

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Mecatrónica




Diseño de un sistema automatizado para la mejora de trazabilidad de freidoras en una empresa de la industria alimenticia

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

José Ignacio Pauly Llobet

Cartago, noviembre del 2024

Licencia de “Creative Commons”

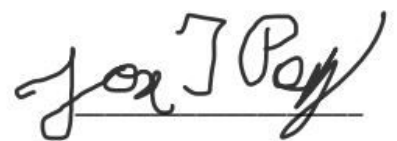
Diseño de un sistema automatizado para la mejora de trazabilidad de freidoras en una empresa de la industria alimenticia by Jose Ignacio Pauly Llobet is licensed under [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

ITCR, Cartago, Costa Rica, 19/11/2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'José Ignacio Pauly Llobet', written over a horizontal line.

José Ignacio Pauly Llobet

Céd: 117630335

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Jose Ignacio Pauly Llobet.

Proyecto: Diseño de un sistema automatizado para la mejora de trazabilidad de freidoras en una empresa de la industria alimenticia Jose Pauly.

Ing. MSc. Johanna Muñoz Pérez

Asesora

Cartago, 19 de noviembre del 2024

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Jose Ignacio Pauly Llobet

Proyecto: Diseño de un sistema automatizado para la mejora de trazabilidad de freidoras en una empresa de la industria alimenticia

Miembros del jurado evaluador

Firmado digitalmente por EDUARDO
JOSE ASENJO CASTILLO (FIRMA)
Fecha: 2024.11.19 10:55:00 -06'00'

Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado

Ing. Eduardo José Asenjo Castillo

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

ITCR Costa Rica, martes 19 de noviembre del 2024

Resumen

En la empresa alimenticia, la trazabilidad de sus productos es un pilar fundamental para garantizar la seguridad de los consumidores y preservar los recursos de la empresa. Como meta principal del presente proyecto, se buscó diseñar un sistema capaz de garantizar la trazabilidad óptima para una máquina freidora de la compañía PRO Snacks. A través de la metodología de Ulrich-Eppinger para diseño de productos, se creó un sistema capaz de capturar información acerca de la temperatura del aceite de fritura y la frecuencia de rotación de los actuadores que controlan las bandas transportadoras de la freidora. Tras lo cual, se acondicionan y transmiten los datos de manera inalámbrica desde una terminal colocada en la planta de producción hasta una terminal remota, donde se guardan los parámetros más relevantes y se grafican en tiempo real para permitir el monitoreo de las operaciones. Seguidamente, se realizan extensivas pruebas de validación para garantizar la precisión de las mediciones y la capacidad del sistema de operar en un ambiente industrial por medio de un prototipo operacional a escala reducida. Por último, se desarrolla un análisis económico para demostrar la viabilidad del sistema propuesto.

Palabras clave: Trazabilidad, sensor RTD, Encoder magnético, Raspberry Pi.

Abstract

In the food company, the traceability of its products is a fundamental pillar to ensure consumer safety and preserve the company's resources. As the main goal of this project, the aim was to design a system capable of guaranteeing optimal traceability for a frying machine of the company PRO Snacks. Through the Ulrich-Eppinger product design methodology, a system was created capable of capturing information about the frying oil temperature and the rotation frequency of the actuators that control the conveyor belts of the fryer. Subsequently, the data is conditioned and transmitted wirelessly from a terminal located in the production plant to a remote terminal, where the most relevant parameters are stored and graphed in real-time to allow monitoring of operations. Extensive validation tests are then carried out to ensure the accuracy of the measurements and the system's ability to operate in an industrial environment through a reduced-scale operational prototype. Finally, an economic analysis is developed to demonstrate the feasibility of the proposed system.

Keywords: Traceability, RTD sensor, Magnetic Encoder, Raspberry Pi.

Agradecimientos

Gracias a mi madre, Natalia Llobet, mi padre Roberto Pauly, mi hermana, Ángela Pauly, a mi novia, Victoria Torres, y a todos mis amigos y amigas: Pablo Gonzalez, José Antonio Arce, Daniel Acuña, Jose Pablo Rodríguez, Esteban Bonilla, Fernando Arias, José Conejo, Daniel Lizano José Chacon, Renán Agüero, Bellen Aguilar, Iró Xenaki, Xanthoula Thomaidou y muchos, muchos otros, tanto fuera del ITCR como fuera de él, que me han acompañado en las buenas y en las malas durante los últimos 7 años, sin todos ustedes, este triunfo no sería lo mismo.

Índice general

Índice de figuras	VIII
Índice de cuadros	X
Lista de abreviaciones	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del problema	1
1.3. Síntesis del problema	2
1.4. Objetivos	2
1.4.1. Objetivo general	2
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Estructura del documento	3
1.6. Aporte a la ingeniería	4
2. Marco teórico	5
2.1. Maquinaria relevante al proyecto	5
2.1.1. Estructura y funcionamiento del freidor	5
2.2. Estándares de higiene y salubridad en la industria alimenticia	6
2.3. Prácticas en la planta de producción del Grupo PRO	8
2.3.1. Protocolos de manufactura relevantes para cada producto	8
2.3.2. Datos y variables relevantes al proyecto	9
2.3.3. Problemas específicos relacionados a la trazabilidad	10
2.4. Principio de funcionamiento de los sensores utilizados en el sistema diseñado	11
2.4.1. Sensores de temperatura tipo RTD	11
2.4.2. Encoders magnéticos	12
2.5. Acondicionamiento y linealización de los sensores	14
2.5.1. Sensor RTD	15
2.5.2. Encoder magnético	20
2.6. Funcionamiento de protocolo de comunicación	21

2.6.1.	Comunicación por medio de SPI	21
2.6.2.	Comunicación por GPIO	23
2.6.3.	Comunicación inalámbrica por sockets	24
3.	Metodología	26
3.1.	Descripción y estructura de la metodología	26
3.2.	Identificación de las necesidades del cliente	26
3.2.1.	Datos recolectados sin procesar	27
3.2.2.	Definición y jerarquización de necesidades	29
3.2.3.	Categorización de las necesidades	31
3.3.	Establecimiento de especificaciones objetivo	31
3.3.1.	Métricas	31
3.3.2.	Comparación con productos existentes	32
3.3.3.	Valores marginales e ideales	33
3.4.	Generación de conceptos	35
3.4.1.	Definición del problema	35
3.4.2.	Búsqueda externa de soluciones	37
3.4.3.	Búsqueda interna de soluciones	40
3.4.4.	Exploración sistemática	42
3.4.5.	Combinar conceptos	45
3.5.	Selección del concepto	46
3.5.1.	Matrices de selección de conceptos	47
3.5.2.	Evaluación de conceptos	49
3.5.3.	Selección del concepto ganador	50
3.5.4.	Viabilidad de la Raspberry Pi en un ambiente industrial	51
3.6.	Variables y Pruebas de validación	52
3.6.1.	Definición de variables a medir	53
3.6.2.	Factores de Influencia	53
3.6.3.	Número de muestras requeridas	54
3.6.4.	Ajustes necesarios para las pruebas de validación	55
3.6.5.	Pruebas de validación	55
4.	Propuesta de diseño	58
4.1.	Puntos de mejoría encontrados en prácticas empresariales	58
4.2.	Diagnóstico de las señales y actuadores de la máquina freidora	59
4.3.	Selección de sensores, módulos y otros componentes	60
4.4.	Diseño de la terminal de recolección de datos	63
4.4.1.	Diseño del circuito de acondicionamiento y linealización para el sensor RTD PT100	63
4.4.2.	Diseño del circuito de filtrado para el sensor AS5600S	64

4.4.3. Simulación de los circuitos	68
4.5. Posicionamiento de sensores en el freidor	72
4.6. Cálculo del tiempo de residencia	77
4.7. Diseño de los sistemas de acople y carcasa	77
4.7.1. Carcasa	77
4.7.2. Sistemas de acople	79
4.7.3. Partes de la carcasa y del acople	82
4.7.4. Análisis de resistencia a vibración del mecanismo de acople	86
4.8. Lógica y algoritmos de programación	87
4.8.1. Lectura e interpretación de frecuencia de rotación	87
4.8.2. Lectura e interpretación de temperatura	88
4.8.3. Preparación y transmisión de los datos	89
4.8.4. Interpretación de los datos recibidos	90
4.8.5. Programación modular del sistema	94
5. Resultados y análisis	95
5.1. Resultados de las simulaciones	95
5.1.1. Circuito de filtrado para el sensor AS5600S	95
5.1.2. Circuito de acondicionamiento y linealización para el sensor RTD Pt100	97
5.1.3. Simulación de resistencia a vibraciones del mecanismo de acople . .	99
5.2. Prototipo utilizado para pruebas de validación	101
5.2.1. Cambios a pruebas de validación	101
5.2.2. Sensor de temperatura utilizado en el prototipo	101
5.2.3. Motor y controlador utilizado en el prototipo	102
5.3. Ejecución y Resultados de las pruebas de validación	104
5.3.1. Prueba general de integridad, tiempo de despliegue y frecuencia de subida	104
5.3.2. Incertidumbre de las medidas de temperatura	108
5.3.3. Incertidumbre de las medidas de elementos rotativos	111
5.3.4. Levantamiento de alarma de temperatura	113
5.3.5. Tiempo transcurrido antes de fallas eléctricas o mecánicas	115
5.3.6. Volumen del sistema	116
5.3.7. Diferencia entre el tiempo de residencia teórico calculado y el repor- tado por el sistema para una frecuencia dada	117
5.3.8. Complejidad del sistema e interfaz de usuario	118
5.3.9. Intervalo de confianza matemática de las medidas	119
5.4. Otras métricas a examinar	121
5.4.1. Temperatura de operación máxima de los sensores	121
5.4.2. Compatibilidad con norma ISO 22000 y seguridad interna de PRO . .	122

5.4.3. Tiempo promedio de entrega de componentes	122
5.4.4. Costo estimado de un modelo funcional	122
5.5. Nivel de cumplimiento de las métricas	123
5.6. Análisis económico	124
5.7. Impacto del proyecto sobre la industria	126
6. Conclusiones y recomendaciones	127
6.1. Conclusiones	127
6.2. Recomendaciones	128
Bibliografía	128
7. Apéndices	138
7.1. Apéndice 1: Códigos y series de comandos	138
7.2. Apéndice 2: Planos y diagramas	139
7.3. Apéndice 3: Formatos y archivos de Excel y CSV	154
7.4. Apéndice 4: Manual del usuario básico para el sistema	155
7.5. Apéndice 5: Entrevistas	167
7.6. Apéndice 6: Resultados de las encuestas	168
8. Anexos	169
8.1. Anexo 1: Requerimientos de seguridad para el freidor #5	169
8.2. Anexo 2: Resumen de la norma ISO 22000	182
8.3. Anexo 3: IPF-02 Instructivo de Trabajo Freidor #5	183
8.4. Anexo 4: Registros de trazabilidad F1, F2, F3, F4, F5, horno y peladora. . . .	184
8.5. Anexo 5: Hojas de datos	185
8.6. Nota importante	185

Índice de figuras

2.1. Modelo del MASTERMATIC MM-18-36 CONTINIUS FRYER.[7]	6
2.2. Extracto del documento de trazabilidad utilizado para la freidora #5. [13] . . .	10
2.3. Estructura interna de un sensor RTD. [16]	12
2.4. Terminales típicas de un encoder magnético. [21]	13
2.5. Señales de salida de un encoder magnético. [21]	13
2.6. Puente de Wheatstone típico para acondicionar un sensor RTD de 3 hilos. [17]	15
2.7. Curva de temperatura vs resistencia de un RTD de ejemplo. [17]	16
2.8. Curva normalizada que muestra la desviación de la linealidad con respecto a la temperatura de un sensor RTD. [17]	17
2.9. Configuración del CI MAX31865 para un sensor RTD de 3 hilos. [24]	18
2.10. Diagrama de bloques de funcionamiento del CI MAX31865. [24]	19
2.11. Protocolo para envío de datos del MAX31865. [24]	19
2.12. Estructura de un filtro Bessel típico. [26]	20
2.13. Respuesta en el tiempo de un filtro Bessel (azul) contra un filtro Butterworth (naranja) ante una onda de entrada cuadrada. [26]	21
2.14. Visualización de como un dispositivo controlador recolecta información por medio de SPI. [27]	22
2.15. Conexión y control de comunicación bidireccional entre un dispositivo pe- riférico y un controlador. [27]	23
2.16. Representación gráfica del uso de sockets, cada triangulo representa un dis- positivo diferente. [31]	25
3.1. Entradas y salidas del sistema.	36
3.2. Subproblemas propuestos para el sistema.	36
3.3. Encoder óptico de una sola hilera [45].	38
3.4. Organización de polos en el disco de un encoder magnético [46].	38
3.5. Diagrama de árbol para el subproblema de captura de los parámetros.	42
3.6. Diagrama de árbol para el subproblema de estructura física.	43
3.7. Diagrama de árbol para el subproblema de transmisión y recepción de datos.	44
3.8. Diagrama de árbol para el subproblema de software e interfaz de usuario.	45
3.9. Bosquejo del concepto ganador.	51

4.1. Sensor RTD Pt100H de Omega. [35]	60
4.2. Estructura del cable tipo OMEGACLAD. [75]	61
4.3. Encoder magnético AS5600S AM OSRAM. [76]	61
4.4. Computadora Raspberry Pi 4. [48]	62
4.5. Diagrama del circuito de acondicionamiento y linealización del sensor RTD Pt100.	63
4.6. Respuesta en frecuencia según las frecuencias pasa banda y corte del filtro Bessel de segundo orden. [80]	64
4.7. Atenuación a frecuencia de 920 Hz del filtro Bessel de segundo orden. [80] .	65
4.8. Filtro Bessel de segundo orden utilizado y el valor de sus componentes. [80]	66
4.9. Respuesta al impulso del filtro Bessel de segundo orden diseñado. [80] . . .	66
4.10. Tiempo de asentamiento a un 2 % del valor nominal para el filtro Bessel de segundo orden diseñado. [80]	67
4.11. Sobreimpulso máximo para el filtro Bessel diseñado. [80]	67
4.12. Esquemático para la simulación del circuito de acondicionamiento y linealización para el RTD PT100.	69
4.13. Registros de datos donde se almacena información de salida en el integrado MAX31865. [24]	69
4.14. Definición de los bits de configuración del integrado MAX31865. [24]	70
4.15. Esquemático para la simulación del circuito de filtrado para el encoder magnético AS5600S.	71
4.16. Diseño final del circuito de la estación de recolección.	72
4.17. Motor de las cortadoras, bajo la tapa se encuentra una estructura similar a los demás actuadores.	73
4.18. Eje de las paletas seleccionado para colocar el sensor.	73
4.19. Eje de la malla de fritura seleccionado para colocar el sensor.	74
4.20. Eje de la malla de enfriamiento seleccionado para colocar el sensor.	74
4.21. Ubicación propuesta para la carcasa y su cableado.	75
4.22. Salida de producto terminado de la freidora 5.	75
4.23. Panel de control de la freidora 5.	76
4.24. Vista lateral del área de trabajo de la freidora 5.	76
4.25. Sujetador de plástico para LEDs. [86]	79
4.26. Actuador de malla de fritura propuesto para la colocación del sensor.	80
4.27. Plano mecánico de una Raspberry Pi 4. [89]	81
4.28. Diagrama ilustrativo de los motores de la freidora número 5, creado con FreeCAD, dimensiones tomadas en planta.	81
4.29. Vista isométrica de la carcasa ensamblada, creado con FreeCAD.	83
4.30. Vista explosionada de la Carcasa, creado con FreeCAD.	83
4.31. Vista isométricas del sujetador de la Raspberry Pi, creado con FreeCAD. . .	84

4.32. Vista isométrica del acople del sensor AS5600s ensamblado, creado con FreeCAD.	85
4.33. Vista explosionada del acople del sensor AS5600s, creado con FreeCAD. . .	85
4.34. Acople de sensor en vista isométrica.	86
4.35. Acople de sensor con malla para análisis de elemento finito y ventana de selección de simulación.	87
4.36. Diagrama de flujo para la lógica de lectura de frecuencia de rotación.	88
4.37. Diagrama de flujo para la lógica de lectura de temperatura del aceite.	88
4.38. Diagrama de flujo para la lógica de transmisión y control de recolección del servidor.	89
4.39. Diagrama de flujo para la lógica de recepción de datos en la terminal del usuario.	91
4.40. Diagrama de flujo para la lógica para graficación y monitoreo del estado actual de la maquinaria.	93
4.41. Gráfico de ejemplo de frecuencia generado por el sistema.	93
4.42. Gráfico de ejemplo de temperatura generado por el sistema.	93
4.43. Ventana de prueba para el levantamiento de la alarma, con una temperatura ideal de 28 °C, y una temperatura captada de 23 °C	94
5.1. Resultado de la respuesta al impulso del circuito de filtrado simulado para el encoder AS5600S con escala de su cuadrícula.	95
5.2. Resultado de la respuesta al impulso del circuito de filtrado simulado para el encoder AS5600S con líneas guía para valores significativos.	96
5.3. Interfaz para la configuración de las características del sensor RTD PT100 simulado.	97
5.4. Lecturas de temperatura y resistencia del sensor RTD PT100 en la simulación a 27 °C.	98
5.5. Lecturas de temperatura y resistencia del sensor RTD PT100 en la simulación a 130 °C.	98
5.6. Resultados de frecuencia requerida para primer fallo de la prueba de vibración para el sistema de acople.	99
5.7. Vista general de los resultados de la simulación de fallo por vibración.	100
5.8. Vista en acercamiento del mapa de deformación por vibración.	100
5.9. Ventana de comandos para la detección y activación de la funcionalidad de un hilo para el sensor DS18B20.	102
5.10. Vista completa del prototipo operacional.	103
5.11. Vista con acercamiento al motor DC, el controlador L298N y el encoder AS5600S.	104

5.12. Vista con acercamiento al sensor de temperatura DS18B20 y su tarjeta de acondicionamiento.	104
5.13. Captura de pantalla de archivo de Excel cálculos_15_minutos.xlsx.	106
5.14. Captura de pantalla de archivo de Excel contabilidad_de_tiempos_15_minutos.xlsx que muestra tiempos promedios en diferentes etapas del ciclo de captura y graficación de datos.	106
5.15. Captura de pantalla de archivo de Excel Machote trazabilidad_15_minutos.csv que muestra cada entrada que se sube a la base de datos.	107
5.16. Termómetro digital utilizado como patrón para las pruebas de incertidumbre de medidas de temperatura.	108
5.17. Ejemplo de la configuración para las pruebas de medición de temperatura a 20 °C.	109
5.18. Ejemplo de la configuración para las pruebas de medición de temperatura a 40 °C.	109
5.19. Ejemplo de la hoja de cálculo utilizada para la prueba de medición de temperatura a 60 °C.	110
5.20. Vista de la interfaz del socket del servidor y del controlador del motor DC durante la prueba a 5 Hz.	111
5.21. Vista de la interfaz de recepción de datos del cliente.	112
5.22. Ejemplo de la hoja de cálculo utilizada para la prueba de medición de frecuencia a 20 Hz.	112
5.23. Alarma #1, correspondiente al primer dato anómalo en la prueba.	114
5.24. Alarma #6, correspondiente a un dato medio con desviación de 8 °C.	114
5.25. Alarma #9, correspondiente al último dato anómalo en la prueba.	114
5.26. Salida de la consola en prueba de levantamiento de alarma.	115
5.27. Diagrama de pastel de las horas que cada participante está dispuesto a dedicar a la capacitación para utilizar el sistema.	118
5.28. Diagrama de pastel de las horas que cada participante estima tardar en realizar una inspección de mantenimiento del sistema.	119
5.29. División de los gastos por hora en la freidora #5.	125

Índice de cuadros

2.1. Frecuencia de elementos rotativos y temperatura del aceite según el tipo de producto a procesar.[11]	9
2.2. Funciones esenciales de los sockets y su descripción	25
3.1. Métricas generadas y sus unidades correspondientes.	31
3.2. Valores ideales y marginales para cada métrica establecida.	34
3.3. Combinación de conceptos.	46
3.4. Candidatos generados por medio del cuadro de combinación de conceptos. .	46
3.5. Matriz de selección para el subproblema de estructura física del sistema. . .	47
3.6. Matriz de selección para el subproblema de transmisión y recepción de datos.	48
3.7. Matriz de selección para el subproblema de software e interfaz.	48
3.8. Matriz de selección para el subproblema de captura de parámetros.	48
3.9. Resultados de cada concepto basado en las matrices de selección.	48
3.10. Concepto híbrido creado a partir de las opciones A y E.	48
3.11. Matriz de evaluación para el subproblema de la estructura física del sistema.	49
3.12. Matriz de evaluación para el subproblema de la transmisión y recepción de datos.	49
3.13. Matriz de evaluación para el subproblema de software e interfaz.	50
3.14. Matriz de evaluación para el subproblema de captura de parámetros.	50
3.15. Especificaciones planteadas y sus variables a medir en las pruebas de validación.	53
3.16. Factores de influencia y sus variables relacionadas	53
5.1. Frecuencia deseada de operación del motor y su mapeo al régimen de trabajo de la señal PWM	103
5.2. Duración promedio de cada etapa del proceso del sistema	107
5.3. Promedio, desviación estándar, valores máximos, y mínimos para las pruebas de incertidumbre de las medidas de temperatura.	110
5.4. Error respecto al patrón para cada prueba de incertidumbre de las medidas de temperatura.	110

5.5. Promedio, desviación estándar, valores máximos y mínimos para las pruebas de incertidumbre de las medidas de frecuencia de rotación.	112
5.6. Error respecto a la frecuencia ideal para cada prueba de incertidumbre de las medidas de frecuencia de rotación.	112
5.7. Promedio, desviación estándar, y porcentaje de error respecto al tiempo ideal del tiempo de residencia calculado.	117
5.8. Media, intervalos de confianza y márgenes de los intervalos para cada prueba de temperatura.	120
5.9. Media, intervalos de confianza y márgenes de los intervalos para cada prueba de frecuencia de rotación.	120
5.10. Comparación entre μ_c y los márgenes del intervalo de confianza del 95 % para las pruebas de temperatura.	120
5.11. Comparación entre μ_c y los márgenes del intervalo de confianza del 95 % para las pruebas de frecuencia de rotación.	121
5.12. Tabla de costos estimados para un modelo funcional.	123
5.13. Comparación entre valores marginales e ideales propuestos originalmente, contra aquellos obtenidos en las pruebas del sistema diseñado.	123

Lista de abreviaciones

Abreviación	Significado
API	Application Programming Interface
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CI	Circuito Integrado
CNC	Computer Numerical Control
CS	Chip Select
CSV	Comma Separated Values
FDA	Food and Drug Administration
FPGA	Field Programmable Gate Array
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
IEC	International Electronics Commission
IP	Internet Protocol
IPC	Inter-Process Communication
IR	Infra Rojo
IT	Information Technologies
IoT	Internet of Things
LED	Light Emitting Diode
NTC	Negative Temperature Coefficient
PICO	Peripheral In Controller Out
PIMA	Programa Integral de Mercado Agropecuario
PLA	Ácido Poliláctico
PLC	Programmable Logic Controller
PO	Percentage Overshoot
POCI	Peripheral Out Controller In
PPR	Pulses per Revolution
PWM	Pulse Width Modulation
RTD	Resistance Temperature Detector
SCLK	Serial Data Clock
SDI	Serial Data Input
SDO	Serial Data Output

SPI	Serial Peripheral Interface
TIR	Tasa Interna de Retorno
USD	United States Dollar
USB	Universal Serial Bus
VAN	Valor Interno Neto
VBA	Visual Basic for Applications
VCD	Voltios en Corriente Directa
WiFi	Wireless Fidelity
XLSX	Microsoft Excel Spreadsheet

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El Grupo PRO es una empresa internacional de la industria alimenticia, con sedes en México, Guatemala, El Salvador, Panamá y Costa Rica, su oficina nacional está ubicada en Ciudad Colón de Alajuela, entre sus productos principales se encuentra; maní, frituras de maíz, yuca, plátano, entre otros. Estos productos se manufacturan in situ, y la fábrica se encuentra adjunta a sus oficinas administrativas, donde se lleva el producto desde materia prima, hasta su finalización y empaque.

Esta empresa es un competidor significativo en el mercado de refrigerios y frituras costarricense, por lo que sus actividades productivas tienen un efecto importante en el desarrollo económico del país.

La trazabilidad se define como: “...(la) capacidad para reconstruir el historial de la utilización o la localización de un artículo o producto mediante una identificación registrada.” [1]

En la industria alimenticia, la trazabilidad en cada una de las etapas de la preparación de sus productos es esencial para garantizar la consistencia del proceso productivo, para así minimizar gastos y desperdicios, y encontrar puntos de mejora de la línea de producción, no solo esto, sino que una fuerte trazabilidad protege a la empresa ante posibles problemas legales, al darle un canal por el cual comprobar la integridad de sus productos.[2]

Por lo tanto, una deficiencia en la trazabilidad impacta de manera negativa la capacidad de diagnosticar problemas y defectos, y lleva a una pérdida de confianza hacia la empresa, tanto de parte del consumidor como de los accionistas.

1.2. Descripción del problema

En las plantas de producción del Grupo PRO, se lleva un registro cada 30 minutos de los diferentes parámetros de los procesos a los que se ve expuesta la materia prima en cada etapa de su preparación, los cuales incluyen:

-
- Temperatura de cocción
 - Tiempo de residencia en el área de cocción
 - Frecuencia de mallas, paletas, y cortadoras.

La toma de datos se realiza de manera manual en papel por parte de los operarios, y el documento físico se guarda en la administración, ya que no se cuenta con una base de datos digital.

Esta serie de acciones de manufactura, mantenimiento, y gestión que gobiernan el proceso de preparación de los productos (el cual se denominará como “el protocolo productivo” a lo largo de este documento), ha demostrado no ser conductivo a una trazabilidad eficaz pues han ocurrido múltiples incidentes donde un lote defectuoso no muestra desviaciones en los registros. Además los archivos físicos son susceptibles a factores ambientales como la humedad, pérdidas accidentales, o a manipulación indebida. Este conjunto de factores han ocasionado que no se pueda confiar en la documentación actual como base para la trazabilidad, lo cual invalida el propósito de su existencia.

Estos errores, ya sean de naturaleza humana, técnica, o ambiental han llevado a pérdidas de material, paros por auditoría, atrasos de entrega, y costos innecesarios. [3]

1.3. Síntesis del problema

El sistema de registro y almacenamiento de datos para la trazabilidad del proceso productivo del Grupo PRO ha demostrado ser susceptible a error, interferencia humana, y pérdida de información, lo que ha llevado este sistema a ser poco confiable y susceptible a fallas. Como consecuencia, se generan atrasos, gastos innecesarios, y pérdidas de materia prima en exceso.

Debido a esto, se seleccionó asegurar la trazabilidad en la producción de la empresa como el objetivo principal de este proyecto final de graduación. A través del mismo, se garantizó la transparencia del proceso productivo y toma de datos, se redujo el impacto del error humano, y se aseguraron los datos en un repositorio seguro.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema que mejore la trazabilidad para freidoras industriales por medio de procesos automáticos y mecatrónicos de recolección, acondicionamiento, y almacenamiento de datos.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Diagnosticar los sistemas administrativos que gobiernan el proceso, así como los actuadores y fuentes de señales existentes en la maquinaria.
2. Diseñar un sistema automatizado de recolección de información y parámetros críticos, incluyendo la selección y acondicionamiento de señales de los sensores requeridos en la maquinaria freidora seleccionada.
3. Diseñar un sistema de transmisión de datos desde los puntos de recolección hasta una terminal de acceso, que cuente con base de datos integrada, sistema de alerta, y graficación en tiempo real de los datos.
4. Validar los diferentes componentes del diseño creado por medio de pruebas técnicas y simulaciones.

1.5. Estructura del documento

El presente documento seguirá la estructura planteada en la guía para la presentación del informe final [4]. Después de esta introducción, el lector puede encontrar un marco teórico, donde se establece todo el trasfondo técnico y tecnológico necesario para entender el desarrollo de este proyecto, así como la relación de estos aspectos a la problemática a solucionar.

Seguidamente, se presenta la metodología la cual sigue la estructura para diseño de productos planteada por Ulrich y Eppinger [5], incluyendo el proceso para determinar las necesidades del cliente, establecer métricas a cumplir, seleccionar un concepto de diseño, y buscar pruebas para validar las decisiones de diseño tomadas.

Después de la metodología, se encuentra la sección de propuesta de diseño, donde se puede encontrar el proceso para convertir el concepto planteado en un sistema y mecanismo funcional.

Una vez concluida la explicación del diseño, se encuentran los resultados y análisis, donde se descompone lo encontrado a través de la ejecución de la propuesta de diseño así como el estado final de su desarrollo. Adicionalmente, se toman los datos obtenidos durante las pruebas de validación para justificar el cumplimiento satisfactorio de éstas, y su relación a los objetivos específicos planteados previamente.

Como última sección del cuerpo de este informe, se encuentran las conclusiones y recomendaciones, donde se explica y redacta el grado de cumplimiento de cada objetivo

específico, basándose en los resultados obtenidos, también se incluye cualquier resultado notable en estas. Adicionalmente, se añaden recomendaciones de cómo navegar retos encontrados a lo largo de la realización del proyecto, con la finalidad de asistir a cualquier estudiante o profesional que busque realizar un proyecto similar al presente en este informe.

Por último, se encuentran la bibliografía, anexos, y apéndices. Los anexos comprenden cualquier documento referenciado que no haya sido producido por el autor, tal como manuales operativos y documentación interna de la empresa, mientras que los apéndices son aquellos documentos redactados por el autor durante el diseño del proyecto, tal como código de software, material de entrevistas, y diagramas auxiliares.

1.6. Aporte a la ingeniería

La contribución más significativa de este proyecto es el diseño de un sistema modular, fácil de escalar, reproducir y mantener para la recolección, modelado, y almacenamiento de datos en maquinaria de la industria alimenticia. Este sistema provee a la pequeña y mediana empresa de una alternativa de relativamente bajo costo para garantizar la integridad y calidad de sus productos por medio de un sistema robusto de trazabilidad. Esto abre las puertas para que estas empresas logren cumplir con normas internacionales como la ISO 9001 [6], de una manera mucho más accesible de lo que se puede lograr con sistemas previamente disponibles en el mercado.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Maquinaria relevante al proyecto

A la fecha del desarrollo de este proyecto, la planta de producción de Costa Rica del Grupo PRO cuenta con 5 hornos y 6 freidoras, cada uno de los cuales está acondicionado para procesar un tipo específico de producto.

Para la ejecución de este proyecto, se designó la freidora #5 como enfoque, ya que es la pieza de maquinaria más representativa de la empresa. Esta freidora se usa para cortar, freír y enfriar frituras de plátano maduro, plátano verde, banano, y papa.

2.1.1. Estructura y funcionamiento del freidor

La freidora de enfoque está compuesta una variedad de maquinaria, ya que se creó con la finalidad de llevar el producto de su forma cruda a su estado listo para el empaque sin cambiar de ubicación. Las partes de la máquina son las siguientes:

- **Navajas cortadoras:** Comprendidas por una serie de navajas circulares operadas por un motor de corriente directa, el propósito de estas es cortar el producto en hojuelas de un tamaño variable, seleccionado dependiendo del tipo de producto a procesar. Esta sección del equipo y la banda transportadora que lleva el producto cortado hasta la sección de fritura fueron diseñadas a la medida.
- **Sección de fritura por inmersión:** corresponde a un “MASTERMATIC MM-18-36 CONTINIUS FRYER” que se muestra en la figura 2.1, el cual contiene la mayoría de elementos cuyos parámetros se desea medir:
 - Las paletas, que son responsables en desplazar el producto que se acumula en el fondo de la freidora.
 - La malla de fritura: banda transportadora que mueve el producto de un extremo de la zona de fritura al otro. El tiempo que el producto permanece sobre esta malla es conocido como el “tiempo de residencia”.

-
- Sensor de temperatura termocupla tipo K.
 - Panel de control: ha sido modificado para poder ajustar la velocidad de las cortadoras, y de la malla de enfriamiento, además de los elementos en la zona de fritura. Adicionalmente, permite controlar la temperatura del aceite por medio de ajustar el flujo de gas a los quemadores debajo del tanque de aceite.



Figura 2.1: Modelo del MASTERMATIC MM-18-36 CONTINIUS FRYER.[7]

- **Malla de enfriamiento:** se encuentra a la salida de la zona de fritura, transporta el producto con el fin de llevarlo a una temperatura a la cual pueda ser manipulado y empacado, mientras que escurre el exceso de aceite.

2.2. Estándares de higiene y salubridad en la industria alimenticia

Garantizar la seguridad e inocuidad de los alimentos es una de las necesidades más críticas de cualquier planta de producción de alimentos, pues esta tiene un impacto enorme en la salud pública y en la imagen de la empresa[8]. Naturalmente, al ser de tan alta importancia, la infraestructura dedicada a garantizar y certificar la seguridad de los productos alimenticios requiere entre un 15 a 20 % del presupuesto total de la planta de producción, tanto en instalación como en mantenimiento. [9]

A pesar de que el presente proyecto no pretende manipular o interactuar directamente con los productos fabricados en la planta del Grupo PRO, el sistema se ubica en proximidad a estos, y como mínimo tiene un punto de contacto con el aceite utilizado para freír los

alimentos. Como consecuencia, el sistema debe apegarse a los estándares de salubridad y seguridad relevantes. Se utilizan dos documentos como referencia, el folleto de advertencias y seguridad laboral para el freidor #5 (ubicado en el anexo 1 del presente informe), y la norma internacional ISO 22000:“Food safety management systems Requirements for any organization in the food chain” (adjunta en el anexo 2).

No toda la norma ISO 22000 aplica en el diseño del sistema, pero posee partes importantes que se deben considerar, las cuales se presentan a continuación.

Análisis de peligro y puntos críticos de control (HACCP)

Dicha sección de la norma describe un punto crítico de control como la ubicación física donde el sistema, cualquiera de sus desechos, y/o salidas, interactúa directamente con los productos alimenticios o su ambiente.

dimensiones del punto de recolección de datos: Se verifican las dimensiones externas de la carcasa y se comparan a los volúmenes aceptables establecidos.

Se definen tres grados de contacto con los productos [10]:

- **Grado 1:** Existe contacto directo con el producto que se está manufacturando.
- **Grado 2:** El sistema o maquinaria solo entra en contacto con el medio en el que se procesa el producto, tal como aceite, agua, o dentro de un horno.
- **Grado 3:** El sistema o maquinaria solo interactúa con otra maquinaria utilizada para procesar el producto.

Por lo tanto, los grados de interés para el sistema son el grado 2, que involucra al sensor de temperatura y su cobertura , que se encuentran sumergidos en el aceite de freír, y grado 3, que concierne a los sensores que captan la rotación de los ejes, y la estación de recolección de datos ubicada en proximidad a la freidora #5.

Los requerimientos relevantes para cada grado de contacto son los siguientes:

- **Grado 2:**
 - Los sistemas utilizados deben estar compuestos por materiales inertes, y no liberar químicos o partículas ajenas al proceso productivo, a los rangos de temperatura esperados dentro de los procesos.
 - El tiempo de vida útil de los materiales utilizados debe estar bien establecido y monitorizado, para evitar liberación de sustancias o partículas nocivas conforme los mismos se degradan.
- **Grado 3:**
 - Los sistemas implementados no deben de interferir con las funciones originales de la maquinaria, tanto en materias de producción como de mantenimiento.

-
- La inclusión de los sistemas no debe comprometer ni alterar ningún proceso que se encontrara en previo acuerdo con la norma ISO 22000.

Monitoreo, medición y mantenimiento

Lo que se establece en esta sección que corresponde al enfoque del presente informe, radica en que el sistema y su desempeño debe ser monitorizable, cualquier medición que genere relevante al producto manufacturado debe estar justificada y documentada, y su mantenimiento no debe permitir que el mismo sea limpiado en su totalidad, para prevenir la acumulación de material que pueda presentar un riesgo para el consumidor.

Requerimientos específicos del Grupo PRO

Durante las entrevistas realizadas al jefe de mantenimiento de la planta Gustavo Chiroy [3] el único material que el cliente consideró relevante es el folleto de consideraciones de seguridad mencionado con anterioridad. El mismo lista los riesgos de seguridad operacional característicos de la freidora #5, mientras que no añaden ningún requerimiento directo al proyecto diseñado, se pueden extrapolar varios puntos significativos:

- El sistema no debe tener componentes, ya sea cableado, partes de la carcasa, o afines, que puedan enredarse en los elementos rotativos de la maquinaria.
- El sistema no debe tener ningún punto que requiera o incentive que los operarios se acerquen al aceite de freír, o a los elementos rotativos mientras los mismos se encuentran en movimiento.
- El diseño no debe impedir, obstruir, o entorpecer las labores de producción o mantenimiento, y su configuración debe estar en armonía con el de la freidora #5 y la planta.
- Toda parte móvil del sistema, en especial los elementos rotativos, deben ubicarse tan lejos como sea posible de los puestos de trabajo de los operarios.

2.3. Prácticas en la planta de producción del Grupo PRO

2.3.1. Protocolos de manufactura relevantes para cada producto

Según la documentación de trabajo de la freidora, se puede encontrar en el anexo 3, la temperatura del aceite, y frecuencia de la malla de operación tienen límites aceptables distintos dependiendo de qué producto se está procesando. Los parámetros para cada producto se muestran en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1: Frecuencia de elementos rotativos y temperatura del aceite según el tipo de producto a procesar.[11]

Producto	Frecuencia de la cortadora (Hz)	Frecuencia de la malla de fritura (Hz)	Temperatura del aceite (°C)
Banano	20	1,7 - 2	160 - 165
Papa	10 - 12	1,7 - 2	170 - 175
Plátano de Brix 19 o mayor	16	1,7 - 2	145 - 150
Plátano Verde	18 - 30	1,6 - 2	150 - 160
Plátano Maduro	10 - 12	1,6 - 2	146 - 152

La frecuencia de las paletas se debe mantener en un rango de 3.5 a 4 Hz para todos los productos.

Otros factores como la distancia entre las cuchillas de corte varían dependiendo del producto, pero el cliente declaró que este ajuste no requiere medición.

Grados Brix

El grado Brix del plátano se refiere a la cantidad de sólidos disueltos en un líquido o sólido. En el caso de la industria alimenticia, se utiliza para determinar la cantidad de azúcares, como la sacarosa, por peso de producto, donde un grado Brix es igual a 1 gramo de sacarosa por cada 100g de producto.[12]. Por lo tanto, el plátano de grado Brix 19 es un plátano con un mayor contenido de azúcar que el plátano maduro tradicional, por lo que su proceso de cocción es diferente.

2.3.2. Datos y variables relevantes al proyecto

Mientras que existen una gran cantidad de entradas, señales, controles, y salidas en el recorrido de operación del freidor #5, el cliente expresó su deseo de limitar las variables a medir a aquellas que se encuentran en el documento "Registros de trazabilidad F5" el cual se puede encontrar en el anexo 4 del presente documento, con la inclusión del tiempo de residencia instantáneo de un lote dado al momento de la toma de los datos. Un ejemplo del machote se muestra en la figura 2.2.


		Control de Proceso, Freidores 1 y 5 (Programa Prerrequisito Operativo (PPRO) / Preventive Control)						Código: RP-21 Versión: 09 Página: 1 de 2		
Elaborado por: Comité de Inocuidad				Actualizado por: Departamento de Producción						
Fecha de Elaboración: 04/01/2013				Fecha de Actualización: 04/04/2024						
Fecha: _____		Operario : _____				Personal Línea: _____				
# Freidor: _____ 1 _____ 5										
Cantidad de Hojuelas por Pulgada (2,54 cm): _____				Hora de Cambio de Cuchillas: _____				N/A (No aplica)		
Hora	Producto	Freidor					Enfriador	Prueba sensorial		Correcciones/Observaciones
		Velocidad Cortadora	Temperatura Q1 (≥ 100 °C)	Temperatura Q2 (≥ 100 °C)	Velocidad Malla (Hz)	Velocidad Paletas		Velocidad Malla	Sabor	

Figura 2.2: Extracto del documento de trazabilidad utilizado para la freidora #5. [13]

Es importante notar que a pesar de que en la figura 2.2 se hace referencia a la “velocidad” de las cortadoras, mallas y paletas, el dato que se registra realmente es la frecuencia de rotación de las mismas, en Hz

Por lo tanto, los datos que se desean obtener de manera automática son:

- Frecuencia de rotación de las cortadoras, en Hz.
- Frecuencia de rotación del motor de la malla de fritura, en Hz.
- Tiempo de residencia en segundos, esta medida es derivada de la frecuencia de rotación de la malla de fritura.
- Temperatura del aceite.
- Frecuencia de rotación de las paletas.
- Frecuencia de rotación de la malla de enfriamiento.

La ubicación específica de donde se recolectan estas variables, junto a las imágenes tomadas en la planta de producción se exploran a detalle en el capítulo 4: Propuesta de diseño.

2.3.3. Problemas específicos relacionados a la trazabilidad

Según Gustavo Chiroy [3], la falta de un sistema de trazabilidad adecuado ha sido el causante de las mayores pérdidas en el departamento de producción de la empresa, mientras que no se lleva contabilidad de la cantidad exacta de los daños ocasionados, la mayor

pérdida de producto que se ha dado en los últimos 3 años fue un lote de producción correspondiente a una jornada entera de 8 horas, en la cual debido a un error en el sensor de temperatura del freidor, todo el producto quedó parcialmente cocinado.

El jefe de planta estima que se da una pérdida de alrededor de un 5 % de la producción mensual, en promedio, debido a errores similares.

Otro factor que considerar es que en ningún momento se conoce la verdadera frecuencia de rotación de las mallas, paletas, o cortadoras, debido a que el control de cada una se da por medio de un potenciómetro que regula la tensión de cada motor, lo único que se conoce es que la tensión que le llega a estos actuadores está en una escala de 0 a 180 VCD, y las medidas de frecuencia presentes en las guías de trabajo son puramente teóricas.

De manera similar, el sensor de temperatura original de la máquina es susceptible a errores de medición, y los técnicos de la empresa estiman que el mismo opera con una incertidumbre de alrededor de $\pm 3^\circ\text{C}$, pero incluso esto parece variar.

Por último, uno de los factores que agudiza la problemática anteriormente mencionada, es el hecho que todos los datos y parámetros de la maquina en un lote de producción dados son anotados en hojas de papel, las cuales son guardadas en archiveros, y nunca son digitalizados.

Esto ha llevado a casos en los cuales se tiene un lote defectuoso al cual se le desea realizar una auditoría, pero a la hora de revisar los archivos que le corresponden, los mismos muestran que no hubo desviación alguna en la operación de la máquina, o el archivo no se puede encontrar.

2.4. Principio de funcionamiento de los sensores utilizados en el sistema diseñado

2.4.1. Sensores de temperatura tipo RTD

Como su nombre lo indica, un sensor RTD (Resistance Temperature detector) es un dispositivo que cuantifica la temperatura de un medio a través de cambios en la resistencia de sus componentes.

Este fenómeno es posible gracias a una propiedad intrínseca de los materiales llamada resistividad ρ que es inversamente proporcional a la temperatura del material y gobierna la resistencia del material por medio de la siguiente ecuación: [14]

$$R = \frac{\rho * L}{A} \quad (2.1)$$

Donde R es la resistencia del material, L es la longitud perpendicular a su sección, y A es su área transversal.

Muchos sensores de temperatura utilizan este principio como base de su funcionamiento, pero lo que distingue a los RTD es su estructura y materiales. En el caso de los sensores tipo PT, la configuración más común consiste en un centro de cerámica u otro material aislante, en el que se enrolla un cable de platino, de una longitud tal que su resistencia a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sea $100\ \Omega$ o $1000\ \Omega$. El nombre del sensor indica la resistencia de su cableado, un PT 100 tiene una resistencia a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ de $100\ \Omega$, por ejemplo.[15]

Tras colocar una cubierta protectora e impermeable, se conectan los cables, o “hilos”, de los cuales se toma la medida de la resistencia. Existen configuraciones de 2, 3 o 4 hilos, donde una mayor cantidad de hilos permite un mayor grado de precisión en la medición, pues los hilos adicionales permiten transmitir la corriente de excitación al sensor en direcciones opuestas, lo que ayuda a cancelar la resistencia inherente de los cables de transmisión. En la figura 2.3 se muestra la estructura de un RTD de 3 hilos.

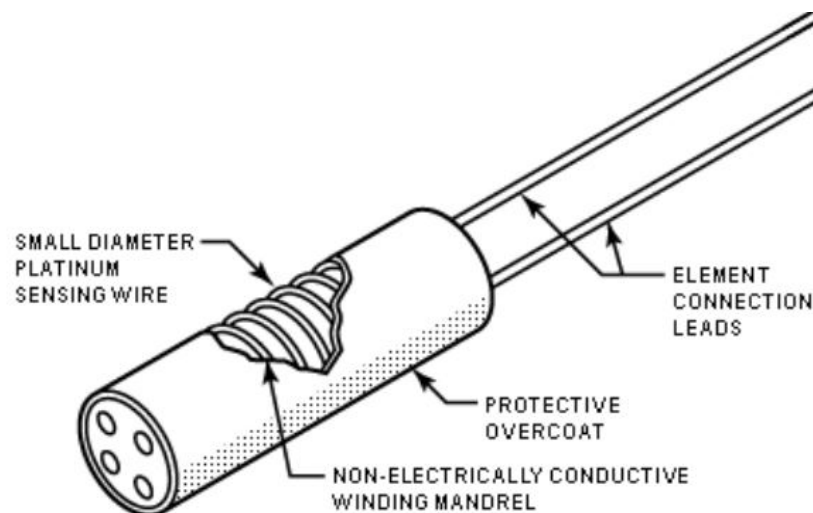


Figura 2.3: Estructura interna de un sensor RTD. [16]

Mientras que las configuraciones de 4 hilos son mucho más precisas, estas no son prácticas para implementaciones industriales [17], por lo que se opta por utilizar un RTD PT100 de 3 hilos para el sistema diseñado.

Las características más relevantes a la práctica de un sensor de estos encontrado en la hoja de datos es su R_0 , o resistencia a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, y su TCR, el cual siempre es igual a $0.00385\ \Omega / C$ según el estándar IEC 60751.[18]

2.4.2. Encoders magnéticos

En principio, un encoder magnético utiliza el efecto Hall para interpretar la velocidad de rotación de un elemento giratorio. El efecto Hall establece que, al aplicar un campo magnético de manera perpendicular a un flujo de corriente, se generará una diferencia de potencial eléctrico.[19]

Al combinar un material magnético, con polos opuestos intercalados, montado sobre un eje giratorio, con un sensor de efecto Hall en un punto fijo se pueden detectar los cambios en frecuencia y amplitud en el campo magnético en movimiento, y cuantificarlo por medio de un diferencial de potencial eléctrico. [20]

En la mayoría de los casos, incluyendo el proyecto correspondiente a este informe, los encuadres de todo tipo cuentan con 4 terminales:

- **VCC:** Entrada de alimentación, típicamente 3,3 o 5 V.
- **Tierra/Ground:** Referencia de tensión 0.
- **Output A:** Canal de pulsos de salida A.
- **Output B:** Canal de pulsos de salida B.

La configuración física de las terminales se muestra en la figura 2.4.

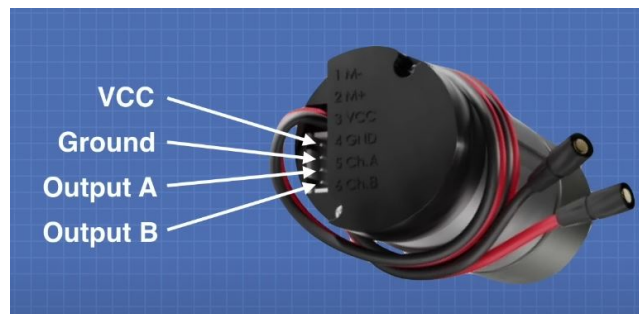


Figura 2.4: Terminales típicas de un encoder magnético. [21]

Mientras que las terminales de alimentación y tierra no requieren mayor explicación, es importante abordar el funcionamiento de las salidas del encoder.

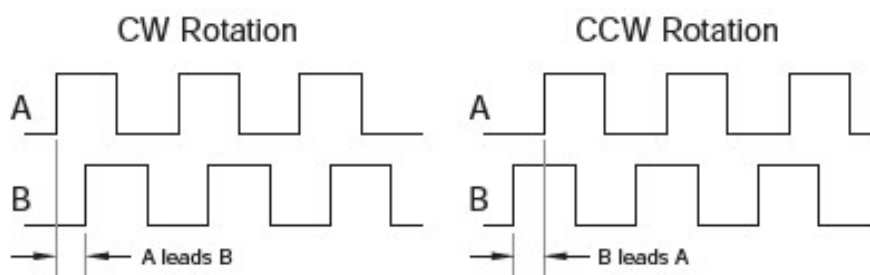


Figura 2.5: Señales de salida de un encoder magnético. [21]

Como se puede apreciar en la figura 2.5, las salidas de cada terminal consisten en pulsos cuadrados de tensión, a mayor velocidad de rotación medida, mayor será el régimen de trabajo de los pulsos, por lo que interpretar esta característica con un microcontrolador resulta relativamente sencillo. La razón por la que se tienen dos salidas (A y B) es para poder detectar la dirección de la rotación medida, debido a que los sensores para ambas

salidas se encuentran en posiciones diferentes dentro del dispositivo, por lo que mientras que su régimen de trabajo es el mismo, estas se encuentran desfasadas entre sí.

Al detectar cual salida se activa primero, se puede inferir la dirección de rotación del elemento, si la señal “A” está adelantada respecto a “B”, la rotación es horaria, mientras que si “B” está adelantada con respecto a “A”, lo opuesto es verdad.

Una ventaja significativa de este tipo de encoder en comparación a los de tipo óptico, es que son mucho más robustos y resistentes a la suciedad, ya que usualmente todos sus componentes se encuentran contenidos dentro de una cubierta protectora, inclusive, muchos modelos incorporan un microprocesador que interpreta las salidas del sensor de efecto Hall, lo que los hace ideales para ambientes con partículas libres en el aire, u otros factores ambientales.

2.5. Acondicionamiento y linealización de los sensores

Los sensores son dispositivos que utilizan múltiples principios físicos y químicos para cuantificar variables y obtener una señal de salida que la represente, sin embargo, debido a la naturaleza de los principios que utilizan para medir estas variables, las señales que se obtienen no siempre se pueden utilizar directamente. Un ejemplo de esto son los sensores RTD mencionados anteriormente, ya que lo que cambia con la temperatura ambiente es su resistencia, el ingeniero o diseñador que los utiliza debe encontrar una manera de convertir los cambios del sensor en señales útiles.

Este proceso, que se puede realizar por medios digitales, análogos, o físicos, se conoce como acondicionamiento, y puede implicar realizar mapeos, aplicar “offsets”, crear circuitos que tomen ventaja de los cambios en el sensor para generar un cambio medible en tensión o corriente, o colocar filtros para eliminar ruidos inherentes al proceso, entre muchas otras opciones. [22]

A pesar de su importancia el acondicionamiento de las señales no es el único proceso necesario, ya que los sensores pueden comportarse de una manera no lineal, lo cual puede complicar la interpretación de sus salidas. Es aquí donde entra en juego el complemento del acondicionamiento, llamado linealización, el cual como su nombre lo indica, utiliza medios analógicos o digitales para ajustar el comportamiento del sensor a uno lineal.

Estos procesos varían con el tipo de sensor utilizado, por lo que se exploran aquellos relevantes al proyecto a continuación:

2.5.1. Sensor RTD

Debido a que un sensor RTD experimenta cambios en su resistencia con la temperatura, se debe aplicar energía al mismo para poder medir la interpretación de la temperatura.

Para ejemplificar su importancia, se utiliza la guía creada por Texas Instruments para un RTD de 3 cables, la cual provee explicaciones muy bien documentadas de cómo lograr el acondicionamiento de estos sensores. En la figura 2.6 se muestra un Puente de Wheatstone en combinación con una fuente de tensión constante como ejemplo de circuito de acondicionamiento, con el fin de tomar ventaja de la sensibilidad a desbalances del puente para generar una tensión con la cual medir los cambios de resistencia en el sensor.[17]

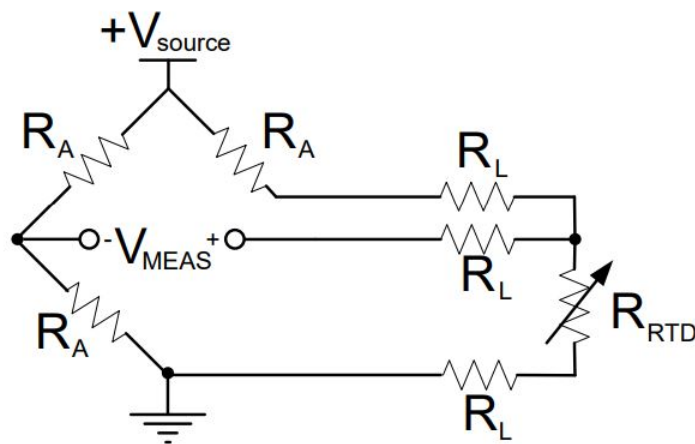


Figura 2.6: Puente de Wheatstone típico para acondicionar un sensor RTD de 3 hilos. [17]

El funcionamiento del circuito de la figura 2.6 es gobernado por la ecuación 2.2:

$$V_{MEAS} = V_{source} \left[\left(\frac{R_{RTD} + R_L}{R_A + R_{RTD} + 2 * R_L} \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (2.2)$$

Donde las variables son:

- R_{Rtd} : Resistencia variable del sensor.
- R_L : Resistencia de los cables que conectan el sensor al puente.
- R_A : Resistencia de balanceo de puente de Wheatstone.
- $+V_{source}$: Fuente de tensión constante.
- V_{MEAS} : Tensión acondicionada, corresponde a la señal a medir.

Adicionalmente, se puede obtener una ecuación para el error de este circuito de la siguiente manera:

$$Error = V_{source} \left[\frac{R_L * (R_A - R_{RTD})}{(R_A + R_{RTD}) * (2R_L + R_A + R_{RTD})} \right] \quad (2.3)$$

Aunque el comportamiento del platino del sensor ante cambios de temperatura es aproximadamente lineal, esto no es del todo correcto, como se muestra en la figura 2.7:

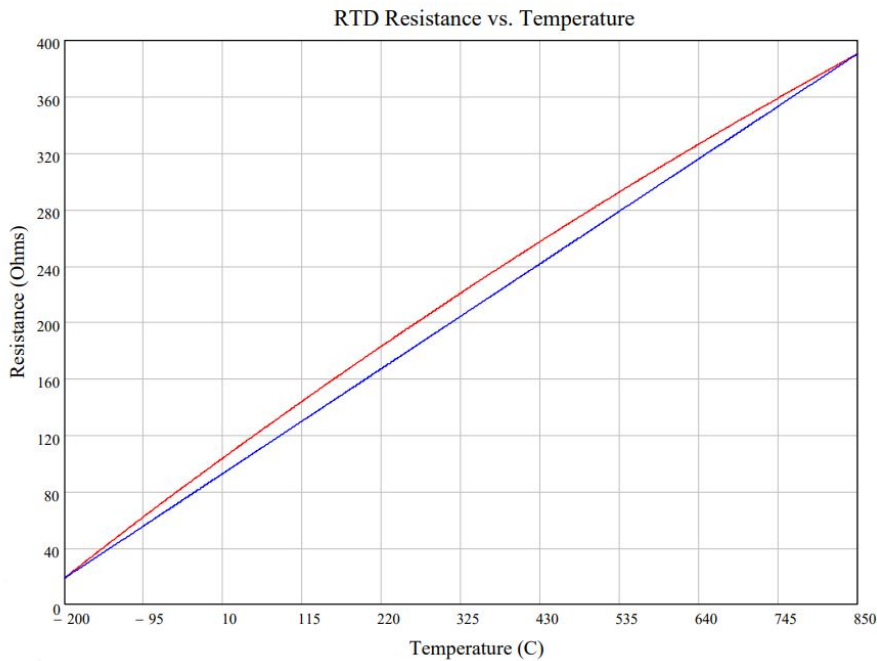


Figura 2.7: Curva de temperatura vs resistencia de un RTD de ejemplo. [17]

En la figura 2.7, la línea roja representa la salida real de un RTD, mientras que la línea azul muestra el ajuste lineal de las mediciones, con esto, se logra identificar que el comportamiento de un RTD no es perfectamente lineal. Si se normalizan los datos, se puede obtener una visualización de la desviación del comportamiento lineal del sensor en función de la temperatura, mostrado en la figura 2.8.

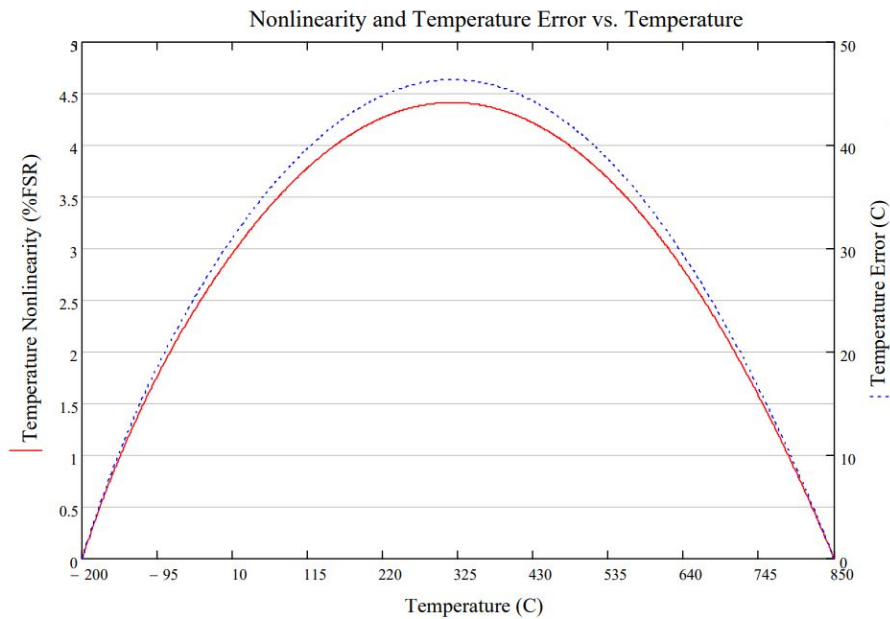


Figura 2.8: Curva normalizada que muestra la desviación de la linealidad con respecto a la temperatura de un sensor RTD. [17]

Como consecuencia de esta no linealidad, el error promedio de un RTD a través de todo su rango de temperaturas es de aproximadamente 4.5 %, por lo que resulta imperativo corregir esta no linealidad.

Nuevamente, la guía de Texas Instruments demuestra cómo lograr eso utilizando amplificadores operacionales, sin embargo, existen soluciones en el mercado diseñadas específicamente para cumplir con las necesidades de acondicionamiento y linealización de un sensor de temperatura PT100.

Para este propósito, se puede utilizar un circuito integrado como el MAX31865 de Analog Devices Inc., el cual actúa como un convertidor ADC, linealizador, y acondicionador para sensores RTD.[23]

Circuito integrado MAX31865

Mientras que una explicación detallada del funcionamiento del circuito integrado está por fuera del enfoque de este informe, es necesario explicar los principios que permite utilizar el circuito dentro del sistema diseñado, la información en esta sección se obtiene directamente de la hoja de datos del fabricante.[24]

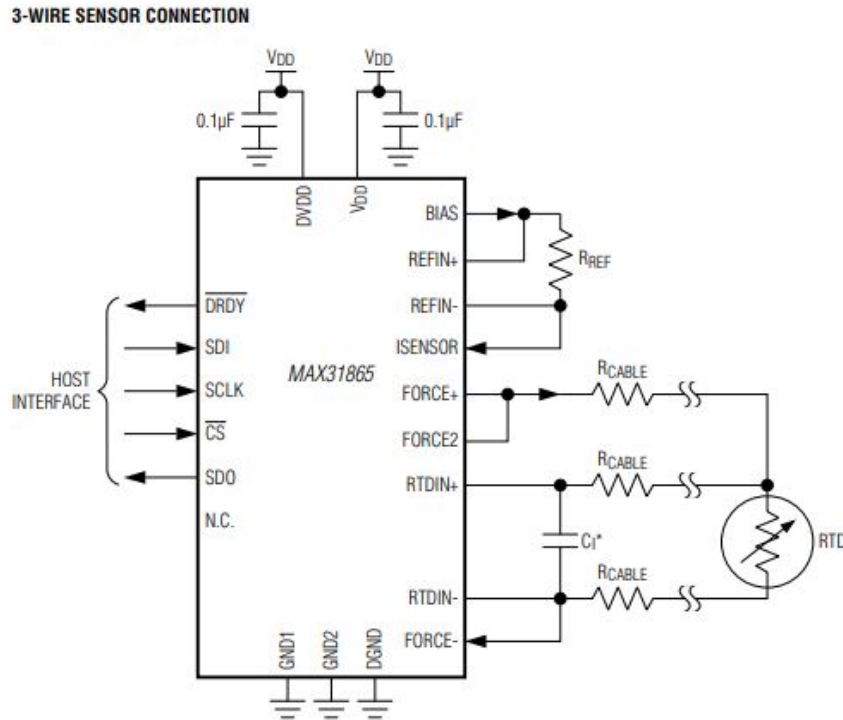


Figura 2.9: Configuración del CI MAX31865 para un sensor RTD de 3 hilos. [24]

Donde:

- R_{Cable} es la resistencia de los cables del sensor.
- R_{Rtd} es el sensor RTD.
- R_{Ref} es una resistencia de referencia.
- V_{DD} es la alimentación del circuito a 3,3 V.

Para medir la resistencia del RTD, se conecta en serie con R_{Ref} , y se le aplica el voltaje de “bias” V_{DD} como se muestra en la figura 2.9, lo cual actúa como un divisor de tensión. La tensión a través de R_{Ref} se utiliza como tensión de referencia del ADC interno del circuito, y la tensión a través del sensor RTD se aplica a las entradas diferenciales del ADC (RTDIN+ y RTDIN-). Como consecuencia, la salida del ADC es una salida digital, que es equivalente a la razón de la R_{RTD} a R_{Ref} . Las conexiones internas del CI se pueden apreciar en la figura 2.10.

Para el funcionamiento correcto del circuito, el valor de impedancia R_{Ref} debe ser cuatro veces mayor al del RTD a 0°C, como en el presente proyecto se utiliza un PT100, R_{Ref} debe ser igual a 400 Ω .

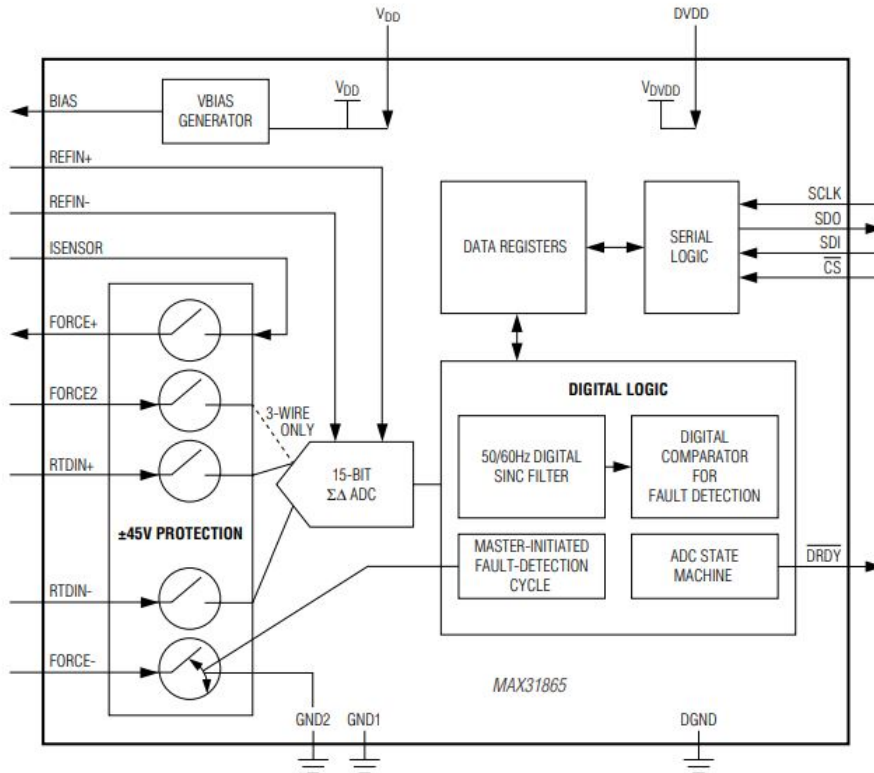


Figura 2.10: Diagrama de bloques de funcionamiento del CI MAX31865. [24]

Para lograr un funcionamiento correcto del circuito, se deben conocer las funciones de cada uno de sus pines, que se presentan en anexo 5: “Hojas de datos”.

Por último, el protocolo de comunicación entre el controlador (maestro) y el CI (esclavo) se muestra a continuación en la figura 2.11:

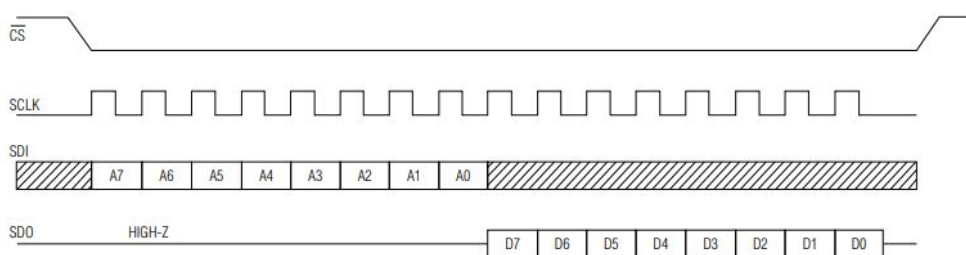


Figura 2.11: Protocolo para envío de datos del MAX31865. [24]

Como se puede observar en la figura 2.11, la transmisión de información solo se da cuando el pin “chip select” se coloca en baja tensión, y el pin SCLK actúa como reloj de pulsos. La comunicación funciona en modo “half-duplex”, donde SDI recibe un byte de entrada, tras lo cual SDO envía la información serial deseada.

Una explicación más detallada del uso específico de estos pines dentro del contexto del presente proyecto se reserva para el capítulo 4: propuesta de diseño, donde se explica a

detalle la implementación práctica del circuito MAX31865 y su interacción con el controlador.

2.5.2. Encoder magnético

Como se mencionó en la sección 2.4.2, la salida de un encoder magnético estándar es una señal PWM, cuyo régimen de trabajo depende de la velocidad de rotación del elemento rotativo conectado al imán. Mientras que esta salida puede ser interpretada directamente por un gran número de microcontroladores, la señal es susceptible a ruido de alta frecuencia debido a la oscilación del imán. Por esta razón, es conveniente colocar un filtro de paso bajo en las salidas del sensor.[25]

Debido a la forma de la onda de salida, en combinación con la escasez de interferencia magnética en el área de trabajo del proyecto, se considera que un filtro Bessel es adecuado [26], la estructura general del filtro se muestra en la figura 2.12.

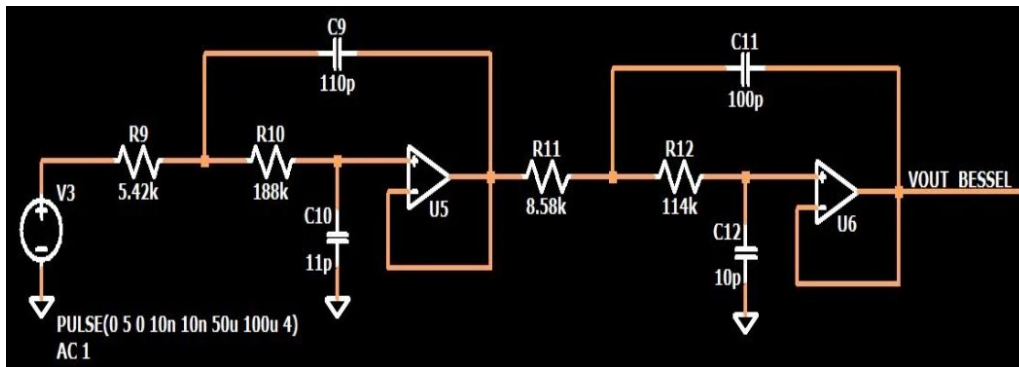


Figura 2.12: Estructura de un filtro Bessel típico. [26]

Mientras que explicar el funcionamiento detallado de un filtro Bessel está por fuera del enfoque del presente informe, es prudente realizar unas aclaraciones sobre el filtro. Su operación se basa en tener una respuesta lineal de fase y una respuesta transitoria sumamente rápida, lo que los hace ideales para eliminar ruido de una señal cuadrada. Mientras que su estructura es similar a la de un filtro Butterworth, la diferencia recae en la selección del valor de sus componentes.

Si se utilizara un filtro pasivo, la forma de onda de la salida se vería afectada, la respuesta capacitiva causaría que los pulsos se “suavizaran”, por lo que la salida sería una onda aproximadamente triangular, lo cual no es lo que se busca.

De manera similar, si se utilizara un filtro Butterworth, el tiempo mayor de respuesta transitorio ocasionaría una deformación de la onda, debido a un efecto de sub-compensación. La comparación entre la respuesta de ambos filtros se muestra en la figura 2.13.

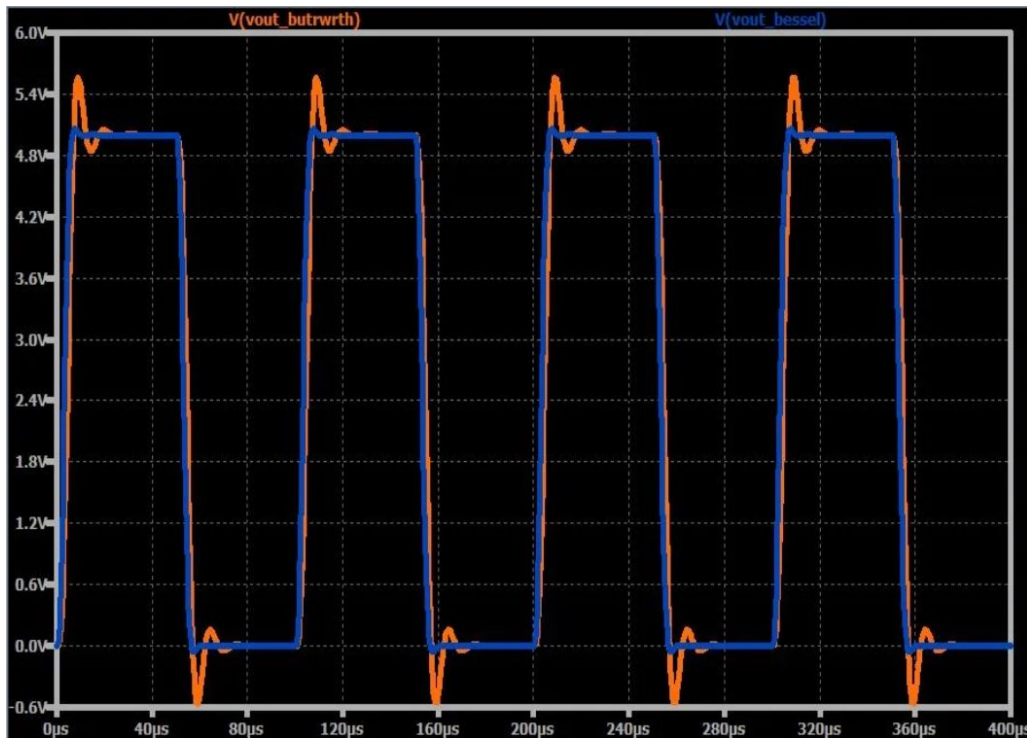


Figura 2.13: Respuesta en el tiempo de un filtro Bessel (azul) contra un filtro Butterworth (naranja) ante una onda de entrada cuadrada. [26]

Por consecuencia, el filtro Bessel resulta ideal para garantizar que la salida de un encoder magnético esté libre de ruido, y sea estable.

2.6. Funcionamiento de protocolo de comunicación

2.6.1. Comunicación por medio de SPI

Debido a la naturaleza de comunicación en serie de la Raspberry Pi y del MAX31865, el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) resulta una selección natural para poder interpretar y codificar las señales eléctricas que se dan entre el controlador, y los sensores, o dispositivos periféricos.

El protocolo SPI representa una alternativa a utilizar puertos seriales tradicionales. Mientras que un puerto serial funciona de manera asíncrona, los puertos SPI operan en base a un reloj interno que permite al controlador y a los dispositivos periféricos operar a la misma velocidad y enviar datos de manera coordinada, lo cual incrementa la eficiencia de la comunicación y evita la corrupción o lectura errónea de la información. [27]

El reloj del SPI dicta al controlador cuando debe tomar muestras de la señal de entrada que viaja en el bus de transferencia de datos, las muestras se toman en los ejes de subida o de caída del reloj, dependiendo de las especificaciones del dispositivo. El funcionamiento básico del protocolo se muestra en la figura 2.14

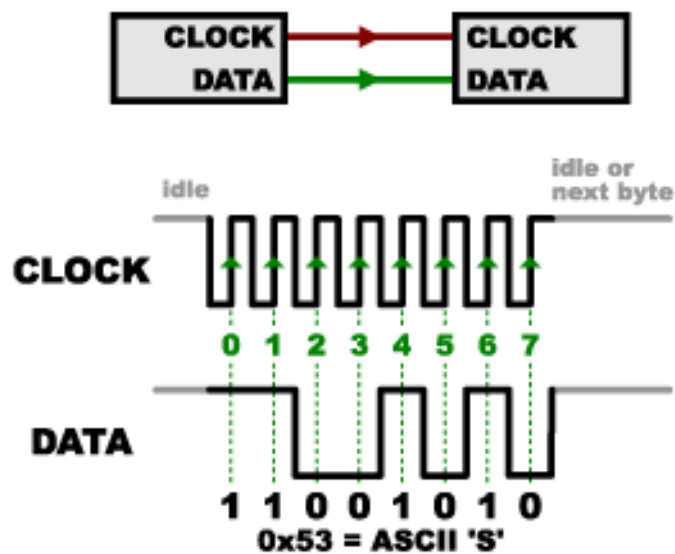


Figura 2.14: Visualización de como un dispositivo controlador recolecta información por medio de SPI. [27]

Para comunicación de doble vía, se utiliza un reloj serial, y buses de transmisión de datos, uno por el cual se envía la información desde el dispositivo periférico llamado POCI (Peripheral Out, Controler In) o SDI (Serial Data Out), y otro por el cual se envían comandos desde el controlador, llamado PICO (Peripheral In, Controler Out). Es importante notar que el controlador siempre es el dispositivo que envía la señal del reloj.

Mientras que el protocolo SPI es Full-Duplex, es decir que el controlador y el dispositivo periférico pueden enviar información al mismo tiempo, la mayoría de las interacciones se dan en un modo Half-Duplex, debido a que como el controlador envía la señal de reloj, el mismo puede controlar cuando se le permite al dispositivo periférico enviar la información, dicha interacción se ilustra en la figura 2.15. De hecho, regular la comunicación de la manera mencionada anteriormente se considera una buena práctica de ingeniería, ya que permite saber exactamente cuándo esperar datos de entrada dentro de una serie de comandos compleja.

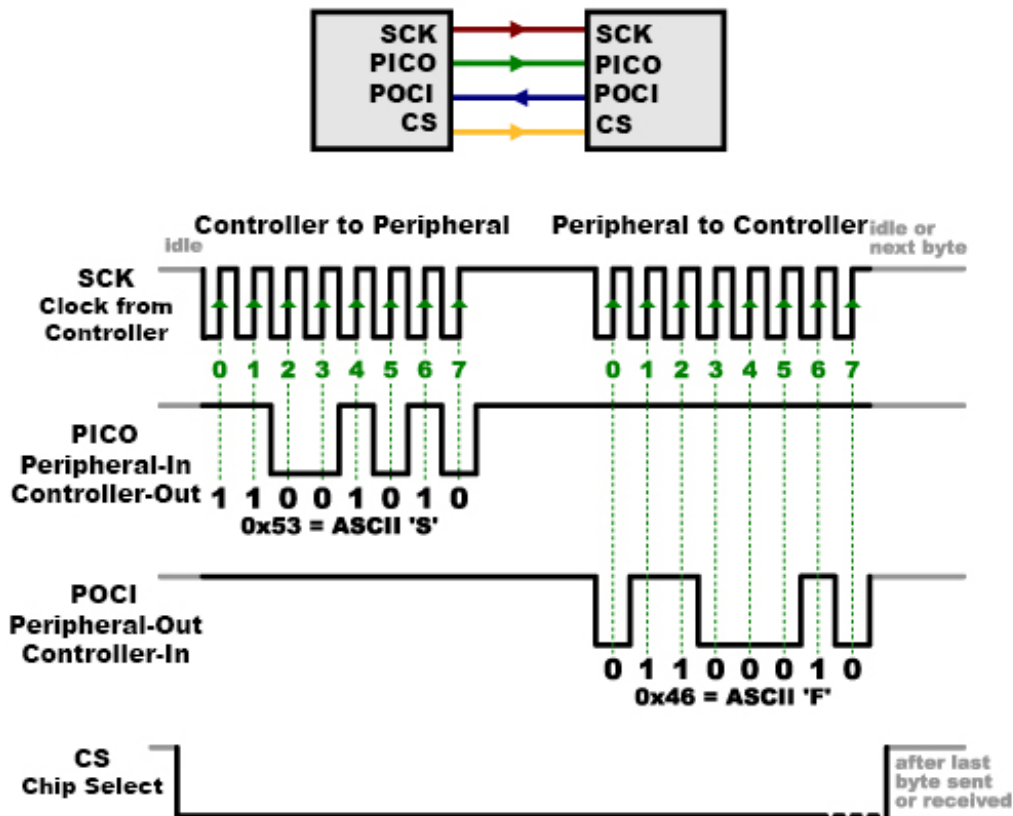


Figura 2.15: Conexión y control de comunicación bidireccional entre un dispositivo periférico y un controlador. [27]

En el caso de que existan múltiples dispositivos periféricos conectados al mismo controlador, todos los elementos pueden compartir los buses de reloj serial, PICO, y POCI, ya que en estos casos se incluye un puerto adicional a cada dispositivo periférico, llamado CS (Chip Select) el cual efectivamente actúa como un “Enable” que coordina cuando se le permite o no enviar datos a un dispositivo.

2.6.2. Comunicación por GPIO

Ya que la señal cuadrada generada por un encoder puede ser interpretada como una señal digital, tomando los estados altos como un 1 binario y los bajos como un 0, resulta conveniente utilizar un protocolo optimizado para la lectura de señales digitales, tal es el caso del GPIO.

Mientras que protocolos como SPI o I2C requieren configuraciones específicas y múltiples líneas de comunicación, los pines GPIO operan de manera más sencilla, permitiendo al controlador enviar y recibir señales digitales básicas, lo cual incrementa la flexibilidad y simplicidad de la comunicación.[28]

Para comunicación de doble vía, se utilizan pines configurados tanto como entradas como salidas. Un pin configurado como entrada puede recibir información desde un dispositivo periférico, mientras que un pin configurado como salida puede enviar comandos desde el controlador. Es importante notar que el controlador siempre es el dispositivo que define la configuración de los pines GPIO.

Mientras que los pines GPIO son de propósito general, es decir, pueden ser configurados para diversas funciones, la mayoría de las interacciones se dan en un modo simple de entrada o salida. Regular la comunicación de esta manera se considera una buena práctica de ingeniería, ya que permite saber exactamente cuándo esperar datos de entrada o enviar comandos dentro de una serie de operaciones.[29]

En el caso de que existan múltiples dispositivos periféricos conectados a los mismos pines GPIO, se pueden utilizar técnicas como multiplexación o expanders de GPIO para coordinar cuándo se le permite a cada dispositivo enviar o recibir datos, asegurando así una comunicación eficiente y ordenada.

2.6.3. Comunicación inalámbrica por sockets

La comunicación inalámbrica entre la terminal de recolección de datos, y el computador personal en la cual se reciben los datos se da por medio de una red de WiFi, y se utiliza un sistema de sockets para manejar la transferencia de información.

Los sockets y su API, son los componentes en los extremos de una red, es decir, son los puntos donde se inicializa y termina una conexión en modalidad semi-dúplex, a lo que se le llama PIC o “inter-process communication”. [30]

El sistema de sockets se utiliza principalmente en aplicaciones de cliente-servidor. En esta aplicación, cada dispositivo tiene una dirección de IP propia que se usa para identificar al dispositivo dentro de la red, y aproximadamente 65535 puertos los cuales se utilizan como interfaz entre los dispositivos, cada IP puede ser referida múltiples veces, pero solo se puede manejar una sola conexión por puerto, como se ilustra en la figura 2.16.



Figura 2.16: Representación gráfica del uso de sockets, cada triángulo representa un dispositivo diferente. [31]

En este esquema de red, el servidor guarda y distribuye información, mientras que los clientes hacen peticiones de información al servidor. Para iniciar la comunicación, el cliente tiene que especificar la dirección y el puerto del servidor cuya IP es pública, mientras que la dirección del cliente es discreta, y el servidor solo la puede utilizar una vez que se realizó una petición de información. La conexión continúa abierta mientras el servidor esté en espera o “escuchando” comandos de los clientes. [31]

Dentro de la comunicación por sockets, existen 8 funciones esenciales, mostradas en el cuadro a continuación:

Cuadro 2.2: Funciones esenciales de los sockets y su descripción

Nombre de la función	Descripción
Socket	Inicializa un socket con los parámetros dados
Bind	Combinación de dirección IP y puerto que identifica al socket
Listen	Coloca al servidor en modo de escucha, donde espera para recibir comandos de los clientes
Connect	Se utiliza del lado del cliente para iniciar la comunicación con el servidor
Accept	Confirmación por parte del servidor para permitir que se conecte a un cliente
Write	Se adjuntan los datos a enviar al cliente o servidor
Read	Se leen datos pedidos al servidor
Close	Cierra una conexión activa

En el caso del sistema diseñado, la Raspberry Pi funciona como el servidor, donde se almacenan los datos, y la computadora personal de la oficina de mantenimiento funciona como el cliente. En la sección de Propuesta de diseño se entra en mayor detalle acerca de la configuración de la red de dispositivos.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Descripción y estructura de la metodología

En consideración a lo visto a lo largo de la carrera y los requerimientos ingenieriles de este proyecto, se eligió la metodología de diseño y desarrollo de producto de K. T. Ulrich y S. D. Eppinger [5], debido a su versatilidad y carácter técnico. A continuación, se presentan las etapas utilizadas para desarrollar una solución al problema propuesto:

1. Identificar las necesidades del cliente: Busca definir los requerimientos del proyecto, así como sus niveles de importancia.
2. Establecer las especificaciones objetivo: En esta etapa, se toman las necesidades encontradas y se les asignan valores que indiquen su cumplimiento, llamados métricas, basándose en lo expresado por el cliente, tecnologías y productos similares existentes en el mercado, y lluvias de ideas.
3. Seleccionar el concepto de producto: Se definen los sub-problemas a resolver dentro del diseño y se proponen múltiples soluciones a cada uno, tras lo cual se combinan estas y se evalúan a través de matrices de selección para determinar un concepto ganador.
4. Definir las pruebas de validación de conceptos: Finalmente, se definen una serie de pruebas cuyo objetivo es verificar que el concepto elegido sea capaz de cumplir con las necesidades y especificaciones definidas, y de ser necesario, identificar qué aspectos del diseño se deben cambiar o ajustar.

3.2. Identificación de las necesidades del cliente

En esta sección, se busca definir de manera concreta las necesidades del cliente, que ayudan a establecer las especificaciones del proyecto y los objetivos del mismo.

3.2.1. Datos recolectados sin procesar

Los siguientes datos fueron recolectados en el transcurso de dos entrevistas y sesiones de aclaración menores con Gustavo Chiroy [3], el jefe de mantenimiento de la planta de producción de grupo PRO.

Debido al proceso de transcripción del audio de la entrevista a un formato escrito, y para incrementar su claridad para el lector, alguna de la información ha sido parafraseada.

- Se busca como función principal del sistema que se incremente la transparencia de las medidas que afectan la trazabilidad de los productos.
- Actualmente, todos los datos se guardan en papel, y estas hojas se almacenan en archiveros que no se digitalizan, y no se les asigna un número de lote u orden de trabajo a la producción de los alimentos.
- "Los operarios no toman las lecturas cuando lo deben hacer, y solo llenan las hojas de registro sin dar mucha consideración a lo que están anotando".
- Se quiere identificar qué eventos o desviaciones de las normas llevaron a defectos o anomalías en los resultados.
- De manera similar, existe la necesidad de reducir el error humano de la toma de datos, así como evitar manipulación intencional de los mismos.
- Se busca que los datos sean guardados en una base de datos organizada, con una frecuencia mínima de una toma de datos cada media hora.
- Adicionalmente, se desea que los datos sean graficados en tiempo real, o lo más próximo a esto, de tal manera que se pueda ver el estado actual de la maquinaria.
- Los datos que se quieren capturar son los siguientes: frecuencia de rotación de las cortadoras (Hz), velocidad de la malla de fritura y de la malla de enfriamiento (Hz), velocidad de las paletas (Hz), temperatura del aceite de cocción (°C).
- No se desea recolectar datos de ningún parámetro fuera de estos.
- El rango de temperaturas en las que se trabaja el aceite es de 155 a 170 °C, mientras que el rango de desviación de la temperatura deseada en cualquier momento dado es de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Se desea enviar los datos a una base de datos interna.
- No hay preferencia entre utilizar medios de comunicación alámbricos o inalámbricos.
- Mientras que no hay restricción a quienes puedan acceder a la base de datos, esta debe estar disponible al personal de IT, mantenimiento y producción.

-
- Se desea que el sistema de monitoreo en tiempo real funcione como un sistema de alerta temprana para fallas, o para cuando los parámetros se desvían de los márgenes aceptables.
 - Para el proyecto, se desea usar el freidor número 5 como caso de estudio.
 - Actualmente se desconoce la velocidad real de las mallas y de las paletas, solo se mide la posición en un potenciómetro que controla su velocidad. La escala de estos potenciómetros es de 0 a 180 VDC.
 - Durante la producción, cuando se ingresa producto nuevo al aceite, se debe ajustar la temperatura del mismo basado en la cantidad de producto ingresado. El ajuste nunca debe superar los 5 grados, y el cambio de temperatura se da a lo largo de aproximadamente 20 minutos, dependiendo del producto ingresado.
 - Los productos que procesa la freidora número 5 son: plátano verde, plátano maduro y banano.
 - Parte de lo que se desea averiguar es la velocidad real de las paletas y mallas.
 - La relación de las mallas con la temperatura de aceite es: a menor temperatura, mayor tiempo de residencia del producto. No hay relación numérica definida.
 - El “tiempo de residencia” se define como el tiempo que dura el producto dentro de la freidora.
 - La solución propuesta debe tomar en cuenta los protocolos de salubridad y seguridad alimenticia de Costa Rica (ver anexo 1).
 - El personal de planta debe poder dar mantenimiento al sistema sin que sea demasiado complejo.
 - La ubicación del sistema no debe interferir con el paso de material y personal, o entorpecer las necesidades de trabajo.
 - No hay problema alguno con modificar o expandir secciones de la máquina, mientras esto no afecte el funcionamiento de la misma.
 - Actualmente, la temperatura del aceite se mide por medio de un sensor tipo termocupla, pero sus medidas son inciertas por la antigüedad del sensor, y el valor mostrado en el panel de control no es muy confiable, pues tiene una incertidumbre de $\pm 4^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, y las medidas son poco consistentes.
 - El salpique y derrame de aceite es una ocurrencia esperada, y sucede de vez en cuando. Adicionalmente, cerca de la máquina hay temperaturas elevadas y partículas de aceite libres en el aire.

-
- En la planta se trabajan 3 turnos diarios, cada uno de 8 horas, 6 días a la semana.
 - A la freidora #5 se le da mantenimiento mayor una vez cada 3 meses, donde se revisan todos sus sistemas, y se le da mantenimiento menor una vez al mes, que corresponde a limpieza de obstrucciones y “chequeos” de sus funciones básicas.
 - La incertidumbre de las mediciones de los elementos rotativos no es muy importante, por lo que un valor de ± 5 Hz se considera aceptable.
 - El presupuesto para una implementación completa de la solución es de 5000 USD.
 - No hay un monto medido para la cantidad de dinero perdido por errores relacionados con el sistema actual de trazabilidad, pero hasta la fecha, la mayor pérdida ha sido un lote de una jornada laboral de 8 horas debido a un error de temperatura.

3.2.2. Definición y jerarquización de necesidades

Tras analizar la información provista por el cliente, se definen las necesidades del proyecto y se procede a clasificarlas dentro de categorías, o jerarquías, con base en similitudes entre las mismas. Por ejemplo, las necesidades pertinentes a requerimientos físicos del sistema se colocan en una jerarquía separada a las necesidades de gestión.

Aquellas necesidades que no se puedan agrupar a otras se colocan por separado.

1. El sistema recolecta todos los parámetros requeridos dentro de rangos aceptables.
 - El sistema es capaz de capturar datos de frecuencia de rotación de las mallas, cortadoras y paletas de la máquina en Hz, así como la temperatura del aceite en °C. De ahora en adelante, se referirá a este conjunto como “los parámetros de la máquina”.
 - Los sensores utilizados en el sistema son más precisos y exactos que los que se utilizaban previamente en la empresa.
 - El sistema permite encontrar la velocidad real de los elementos rotativos de la máquina.
2. Los datos preservan su fidelidad y presentan resistencia ante interferencias en su recorrido.
 - El sistema es capaz de recolectar y almacenar los datos de tal manera que los mismos no se vean comprometidos por error humano, manipulación, pérdida o daño por factores ambientales y son almacenados de manera que resulta sencillo encontrar información para una fecha en particular.
 - Los datos cuentan con un grado de confiabilidad estándar en la industria.
 - La información es transmitida por medio de la tecnología y protocolo de comunicación que garantiza la menor interferencia y mayor velocidad posible.

-
3. Se almacena la información según los requerimientos del cliente, y las salidas requeridas se muestran al usuario.
 - Los datos son almacenados de manera que resulta sencillo encontrar información para una fecha en particular.
 - Se almacena un conjunto de datos cada 15 minutos como mínimo en la base de datos.
 - Se genera una visualización del estado actual de los parámetros de la máquina con un atraso máximo de 2 minutos entre la captura del dato y el despliegue.
 - Se obtiene una medida del tiempo aproximado de residencia basado en la frecuencia instantánea de rotación de las mallas, usando la medición guardada en la base de datos.
 - Se levanta una alarma al usuario cuando la temperatura del aceite excede los $\pm 5^{\circ}\text{C}$ del rango aceptable.
 4. El sistema es conducente a un flujo apropiado de trabajo en la planta, y es resistente a los factores ambientales dentro de esta.
 - El sensor de temperatura empleado en el sistema opera con normalidad a temperaturas de 155 a 170 °C como mínimo.
 - Los sensores para los elementos rotativos son resistentes a la humedad, altas temperaturas y obstrucciones tales como aceite libre en el aire.
 - Los componentes físicos del sistema están protegidos contra las condiciones ambientales de la planta de producción.
 - Los componentes físicos del sistema no interfieren con las labores diarias o de mantenimiento de la planta, además, el mismo puede ser desmontado y transportado con facilidad.
 5. El diseño del sistema se apega a las necesidades económicas del cliente.
 - Los repuestos del sistema son comunes en el mercado y accesibles económicamente.
 - El costo total de los componentes, tanto físicos como de software, no excede los 5000 USD.
 6. El mantenimiento del sistema puede ser realizado por un operario tras una corta capacitación.
 7. El sistema cumple con los requerimientos establecidos por los estándares de salubridad y seguridad ocupacional de la empresa.

3.2.3. Categorización de las necesidades

Por medio de los resultados de una encuesta de "Google Forms" que se envió al cliente [32], se le asignaron valores de prioridad del 1 al 5 a cada necesidad, donde un 1 indica que esta es de baja importancia, y un 5 indica que es absolutamente necesaria.

Los resultados de esta encuesta se muestran en los cuadros 3.1 y 3.2, y el detalle se puede encontrar en el apéndice 6.

3.3. Establecimiento de especificaciones objetivo

3.3.1. Métricas

Una vez definidas las necesidades del cliente, se busca generar métricas para cada una de estas, de tal forma que cada necesidad tenga al menos una métrica asociada. Sin embargo, varias necesidades pueden compartir una métrica, y una necesidad puede tener más de una métrica que la represente. Inicialmente, se define la unidad de medida que se utiliza para cada punto, y los valores numéricos se asignan más adelante en esta sección.

Las unidades se obtuvieron por medio de la lluvia de ideas y asociación con las metodologías de medición utilizadas actualmente en la empresa y en el mercado. En el cuadro 3.1 se asigna una unidad a cada métrica.

Cuadro 3.1: Métricas generadas y sus unidades correspondientes.

Métrica	Necesidad	Descripción	Importancia	Unidad
1	1	Presencia de sensores rotativos, y de temperatura	5	N/A
2	3, 9	Almacenamiento del contenido de los datos durante su recorrido	5	%
3	2	Incertidumbre de las medidas del sensor de temperatura	5	± °C
4	2	Incertidumbre de las medidas de los sensores de rotativos	5	± Hz
5	4	Frecuencia de cargas a la base de datos	5	min
6	5	Tiempo en desplegar estado al graficador	4	min
7	6	Precisión del límite de temperatura para desplegar alarma	3	± °C
8	7	Temperatura máxima del termo sensor	5	°C
9	8	Temperatura de operación máxima de los sensores rotativos	5	°C
10	8	Periodicidad promedio de mantenimiento de sensores rotativos	5	h
11	10	Presencia de mapeo de tiempo de residencia de operación a frecuencia de rotación	4	N/A
12	11	Error entre tiempo de residencia real y medido	4	%
13	12	Compatibilidad con norma ISO 22000 y seguridad interna de PRO	4	N/A
14	13	Temperatura máxima que resiste la carcasa	3	°C
15	14	Dimensiones del punto de recolección	4	cm ³
16	14	Tiempo promedio de montaje/desmontaje	4	min
17	15	Tiempo promedio de entrega de componentes	4	días
18	16	Tiempo en capacitar nuevo operario en uso del sistema	3	h
19	17	Confiabilidad de las medidas rotativas y de temperatura	5	%
20	18	Costo estimado de un modelo funcional	3	\$ USD

Obtención de las métricas

A continuación, se lista la lógica e investigación utilizada para determinar algunas de las métricas. Es importante resaltar que la descripción de aquellas métricas derivadas di-

rectamente de la entrevista con el cliente ha sido omitida para mantener la brevedad del documento.

- **Métrica 2:** Se consideró que esta es la manera más cercana a la realidad y al enfoque de este proyecto de lograr medir la integridad de los datos.
- **Métrica 3:** Tomando en cuenta la naturaleza ambigua de los sensores originales de la freidora, se consideró que una medida de error porcentual comparado a un termómetro análogo es la alternativa que mejor se ajusta al alcance de tanto el proyecto como a las restricciones de tiempo del mismo.
- **Métrica 9:** El objetivo es ayudar a encontrar la distancia de la fuente de combustión a la que deben ubicarse los sensores rotativos.
- **Métrica 10:** El tiempo promedio antes de mantenimiento se consideró una métrica apta para determinar la durabilidad de los sensores rotativos.
- **Métrica 11:** En la empresa no se busca conocer el tiempo de residencia de una unidad de producto en particular, sino que el propósito es conocer el tiempo aproximado que dura el producto dentro del aceite a una frecuencia de malla específica. Debido a esto, se tomó el tiempo de residencia como una medida derivada instantánea al momento que se captura la información para ser enviada a la base de datos.
- **Métrica 13:** Debido a que en la industria alimenticia se requiere el cumplimiento de la norma ISO 22000: sistemas de manejo de seguridad alimenticia [10], la cual es un conglomerado de múltiples normas ISO que regulan toda etapa de la cadena de suministro, el sistema debe cumplir con esta norma. Adicionalmente, se buscó que el sistema fuera compatible con los requerimientos de seguridad del freidor número 5, proporcionados por el cliente, los cuales se pueden encontrar en el anexo 1.
- **Métrica 14:** En un entorno industrial, hay múltiples factores que pueden determinar la resistencia de un componente. Sin embargo, en la planta del grupo PRO, el mayor contaminante ambiental son las salpicaduras de aceite a alta temperatura, por lo que se tomó la temperatura de este como métrica para la resistencia de la carcasa.
- **Métrica 18:** A pesar de que esta métrica puede tener una mayor complejidad, debido a las restricciones de tiempo de este proyecto, se consideró una opción válida utilizar esta métrica para determinar la facilidad de mantenimiento del sistema.

3.3.2. Comparación con productos existentes

El propósito de esta sección es orientar los valores marginales e ideales por medio de la investigación de mercado, que corresponde igualmente a la sección 3.4.2.

Solamente se incluye información que ayude directamente a la selección de los valores para las métricas.

-
- Sensores de temperatura
 - **Sensores tipo termopar de TE Connectivity:** Sensores diseñados para una gran variedad de aplicaciones, se componen de dos metales diferentes unidos entre sí en un extremo, y la temperatura se calcula con base en la diferencia de tensión entre estos. Este principio se le conoce como efecto Seebeck [33]. Requieren contenedores para ser utilizados en inmersión líquida [34].
 - **Sensores tipo RTD de Omega:** Estos sensores funcionan de manera similar, miden la temperatura por medio del cambio en impedancia de un único tipo de metal termoconductor, que puede ser níquel, cobre o platino [16]. Estos son más versátiles, y existen modelos que permiten inmersión directa en líquido. Poseen diferentes categorías, con base en sus temperaturas de operación e incertidumbres de sus mediciones [35].
 - Microprocesadores
 - **Arduino UNO / WiFi:** Placa altamente versátil con gran variedad de módulos disponibles, con opción para tener funcionalidad WiFi incluida. A pesar de esto, su poder de procesamiento no es tan veloz como otras alternativas [36].
 - **Raspberry Pi 5:** Microcomputador sumamente versátil, con WiFi integrado, alta capacidad de procesamiento, capacidad de “multi-threading”, y facilidad para incorporar una interfaz de usuario dinámica y accesible, entre otras características [37].
 - **Tarjetas FPGA:** Altamente personalizables, capaces de ser programadas a un muy bajo nivel, lo que las permite ajustarse a prácticamente cualquier aplicación. Esto se debe a que estas tarjetas son “hardware programable”, ya que el código que se cargue en las mismas físicamente configura las compuertas lógicas que las componen. Sin embargo, estas requieren una mayor capacitación para ser utilizadas. Adicionalmente, toda funcionalidad que no incluya transmisión alámbrica y procesamiento de entradas y salidas, está totalmente ausente [38].

3.3.3. Valores marginales e ideales

En el cuadro 3.2 se presentan los valores ideales y marginales para cada métrica, y se omiten aquellas que tengan una característica binaria, o no medible, como lo son las métricas 1, 11 y 14.

Cuadro 3.2: Valores ideales y marginales para cada métrica establecida.

Métrica	Descripción	Importancia	Unidad	Valor ideal	Valor Marginal
2	Almacenamiento del contenido de los datos durante su recorrido	5	%	> 99	> 95
3	Incertidumbre de las medidas del sensor de temperatura	5	± °C	≥ 0,5	≥ 5
4	Incertidumbre de las medidas de los sensores de rotativos	5	± Hz	≥ 0,5	≥ 2
5	Frecuencia de cargas a la base de datos	5	min	5	15
6	Tiempo en desplegar estado al graficador	4	min	≤ 0,5	≤ 6
7	Precisión del límite de temperatura para desplegar alarma	3	± °C	3	5
8	Temperatura máxima del termo sensor	5	°C	≥ 250	≥ 204
9	Temperatura de operación máxima de los sensores rotativos	5	°C	≥ 65	≥ 40
10	Periodicidad promedio de mantenimiento de sensores rotativos	5	h	≥ 1728	≥ 576
12	Error entre tiempo de residencia real y medido	4	%	< 5	< 10
14	Temperatura máxima que resiste la carcasa	3	°C	≥ 200	≥ 170
15	Dimensiones del punto de recolección	4	cm ³	≤ 300000	≤ 500000
16	Tiempo promedio de montaje/desmontaje	4	min	≤ 4,8	≤ 9,6
17	Tiempo promedio de entrega de componentes	4	días	≤ 3	≤ 5
18	Tiempo en capacitar nuevo operario en uso del sistema	3	h	< 3	< 6
19	Confiabledad de las medidas rotativas y de temperatura	5	%	≥ 95 %	≥ 90 %
20	Costo estimado de un modelo funcional	3	USD	< 3000	< 5000

Proceso utilizado para definir los valores de cada métrica

Para garantizar prácticas apropiadas de ingeniería, los valores previamente mostrados en el cuadro 3.2 no fueron generados espontáneamente. Estos se obtuvieron con base en racionalizaciones fundamentadas en los comentarios del cliente, o en su defecto, fueron derivados de características de los productos mencionados en la sección 3.3.2.

Con esto en mente, la lógica detrás de los valores ideales y marginales de cada métrica es la siguiente:

- Métrica 2: Se busca minimizar la pérdida, sin garantizar una transmisión perfecta, y se considera aceptable, por criterio del diseñador, que un 95% de los datos sean transmitidos exitosamente.
- Métrica 3: Incertidumbres extraídas de sensores RTD de clase B [16].
- Métrica 4: Seleccionada para ser menores a las incertidumbres de los sensores originalmente presentes en el Grupo PRO, y reforzadas por los límites aceptables descritos por el cliente.
- Métricas 5, 6, 7 y 20: Fueron obtenidas directamente de las necesidades planteadas por el cliente.
- Métrica 8: Se toma la temperatura máxima admitida por la clase de sensores utilizados para determinar la métrica 3 como valor ideal, ya que este es cercano a muchas otras tecnologías [34]. Mientras que el valor marginal es la temperatura promedio del aceite para freír utilizado en la planta del cliente [3].
- Métrica 9: Según la medición de sensores ambientales, la temperatura medida en la planta a 20 cm de la superficie del aceite es de 65 °C y 45 °C a 50 cm del aceite, que se utiliza como el rango de colocación admitido para los sensores rotativos.

-
- Métrica 10: En la empresa del cliente, el mantenimiento completo se le da a la máquina cada 3 meses, lo que involucra revisar la integridad de los componentes. Alternativamente, se realizan inspecciones menores una vez al mes, por lo que los valores se basan en un régimen de trabajo de 24 horas diarias, 6 días a la semana, para estos periodos.
 - Métrica 12: Debido a la amplia cantidad de valores que actualmente se desconocen en la empresa sobre el tiempo de residencia y velocidad de las mallas, se escogen valores de error relativamente elevados.
 - Métrica 14: Se toma como valor marginal la temperatura promedio del aceite utilizado en la empresa, y como ideal, la temperatura máxima del mismo.
 - Métrica 15: Criterio del diseñador, basado en volúmenes promedio de una carcasa de CPU para computadoras de escritorio.
 - Métrica 16: Correspondiente a un 2%-4% a las 4 horas de mantenimiento mensual dedicadas a la freidora #5.
 - Métrica 18: Tiempos basados en que la capacitación se realice en 3 sesiones semanales, de 1 a 2 horas.
 - Métrica 19: Según Patrik D. T. O'Connor y A. Kleyner, en su libro "Practical Reliability Engineering", la confiabilidad práctica más utilizada en la empresa es del 95%, mientras que un valor de 90% se considera aceptable donde el primer caso no sea alcanzable [39].

3.4. Generación de conceptos

3.4.1. Definición del problema

El primer paso para lograr definir el problema, es decir, la serie de retos técnicos a solucionar, consistió en determinar las entradas y salidas del sistema diseñado, como se muestra en la figura 3.1:

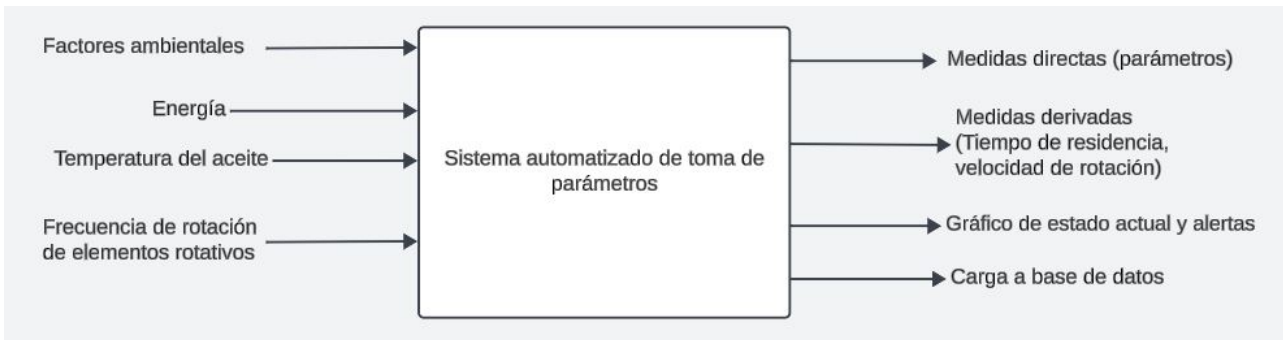


Figura 3.1: Entradas y salidas del sistema.

Una vez establecidas estas entradas y salidas, se descompone el problema principal en subproblemas, o subtareas, mostrado en el diagrama de la figura 3.2.

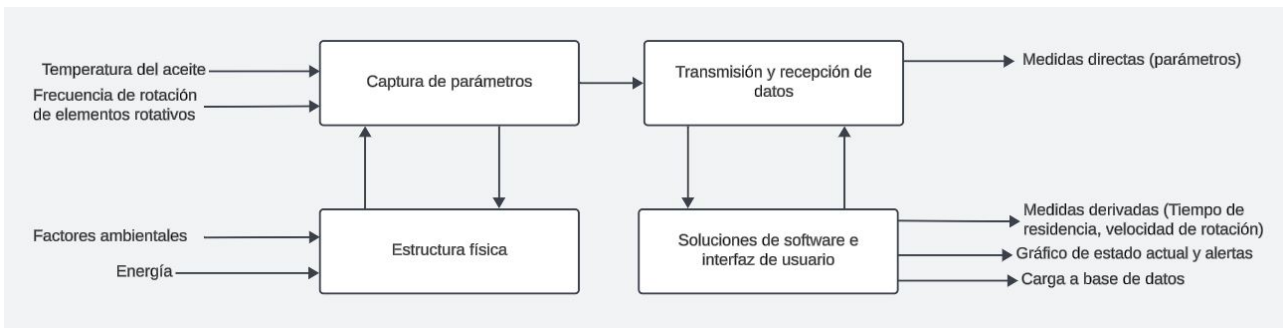


Figura 3.2: Subproblemas propuestos para el sistema.

Como tal vez el lector haya logrado observar, esta sección tiene el propósito de descomponer un reto muy complejo y difícil de abordar directamente, en múltiples tareas más simples de resolver. Debido a esto, se descomponen nuevamente los subproblemas en tareas tangibles y realizables.

- Captura de los parámetros:
 - Tomar información de variables físicas.
 - Acondicionar las señales de los sensores.
 - Procesar e interpretar las señales capturadas.
 - Mapear y asignar los datos a variables.
- Estructura Física:
 - Sujeción y colocación correcta de los sensores.
 - Proporcionar resistencia a factores ambientales.
 - Fuente de alimentación del sistema.
- Transmisión y recepción de datos:

-
- Definir y adaptar los datos al protocolo de comunicación elegido.
 - Proporcionar resistencia a interferencias e interrupciones.
 - **Software e interfaz de usuario:**
 - Generar entrada a base de datos.
 - Generar y desplegar gráfico de parámetros.
 - Eliminar información no necesaria.
 - Recibir, normalizar y organizar los datos.

3.4.2. Búsqueda externa de soluciones

Una vez establecidos los subsistemas y tareas a solucionar del problema, se realiza una investigación de mercado con un foco específico en sistemas y productos que son de utilidad para ejecutar cada una de las tareas mencionadas en la subsección anterior, con la finalidad de formar una lista de opciones de la cual derivar un concepto ganador.

Las tecnologías y productos mencionados en la sección 3.3.2 se consideran, pero no se repetirán en esta sección para mantener la brevedad del documento.

Captura de los parámetros:

- **Sensores de temperatura:**
 - **Termistores NTC:** Una alternativa a los dos tipos de sensores de temperatura mencionados anteriormente. Estos están formados de metales conductivos tratados para expresar un alto cambio en impedancia ante cambios relativamente pequeños en temperatura [40]. Estos tienen una precisión moderada y un tiempo de respuesta sumamente rápido, debido a su pequeño tamaño. Mientras que la mayoría de estos funcionan en rangos de -50 °C a 150 °C, hay varias alternativas en el mercado capaces de operar a 200 °C o más, tales como los termistores de Mouser Electronics [41].
 - **Sensores IR de temperatura:** Proveen una alternativa sin contacto para medir la temperatura del aceite, y un tiempo de respuesta rápido [42]. Sin embargo, la alta emisividad del metal que rodea el aceite en la maquinaria, las restricciones de línea de visión, y la incapacidad de tomar lecturas por debajo de la superficie del aceite, lo hacen una opción poco atractiva [43] [44].
- **Sensores de velocidad y frecuencia rotacional:**
 - **Encoders ópticos:** Transductores utilizados para medir movimientos rotacionales, consisten de discos de plástico, papel u otros materiales, que contienen varias hileras de marcas transparentes y negras de manera alternada. En lados

opuestos de este disco, se coloca una fuente de luz y un sensor óptico. La velocidad se mide por medio de la frecuencia de los pulsos de luz que llegan al sensor, generadas cuando las secciones negras del disco interfieren con el flujo de luz [45]. En la figura 3.3 se muestra un disco estándar para encoder óptico.

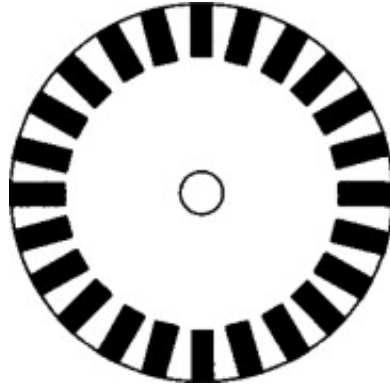


Figura 3.3: Encoder óptico de una sola hilera [45].

- **Encoders Magnéticos:** Usa un principio similar al encoder óptico, pero este mide la rotación por medio de cambios en campos magnéticos. Se coloca una pieza con polos opuestos alternados en el rotor, como se visualiza en la figura 3.4, y en el otro extremo se coloca un sensor. La naturaleza de este sensor define la tecnología detrás del encoder, los dos tipos más comunes son: Sensores de efecto Hall, que detectan los cambios en corriente generados por el movimiento de los polos, y de efecto Magneto, que detectan el cambio en resistencia causado por el campo magnético. Adicionalmente, debido a que estos no dependen de sensores ópticos para su funcionamiento, su resistencia a obstrucciones y suciedad es superior [46].

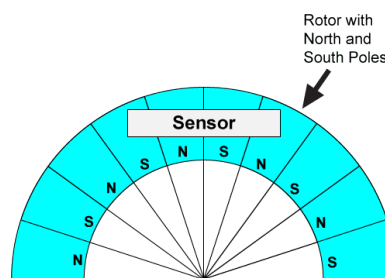


Figura 3.4: Organización de polos en el disco de un encoder magnético [46].

- **Tacómetro:** Consiste de una masa conectada a un resorte, que se coloca en contacto directo con el elemento rotativo. Conforme el eje rotativo acelera, la fuerza centrípeta empuja la masa hacia afuera, lo que comprime el resorte, y de esta compresión se deriva la medida de velocidad rotacional [47].

Estructura Física:

■ Fuente de alimentación del sistema:

- **Cargador especializado:** Muchas compañías como Raspberry Pi y Arduino ofrecen transformadores especialmente diseñados para conectar sus productos directamente a una fuente de corriente CA [48].
- **Power Over Ethernet (PoE):** Protocolo de alimentación eléctrica respaldado por la norma IEEE 802.3af, como su nombre lo indica, este busca utilizar cables de Ethernet para transmitir un flujo de corriente directa por medio de un puerto Ethernet. Se desarrolló con la finalidad de estandarizar la alimentación de los diversos sistemas que se encuentran en una planta automatizada, y garantizar un flujo sin picos de tensión. Es de gran utilidad cuando se está trabajando con equipo sensible, o con sistemas complejos [49].

Transmisión y recepción de datos:

■ Tecnologías de comunicación:

- **WiFi:** Permite conexiones de alta velocidad de manera inalámbrica, a rangos medios. Tiene amplia disponibilidad en dispositivos modernos, y la información transferida es altamente resistente a interferencias. Sin embargo, su desempeño está directamente ligado a la calidad y ancho de banda de la conexión local [50].
- **Bluetooth:** Sumamente fácil de implementar, tanto por su baja complejidad como por su presencia universal en los dispositivos modernos. Dependiendo de su configuración, puede operar a muy grandes distancias, con un consumo muy bajo de energía. Sin embargo, este tiende a ser susceptible a interferencias externas [51].
- **Zigbee:** Estándar diseñado especialmente para aplicaciones de bajo consumo energético y bajo ancho de banda, con un énfasis en una comunicación en malla, donde todos los dispositivos en la red están conectados uno al otro, y busca homogeneizar la comunicación entre estos [52].
- **Ethernet:** Estándar alámbrico de muy alta velocidad, diseñado específicamente para aplicaciones industriales donde se busca comunicar y organizar un gran número de dispositivos [53]. Entre sus principales ventajas se encuentra su capacidad de coordinar la comunicación entre dispositivos de manera altamente eficiente, y su alta resistencia a interferencia en los datos, ya que transmite los mismos por medio de señalización diferencial [54].

Software e interfaz de usuario:

■ Lenguajes de programación:

-
- **Python:** Uno de los lenguajes de programación más utilizados en la industria, debido a su gran versatilidad y alta optimización [55]. Incluye librerías sumamente útiles para la manipulación de datos como lo son Pandas, Matplotlib, Nicegui, entre otras [56], así como muchas opciones y facilidad de uso para el usuario.
 - **VBA:** Este es el lenguaje de programación asociado con programas de Microsoft como Excel y Word, que permite crear funciones únicas para libros de Excel. Al utilizarse en conjunto a la funcionalidad de macros, permite realizar prácticamente cualquier operación sobre archivos tipo CSV [57].
 - **C++:** Sistema con énfasis en el uso de clases, de relativamente bajo nivel, que permite programar aplicaciones “client side” de cualquier naturaleza. Adicionalmente, las plataformas de Arduino utilizan una derivación de este lenguaje como base de su funcionamiento [58].

■ **Soluciones de software:**

- **Power Bi:** Sistema de Microsoft de gran utilidad para realizar análisis de datos y extracción de conclusiones, permite compartir “boards” hechos por el usuario a cualquier persona, independientemente [59].
- **Excel:** Producto de Microsoft Inc, capaz de almacenar, desplegar y manipular información en formato .CSV y .XLSX. Su facilidad de uso y compatibilidad con otros productos de diversas compañías lo posicionan como un elemento esencial en la industria.
- **Minitab:** Software utilizado ampliamente en la industria para analizar grandes bases de datos y obtener información estadística y probabilística [60].
- **Jupyter Notebooks/Google Colab:** Herramientas de alto nivel para poder ejecutar código de Python a alto nivel, donde el usuario no necesita conocimiento programático para ejecutar las secuencias de comandos. Es de gran utilidad a la hora de distribuir una solución de software, al minimizar la capacitación de usuario necesaria [61].

3.4.3. Búsqueda interna de soluciones

Una vez exploradas las opciones disponibles en el mercado, se deben complementar las mismas con ideas generadas por el diseñador, para así generar conceptos para todas las tareas propuestas.

Estructura Física:

■ **Materiales de la carcasa:**

- **Acrílico:** Mientras que su resistencia a la temperatura no es muy elevada, ya que solo resiste 90 °C antes de empezar a deformarse [62], este es muy barato

de reemplazar, y una cobertura lo suficientemente gruesa puede resguardar los componentes electrónicos de derrames de aceite. Además, tiene la ventaja adicional de que este se tiende a cortar de una sola pieza, lo que ayuda a evitar que el aceite se filtre por fisuras en la carcasa.

- **PLA:** Es el material más comúnmente utilizado en la impresión 3D por extrusión de filamento. Mientras que su estructura interna no es tan homogénea como la del acrílico, ya que se forma por manufactura aditiva, este posee una mayor resistencia a altas temperaturas, porque puede soportar hasta 190 °C antes de empezar a deformarse. Adicionalmente, debido a que se utiliza en la impresión en 3D, es posible fabricar una carcasa con geometría más especializada, con relativa facilidad [63].
- **Acero inoxidable:** De los materiales listados, es el de mayor resistencia y durabilidad ante impactos físicos. Sin embargo, tiene un alto costo de producción y manufactura, así como una alta conductividad térmica y eléctrica, lo que puede comprometer la integridad de los componentes electrónicos del sistema.

■ Fuente de alimentación del sistema:

- **Banco de energía portátil:** Debido a la poca utilidad que ofrecen las baterías químicas tradicionales, un banco de energía portátil de alto rendimiento presenta una opción atractiva, debido a que no se espera que las aplicaciones remotas del sistema requieran altas cantidades de tensión eléctrica para funcionar.

■ Sujeción de los sensores:

- **Extensión de los elementos rotativos:** Debido a la proximidad de los extremos de los ejes rotativos del freidor al aceite en la maquinaria, resulta altamente conveniente extender estos elementos por medio de una pieza impresa en 3D, o formada a través de una tubería metálica, y sujetas a los ejes por medio de una tenaza, pegamento o elemento afín, de tal manera que esta extensión comparta la velocidad de rotación del eje real. Esto permite mantener los sensores lejos del aceite, sin comprometer la captura de los datos.

Software e interfaz de usuario:

- **Desplegar los parámetros en la estación de recolección:** Resulta útil desplegar los parámetros instantáneos en una pantalla conectada a la estación de recolección, para permitir a los operarios monitorear y actuar rápidamente sobre el estado de la máquina.

3.4.4. Exploración sistemática

Tras haber recopilado información de tecnologías existentes, y realizar lluvia de ideas para conceptos en las secciones anteriores, se organizan todas las ideas y descubrimientos en árboles de clasificación, con el objetivo de tener un panorama claro en qué necesidad, métrica o subproblema estos resultan útiles.

Adicionalmente, el agrupar conceptos similares permite resaltar aquellos que son más atractivos o, por el contrario, aquellos que no tienen alguna utilidad real, incluso antes de asignarles puntuaciones a cada uno de estos. En las figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 se ilustran los árboles de decisión utilizados.

Captura de los parámetros:

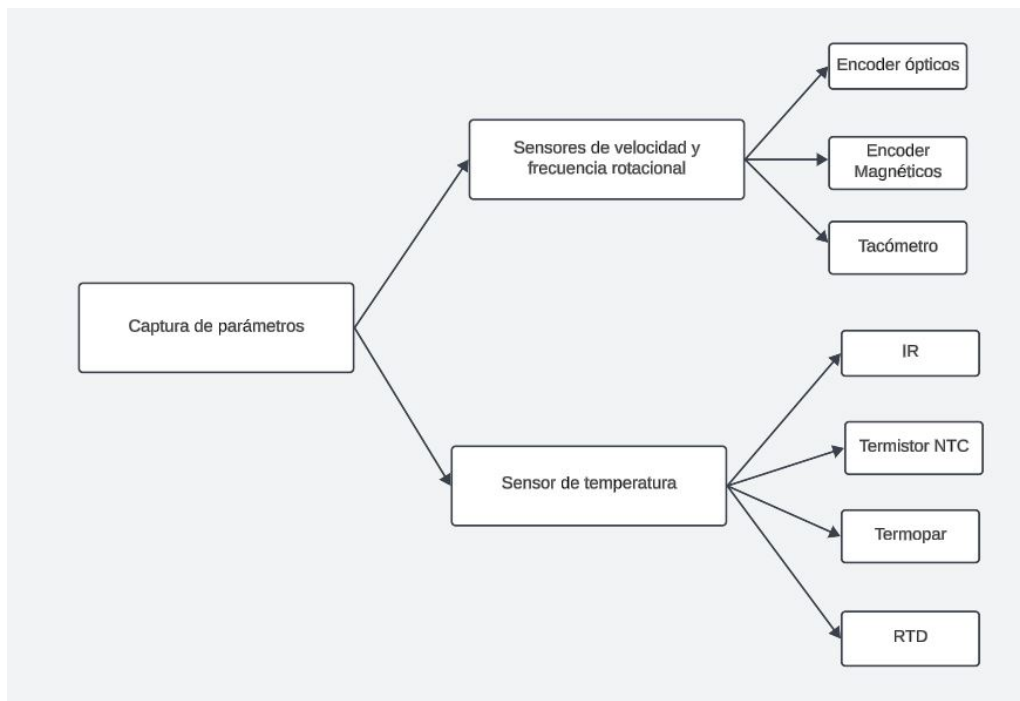


Figura 3.5: Diagrama de árbol para el subproblema de captura de los parámetros.

Al realizar una observación del árbol de clasificación de la captura de parámetros, solo se identifican a los sensores IR como la única opción no factible. Esto se debe a que es crítico medir la temperatura por debajo de la superficie del aceite de freír, que es algo que dicho sensor no es capaz de hacer [44].

Estructura física:

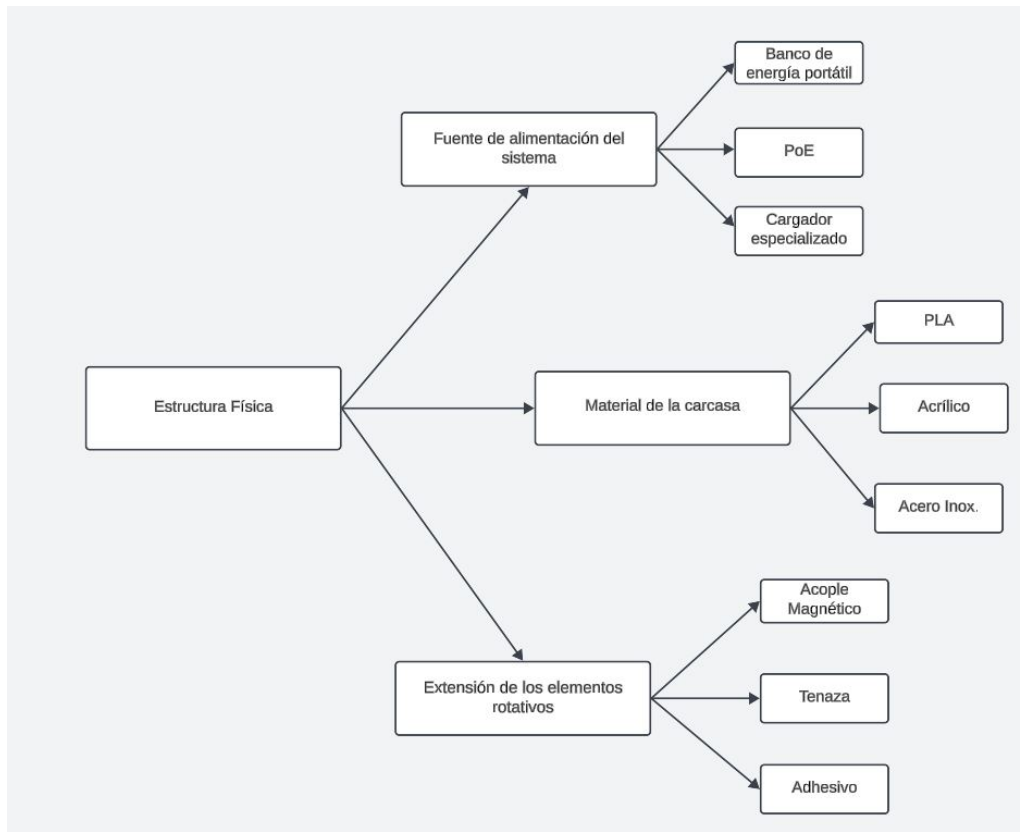


Figura 3.6: Diagrama de árbol para el subproblema de estructura física.

Según Palmetto Industries, las tres opciones presentadas para el material de la carcasa son seguras y aprobadas por la FDA para entrar en contacto con comida por tiempos prolongados [64]. Sin embargo, el acrílico resulta peligroso si se ve expuesto a altas temperaturas, pues libera tolueno, xileno y formaldehído, los cuales pueden fácilmente causar intoxicación en adultos [65]. Al considerar la información anterior, se decide eliminar al acrílico de los posibles candidatos para la carcasa.

Transmisión y recepción de datos:

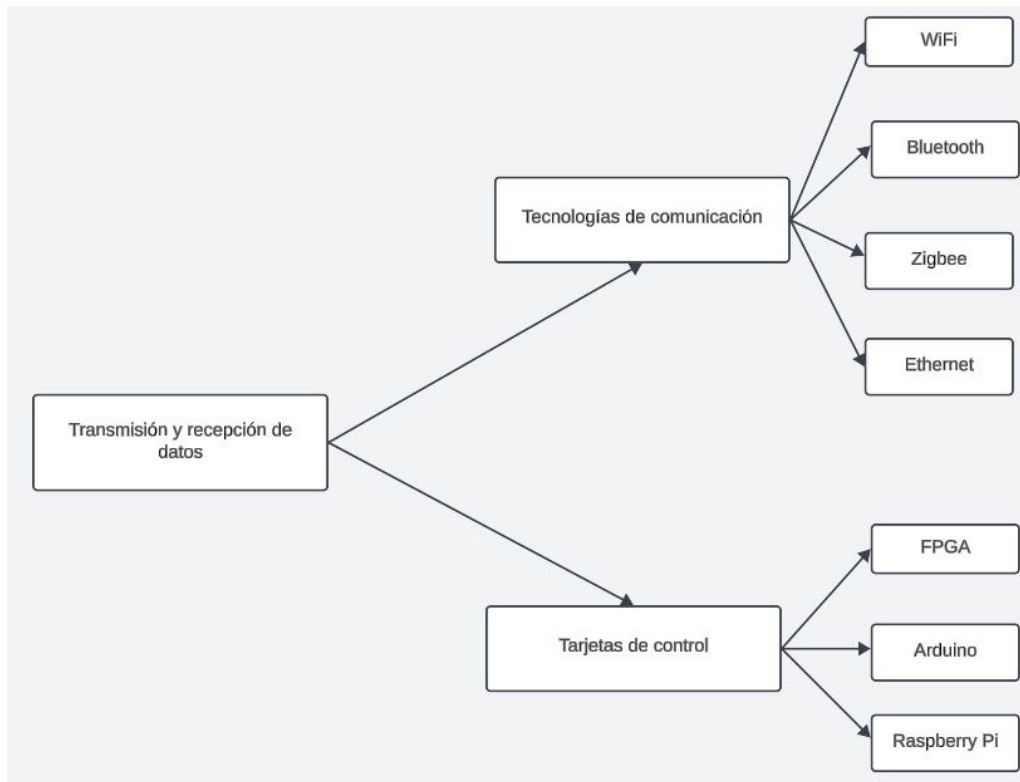


Figura 3.7: Diagrama de árbol para el subproblema de transmisión y recepción de datos.

A pesar de su amplio uso en IoT, el protocolo Zigbee no es apto para aplicaciones que requieran velocidades mayores a 250 kbits por segundo [66], por lo que no se ajusta a las métricas propuestas en la sección 3.3.3. Como consecuencia, se elimina de las tecnologías a considerar para el concepto final.

Software e interfaz de usuario:

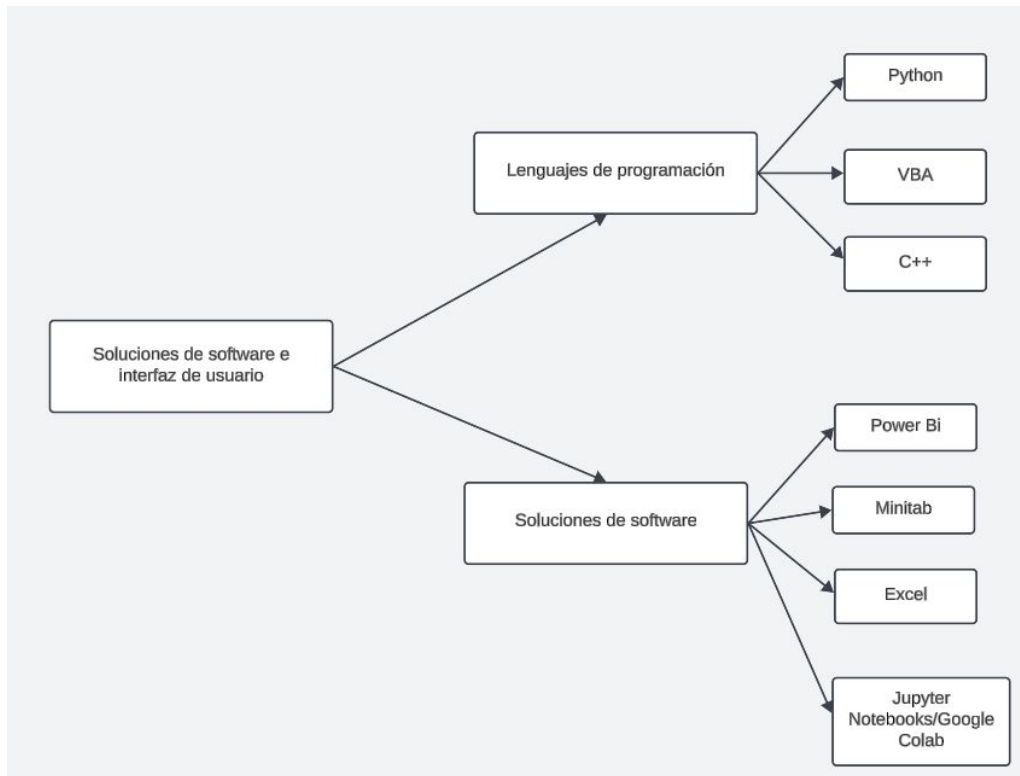


Figura 3.8: Diagrama de árbol para el subproblema de software e interfaz de usuario.

Al analizar más a profundidad los puntos resaltados en la figura 3.9, se identifican dos puntos a descartar:

- Minitab se descarta, debido a su mayor complejidad de uso. Mientras este software permite realizar análisis estadístico detallado de los datos recolectados, esto se puede lograr de manera automatizada con secuencias de código de Python, por lo que se considera redundante [67].
- Jupyter Notebooks se descarta por razones similares, ya que el usuario no tiene la necesidad de interactuar directamente con el código. Además, este es un medio poco seguro, sin control de versión, que podría llevar a modificaciones accidentales del código por parte de un operador no experto.

3.4.5. Combinar conceptos

Una vez descartadas las opciones que no resultan prácticas o factibles en el contexto del sistema a diseñar, se agrupan aquellos conceptos restantes para cada tarea, mostrado en el cuadro 3.3, para crear un concepto holístico para la solución de la problemática del proyecto.

Cuadro 3.3: Combinación de conceptos.

Sensor de temperatura	Sensor de rotativo	Tarjeta de control	Alimentación	Material de la carcasa	Comunicación	Software	Lenguajes	Acople de sensores
Termopar Termistor NTC Sensor RTD	Encoder Magnético Encoder óptico Tacómetro	FPGA Arduino Raspberry Pi	Cargador PoE Banco portátil	Acero inoxidable PLA	WiFi Bluetooth Ethernet	Power Bi Excel	Python VBA C++	Tenaza extensora Adhesivo Acople magnético

Usando combinatoria básica, considerando que 7 de las categorías contienen 3 opciones, y el resto de ellas contienen 2, se puede encontrar que el número de conceptos finales posibles es $3^7 * 2 = 8748$, por lo que resulta imposible explorarlos todos. Debido a esto, se utilizó el criterio del diseñador para generar 6 candidatos a concepto final.

La compatibilidad entre tecnologías es una consideración cuya importancia no se debe minimizar. Como ejemplo, no tiene mucho sentido utilizar PoE como fuente de energía para el sistema, si no se pretende utilizar Ethernet como tecnología de transmisión de datos. De manera similar, no es posible utilizar VBA como lenguaje de programación para un FPGA.

Un acercamiento opuesto, pero igualmente válido, es tomar tecnologías que funcionen bien juntas. Utilizar Python como lenguaje de programación para un sistema que también utilice una Raspberry Pi es una decisión segura, pues utilizar este lenguaje de programación para recibir los datos enviados por la Raspberry Pi puede evitar muchos problemas de compatibilidad.

Adicionalmente, se toma la interpretación de Ulrich y Eppinger de esta tabla para justificar un acercamiento subjetivo por parte del diseñador: “De cierta forma, la tabla de combinación es simplemente una manera de hacer asociaciones forzadas entre fragmentos para estimular más el pensamiento creativo; el mero acto de seleccionar una combinación de ningún modo dará una solución completa.” [5]

Tomando lo anteriormente planteado en cuenta, se generara el cuadro 3.4:

Cuadro 3.4: Candidatos generados por medio del cuadro de combinación de conceptos.

Concepto	Sensores	Tarjeta de control	Alimentación	Comunicación	Software	Lenguajes	Acople de sensores	Material
A	Termopar y encoder óptico	FPGA	PoE	Ethernet	Power Bi	VBA	Acople magnético	PLA
B	Termopar y tacómetro	Raspberry Pi	PoE	Ethernet	Power Bi	VBA	Tenaza extensora	Acero inoxidable
C	Termistor NTC y tacómetro	Arduino	Cargador Especializado	Bluetooth	Power Bi	Python	Acople magnético	PLA
D	Sensor RTD y encoder magnético	Raspberry Pi	Cargador Especializado	WiFi	Excel	Python	Acople magnético	Acero inoxidable
E	Termistor NTC y encoder magnético	FPGA	PoE	Ethernet	Excel	C++	Adhesivo	PLA
F	Sensor RTD y encoder óptico	Arduino	Banco de energía portátil	WiFi	Excel	C++	Adhesivo	Acero inoxidable

3.5. Selección del concepto

Una vez establecidos los diferentes conceptos que representan una posible solución a las necesidades del cliente, se escoge uno de estos, o una mezcla entre los mejores atributos de diferentes opciones.

Esta selección se da en dos etapas:

- **Filtrado:** Se lleva a cabo por medio de la matriz de selección de conceptos. Su objetivo es evaluar el desempeño de cada opción en cada subproblema dado, con relación a uno de los conceptos tomados como referencia. Por medio de un sistema de puntajes relativos, se eliminan los conceptos con menor desempeño relativo.
- **Evaluación:** Se crea una matriz similar a la de selección de conceptos, pero solo se toman en cuenta los conceptos de mejor desempeño en la etapa de filtrado, y se le asigna un peso a cada criterio de selección, basado en la importancia que le asignó el cliente a cada necesidad en la sección 3.2.3. Por último, se aplica una calificación en una escala del 0 al 10 a cada criterio. Esta escala se utiliza de manera relativa, pues su objetivo es evaluar los criterios entre sí. Un valor de referencia de 5 representa el criterio base; si a un punto en cuestión se le asigna un valor mayor a 5, esto representa que su desempeño relativo es mayor al del punto de referencia. Por último, se tabulan los resultados para encontrar el concepto ganador.

Para una descripción más detallada de este proceso, se recomienda al lector leer el capítulo 8 del "Diseño y desarrollo de productos 5ta edición", Ulrich y Eppinger [5].

3.5.1. Matrices de selección de conceptos

En los cuadros 3.5, 3.6, 3.7, y 3.8, se muestran las matrices de evaluación para cada concepto, separadas en cada subproblema a atacar, mientras que en el cuadro 3.9 se muestra el resultado de la evaluación.

Es importante aclarar que no se evalúan todas las necesidades planteadas, ya que algunas son agnósticas al concepto elegido. Un ejemplo es el límite de desviación de temperatura del aceite, el cual se debe solventar en la implementación específica de la solución.

Cuadro 3.5: Matriz de selección para el subproblema de estructura física del sistema.

Estructura Física	Concepto					
	A	B (referencia)	C	D	E	F
Criterio de selección						
Resistencia a temperatura de la carcasa	+	0	+	0	+	0
Dimensiones del punto de recolección	0	0	0	0	0	-
Horas de operación de la fuente de alimentación	0	0	0	0	0	-
Durabilidad del acople de sensores	+	0	+	+	-	-
Evaluación	2	0	2	1	0	-3

Cuadro 3.6: Matriz de selección para el subproblema de transmisión y recepción de datos.

Transmisión y recepción de datos	Concepto					
Criterio de selección	A	B	C	D	E (referencia)	F
Almacenamiento del contenido de los datos	0	0	-	0	0	0
Velocidad de transmisión de datos	0	0	-	-	0	-
Funcionamiento en la arquitectura de la planta	0	0	+	+	0	+
Capacidad de procesamiento	0	+	-	+	0	-
Evaluación	0	1	-2	1	0	-1

Cuadro 3.7: Matriz de selección para el subproblema de software e interfaz.

Software e interfaz	Concepto					
Criterio de selección	A	B	C	D (referencia)	E	F
Tiempo en desplegar estado	-	-	0	0	0	0
Facilidad de uso	+	+	0	0	-	0
Compatibilidad entre tecnologías	-	-	-	0	0	0
Capacidad de automatización	-	-	-	0	0	0
Evaluación	-2	-2	-1	0	-1	0

Cuadro 3.8: Matriz de selección para el subproblema de captura de parámetros.

Captura de parámetros y sensores	Concepto					
Criterio de selección	A (referencia)	B	C	D	E	F
Incertidumbre del sensor de temperatura	0	0	+	+	+	+
Incertidumbre de los sensores rotativos	0	-	-	-	-	0
Facilidad de acondicionar	0	-	-	0	0	0
Resistencia a temperatura del termo sensor	0	0	-	+	-	+
Resistencia a factores ambientales de sensores rotativos	0	+	+	+	+	0
Evaluación	0	-1	-2	2	0	2

Cuadro 3.9: Resultados de cada concepto basado en las matrices de selección.

Concepto	A	B	C	D	E	F
Puntaje total	0	-2	-3	4	-1	-2
Posición	2	4	5	1	3	4
¿Continuar?	Combinar	No	No	Sí	Combinar	No

Como se puede observar en el cuadro 3.9, el concepto D es el que mayor puntuación obtuvo, seguido por el A y el E. Debido a esto, se opta por descartar los conceptos B, C, y F. Se decide combinar los conceptos A y E, de tal manera que se combinen los mejores atributos de cada uno, de la siguiente manera, mostrada en el cuadro 3.10:

Cuadro 3.10: Concepto híbrido creado a partir de las opciones A y E.

Concepto	Sensores	Tarjeta de control	Alimentación	Comunicación	Software	Lenguajes	Acople de sensores	Material
AE	Sensor NTC y encoder óptico	FPGA	PoE	Ethernet	Excel	C++	Acople magnético	PLA

La selección de cuáles tecnologías e ideas usar en el concepto AE se tomaron según dos criterios; primero, si ambos conceptos comparten una tecnología, esta es transferida a AE, mientras que para aquellas que presentan diferencias, se escoge la que minimice la intersección con el concepto D.

Una vez realizado esto, se proceda a evaluar el concepto D contra el AE.

3.5.2. Evaluación de conceptos

Con el fin de mantener la consistencia del análisis, se utiliza el concepto AE como referencia, por lo que su calificación es de 5 en todos los aspectos, y el concepto D se evalúa relativo a estos.

Se utiliza un proceso similar a la primera evaluación, que se desarrolla en los cuadros 3.11, 3.12, 3.13, y 3.14.

El peso relativo de cada criterio de selección se derivó de las calificaciones que el cliente asignó a cada necesidad. La suma de sus porcentajes de peso debe ser 1, (o 100%), el valor exacto del peso se calculo al asignar el valor de importancia dado por el cliente a cada criterio y normalizar los valores.

Cuadro 3.11: Matriz de evaluación para el subproblema de la estructura física del sistema.

Estructura Física		Concepto			
Criterio de Selección	Peso	D	Calificación	AE	Calificación
Resistencia a temperatura de la carcasa	0.23	4	0.92	5	1.15
Dimensiones del punto de recolección	0.23	5	1.15	5	1.15
Horas de operación de la fuente de alimentación	0.23	5	1.15	5	1.15
Durabilidad del acople de sensores	0.31	7	2.17	5	1.55
Total			5.39		5

Cuadro 3.12: Matriz de evaluación para el subproblema de la transmisión y recepción de datos.

Transmisión y recepción de datos		Concepto			
Criterio de selección	Peso	D	Calificación	AE	Calificación
Almacenamiento del contenido de los datos	0.29	5	1.45	5	1.45
Velocidad de transmisión de datos	0.18	3	0.54	5	0.9
Funcionamiento en la arquitectura de la planta	0.29	6	1.74	5	1.45
Capacidad de procesamiento	0.24	7	1.68	5	1.2
Total			5.41		5

Cuadro 3.13: Matriz de evaluación para el subproblema de software e interfaz.

Software e interfaz		Concepto			
Criterio de selección	Peso	D	Calificación	AE	Calificación
Tiempo en desplegar estado	0.24	5	1.2	5	1.2
Facilidad de uso	0.18	6	1.08	5	0.9
Compatibilidad entre tecnologías	0.29	5	1.45	5	1.45
Capacidad de automatización	0.29	5	1.45	5	1.45
Total			5.18		5

Cuadro 3.14: Matriz de evaluación para el subproblema de captura de parámetros.

Captura de parámetros y sensores		Concepto			
Criterio de selección	Peso	D	Calificación	AE	Calificación
Incertidumbre del sensor de temperatura	0.21	6	1.26	5	1.05
Incertidumbre de los sensores rotativos	0.21	3	0.63	5	1.05
Facilidad de acondicionar	0.16	5	0.8	5	0.8
Resistencia a temperatura del termo sensor	0.21	4	0.84	5	1.05
Resistencia a factores ambientales de sensores rotativos	0.21	7	1.47	5	1.05
Total			5		5

3.5.3. Selección del concepto ganador

Al tomar en cuenta los resultados de los cuadros 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14, es claro que el concepto D es ligeramente más adecuado que el AE, ya que este primero obtuvo 20,98 puntos, mientras que el segundo solo obtuvo 20 puntos.

Debido a esto, se elige al concepto D como concepto ganador, el cual es desarrollado en el capítulo 4, que corresponde a la propuesta de diseño, para el cual se crea un diagrama ilustrativo, presente en la figura 3.9.

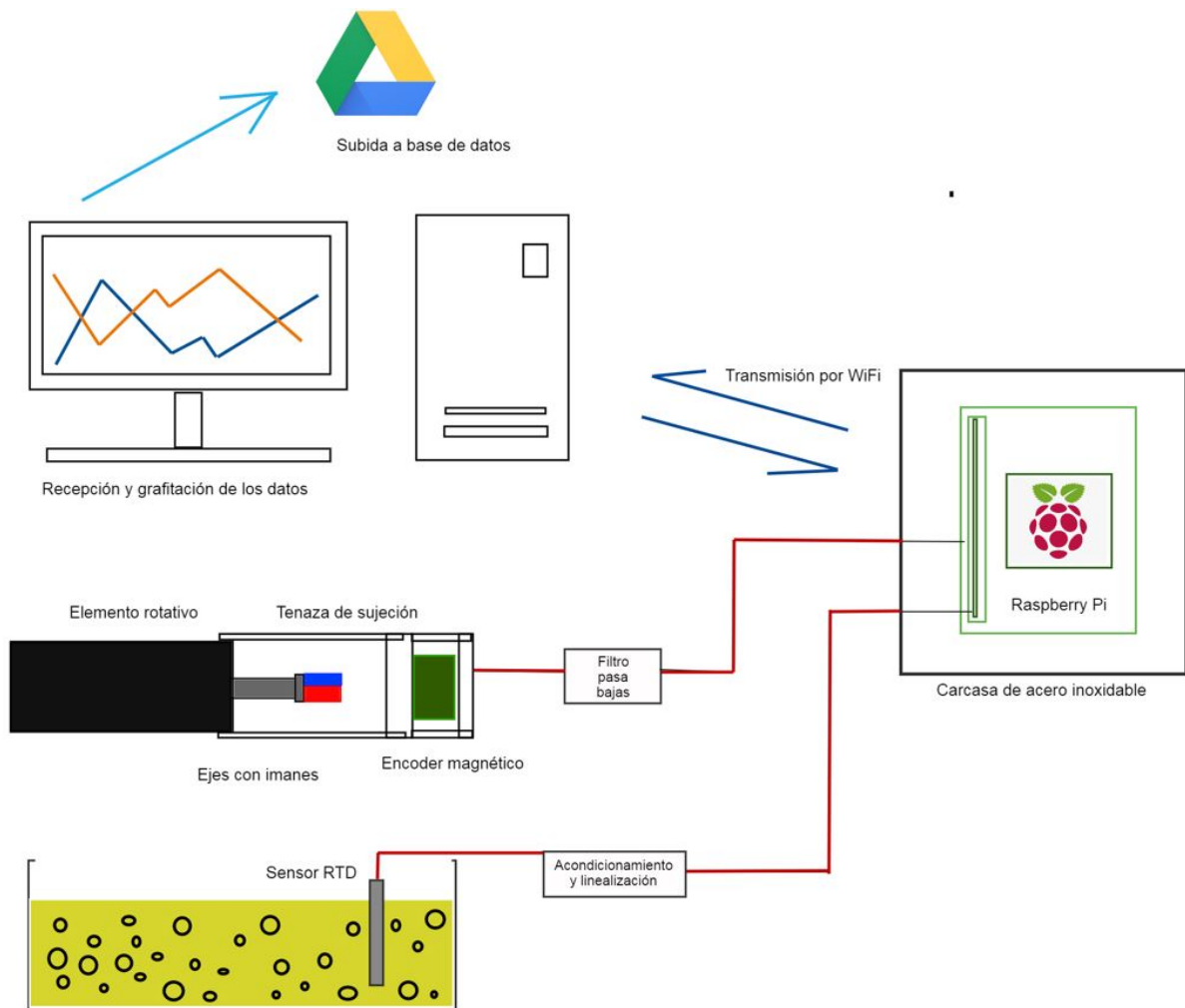


Figura 3.9: Bosquejo del concepto ganador.

3.5.4. Viabilidad de la Raspberry Pi en un ambiente industrial

Mientras que se justifica la selección del concepto por medio de las matrices de selección, resulta importante resaltar las razones por las que se le asignó las calificaciones anteriores a la Raspberry Pi.

Mientras que una FPGA o un PLC resulta una elección más robusta y ajustada a implementaciones industriales, el cliente expresó que no hay personal capacitado para mantener, utilizar o programar un sistema de dicha índole [3].

Por otro lado, una Raspberry Pi es relativamente fácil de utilizar, ya que efectivamente se puede usar como una computadora de escritorio, y tanto el sistema operativo como los programas necesarios para la ejecución de la solución pueden ser instalados por una llave USB [68], lo cual permite a cualquier persona realizar una instalación o reparación con mínimo aprendizaje.

En cuanto a durabilidad dentro del ambiente industrial, el diseño de la carcasa está orientado a proteger al controlador y sus puntos de conexión contra partículas, líquidos y exposición directa a altas temperaturas.

En resumen, utilizar una Raspberry Pi permite una mayor accesibilidad al usuario, una elevada capacidad de procesamiento en relación a su costo, y su durabilidad puede ser suplementada por un diseño adecuado del sistema de protección.

3.6. Variables y Pruebas de validación

Como lo explica J. Crespo, previo a generar las pruebas de validación, es necesario establecer objetivos a partir de las necesidades del cliente, y definir variables a medir con base en las especificaciones, las cuales se pueden encontrar en las secciones 3.2.2 y 3.3.1 de este documento, respectivamente.

Seguidamente, se utilizan los objetivos y variables para definir factores de influencia, los cuales representan lo que se busca verificar o medir durante las pruebas de validación.

Es importante notar que no todas las métricas planteadas pueden ser validadas por medio de pruebas. Un ejemplo de esto es la métrica 1: “Presencia de sensores rotativos y de temperatura”, la cual se cumple con incluir los sensores en el diseño de la solución. Como consecuencia, no se consideran necesarias las pruebas de validación para las siguientes métricas:

- Métrica 1: “Presencia de sensores rotativos y de temperatura”, ya que solo requiere presencia de los sensores.
- Métrica 8 y 9: “Temperatura de operación máxima de los sensores rotativos”, ya que esta información se puede obtener con mayor confiabilidad al examinar las hojas de datos de los fabricantes respectivos.
- Métrica 11: “Presencia de mapeo de voltaje de operación a frecuencia de rotación”, ya que solo requiere presencia del mapeo entre ambos parámetros.
- Métrica 13: “Compatibilidad con norma ISO 22000 y seguridad interna de PRO”, debido a que no hay pruebas numéricas definidas por la norma ISO 22000, ni por los manuales de seguridad del freidor #5, la validación se dará al cumplir con los requerimientos cualitativos establecidos en ambos documentos.
- Métrica 14: “Temperatura máxima que resiste la carcasa”, de manera similar a los sensores, es más factible y seguro utilizar la información existente sobre el material que compone la carcasa.
- Métrica 17: “Tiempo promedio de entrega de componentes”, mientras que no se puede cuantificar de la misma manera que el resto de pruebas, se realiza una compra de

componentes utilizados para el prototipo, se tabulan los tiempos de entrega. Además, se crea un inventario de repuestos recomendado.

- Métrica 20: “Costo estimado de un modelo funcional”, por la naturaleza de la necesidad, una prueba experimental no es requerida, sin embargo, se crea un inventario de los componentes principales del diseño final del sistema, y su costo estimado, desglosado por cada componente.

3.6.1. Definición de variables a medir

Ya que los objetivos del presente proyecto se plantearon con anterioridad, y que las métricas establecidas son un reflejo directo de las necesidades del cliente, se opta por no incluir una asociación directa entre necesidades y objetivos, porque se considera redundante. Por otra parte, las variables a medir y sus especificaciones correspondientes se presentan en el cuadro 3.15:

Cuadro 3.15: Especificaciones planteadas y sus variables a medir en las pruebas de validación.

Especificación	Variable a medir
Almacenamiento del contenido de los datos durante su recorrido	Porcentaje de los datos capturados correctamente
Incertidumbre de las medidas del sensor de temperatura	Desviación estándar de las medidas de temperatura
Incertidumbre de las medidas de los sensores de rotativos	Desviación estándar de las medidas de los elementos rotativos
Frecuencia de cargas a la base de datos	Periodicidad de carga de los datos
Tiempo en desplegar estado al graficador	Tiempo entre captura del dato y su despliegue en el gráfico
Límite de temperatura para desplegar alarma	Desviación mínima necesaria para levantar la alarma
Periodicidad promedio de mantenimiento de sensores rotativos	Grados IP y Ciclos de trabajo del sensor
Error entre tiempo de residencia real y medido	Diferencia entre el tiempo teórico calculado y el reportado por el sistema, para una frecuencia dada
Tiempo promedio de montaje/desmontaje	Tiempo promedio en conectar y desconectar la carcasa y los acoples
Tiempo en capacitar nuevo operario en uso del sistema	Horas del plan de aprendizaje planteado
Confianza de las medidas rotativas y de temperatura	Confianza matemática de las medidas

3.6.2. Factores de Influencia

El siguiente paso es proponer los factores de influencia en sí. La razón por la que se redactan es debido a que son de gran utilidad al orientar el desarrollo de las pruebas de validación, ya que describen los factores que afectan las variables, dichos factores se pueden modificar para observar cómo su variación afecta el cumplimiento de las especificaciones, su relación se puede observar en el cuadro 3.16.

Cuadro 3.16: Factores de influencia y sus variables relacionadas

Variable a medir	Factores de influencia
Porcentaje de los datos capturados correctamente	Eficacia de transferencia en la cadena de transporte de datos
Incertidumbre acumulada de las medidas de temperatura	Incertidumbre de las medidas de temperatura
Incertidumbre acumulada de las medidas de los elementos rotativos	Incertidumbre de las medidas de elementos rotativos
Periodicidad de carga de los datos	Velocidad de procesamiento de datos en la terminal receptora
Tiempo entre captura del dato y su despliegue en el gráfico	Tiempo total en procesar una serie de datos “end-to-end”
Desviación mínima necesaria para levantar la alarma	Levantamiento de alarma
Grados IP y Ciclos de trabajo del sensor	Tiempo ante fallas eléctricas o mecánicas
Diferencia entre el tiempo teórico calculado y el reportado por el sistema, para una frecuencia dada	Error matemático en los procesos de manipulación de los datos
Tiempo promedio en conectar y desconectar la carcasa y los acoples	Complejidad de las conexiones del sistema
Horas del plan de aprendizaje planteado	Complejidad del sistema e interfaz de usuario
Confianza matemática de las medidas	Variabilidad estadística, y probabilidad de que la medida tomada sea una medición real

3.6.3. Número de muestras requeridas

Previo a estipular las pruebas de validación, es importante definir el número de muestras que se considera estadísticamente válido al tomar mediciones con los sensores. Un número bajo de muestras puede llevar a que los resultados de las pruebas no sean representativos, mientras que si el número de muestras es muy elevado, la ejecución de las pruebas resulta poco práctica.

Para llegar a un número satisfactorio, se utiliza una de las fórmulas de tamaño de muestra sugeridas por J.A. García-García [69]:

$$n = \frac{Z * \sigma}{E} \quad (3.1)$$

Donde:

- **Z** es el valor asociado a la confiabilidad deseada.
- σ es el valor de la desviación estándar.
- **E** es el margen de error aceptable.

Para determinar los valores usados en la ecuación 3.1, se utilizan varios criterios:

- Como en el proyecto se desea una confiabilidad del 95 %, el valor de Z utilizado es de 1.96 [70].
- El valor de E se toma directamente de las necesidades del cliente, donde este es 0.5 para las medidas de temperatura y 0.3 para las medidas de frecuencia de rotación.

La desviación estándar se estima con la fórmula basada en rangos [71], que utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{Rango}{6} \quad (3.2)$$

Donde el rango experimental es de 60 °C para las medidas de temperatura y 30 Hz para las medidas de frecuencia rotativa. Los valores de los rangos se seleccionan con base en la variación esperada dentro de la preparación de producto en la empresa del cliente, con un margen adicional [11].

Por lo tanto:

$$\sigma_{temperatura} = \frac{60}{6} = 10 \quad (3.3)$$

$$\sigma_{frecuencia} = \frac{30}{6} = 5 \quad (3.4)$$

$$n_{temperatura} = \frac{1,96 \times 10}{0,5} = 39,2 \approx 40 \quad (3.5)$$

$$n_{\text{frecuencia}} = \frac{1,96 \times 5}{0,3} = 32,67 \approx 33 \quad (3.6)$$

Por lo tanto, se toman 40 muestras de temperatura y 33 de frecuencia rotativa para cada rango de prueba.

3.6.4. Ajustes necesarios para las pruebas de validación

Debido a la naturaleza del proyecto, así como a restricciones de presupuesto, tiempo, y dificultades para acceder a la planta de producción, las pruebas de validación se deben dar bajo condiciones y con sensores diferentes a los establecidos en el diseño final.

Para la validación por medio del prototipo, se realizan los siguientes cambios:

- Se intercambia el sensor de temperatura **RTD** de tres hilos por un sensor **DS18B20** con linealización integrada. Para compensar la diferencia en los circuitos de acondicionamiento y linealización entre los sensores, el funcionamiento del circuito diseñado para el sensor RTD se valida por medio de simulaciones en realizadas con una licencia de prueba gratuita del software Proteus lab V8.
- Ya que no se tiene acceso de manera segura a aceite a altas temperaturas, se realizan las pruebas de medición de temperatura con agua a temperaturas considerablemente menores (de 20 °C a aproximadamente 80 °C). Gracias a los circuitos de linealización y acondicionamiento, un cambio en el rango de la temperatura no afecta la precisión del sensor.
- Para realizar las pruebas relacionadas a la medición de la frecuencia de rotación, se coloca un encoder de cuadratura magnético, cuyas salidas no difieren del sensor AS5600S [72]. Dicho sensor se conecta a un motor DC con un controlador L298N. La configuración mencionada permite inducir una velocidad de rotación al motor por medio del controlador, lo que provee un punto de comparación teórico a la medición realizada por el encoder.

3.6.5. Pruebas de validación

Se proponen las siguientes pruebas para validar el funcionamiento del sistema:

- Debido a su compatibilidad, se realiza una misma prueba de validación para los siguientes factores de influencia:
 - **Eficacia de transferencia en la cadena de transporte de datos**
 - **Velocidad de procesamiento de datos en la terminal receptora**
 - **Tiempo total en procesar una serie de datos “end-to-end”**
 - **Velocidad de transmisión desde la estación de procesamiento**

-
- **Prueba general de integridad, tiempo de despliegue, y frecuencia de subida:** Se generan series de datos correspondientes a 15, 30, y 60 minutos del régimen de trabajo, se alimentan las mismas a la terminal de recolección como si fueran datos tomados de sensores, y se monitorea su ingreso e integridad en la estación receptora, donde se marcan aquellas entradas o series con errores, para calcular el porcentaje de defectos.

Paralelo a la transmisión de los datos, se almacena y calcula el tiempo de procesamiento en cada etapa: Procesamiento en estación de recolección, envío de los datos a estación receptora, y tiempo en procesar y desplegar los datos en el gráfico de monitoreo. Se obtiene un tiempo promedio para cada etapa, así como un tiempo promedio total.

- **Incertidumbre de las medidas de temperatura:** Se toma una serie de 40 mediciones de temperatura de agua a 20, 40, 60, y 80 °C con el sensor de temperatura, se anotan las mediciones, se calcula su desviación estándar, y se compara su porcentaje de error con respecto a un termómetro de alimentos especializado.
- **Incertidumbre de las medidas de elementos rotativos:** Se conecta el sensor a un motor DC con un controlador capaz de variar y monitorear precisamente su velocidad. Se varía la frecuencia de rotación del motor de 0 a 30 Hz, en intervalos de 5 Hz. Se registran 33 medidas para cada intervalo por medio de un encoder de cuadratura, se calcula su desviación estándar, y se comparan a la frecuencia de rotación teórica del motor.
- **Levantamiento de alarma:** Se envía una paquete de datos con 12 desviaciones de 3, 5, 8, y 10 °C de la temperatura deseada de 28 °C al software de graficación y se anota cuantos de los puntos enviados levantan una alarma cuando se superan los 5 °C de separación.
- **Tiempo ante fallas eléctricas o mecánicas:** Se realiza una comparación de los grados IP de los sensores a las condiciones ambientales de la planta, y se realizan cálculos de por cuántos regímenes de trabajo de la empresa pueden operar los sensores basados en un estimado de revoluciones aproximadas.
- **Diferencia entre el tiempo de residencia teórico calculado y el reportado por el sistema, para una frecuencia dada:** Se calcula el tiempo de residencia teórico por medio de la longitud de la banda transportadora, y la longitud del área de fritura a una velocidad de rotación dada, de 0 a 30 Hz, en intervalos de 5 Hz. Seguidamente, se toman 33 muestras del tiempo de residencia reportado en cada una de estas frecuencias. Finalmente, se calcula el porcentaje de error en relación al tiempo de residencia teórico.

-
- **Complejidad de las conexiones del sistema:** Se envía una encuesta a 5 de los operarios de mantenimiento de la planta, en la cual se detallan todos los puntos de interacción entre el sistema diseñado y la freidora #5, donde se califica en una escala del 1 al 10: la complejidad percibida de los puntos de interacción, el nivel de interferencia que presentan los puntos de interacción con las tareas regulares de mantenimiento, y el nivel de habilidad percibido necesario para interactuar con el sistema.
 - **Dimensiones del punto de recolección de datos:** Se verifican las dimensiones externas de la carcasa y se comparan a los volúmenes aceptables establecidos.
 - **Complejidad del sistema e interfaz de usuario:** Tras crear un manual de usuario, y un plan de capacitación, se envía una copia a 3 operarios, y se les pide llenar una encuesta en la que califiquen en una escala del 1 al 10 la comprensibilidad del documento, además, se envía un cuestionario donde se les pregunte aspectos básicos de la utilización del sistema.
 - **Confianza matemática de las medidas:** Se realizan los cálculos del intervalo de confianza, para una confiabilidad de 95 % para 40 observaciones, la media y desviación estándar de estas medidas se calcula por medio de software estadístico. Las medidas se toman de 0 a 30 Hz, en intervalos de 5 Hz de separación para los sensores rotativos, y para una temperatura teórica de agua de 20, 40, 60, y 80 °C para el sensor de temperatura. Una vez calculado el intervalo de confianza para cada uno de los parámetros mencionados anteriormente, se realizan 40 mediciones manualmente con el sistema bajo las mismas condiciones, y se corrobora que las medidas se encuentren dentro del intervalo de confianza correspondiente.

Capítulo 4

Propuesta de diseño

4.1. Puntos de mejoría encontrados en prácticas empresariales

A través del desarrollo de la investigación y diseño del presente proyecto, se han identificado un número de oportunidades de mejora en cómo el Grupo PRO maneja la trazabilidad en su planta de Costa Rica. Mientras que algunas de las propuestas a continuación son tomadas en cuenta por el sistema propuesto, se incluyen de todas maneras ya que son fundamentales para entender la filosofía de diseño del sistema, así como para inspirar cambios a futuro en la empresa.

Los aspectos cubiertos a continuación representan cambios en la estructura administrativa y el manejo de la información. Se presentan juntos debido a la fuerte interrelación que existe entre ambos.

- Mientras que la información se guarda en archiveros en forma cronológica, este sistema no siempre se sigue, lo que causa pérdida de los archivos. Se recomienda también organizar los archivos por tipo de producto y máquina en la cual se procesan.
- Utilizar un sistema de indexación robusto facilitaría la búsqueda, organización y escalabilidad de la base de datos de la empresa. El libro “Indexing Techniques for Advanced Database Systems (Advances in Database Systems, 8)” [73] provee muchas técnicas sobre cómo organizar bases de datos físicas y digitales de manera efectiva e intuitiva.
- Capacitar a los colaboradores de la planta para mantener una base de conocimiento que esté al día con las soluciones tecnológicas implementadas, ya que las mejoras tecnológicas solo son efectivas si son utilizadas de manera correcta.
- La práctica de tomar medidas del estado de la máquina cada 30 minutos es solo parcialmente efectiva. Aunque permite una organización cronológica directa de la in-

formación, no diferencia entre turnos de trabajo, lotes de producción u órdenes de trabajo. Se recomienda seccionar o clasificar la producción en lotes y asignar un código o algún otro tipo de nomenclatura a cada lote. Al combinarlo con una indexación más navegable, como se mencionó anteriormente, el cambio ayuda a almacenar y encontrar el archivo deseado con mucha mayor rapidez.

- El hecho de que los colaboradores escriban a mano los parámetros de la maquinaria resulta ineficiente, ya que la transcripción de ellos es susceptible a error humano, y los archivos en sí pueden ser alterados sin ninguna manera de rastrear o verificar la objetividad de la información, lo cual invalida el proceso actual como un sistema de trazabilidad efectivo.

4.2. Diagnóstico de las señales y actuadores de la máquina freidora

Adicionalmente a las prácticas administrativas, hay un número de características subóptimas en el equipo de la planta:

- **Sensor de temperatura:** A pesar de que utilizar una termocupla como sensor de temperatura, como es el caso en la freidora, es común en la industria alimenticia, el cliente ha reportado una incertidumbre aproximada de $\pm 4^\circ\text{C}$ [3], y la interfaz de usuario posee una incertidumbre de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Por medio de la teoría de mediciones, se puede utilizar la ecuación 4.1 [74] para determinar que la incertidumbre total de la medición es de $\pm 4.001^\circ\text{C}$, lo cual resulta inaceptable, ya que la desviación máxima de la temperatura del aceite que se considera aceptable es de $\pm 5^\circ\text{C}$, y la cifra de la incertidumbre causa que el más mínimo error pueda sacar al aceite de su rango de trabajo aceptable sin que el registro muestre anomalías. Por lo tanto, el sensor de temperatura original de la maquinaria no es adecuado para el uso en el freidor.

$$u_{total} = \sqrt{u_{sensor}^2 + u_{captura}^2} \quad (4.1)$$

- **Medición de frecuencia de elementos rotativos:** Mientras que el panel de control de la máquina freidora tiene perillas para controlar la velocidad de rotación de las mallas, la cortadora y las paletas, no se conoce la frecuencia ni la velocidad a la que operan en un momento dado. La razón es que las perillas son solamente un potenciómetro conectado a un divisor de tensión, que controla el porcentaje de tensión eléctrica que se aplica al circuito de los elementos rotativos. Los elementos rotativos están alimentados por una fuente de 180 VCD, y su frecuencia se estima por medio del porcentaje de su frecuencia de operación máxima basado en el régimen de trabajo del divisor de tensión a estos 180 VCD.

Se llega a tal punto que el valor que los operarios escriben en la hoja de trazabilidad no es la frecuencia de rotación, sino la posición de la perilla.

El detrimento de realizar la medición de esta manera es claro cuando se toma en cuenta que cada producto tiene un tiempo de residencia, velocidad de corte y de agitación específicos (ver la sección 2.3.1 para los valores específicos de operación para cada producto).

- **Estimación del tiempo de residencia:** Como se explica en la sección 2.1, el tiempo de residencia está estrechamente relacionado con la frecuencia de rotación de la malla del tanque de fritura. Como consecuencia, el tiempo de residencia que se utiliza como referencia es prácticamente arbitrario, lo cual resulta preocupante al considerar su importancia para la cocción óptima de los productos.

4.3. Selección de sensores, módulos y otros componentes

La selección de los sensores, módulos y circuitos integrados se realizó una vez aplicada la metodología del presente informe, en donde se encontraron dos candidatos muy prometedores:

- **Omega Pt100:** sensor de temperatura tipo RTD, disponible en configuraciones de 2, 3 y 4 hilos, con múltiples grados de precisión disponibles. Considerando la aplicación industrial del proyecto y la precisión requerida por las métricas establecidas, se selecciona el modelo Omega PT100H que cuenta con 3 hilos, una incertidumbre de ± 0.12 °C y una temperatura máxima de operación de 450°C [35]. En la figura 4.1 se muestra un Pt100 similar al utilizado en el diseño.



Figura 4.1: Sensor RTD Pt100H de Omega. [35]

- **OMEGACLAD™ Mineral Insulated Cable:** Cable específicamente diseñado por omega para ser utilizado en conjunto a sus sensores PT100, este cable permite una ope-

ración óptima a temperaturas de hasta 250 °C, y un mínimo cambio de resistencia ante fluctuaciones de temperatura, debido a su cubierta de acero inoxidable, y su relleno de material insulante, que aísla los cables uno del otro y de la temperatura ambiental.[75] Se venden en longitudes de 50 a 1000 ft. Tomando en cuenta las propiedades mencionadas, se utiliza el cable OMEGACLAD para conectar el sensor RTD en la áreas donde se requiera que el cable se encuentre sumergido en aceite. Para las demás conexiones, se utilizan conductores estándar. Un diagrama de la estructura del cable se muestra en la figura 4.2.

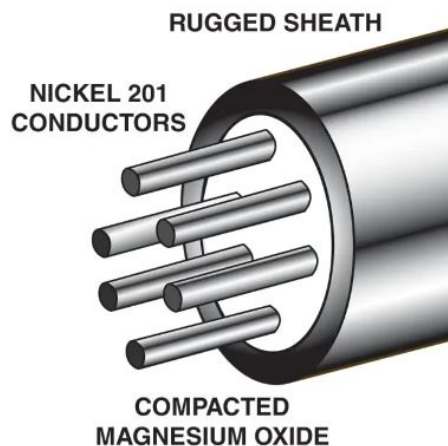


Figura 4.2: Estructura del cable tipo OMEGACLAD. [75]

- **Encoder Magnético AS5600S:** es un sensor ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requieren mediciones precisas de la frecuencia de rotación de un elemento, ya sea con contacto directo o no. Incluye un imán polarizado horizontalmente con el fin de acoplarlo al elemento rotativo, y un microprocesador que convierte su lectura a una señal PWM [76]. Muchos sensores se encuentran ya unidos a una placa, como el ejemplo de la figura 4.3. Se utiliza el AS5600S para capturar todas las mediciones rotativas de la freidora.

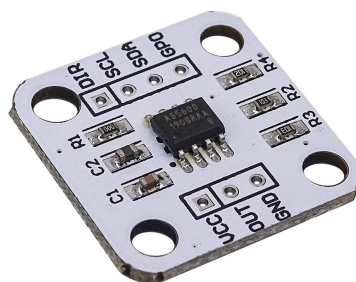


Figura 4.3: Encoder magnético AS5600S AM OSRAM. [76]

-
- **IC MAX31865:** Circuito integrado diseñado específicamente para condicionar y linealizar las salidas de los sensores tipo PT RTD. Su principio de funcionamiento se describe a detalle en la sección 2.5.1 del marco teórico.
 - **Raspberry Pi 4:** Se emplea acorde con lo determinado en la metodología. Se selecciona la Raspberry Pi 4 debido a su mayor accesibilidad y disponibilidad en el mercado. Bajo condiciones adecuadas, el modelo seleccionado cumple con las especificaciones de velocidad de transmisión, ya que su velocidad de subida o “upload” de datos se encuentra en el rango de 63 a 79 Mbits/s [77].

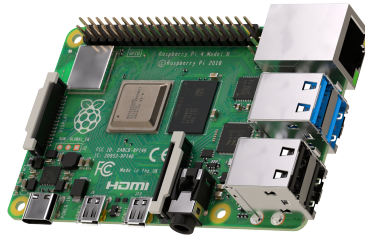


Figura 4.4: Computadora Raspberry Pi 4. [48]

- **Raspberry Pi 15W USB-C Power Supply:** La selección del cargador resulta sencilla, ya que Adafruit ofrece un modelo de 15W diseñado específicamente para proveer a la Raspberry Pi 4 y 5 con una cantidad óptima de energía [78]. Según Adafruit, el cargador es capaz de suministrar hasta 3.1 A al microcomputador. La Raspberry Pi, a su vez, puede suministrar hasta 1.5 A por medio de sus pines de 3.3 V. Ya que la alimentación de la computadora es constante, se pueden conectar tantos sensores como pines GPIO haya en la Raspberry Pi, sin afectar su desempeño, debido a que la alimentación del procesador del sistema y la corriente suministrada a los sensores corren en circuitos separados [79].

Por último, el MAX31865 requiere una corriente de 50 mA, y cada encoder magnético AS5600S consume tan solo 10 mA. Tomando esto en cuenta, el consumo máximo de corriente de los sensores es de 90 mA, lo cual cae dentro del rango de operación de la Raspberry Pi.

4.4. Diseño de la terminal de recolección de datos

4.4.1. Diseño del circuito de acondicionamiento y linealización para el sensor RTD PT100

El circuito utilizado para el manejo de las señales del sensor de temperatura, que se puede observar en la figura 4.5 es una versión modificada del circuito recomendado para RTD Pt100 de tres hilos en la hoja de datos del circuito integrado MAX31865 [24].

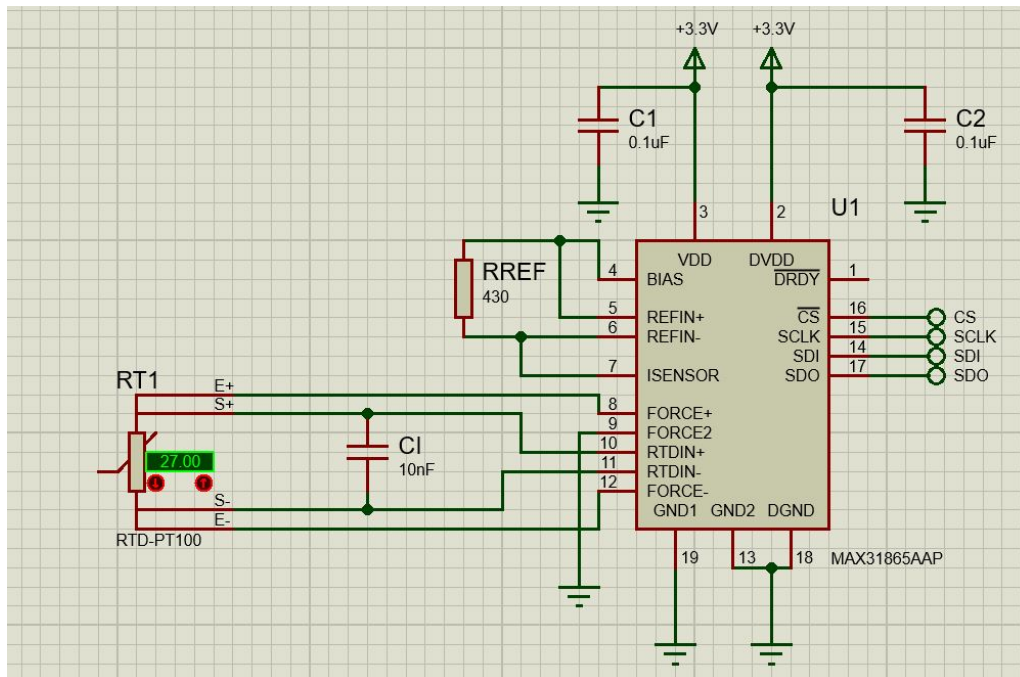


Figura 4.5: Diagrama del circuito de acondicionamiento y linealización del sensor RTD Pt100.

La mayor diferencia radica en el valor de R_{REF} , el cual es 30 ohmios mayor, debido a que el valor original de 400 ohmios no toma en cuenta la resistencia de los cables del sensor, por lo que es recomendado utilizar un valor ligeramente más alto de R_{REF} para compensar. Las salidas del CI MAX31865 son las siguientes:

- **CS**: Corresponde al iniciador de comunicación entre la Raspberry Pi y el MAX31865. Solo se permite la transmisión de información cuando su entrada está en baja tensión.
- **SCLK**: Reloj serial que dicta el ritmo de la transmisión de datos entre los componentes.
- **SDI**: Puerto de entrada al MAX31865, por el cual se recibe información, tal como información de registros y configuración.
- **SDO**: Puerto serial de salida del MAX31865, por el cual se envía las lecturas codificadas.

4.4.2. Diseño del circuito de filtrado para el sensor AS5600S

Como se menciona en el marco teórico, los encoders magnéticos son susceptibles a interferencia debido a señales de alta frecuencia. A continuación, se presenta el proceso de diseño para el filtro Bessel de segundo orden diseñado para satisfacer esta necesidad.

Según la hoja de datos del AS5600S, la frecuencia máxima del PWM es de 920 Hz, por lo tanto, se selecciona una frecuencia de pasa banda de 0 a 1.1 kHz y una frecuencia de corte de 1.5 kHz. Mientras que esto resulta en una leve atenuación de -0.3 dB, la reducción se considera aceptable, pues se espera operar la PWM en su segunda mayor frecuencia de operación de 460 Hz. El filtro tiene una ganancia de 0 dB, la frecuencia pasa banda se mantiene hasta llegar a una atenuación de -3 dB al final de su carrera, mientras que la de corte se coloca a -6 dB. En las figuras 4.6 y 4.7 se puede observar el comportamiento del filtro.

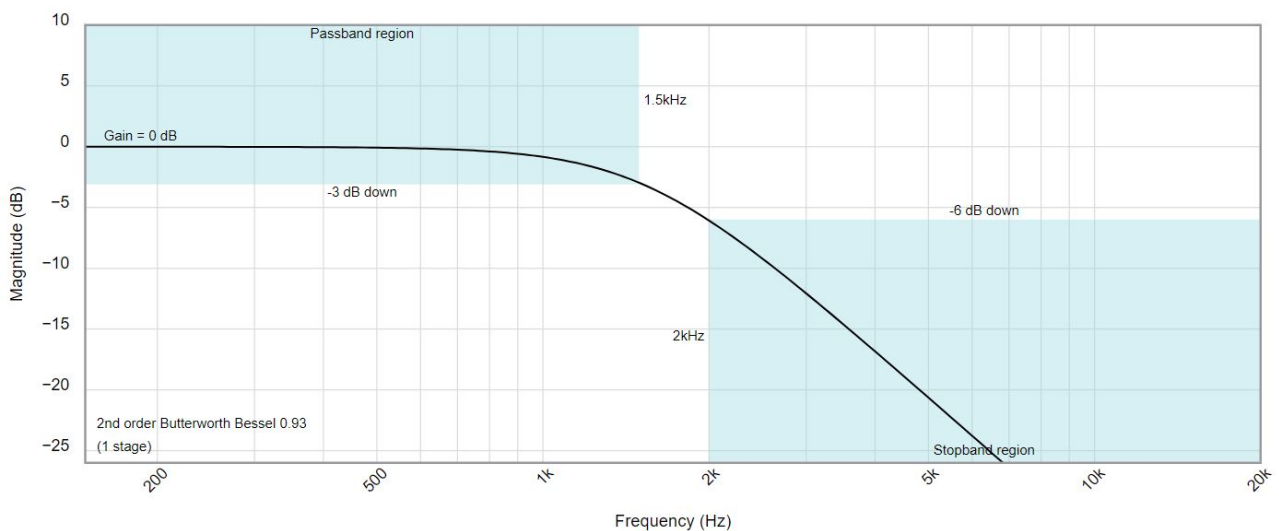


Figura 4.6: Respuesta en frecuencia según las frecuencias pasa banda y corte del filtro Bessel de segundo orden. [80]

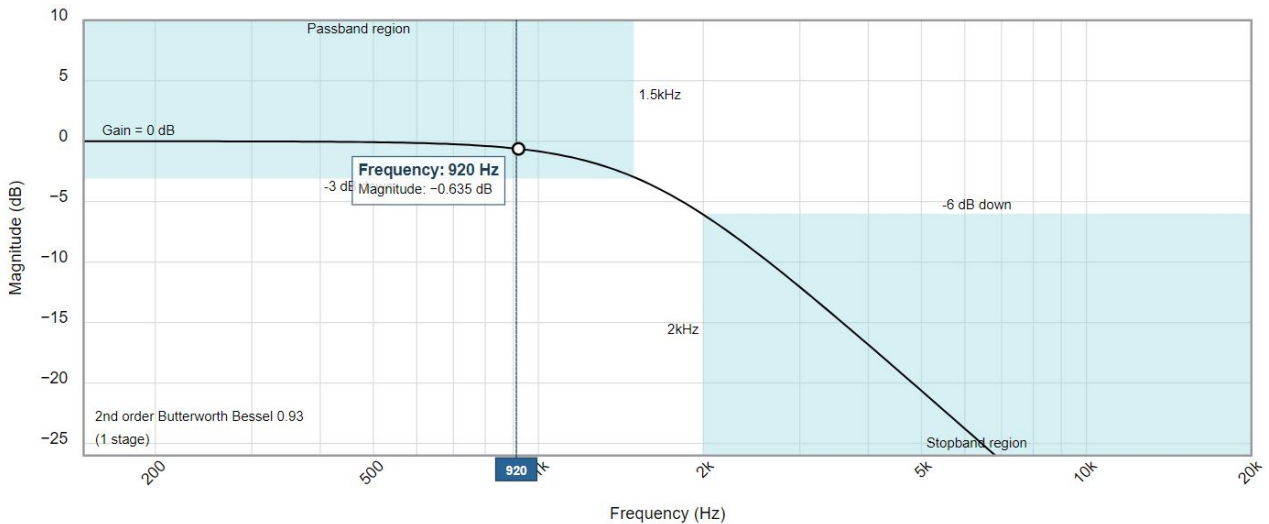


Figura 4.7: Atenuación a frecuencia de 920 Hz del filtro Bessel de segundo orden. [80]

De acuerdo con la teoría de respuesta de un filtro activo, al separar la frecuencia pasa banda y la de corte, se da espacio para un periodo transitivo en el filtro. Si se colocara la frecuencia de corte a la misma frecuencia que el final del área pasa banda, el filtro tendría que reaccionar extremadamente rápido, lo cual puede llevar a efectos indeseados, como la sobrecompensación y la alteración de la forma de onda de la señal [81].

Tomando en cuenta los rangos de frecuencia, se utiliza la herramienta “Filter Wizard” de Analog Devices para calcular el valor de los componentes [80]. En la figura 4.8 se muestra la configuración del filtro utilizado, así como los valores de todos sus componentes.

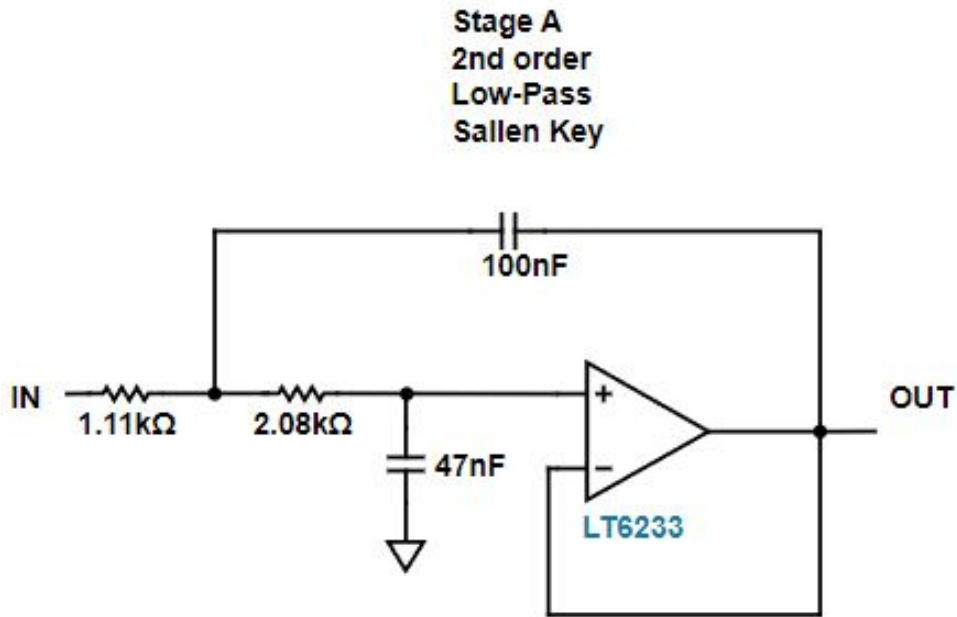


Figura 4.8: Filtro Bessel de segundo orden utilizado y el valor de sus componentes. [80]

Por medio del porcentaje de sobrecompensación, se evalúa la respuesta ante el impulso del filtro, donde el tiempo de asentamiento es de 590 microsegundos a un umbral del 2% del valor nominal. Debido a la naturaleza de la aplicación, una respuesta más veloz que esta no es requerida, por lo que se considera aceptable. Tanto el diagrama de respuesta al impulso como tiempo de asentamiento se presentan en las figuras 4.9 y 4.10 la amplitud máxima del sobreimpulso se despliega en la figura 4.11.

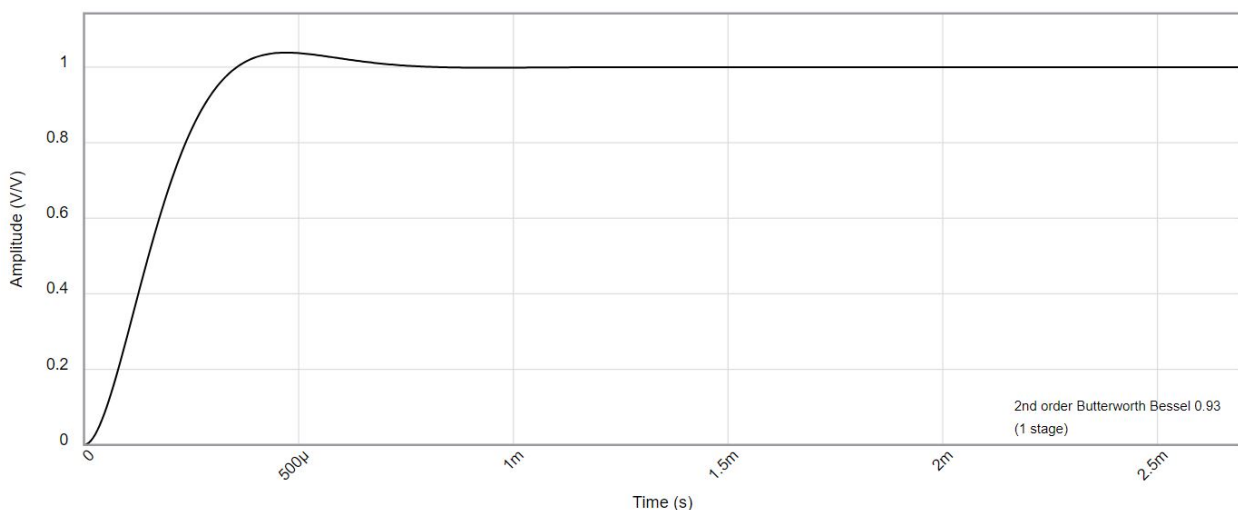


Figura 4.9: Respuesta al impulso del filtro Bessel de segundo orden diseñado. [80]

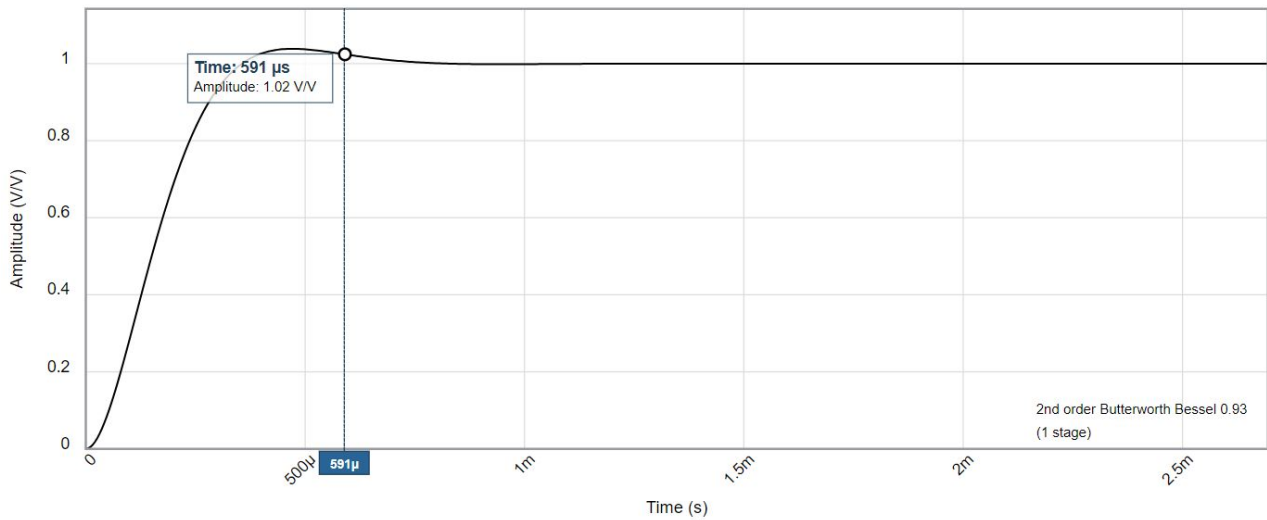


Figura 4.10: Tiempo de asentamiento a un 2% del valor nominal para el filtro Bessel de segundo orden diseñado. [80]

Seguidamente, se determina si la respuesta del filtro es adecuada, o si se considera que tiene un sobreimpulso excesivo, lo cual se puede determinar por medio de la siguiente ecuación [82]:

$$PO = 100 * \left(\frac{MP - MS}{MS} \right) \quad (4.2)$$

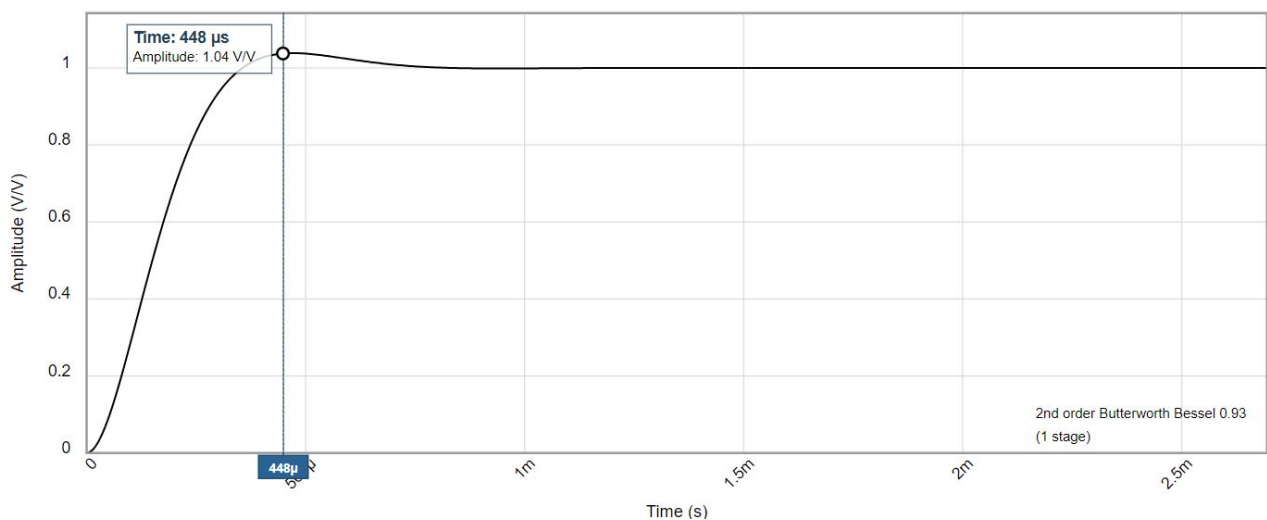


Figura 4.11: Sobreimpulso máximo para el filtro Bessel diseñado. [80]

Donde **PO** es el porcentaje de sobreimpulso, **MP** es la amplitud del pico máximo, y **MS** es el valor en estado estacionario. La amplitud máxima del pico es de 1.04 V/V mientras que el valor en estado estacionario es de 1 V/V, por lo tanto, el porcentaje de sobreimpulso

es de 4 %. En la teoría de sistemas de control, se considera aceptable cualquier porcentaje de sobreimpulso menor a 10 %, por lo que tanto la respuesta en frecuencia como ante el impulso de este filtro se considera apta, en línea con lo declarado por C. W. De Silva en el capítulo 3, sección 5 de su libro “Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)” [82].

Por último, se optimiza el filtro para reducir el ruido, ya que el consumo de energía no es una preocupación, y se planea para una alimentación de 5V, ya que esta es la que se utiliza para el AS5600S.

4.4.3. Simulación de los circuitos

Por medio de acceso a una prueba gratuita, se utilizó software de simulación de circuitos Proteus V8.

Los circuitos de acondicionamiento, linealización y filtrado de los sensores se probaron por medio del simulador, debido a que posee una amplia librería de componentes que incluye todas las partes y materiales del diseño creado. Adicionalmente, es capaz de realizar simulaciones robustas en las cuales se puede cambiar la temperatura del medio de manera dinámica, monitorizar salidas y realizar funcionalidades básicas de Arduino y otros micro-controladores.

En la presente sección se muestra el desarrollo de las simulaciones, mientras que sus resultados se exhiben en la sección de resultados y análisis.

Simulación del circuito de acondicionamiento y linealización para el sensor RTD Pt100

Para verificar el funcionamiento adecuado del diseño, se crea una copia del circuito diseñado en la sección anterior, cuyo diagrama se muestra en la figura 4.12.

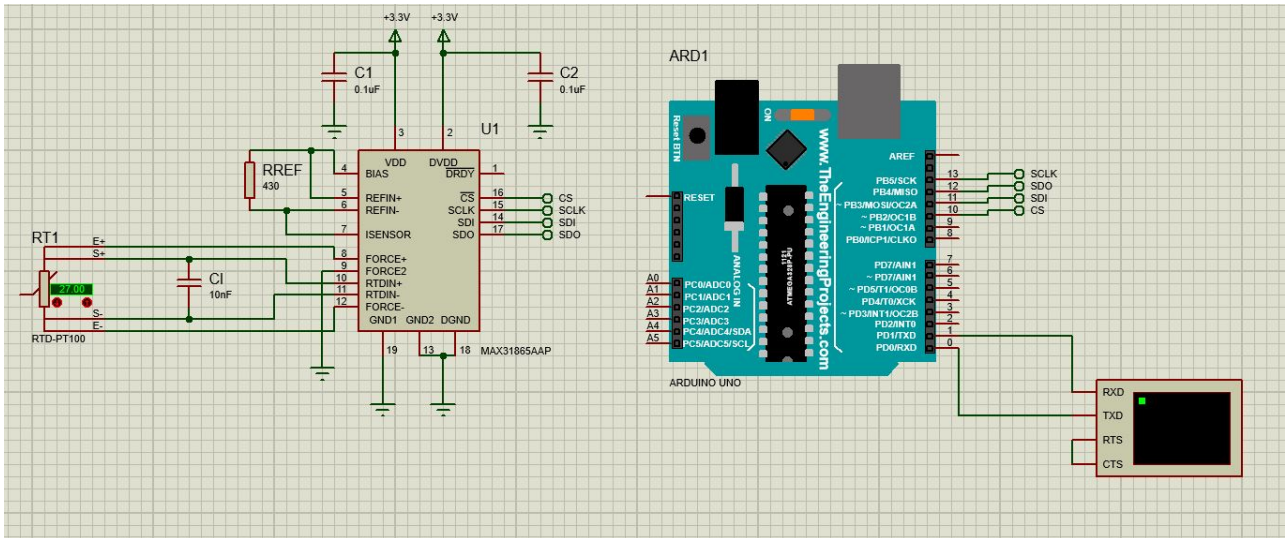


Figura 4.12: Esquemático para la simulación del circuito de acondicionamiento y linealización para el RTD PT100.

Es importante notar que, aunque la conexión asemeja un RTD de 4 hilos, el cuarto hilo se encuentra deshabilitado.

Para permitir la comunicación entre el microcontrolador simulado y el chip del MAX31865, se asignan las direcciones de los registros 1 y 2 del circuito integrado a una variable de 16 bits, mostrado en la figura 4.13, donde se almacena la información enviada por el circuito de medición. Además, se crea una variable que corresponde al byte de configuración del MAX31865 y se le da el valor de 10110000. Los valores de cada bit se escogen según las necesidades de la simulación, según la figura 4.14.

Table 4. RTD Resistance Registers Definition

REGISTER	RTD MSBS (01h) REGISTER								RTD LSBS (02h) REGISTER							
Bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RTD Resistance Data	MSB	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	LSB	Fault
Bit Weighting	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	—
Decimal Value	16384	8192	4096	2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1	—

Figura 4.13: Registros de datos donde se almacena información de salida en el integrado MAX31865. [24]

Table 2. Configuration Register Definition

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
V _{BIAS} 1 = ON 0 = OFF	Conversion mode 1 = Auto 0 = Normally off	1-shot 1 = 1-shot (auto-clear)	3-wire 1 = 3-wire RTD 0 = 2-wire or 4-wire	Fault Detection Cycle Control (see Table 3)		Fault Status Clear 1 = Clear (auto-clear)	50/60Hz filter select 1 = 50Hz 0 = 60Hz

Figura 4.14: Definición de los bits de configuración del integrado MAX31865. [24]

Una vez definidas las funciones para la comunicación entre el microcontrolador y el MAX31865, se requiere convertir los valores de resistencia a temperatura. Para lograrlo, se utilizan los valores de equivalencias recomendados por Adafruit de $RTD_a = 3.9083e-3$ y $RTD_b = -5.775e-7$ para el caso de uso del circuito RTD con un MAX31865 [83]. Los valores equivalen a los coeficientes A y B de la ecuación de Callendar-Van Dusen, que se utiliza para determinar la resistencia a una temperatura dada, o viceversa [17].

$$RTD(T) = R_0 * (1 + AT + BT^2) \quad (4.3)$$

Donde:

- RTD es el valor de la resistencia del sensor a una temperatura dada.
- R0 es la resistencia del sensor a 0°C.
- T es la temperatura del medio.
- A y B son las constantes de Van Dusen.

Al despejar la temperatura de la ecuación 4.3 se obtiene:

$$T_{RTD}(r) = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{r}{R_0})}}{2B} \quad (4.4)$$

Y se agrupan los términos dentro de las siguientes variables para facilidad de programación, tal que:

$$T_{RTD}(r) = \frac{Z_1 + \sqrt{Z_2 - Z_3}}{Z_4} \quad (4.5)$$

- $Z_1 = -A$
- $Z_2 = A^2 - 4B$
- $Z_3 = \frac{4B}{R_0}$
- $Z_4 = 2B$

Por último, se inserta el valor de r recuperado de los registros del MAX31865 en la ecuación 4.5 para obtener la medición de temperatura y se despliega en la terminal virtual del circuito simulado.

Para una descripción más a profundidad del código utilizado en la simulación, refiérase al apéndice 1: “Códigos y Series de comandos”. El código presente en el apéndice relacionado a la simulación del circuito de temperatura fue adaptado del sitio “Curious Scientist” [84].

Simulación del circuito de filtrado para el sensor AS5600S

Simular y monitorear el circuito de filtrado resulta simple en comparación a los requerimientos de la sección anterior. Para determinar la eficacia del circuito, basta con conectar un motor de alta frecuencia al filtro Bessel diseñado, observar el osciloscopio digital y verificar que el comportamiento de la respuesta asemeje el comportamiento teórico del filtro. La configuración utilizada para la simulación se muestra en la figura 4.15.

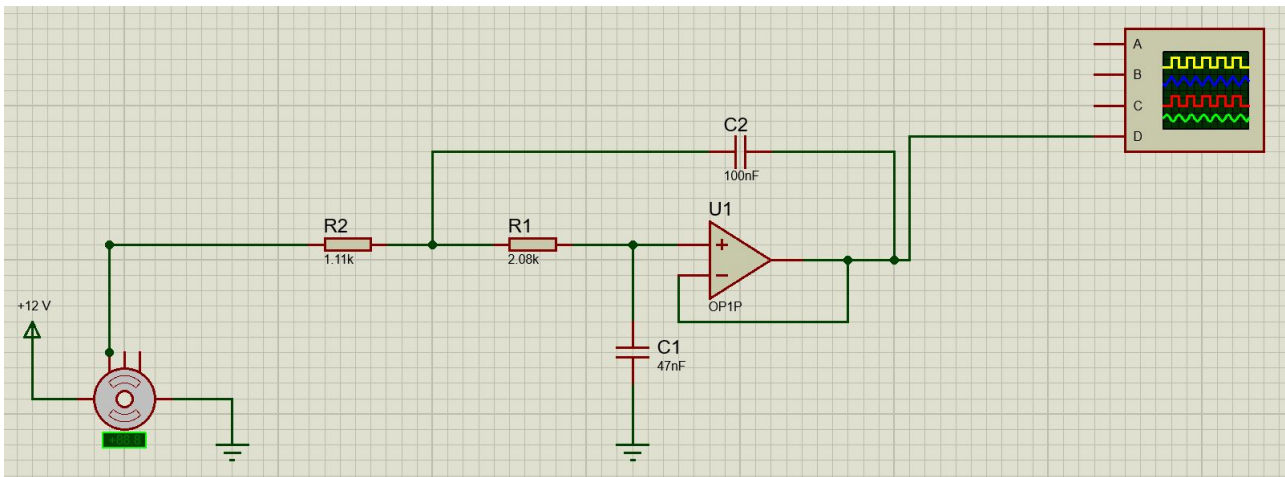


Figura 4.15: Esquemático para la simulación del circuito de filtrado para el encoder magnético AS5600S.

Esquemático completo para la estación de recolección

En la figura 4.16 se muestra el esquemático final del circuito de la estación de recolección de señales. Para propósitos de orden, se usan “tags” para las conexiones con la Raspberry Pi 4, la cual a su vez es representada por un microprocesador azul.

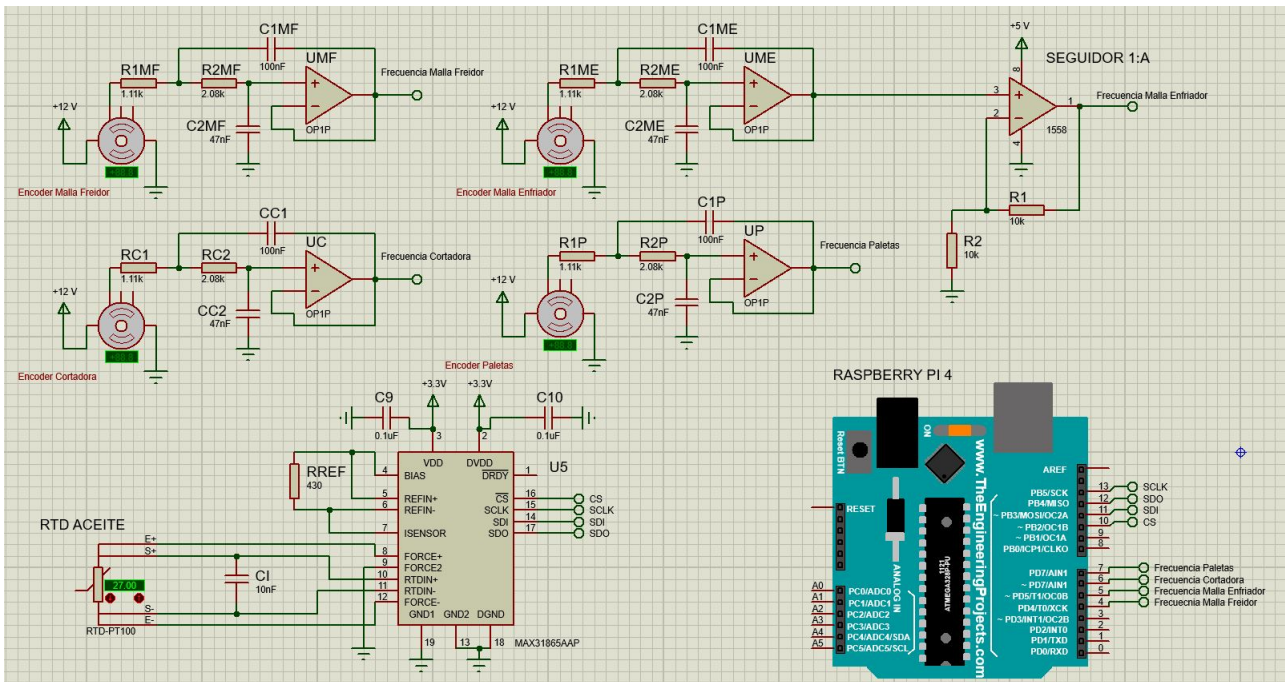


Figura 4.16: Diseño final del circuito de la estación de recolección.

El microcontrolador representado en la figura es para fines ilustrativos, un diagrama donde se muestren las conexiones a los pines de la Raspberry Pi que se implementan en el diseño final se puede encontrar en el apéndice 2 :“Diagramas y planos”

Debido a la cercanía de los puntos de medición para todos los elementos rotativos de la malla del freidor, paletas, cortadora y sensor de temperatura del aceite, se coloca la Raspberry Pi cerca de los mismos. Sin embargo, la malla del enfriador se ubica a 2 m del resto de actuadores, por lo que se incluye un seguidor de voltaje en su recorrido para mantener la amplitud de la señal.

4.5. Posicionamiento de sensores en el freidor

La posición donde se colocan los sensores se determinó utilizando los siguientes criterios:

- **Cercanía entre actuadores y panel de control:** Se busca colocar los sensores en los actuadores más cercanos entre sí, para reducir la cantidad de cableado necesario, con el fin de minimizar el ruido e interferencia de las señales.
- **Inmersión en el aceite:** Según la entrevista realizada a Gustavo Chiroy [3], la posición del sensor de temperatura no es crítica, mientras este se encuentre en algún punto de la longitud del área de fritura, y se encuentre entre 30 y 60 cm de profundidad, ya que en esta zona es en la que se traslada el producto. Debido a esto, se buscó colocarlo en la mitad del área de fritura.

-
- **Facilidad de acople:** Finalmente, ya que los actuadores rotativos poseen múltiples poleas y ejes, existen múltiples ubicaciones válidas para los sensores. Tras examinar la maquinaria, se determinó que resultaría más conveniente, tanto por geometría de la maquinaria como por exactitud de las medidas, colocar los sensores en el eje principal de cada actuador.

Al utilizar los criterios anteriores como filosofía de diseño, se decidió colocar los sensores en las posiciones mostradas en las figuras 4.17,4.18,4.19,y 4.20.



Figura 4.17: Motor de las cortadoras, bajo la tapa se encuentra una estructura similar a los demás actuadores.

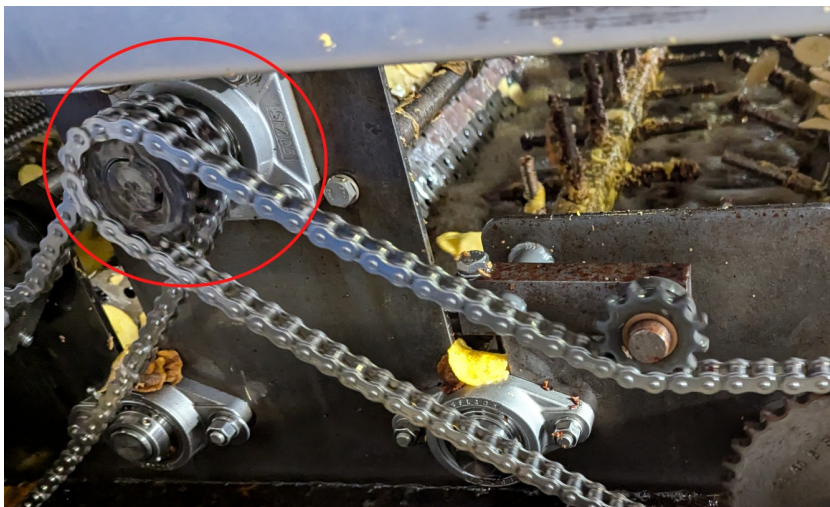


Figura 4.18: Eje de las paletas seleccionado para colocar el sensor.

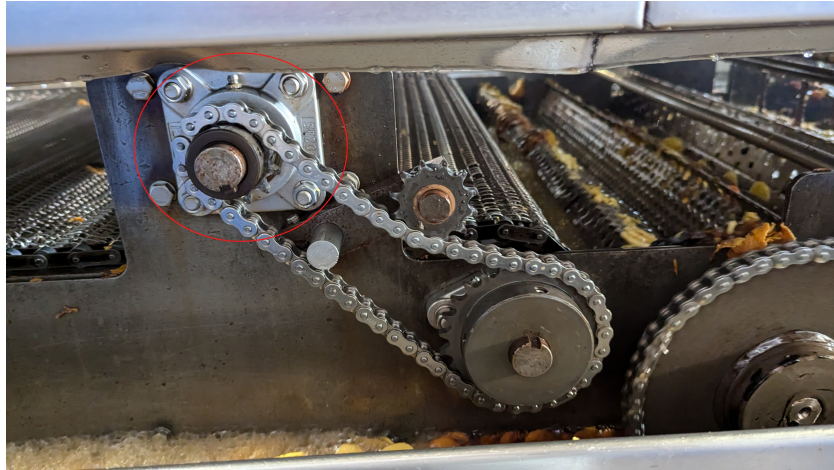


Figura 4.19: Eje de la malla de fritura seleccionado para colocar el sensor.

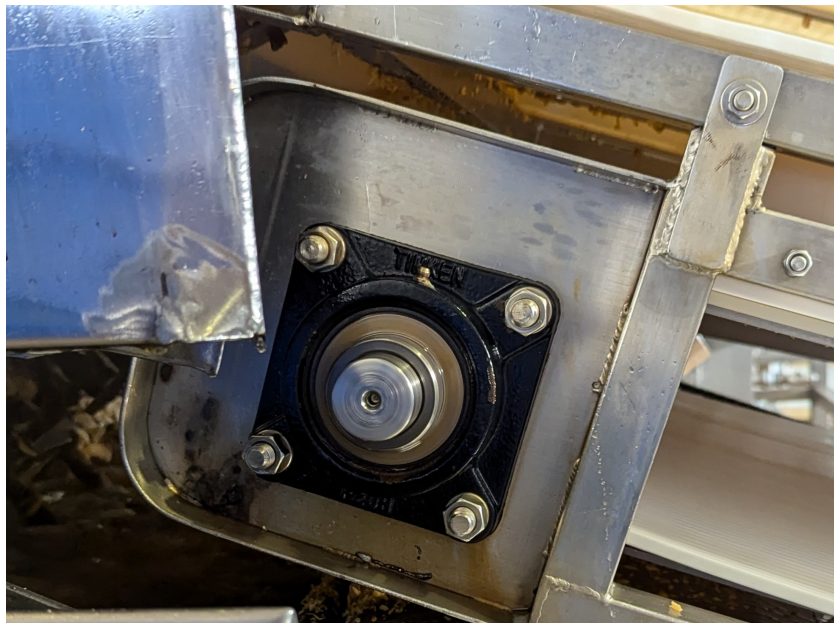


Figura 4.20: Eje de la malla de enfriamiento seleccionado para colocar el sensor.

Bajo la misma lógica, se determinó la ubicación de la Raspberry Pi de tal manera que se encuentre tan cerca de tantos sensores como sea posible. Las distancias aproximadas de la ubicación definida para el microcomputador y los sensores son las siguientes:

- 0.5 m del punto de ingreso del sensor RTD al aceite.
- 0.45 m al actuador principal de la malla de fritura.
- 0.6 m al actuador fuera del aceite de las paletas.
- 0.8 m al eje del motor de la cortadora.
- 2 m al actuador principal de la malla de enfriamiento.

Se coloca el cableado dentro de tubería plástica de 3 mm de grosor en las áreas que se encuentre expuesto, y su recorrido se asegura al piso de la planta con cinta adhesiva de calibre industrial en toda su longitud, para garantizar la protección del cableado y minimizar el riesgo de tropiezo del personal de la planta. En la figura 4.21 se muestra la ubicación propuesta para la carcasa, esta se representa por medio del cubo isométrico, y las líneas representan una visualización de la posible ubicación del cableado.

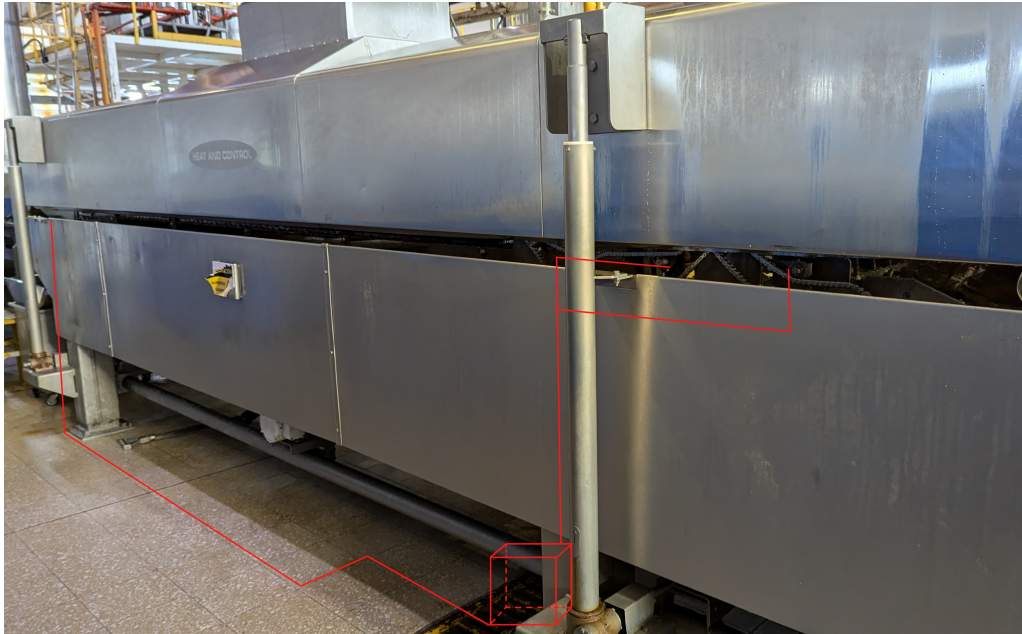


Figura 4.21: Ubicación propuesta para la carcasa y su cableado.

Por último, en las figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se muestran vistas adicionales de la freidora #5.



Figura 4.22: Salida de producto terminado de la freidora 5.



Figura 4.23: Panel de control de la freidora 5.



Figura 4.24: Vista lateral del área de trabajo de la freidora 5.

4.6. Cálculo del tiempo de residencia

El tiempo de residencia del producto en la sección de fritura no puede ser medido directamente de una manera práctica, por lo que se decide calcular el tiempo instantáneo de un punto dado de la malla de fritura, basado en la frecuencia de rotación del actuador correspondiente.

Sin embargo, el manual de operaciones para las freidoras del Grupo Pro indican que si la frecuencia de la malla de enfriamiento es de 2 Hz, el tiempo de residencia debería ser de alrededor de 2.5 minutos, o 150 segundos.[11]

Con la información anterior, se puede inferir la siguiente ecuación para el tiempo de residencia teórico:

$$t_{residencia} = \frac{300}{f} \quad (4.6)$$

Donde f es la frecuencia de rotación malla.

Es importante notar que la malla de fritura y el motor que la opera se encuentran conectados por un par de engranajes unidos por una cadena. El engranaje del eje del motor tiene un diámetro de 45 mm, mientras que el engranaje de la malla es de 120 mm de diámetro. Por lo tanto, se debe incluir la razón de los engranajes en la ecuación 4.6:

$$t'_{residencia} = \frac{300}{f * \frac{r_2}{r_1}} = \frac{300}{f * \frac{0,045}{0,12}} = \frac{800}{f} \quad (4.7)$$

La ecuación 4.7 se utiliza para las pruebas de validación, a pesar de no contar con los engranajes previamente mencionados.

4.7. Diseño de los sistemas de acople y carcasa

La estructura física sostiene y protege los componentes del sistema; por lo tanto, es tan importante como el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos y digitales del mismo. Por esta razón, se debe abordar el proceso de diseño necesario para que la carcasa esté en armonía con el resto del sistema.

Todos los diseños y simulaciones se realizaron por medio del software FreeCAD, el cual es una herramienta de modelado en 3D de uso libre.[85]

4.7.1. Carcasa

La carcasa representa un elemento crítico que protege a la Raspberry Pi de los factores ambientales en la planta de producción, por lo que se tienen una serie de consideraciones

durante su diseño. Como se define en la metodología, la carcasa está compuesta de acero inoxidable.

Las características primarias de la carcasa incluyen:

- **Pines para montaje:** Permiten asegurar la Raspberry Pi de tal manera que no se mueva, caiga o dañe sin importar la orientación ni el movimiento de la carcasa.
- **Clips de sujeción:** Su propósito es sujetar la carcasa a la estructura de la freidora de manera que el sistema sea accesible y no obstruya el trabajo diario de la planta.
- **Tapá removible:** Da acceso a la Raspberry Pi.
- **Agujeros de cableado:** Permiten insertar los cables de los sensores al interior de la carcasa, protegidos por una lámina de hule para evitar el ingreso de suciedad y obstrucciones.
- **LEDs de alerta de estado:** Ya que la Raspberry Pi se encuentra totalmente encapsulada, se colocan luces tipo LED que indiquen una variedad de estados, de la siguiente manera:
 - LED Verde: Indica que el sistema se encuentra energizado.
 - LED Azul: Parpadea en sincronía con la transmisión de los datos, permitiendo visualizar el envío adecuado de información.
 - LED Amarillo: Se enciende en caso de que haya un error en la transmisión de datos.
 - LED Rojo: Se enciende en caso de que se interrumpa la conexión a alguno de los sensores.

Para acoplar los LEDs a la carcasa, se utiliza un adaptador de plástico para LED, cuyo diámetro interno es de 3 mm y su diámetro externo es de 6 mm, como el que se muestra en la figura 4.25:



Figura 4.25: Sujetador de plástico para LEDs. [86]

- Manejo de temperatura:** Para garantizar el funcionamiento óptimo de la Raspberry Pi, se colocan disipadores de calor en el exterior de la carcasa, con el fin de incrementar su superficie, lo que le permite disipar calor más rápidamente.[87] Además, se implementa un ventilador de 3 V a corriente directa, para ayudar a la circulación de aire. Al mismo tiempo, se coloca una membrana de filtro al ventilador para evitar el ingreso de contaminantes.

4.7.2. Sistemas de acople

Mientras que el sensor de temperatura y su cableado pueden ser sumergidos directamente en el aceite, los sensores AS5600S requieren algún tipo de sujeción estática. Se recomienda adherir el imán que incluye el sensor con un adhesivo industrial al eje que se desea monitorizar y el sensor en sí a una estructura estacionaria [88].

Para colocar el imán, basta con usar un material abrasivo, tal como lija, en el lugar donde se posiciona el imán, y utilizar el epoxy resistente a la temperatura que incluye el kit del sensor.

Para sostener el sensor en sí, se diseña una estructura que aprovecha los tornillos externos ya existentes en la cubierta del motor para sujetarse. Una vista frontal del motor se incluye en la figura 4.26.

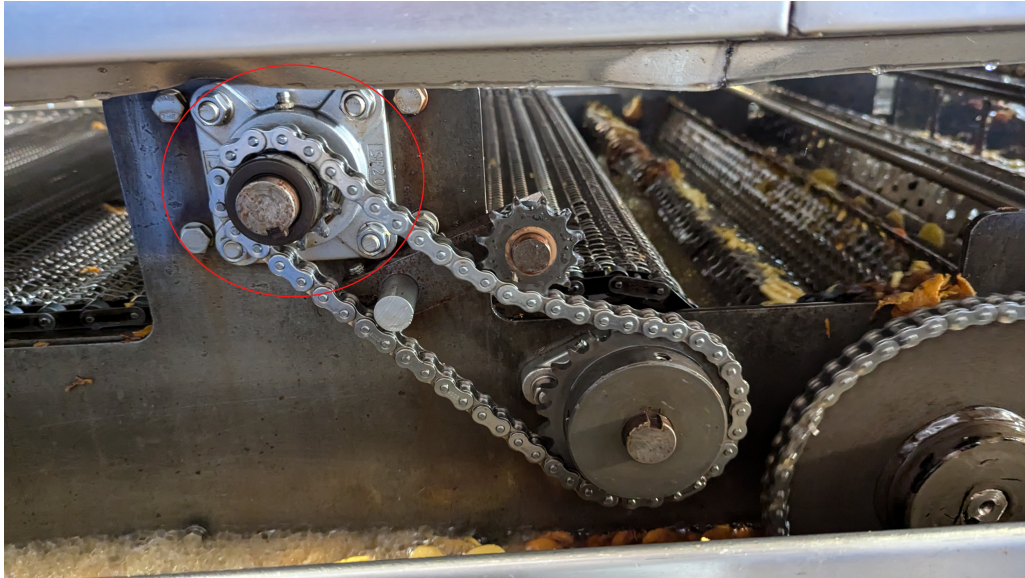


Figura 4.26: Actuador de malla de fritura propuesto para la colocación del sensor.

El mecanismo de sujeción cuenta con una cubierta alrededor del sensor, que evita que sea salpicado por aceite, y posee un diseño con agujeros, con el fin de regular la temperatura de la estructura.

El peso del sensor es muy pequeño en comparación a las dimensiones y resistencia mecánica del mecanismo de sujeción, por lo que un análisis de esfuerzos no es necesario. Sin embargo, todo motor y elemento mecánico produce vibraciones que pueden afectar el alineamiento del sensor al imán, lo cual es fundamental para garantizar mediciones correctas [20]. Como consecuencia, se realiza un análisis de vibración sobre la estructura diseñada en la sección 4.7.4.

Dimensionamiento de la carcasa y sistema de acople

Para dimensionar tanto la carcasa como el sujetador, se usan como referencia las dimensiones de la Raspberry Pi, el sensor AS5600s con placa de acople y el motor estándar que se usa en los elementos rotativos de la freidora. Además, se toma en consideración dejar espacios para el acople de luces LED y un motor de 3 VCD estándar.

Las dimensiones que se toman en cuenta para cada elemento son las siguientes:

- **Raspberry Pi 4:** Su ancho, largo y diámetro de agujero para tornillos. Se muestran todas sus dimensiones en la figura 4.27.

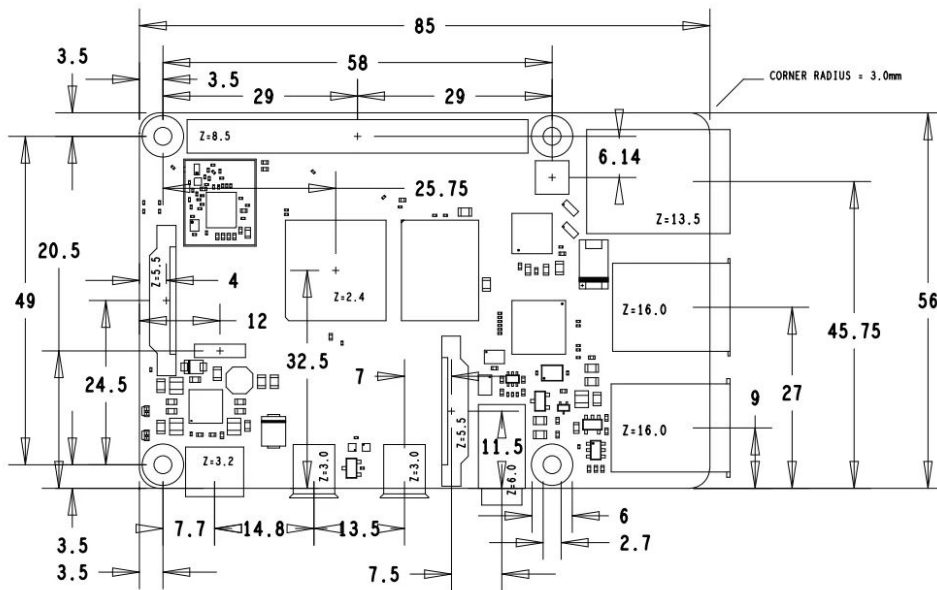


Figura 4.27: Plano mecánico de una Raspberry Pi 4. [89]

- **AS5600s:** Sus dimensiones externas, que son 26 x 26 mm, y el diámetro de sus agujeros, que es 3.7 mm.
- **Motores de la freidora:** Se utiliza el motor de la malla de fritura como base, ya que todos los motores estudiados son idénticos. Se toman en cuenta las dimensiones externas, el diámetro del eje, la posición del eje, el largo del eje desde la carátula y la ubicación de los tornillos de su carátula. Se ejemplifican estas medidas en el diagrama de la figura 4.28.

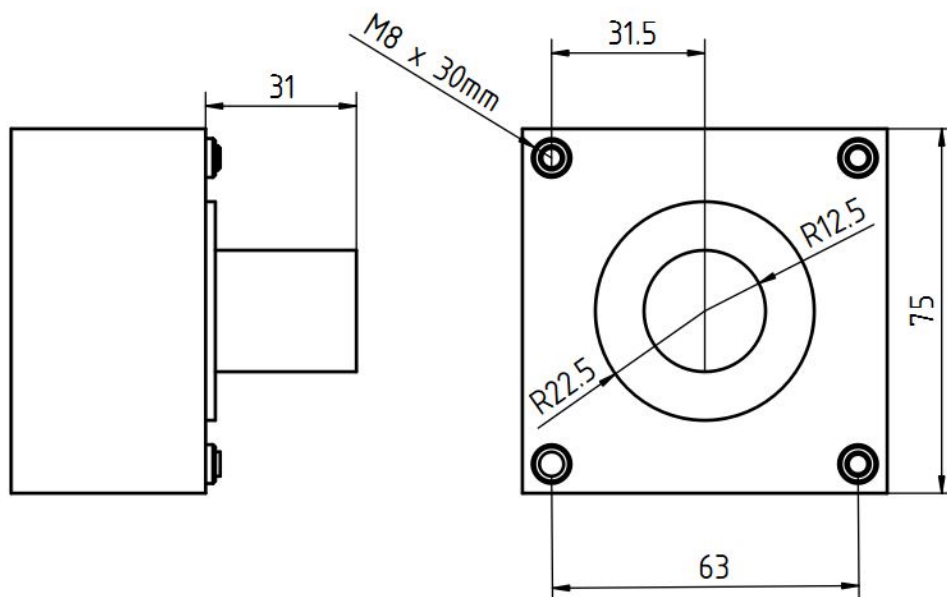


Figura 4.28: Diagrama ilustrativo de los motores de la freidora número 5, creado con FreeCAD, dimensiones tomadas en planta.

-
- **Ventilador 3 VDC:** Sus dimensiones externas son de 30 x 30 mm, con un filete de 2 mm en sus esquinas.[90]
 - **Acoplador para LED:** Diámetro interno y externo del adaptador de 3 mm mostrado en la figura 4.25.

4.7.3. Partes de la carcasa y del acople

Los planos completos de los componentes descritos se pueden encontrar en el apéndice 2 “Diagramas y Planos”.

Carcasa

Para facilitar el ensamblaje y la manufactura, las paredes, la base y la tapa de la carcasa se componen de placas separadas de acero inoxidable, las cuales están conectadas por uniones en sus aristas. La tapa cuenta con agujeros para posicionar los LEDs y un sujetador para levantarla, mientras que las paredes tienen agujeros para insertar el cableado de alimentación y transmisión de datos, los cuales están cubiertos por pestañas de hule adheridas con pegamento a la carcasa. Adicionalmente, se colocan dos agujeros de 30 x 30 mm para colocar los ventiladores de 3 V.

Las dimensiones de la carcasa permiten manipular la Raspberry Pi y sus conexiones cómodamente. El microcomputador no se atornilla directamente al piso de la carcasa, sino que se suspende dentro de la estructura mediante un adaptador de PLA al cual se acopla la Raspberry Pi por medio de sus 4 agujeros para tornillos. El propósito del adaptador es incrementar la superficie de la computadora expuesta al aire, evitar cortocircuitos accidentales con la estructura de acero y facilitar el reemplazo de los componentes.

Todas las partes se conectan por medio de tornillos M3 x 0.5 de 5 mm de largo y tuercas M3 x 0.5. En las figuras 4.29 y 4.30 se muestran las vistas isométricas y explosionadas de la carcasa ensamblada, y en la figura 4.31 se muestra una vista similar del sujetador para la Raspberry Pi.

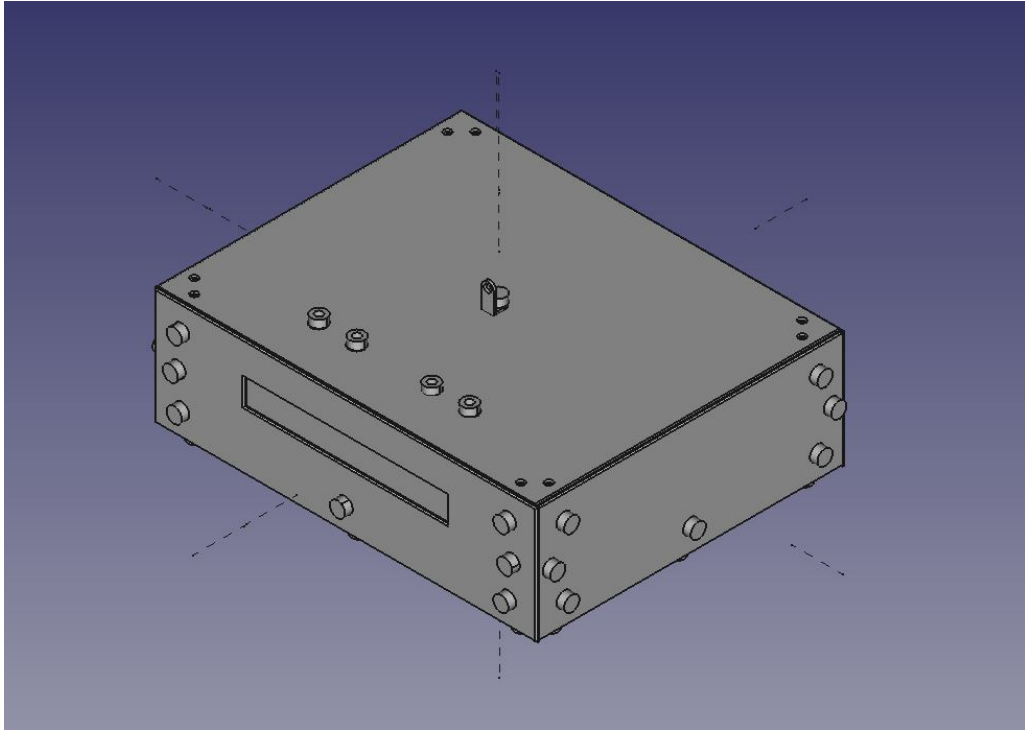


Figura 4.29: Vista isométrica de la carcasa ensamblada, creado con FreeCAD.

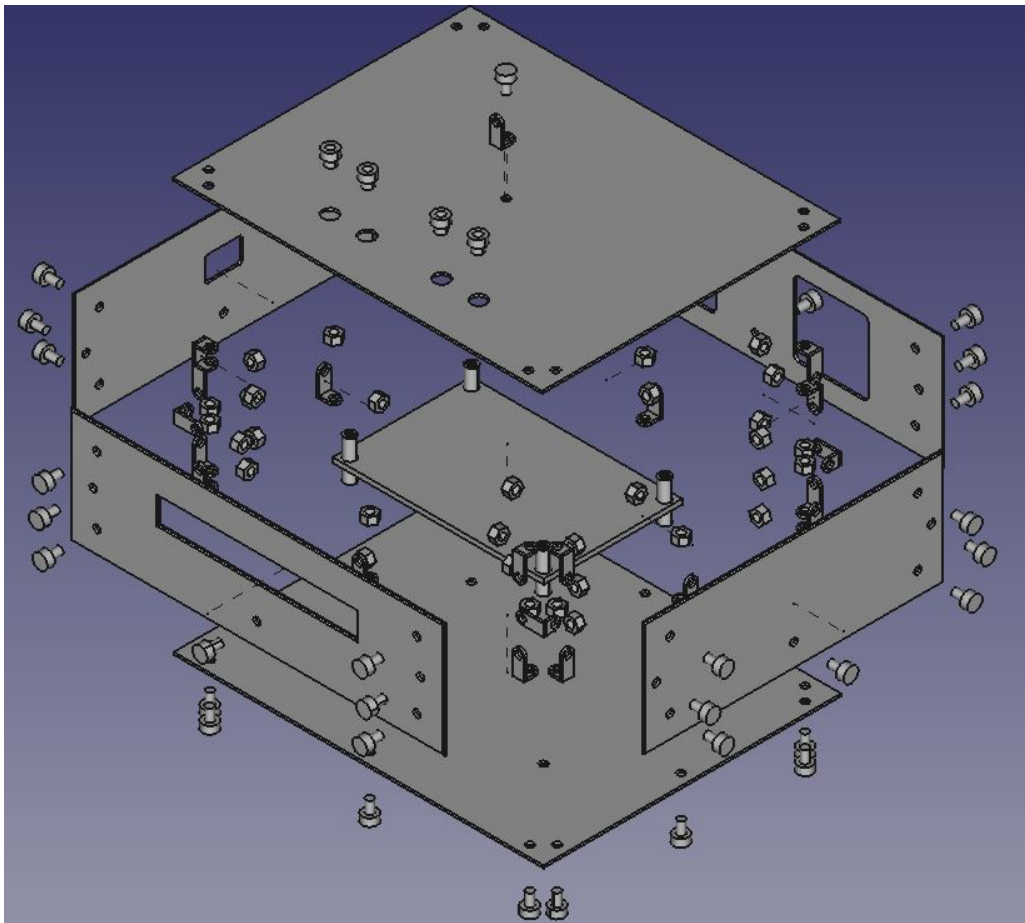


Figura 4.30: Vista explosionada de la Carcasa, creado con FreeCAD.

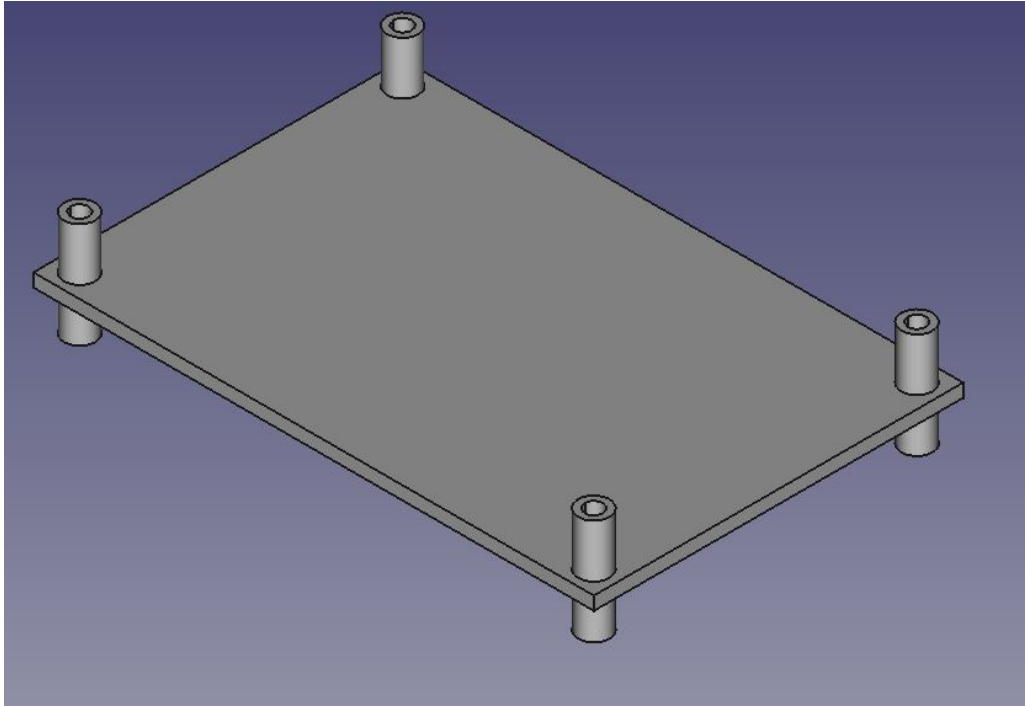


Figura 4.31: Vista isométricas del sujetador de la Raspberry Pi, creado con FreeCAD.

Acople de sensores

Para el diseño del acople del sensor AS5600s al motor, se opta por aprovechar los tornillos de 8 mm de diámetro que ya están presentes en la carcasa del motor de la freidora. Por lo tanto, el acople tiene agujeros por los cuales se pasan dichos tornillos para su sujeción.

La estructura se compone de dos partes: la estructura que se sujeta directamente a la carcasa del motor, a la cual también se atornilla el sensor mediante tornillos M4 x 0.5 de 8 mm de largo, y un cobertor que protege al sensor contra salpicaduras y que tiene espacio para colocar los cables de entrada y salida. Ambas estructuras se fabrican de PLA para evitar cortocircuitos accidentales y dar mayor flexibilidad en cuanto a la geometría utilizada.

Es importante mencionar que se deja un pequeño agujero alineado con el sensor para mantener la mayor cercanía posible al imán en el eje del motor. En las figuras 4.32 y 4.33 se muestran las vistas isométricas del acople, y de su explosionado respectivamente.

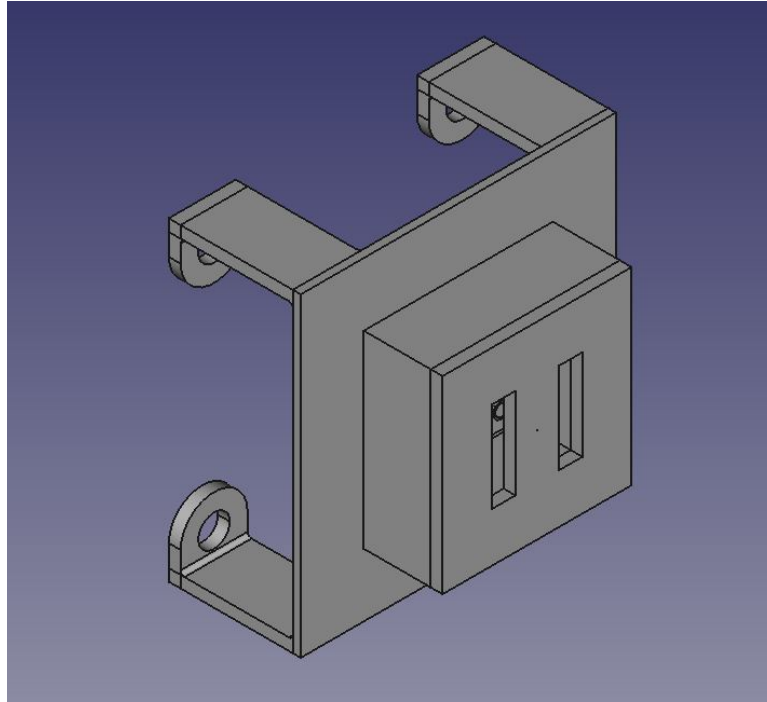


Figura 4.32: Vista isométrica del acople del sensor AS5600s ensamblado, creado con FreeCAD.

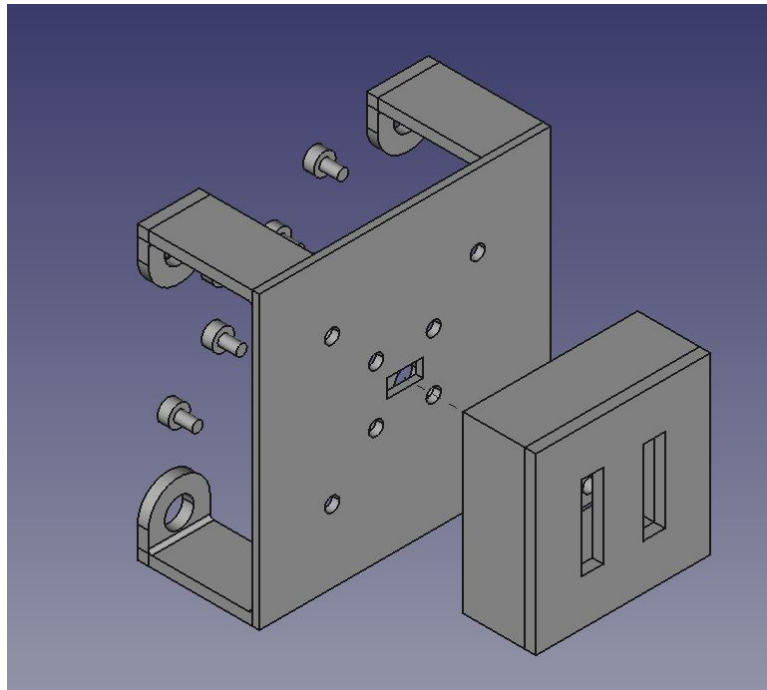


Figura 4.33: Vista explosionada del acople del sensor AS5600s, creado con FreeCAD.

Todos los planos de los componentes descritos se pueden encontrar en el apéndice 2 “Diagramas y Planos”.

4.7.4. Análisis de resistencia a vibración del mecanismo de acople

Para poder determinar la frecuencia de las vibraciones a la cual se van a realizar las pruebas, se utiliza como base la mayor frecuencia a la que se operan los motores del freidor, y se le aplica un factor de seguridad de 2, para garantizar que las vibraciones no afecten la alineación del sensor de manera significativa.

Por lo tanto, según el instructivo de trabajo, la mayor frecuencia de operación es de 30 Hz, y se da en la cortadora durante la producción de plátano verde [11]. Como consecuencia, se le aplica una frecuencia de vibración de 60 Hz a la estructura simulada.

La métrica de 60 Hz se utiliza solamente como referencia, ya que la funcionalidad de análisis de vibración de FreeCAD automáticamente realiza la simulación a la menor frecuencia a la cual empiezan a haber transformaciones mecánicas en el cuerpo simulado.

La simulación de vibración se configura al colocar el punto de origen de las vibraciones, asignar un material al objeto y generar una malla para análisis de elemento finito. En el caso del acople de sensor, se coloca el origen de las vibraciones en cada una de las patillas donde se conecta al motor, y se escoge el tipo de material "PLA_General" en la librería de FreeCAD. Una vez asignados los parámetros, se procede a ejecutar la simulación por medio de la herramienta Solver de vibración. Los resultados de las simulaciones se muestran y examinan en la sección de análisis de resultados del presente informe.

En las figuras 4.34 y 4.35 se muestra el cuerpo con y sin malla para análisis de elemento finito.

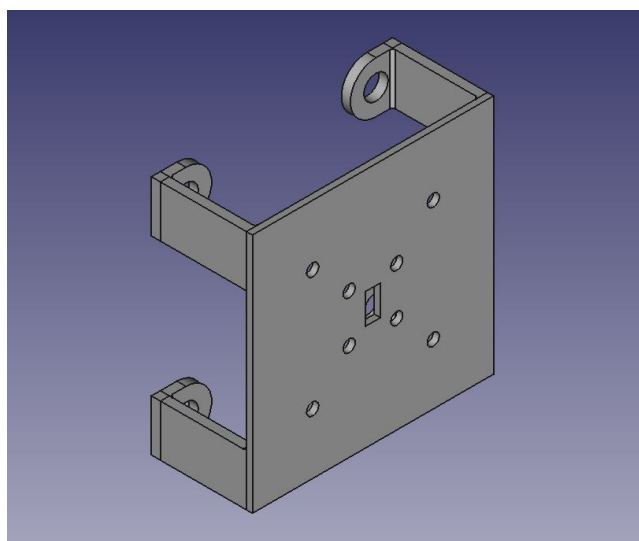


Figura 4.34: Acople de sensor en vista isométrica.

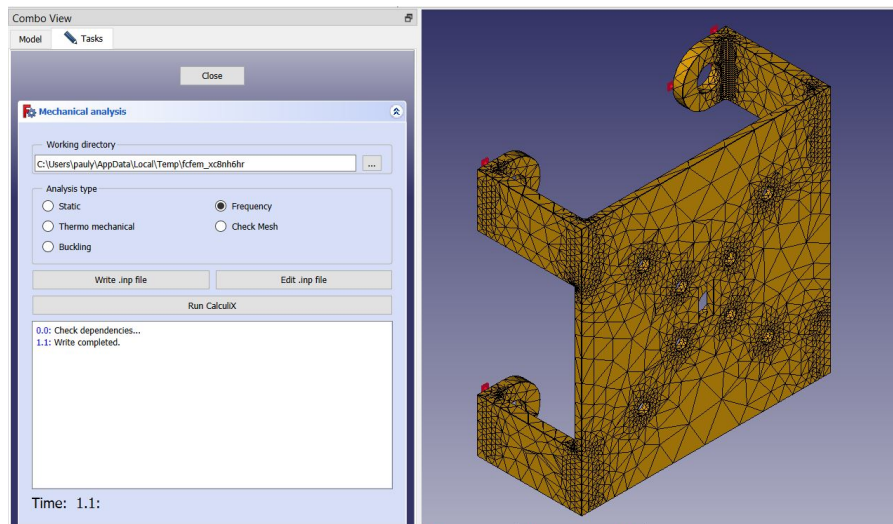


Figura 4.35: Acople de sensor con malla para análisis de elemento finito y ventana de selección de simulación.

4.8. Lógica y algoritmos de programación

4.8.1. Lectura e interpretación de frecuencia de rotación

Se conoce que el encoder posee dos terminales de salida, “A” y “B”, que envían un pulso cuando la posición angular del eje del motor coincide con la posición angular del sensor correspondiente a alguna de las salidas. Por lo tanto, se puede encontrar el período, y por ende la frecuencia de rotación al medir el intervalo de tiempo entre los pulsos de una salida dada. Se eligió la salida “A” como referencia para realizar los cálculos pertinentes.

Para convertir el concepto mencionado en el párrafo anterior a una medida útil, se implementa la librería `time.py`, y la información encontrada en la hoja de datos del encoder [88], lo cual indica que el sensor tiene una resolución de Hall de 11 PPR, es decir, se dan 11 pulsos de las señales “A” y “B” por cada rotación del motor.

Por lo tanto, se usa un contador para llevar el registro de pulsos de las señales de entrada, y cada vez que se cuentan 11 pulsos se considera que el encoder ha realizado una revolución completa, sin embargo, se debe tomar en cuenta la razón de cambio del motor, el cual es de 1:24, lo que resulta en un PPR de 224.4.

Seguidamente, se registra el tiempo que se tomó en completar una rotación, y se divide 1 sobre este valor para encontrar la frecuencia.

En la figura 4.36 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la lógica de captura de frecuencia de rotación.

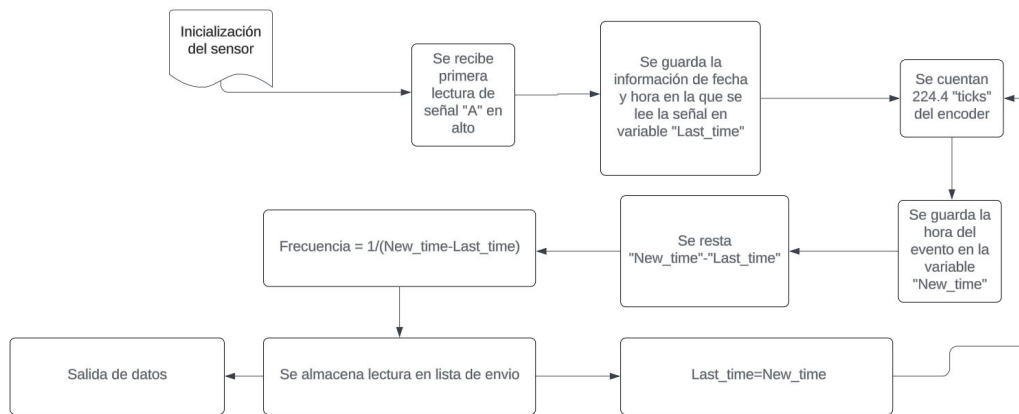


Figura 4.36: Diagrama de flujo para la lógica de lectura de frecuencia de rotación.

En el apéndice 1 se incluye solamente la lógica para encontrar la frecuencia de un actuador, sin embargo, para poder controlar actuadores adicionales, basta con crear nuevas variables de la clase “Encoder”, y asignarles los pines a los cuáles están conectadas las señales de los encoders de los actuadores.

4.8.2. Lectura e interpretación de temperatura

La lógica para la interpretación de la lectura de temperatura se basa fuertemente en las fórmulas y recomendaciones que se encuentran en la hoja de datos del circuito integrado MAX31865 [24] y en la librería especializada de Adafruit para este circuito integrado. [83]

Gracias a la librería de Adafruit, es posible crear un código conciso para la lectura, ya que la mayoría de la configuración se da al modificar los registros del MAX31865.

El dato de temperatura se obtiene por medio de la función `max31865.temperature()`, la cual aplica los procesos matemáticos descritos en la sección 4.4.3 a la señal de entrada, tras lo cual se convierte el dato a un string y se envía a la función de agrupamiento de datos. En la figura 4.37 se muestra el diagrama del proceso para la toma de temperatura:

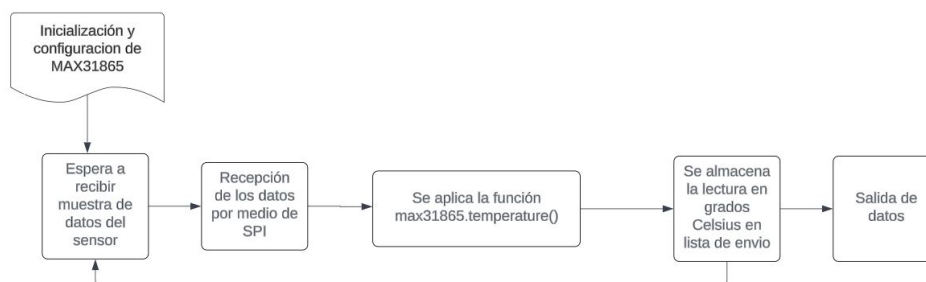


Figura 4.37: Diagrama de flujo para la lógica de lectura de temperatura del aceite.

4.8.3. Preparación y transmisión de los datos

Para la transmisión por el protocolo de sockets, primero se inicializa el socket en el servidor, que en este caso es la Raspberry Pi. Se abre el canal y se espera a que el dispositivo cliente envíe una petición de conexión. Una vez recibida, se graba la dirección IP del cliente y se conectan los sockets de cada extremo.

Una vez establecida la conexión, el servidor envía los paquetes de datos cada 20 segundos al cliente. Esta frecuencia de muestreo se elige para mantener un balance entre administrar los recursos de la Raspberry Pi y mantener un flujo de información representativo del estado actual de la máquina.

Antes de enviar los datos, se recolecta la siguiente información, obtenida de procesos anteriores:

- Lectura procesada de temperatura.
- Lectura procesada de frecuencia de rotación de cada actuador.
- Marca del tiempo en que se tomaron las lecturas, con hora, minuto y segundos.

La recolección de datos se realiza por “lotes”, de tal manera que se espera a tener todos los datos antes de enviar el conjunto. Una vez recolectados, los datos se añaden en una lista de Python en el orden de que se listan anteriormente, y se convierten a un “string” para permitir su transmisión por el protocolo de sockets.

Por último, se carga el “string” a la variable de transmisión y se envía el paquete al cliente. El proceso de preparación y envío de datos se muestra en la figura 4.38.

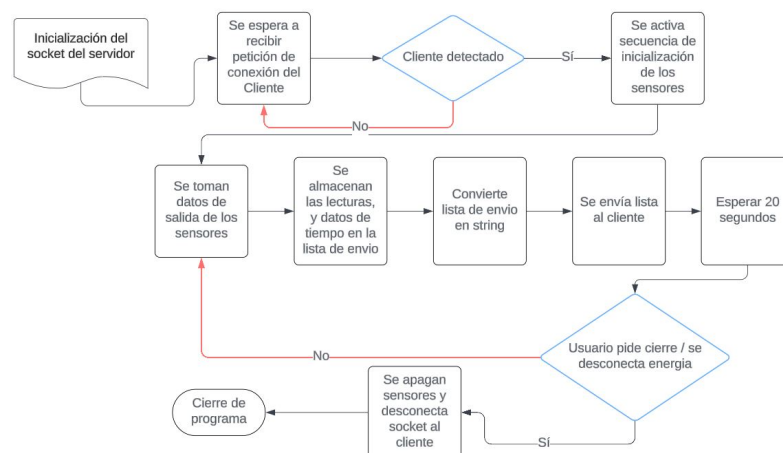


Figura 4.38: Diagrama de flujo para la lógica de transmisión y control de recolección del servidor.

4.8.4. Interpretación de los datos recibidos

Para recibir e interpretar los datos, se utiliza la transmisión por sockets, creando un cliente en la computadora que realiza las operaciones. Esta conexión se activa mediante el script principal de Python del cliente. Primero, se inicializa el socket, se conecta a la Raspberry Pi usando su dirección IP y se envía una petición de información, lo que inicia el flujo de datos.

El formato de listas en Python es consistente, compuesto por valores separados por comas y encerrados entre corchetes, de la siguiente forma: [valor1, valor2, valor3, ...]. Python contiene en su librería básica la función `list`, que convierte un valor ingresado en una lista. Esta función también tiene el método `.split()`, que separa el valor ingresado en elementos individuales de la lista usando un separador seleccionado. [91]

Esto significa que, al aplicar la función de la siguiente manera:

```
datos_leidos = list(datos_recibidos).split(,)
```

La variable `datos_leidos` será una lista que contiene los datos enviados desde la Raspberry Pi. Como el orden de los elementos en la lista no se altera, se sabe con certeza qué elemento de la lista corresponde a cada parámetro enviado.

Finalmente, se tomo la decisión de crear dos archivos de Excel durante la ejecución del programa:

- El primero es temporal, y solamente se utiliza como interfaz entre el ciclo de recepción de datos, y el de graficador, este solo contiene la serie de datos recibidos más recientes.
- El segundo archivo de Excel creado, es el que se sube a la base de datos, y en este se escriben los datos muestreados cada 15 minutos.

Se utiliza un Excel para conectar el graficador con la recepción de datos, por que ambas funciones operan en base a bucles que corren constantemente, y si se fueran a comunicar directamente, eso afectaría la sincronización de la lectura de los datos, o requeriría recursos excesivos del sistema. [92]

Este proceso se repite para cada string de datos recibido. En la figura 4.39 se muestra el flujo del código para recibir y acondicionar los datos.

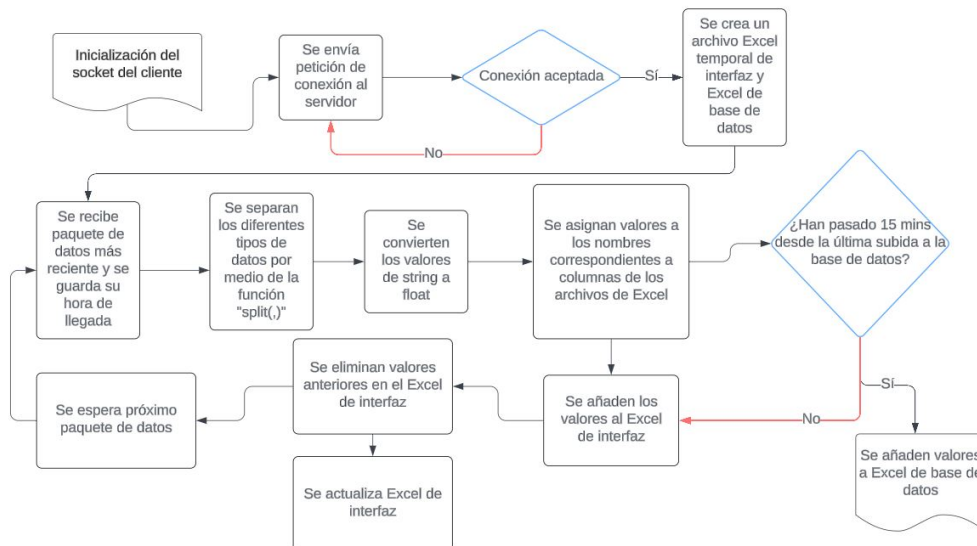


Figura 4.39: Diagrama de flujo para la lógica de recepción de datos en la terminal del usuario.

Carga a base de datos

La carga resulta uno de los procesos más sencillos del software del sistema, ya que simplemente utiliza la función `to.Excel` de la librería Pandas, la cual puede crear un nuevo Excel, en el caso de ser el primer registro del día, o añadir cada “lote” de datos a un Excel ya existente [93]. El Excel utiliza el machote de registros de trazabilidad de PRO como base.[13]

Al machote se añade una columna correspondiente al tiempo de residencia, el cual se calcula por medio de la ecuación 4.7, descrita en la sección 4.6.

Este proceso se realiza cada 15 minutos para mantener una trazabilidad adecuada, sin incluir datos en exceso. El Excel en la terminal se vincula a una carpeta de “OneDrive”, la cual se configura para subir y actualizar el archivo a la nube cada vez que se realiza un cambio.

Las plantillas de los formatos de Excel utilizados se pueden encontrar en el apéndice 3: “Formatos y archivos de Excel y CSV”.

Despliegue al graficador en tiempo real

Para poder generar el gráfico que representa las variables se utilizan las librerías `plotly` y `animate` de `matplotlib`. `Plotly` provee la base para convertir la lista de datos recibida en un gráfico de líneas, mientras que `animate` permite incorporar una animación donde se “dibujan” las líneas.

Mientras que matplotlib es capaz de desplegar cualquier lista de datos ya existente, no es capaz de hacerlo de manera dinámica, es decir, no se pueden mostrar los datos en el mismo gráfico conforme se procesan los datos.

Para compensar por las limitaciones de la librería, se opta por reasignar las variables correspondientes al gráfico en cada ciclo del bucle. Se crean 6 listas, donde 4 almacenan las lecturas de frecuencia de cada uno de los actuadores, una almacena las lecturas del sensor de temperatura, y la última guarda el dato de hora y minuto en que se tomaron las medidas. Cada una de estas listas tiene una longitud máxima de 50 elementos, que corresponde al número de puntos visibles en el gráfico en cualquier momento dado.

Conforme se reciben los paquetes de datos de la Raspberry Pi, se descompone la lista enviada en cada una de sus variables, y se añade a un archivo de Excel temporal, que contiene solamente el dato recibido más recientemente con un header en su columna que lo identifica.

Con cada ciclo del bucle, se lee el Excel y se almacena la serie de datos en listas separadas por tipo de dato que contienen un máximo de 50 objetos cada una, y se borran los datos más antiguos de cada lista, tras lo cual se actualiza la ventana de graficación. Para facilidad de lectura por parte del usuario, se crea un gráfico para la lectura de temperatura, y uno para las lecturas de frecuencia de rotación.

En la figura 4.40 se ilustra el proceso discutido anteriormente, mientras que en la figuras 4.41 y 4.42 se despliega un ejemplo de los gráficos de frecuencia y temperatura, respectivamente.

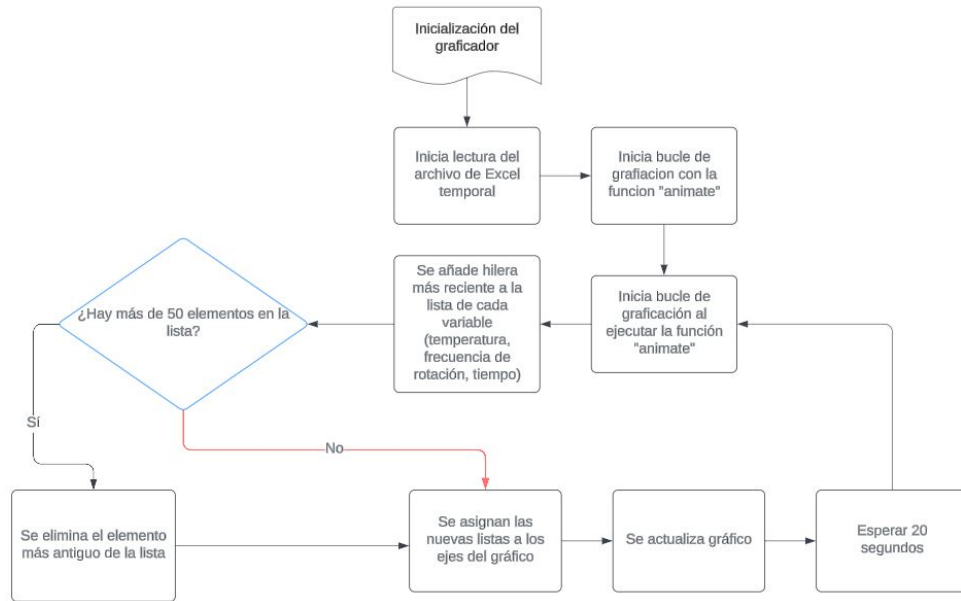


Figura 4.40: Diagrama de flujo para la lógica para graficación y monitoreo del estado actual de la maquinaria.

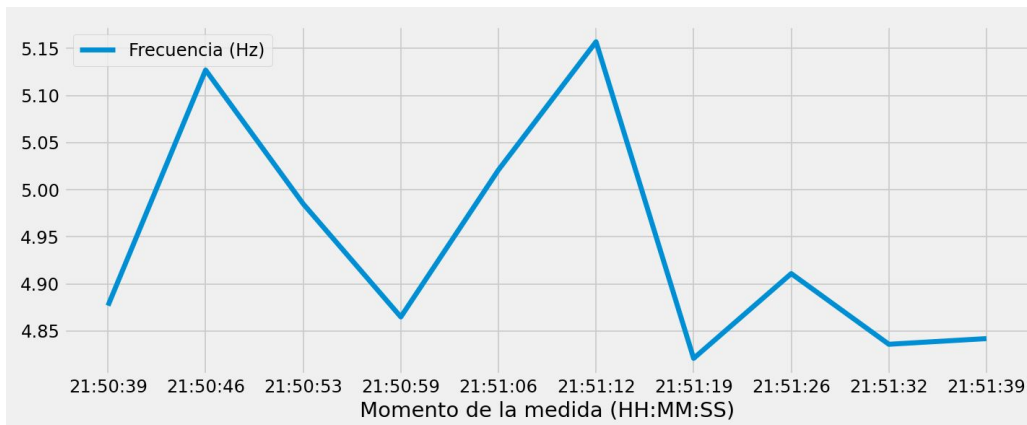


Figura 4.41: Gráfico de ejemplo de frecuencia generado por el sistema.

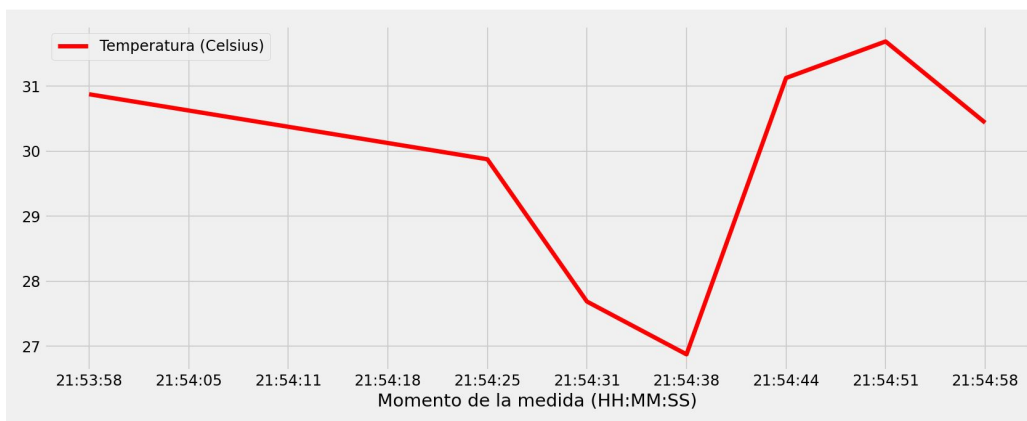


Figura 4.42: Gráfico de ejemplo de temperatura generado por el sistema.

Levantamiento de alarma

Para saber cuando una lectura sobrepasa los límites de temperatura aceptables, se compara cada dato de temperatura procesado contra una temperatura ideal ingresada por el usuario, si estos valores difieren por mas de 5 °C, se levantan una ventana de alarma en la interfaz gráfica. En la figura a continuación se muestra un ejemplo de la ventana de alarma:

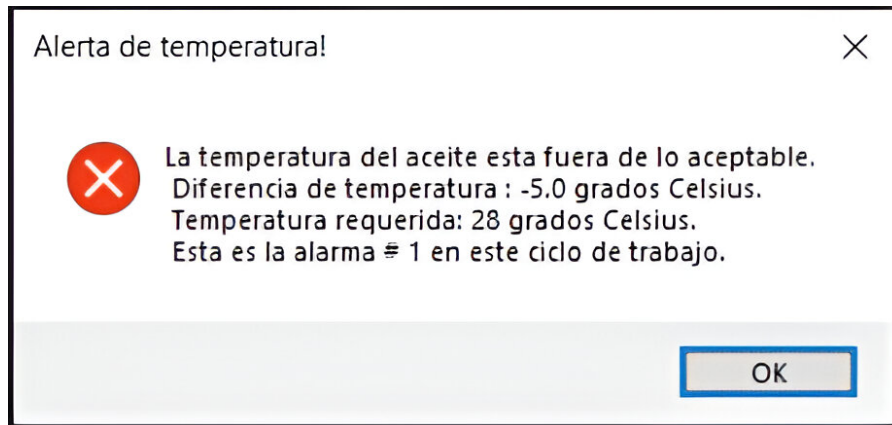


Figura 4.43: Ventana de prueba para el levantamiento de la alarma, con una temperatura ideal de 28°C, y una temperatura captada de 23 °C .

4.8.5. Programación modular del sistema

Con el objetivo de cumplir con las buenas prácticas de programación, se diseña el código en módulos. Esto permite que el código sea más fácil de entender, reduce la probabilidad de errores, facilita el diagnóstico de fallas y permite que las partes del código sean intercambiables.[94]

En el contexto del presente proyecto, se tiene un bucle principal en cada terminal, el cual maneja el orden en que se ejecuta cada uno de los módulos, ya sea para la recolección de señales, envío o recepción de los datos, o despliegue del gráfico, entre otros.

Gracias a este diseño, se puede cambiar alguno de los sensores por uno con un principio de funcionamiento diferente, y solo se debe modificar el módulo relevante a la recolección de las variables relacionadas. Mientras que dicha funcionalidad puede llegar a resultar útil en un ambiente industrial, se pone en uso durante la construcción del prototipo para las pruebas de validación, ya que se utiliza un sensor de temperatura distinto al planteado en el diseño final. En el capítulo 5: resultados y análisis, se aborda el tema a mayor detalle.

El código descrito en esta sección se puede encontrar en el apéndice 1: "Códigos y Series de comandos".

Capítulo 5

Resultados y análisis

5.1. Resultados de las simulaciones

5.1.1. Circuito de filtrado para el sensor AS5600S

Como se discute en la sección 4.4.3, se realiza una simulación de la respuesta al impulso del circuito de la figura 4.15 al conectar un encoder digital a la entrada del circuito de filtrado pasa bajas, y un osciloscopio digital a su salida para observar el comportamiento de la señal.

En la figura 5.1 se muestra la respuesta del circuito, con su respectiva escala, que corresponde a 0.1 ms por división en el eje horizontal, y 0.5 V por división en el eje vertical.

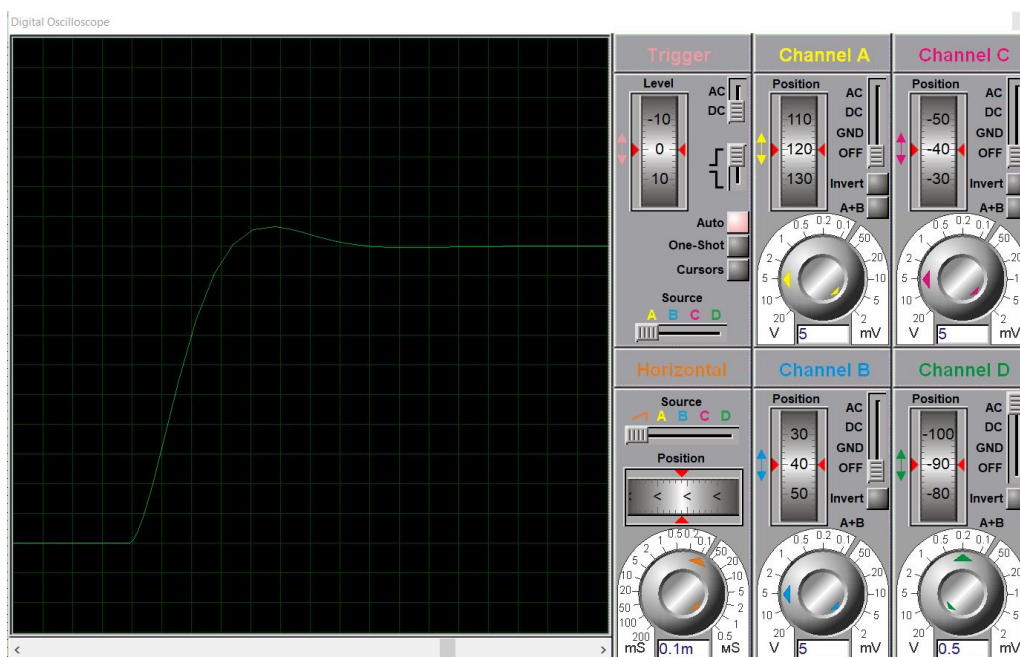


Figura 5.1: Resultado de la respuesta al impulso del circuito de filtrado simulado para el encoder AS5600S con escala de su cuadrícula.

Con el objetivo de tener un punto de comparación directa al comportamiento esperado mostrado en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11, se colocan marcas sobre la cuadrícula, que se pueden apreciar en la figura 5.2. Es importante notar que el valor mostrado en las anotaciones se obtuvo directamente, por medio de las medidas del simulador, y no por medio de estimación visual.

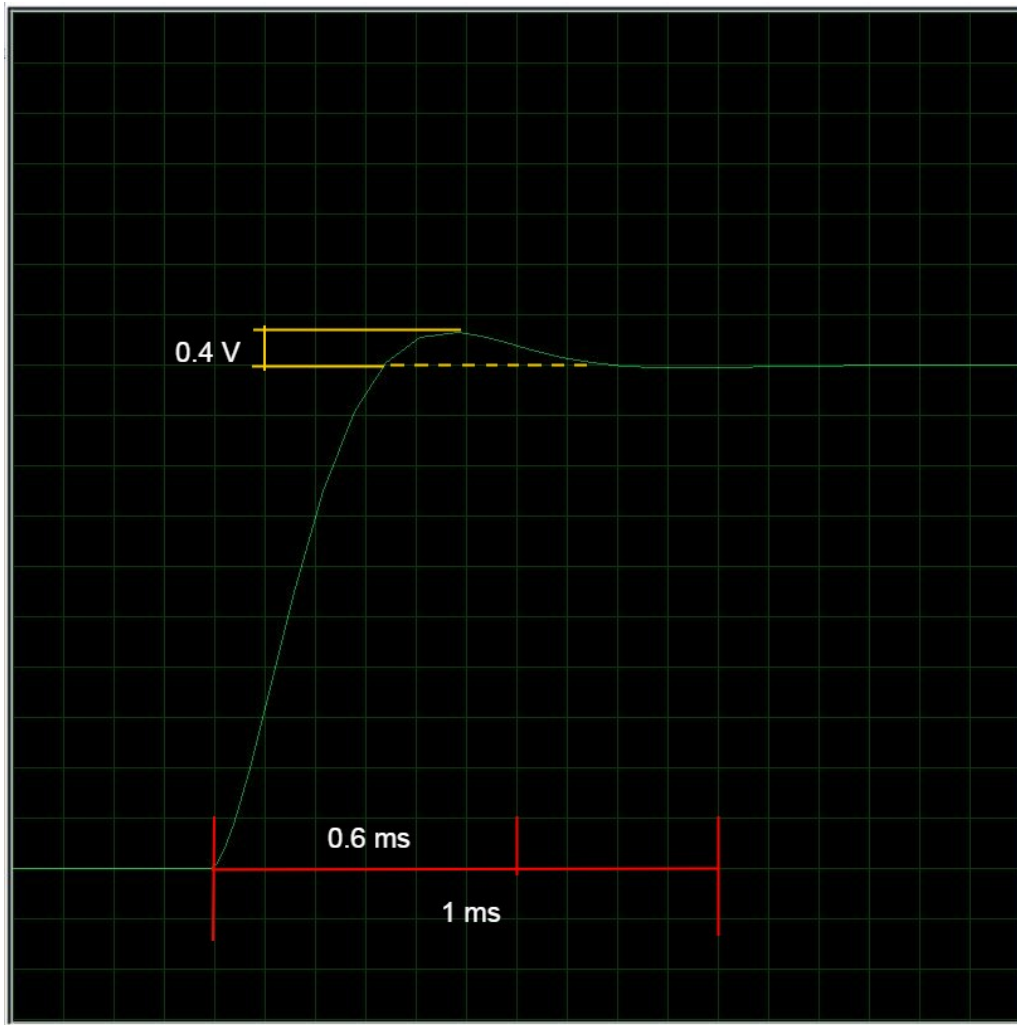


Figura 5.2: Resultado de la respuesta al impulso del circuito de filtrado simulado para el encoder AS5600S con líneas guía para valores significativos.

Como se puede observar, el sobreimpulso máximo es de aproximadamente 0.4 V, y el tiempo de asentamiento a un umbral del 2% es de 0.591 ms, lo cual coincide con las metas de diseño discutidas en la sección 4.4.2. Por lo tanto, el filtro logra exitosamente mantener el sobreimpulso por debajo del 10%, mientras que mantiene un tiempo de respuesta adecuado a la aplicación.

Por lo tanto, se puede afirmar que los resultados de simulación demuestran que el diseño del circuito de filtrado para el sensor AS5600S atenúa efectivamente el ruido de alta

frecuencia generado por un encoder a una frecuencia de corte de 920 Hz, y su respuesta al impulso se comporta según lo esperado por la teoría de diseño de filtros.

5.1.2. Circuito de acondicionamiento y linealización para el sensor RTD Pt100

Con el fin de verificar el funcionamiento de las conexiones y el código utilizado para el sensor RTD PT100 en conjunto con el circuito integrado MAX31865, se utiliza la configuración mostrada en la sección 4.4.3. El objetivo principal de esta prueba es asegurar el correcto funcionamiento del circuito de acondicionamiento.

Se procede a cargar el código contenido en `Simulacion_RTD.ino` (ver apéndice 1), y se configura el RTD en Proteus Lab para que su temperatura ambiente sea de 27 °C en la primera prueba, y 130 °C en la segunda. Para monitorear las lecturas, se conecta una terminal virtual a la salida del microprocesador, donde se despliega la resistencia del sensor y la temperatura leída. En la figura 5.3 se muestra la interfaz de configuración para el sensor RTD PT100, y los parámetros utilizados para la prueba a 27 °C.

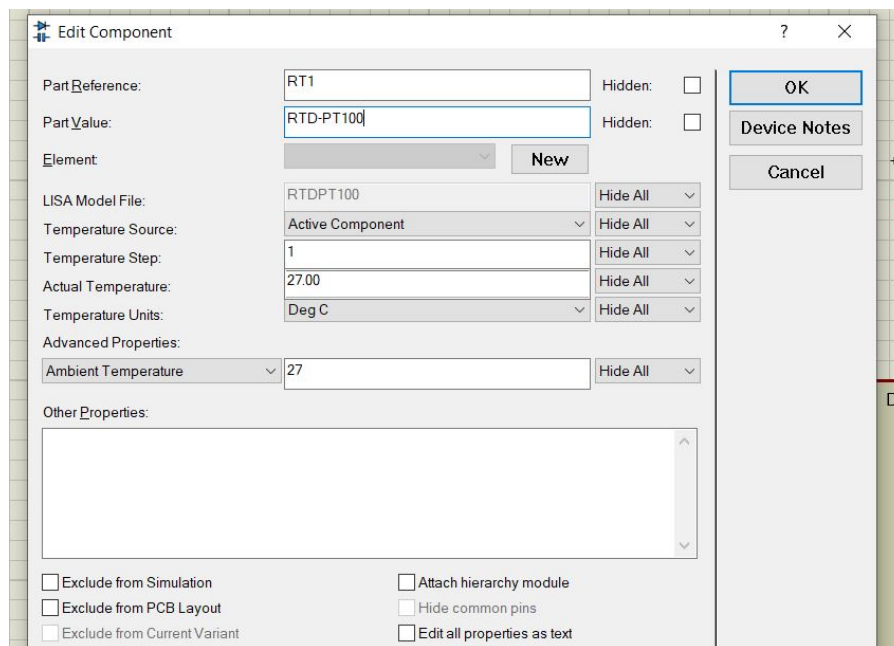


Figura 5.3: Interfaz para la configuración de las características del sensor RTD PT100 simulado.

En las figuras 5.4 y 5.5, se muestra el desarrollo de las pruebas a 27 °C y 130 °C respectivamente.

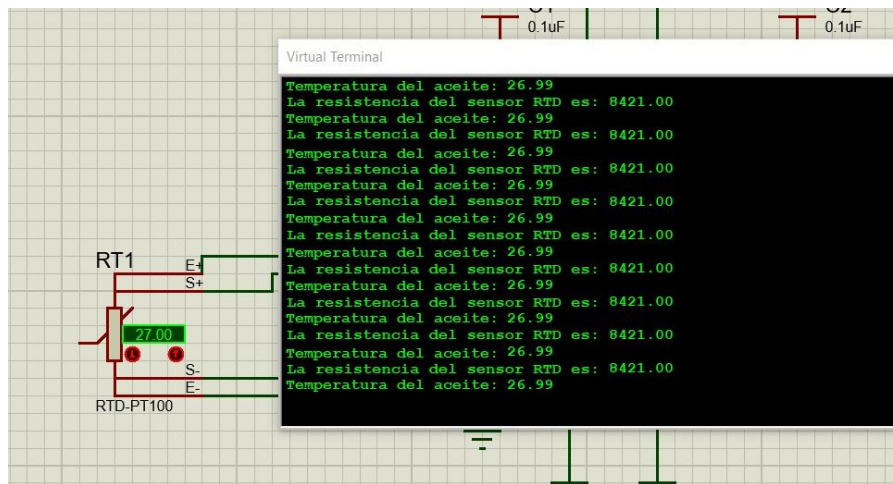


Figura 5.4: Lecturas de temperatura y resistencia del sensor RTD PT100 en la simulación a 27 °C.

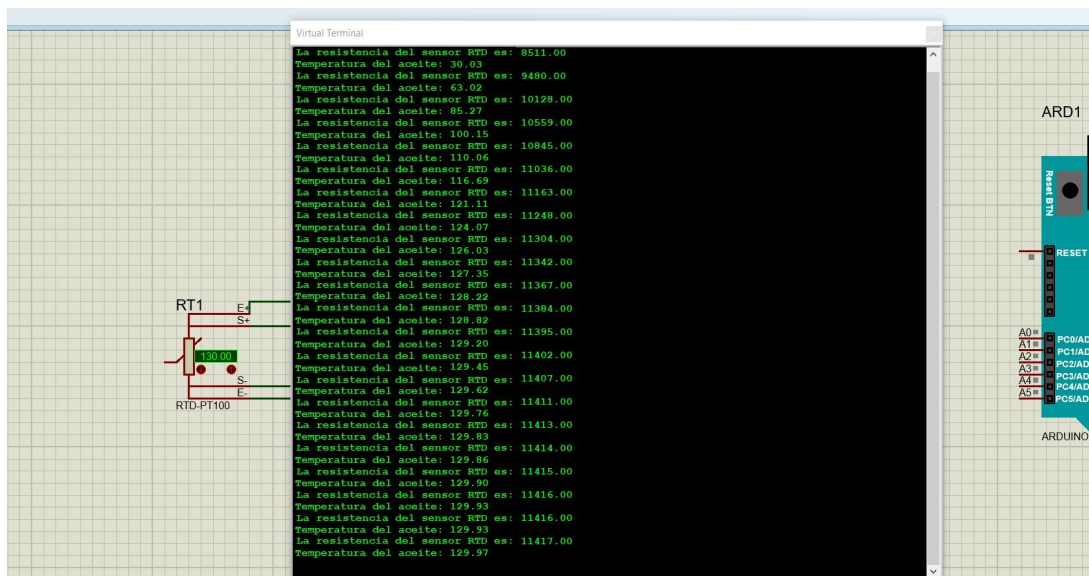


Figura 5.5: Lecturas de temperatura y resistencia del sensor RTD PT100 en la simulación a 130 °C.

La configuración del MAX31865 permite una lectura de temperatura con una precisión de ± 0.01 °C. Mientras que la medición de 27 °C se ajusta casi instantáneamente, la medida de 130 °C se adapta a la temperatura ambiental gradualmente, al mismo ritmo que su coeficiente de expansión mostrado en su hoja de datos. [95]

A pesar de que el ambiente de Proteus no permite validar la precisión del sensor RTD PT100 de la misma manera que una prueba física, sí permite verificar el correcto funcionamiento y configuración del circuito de acondicionamiento. Por lo tanto, al considerar la precisión inherente al sensor mostrada en el estándar IEC 60751 [18], se considera satisfactorio el resultado.

5.1.3. Simulación de resistencia a vibraciones del mecanismo de acople

Durante la operación del diseño propuesto, garantizar la precisión de las medidas de frecuencia rotacional requiere que el encoder y el imán conectado al eje del motor se encuentren correctamente alineados.

La importancia del alineamiento se debe a la polarización única del imán utilizado en los encoders magnéticos, ya que el sensor mide cambios en el campo magnético, cualquier desvío de alineación puede llegar a afectar significativamente la medición realizada.[96]

Con el fin de garantizar la alineación a lo largo de la vida útil del sistema diseñado, se realizan pruebas de vibración sobre el sujetador del sensor en la sección 4.7.3, con los parámetros y procedimientos detallados en la sección 4.7.4.

Mientras que los parámetros establecidos originalmente para la prueba indican que se realizaría la simulación a 60 Hz, el software FreeCAD está diseñado para realizar pruebas hasta que se detecte el primer fallo mecánico en la pieza. Como consecuencia, el primer fallo detectado se dio a una frecuencia de vibración de 663.73 Hz, con una deformación máxima de 0.5 mm. Una vista general de los resultados se presenta en la figura 5.7, mientras que la ventana de la figura 5.6 muestra la frecuencia de vibración para el primer fallo, y la figura 5.8 presenta una vista a detalle de la geometría resultante.

Property	Value
Base	
Label	CCX_EigenMode_3_Results
Result Type	Fem::ResultMechanical
Data	
Stats	[-18.44,18.94,-38.41,38.37,-659.21,654.60,0.00,659.43,3.98,11921.86,...]
Time	0.00
Eigenmode	3
Eigenmode Frequency	663.73

Figura 5.6: Resultados de frecuencia requerida para primer fallo de la prueba de vibración para el sistema de acople.

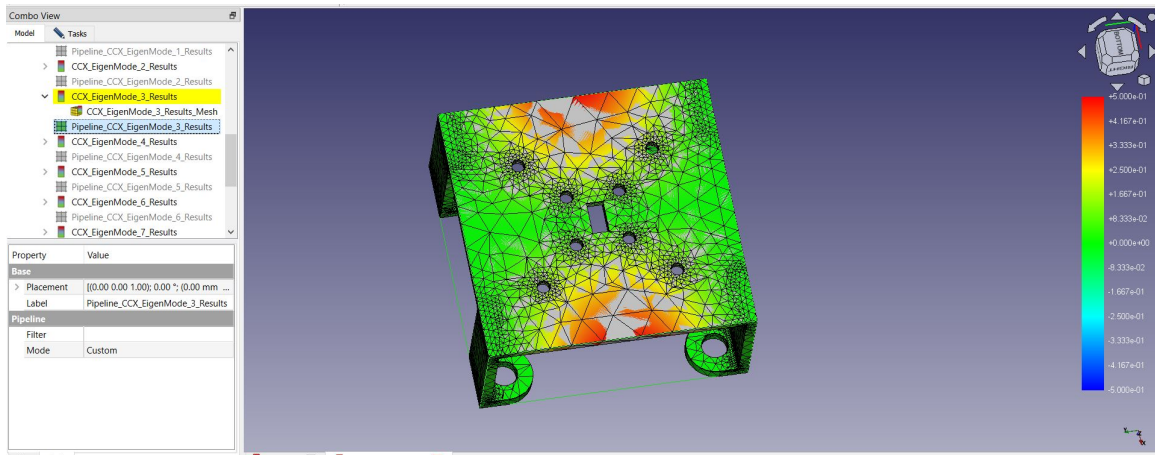


Figura 5.7: Vista general de los resultados de la simulación de fallo por vibración.

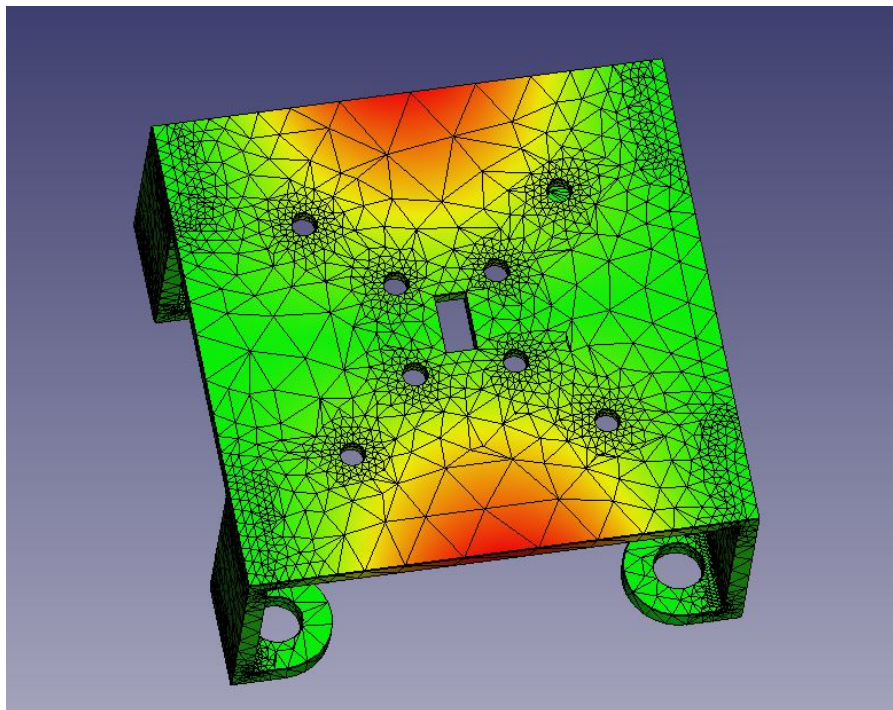


Figura 5.8: Vista en acercamiento del mapa de deformación por vibración.

Con la información obtenida, se confirma que el diseño del acople del sensor AS5600S es capaz de preservar su geometría, y por lo tanto su alineación al imán del eje del actuador a medir, a una frecuencia 10 veces mayor a la frecuencia máxima esperada en la planta de 60 Hz.

Adicionalmente, la deformación plástica del acople se concentra en los bordes de su estructura, y no directamente en el área donde se encuentra el sensor, por lo que el diseño del acople del sensor se considera apto para operación prolongada en el ambiente industrial esperado, sin afectar las medidas del sensor por fallos de alineación.

5.2. Prototipo utilizado para pruebas de validación

Debido al limitado acceso a la planta de producción para realizar pruebas, así como restricciones logísticas y económicas, se consideró necesario modificar ciertos componentes y procesos relacionados al prototipo operacional creado para realizar las pruebas de validación. Las modificaciones y su relación al diseño planteado se exploran a lo largo de esta sección.

5.2.1. Cambios a pruebas de validación

Los cambios más relevantes a las pruebas de validación con respecto a lo esperado del prototipo final son los siguientes:

- **Rango y medio para pruebas de temperatura:** Por seguridad del usuario, y falta de equipo especializado, se realizan las pruebas con agua como medio líquido a medir, y se reduce la temperatura de prueba a un rango de 20 a 80 °C. Ya que las pruebas afectadas buscan medir la incertidumbre de los sensores y la confianza matemática de las medidas, los cambios no afectan el desempeño ni la eficacia de las pruebas.
- **Rango y actuadores para pruebas de frecuencia:** El diseño del sistema implica la montura de los sensores AS5600S en los diferentes actuadores de la freidora #5, sin embargo, la intervención requeriría un paro en las operaciones, el cual no se logró realizar. Por lo tanto, se optó por utilizar un motor de 6 VCD como actuador a medir. Por lo tanto, la frecuencia de las pruebas se realiza en el rango de 0 a 30 Hz.

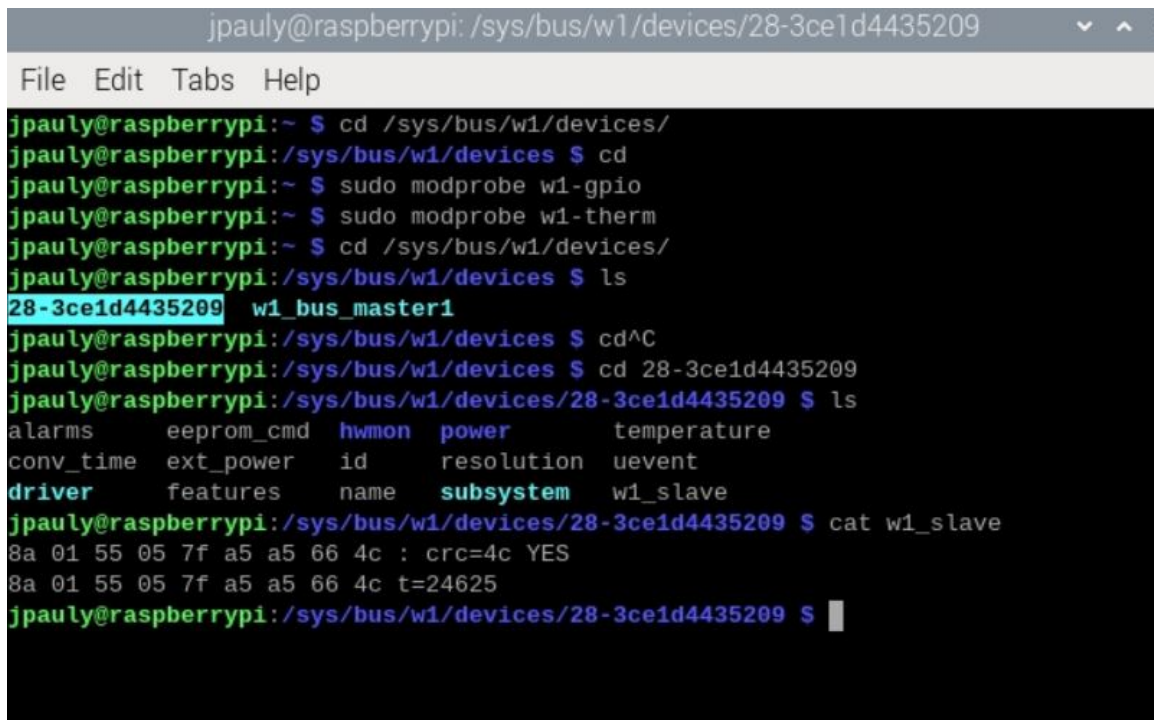
5.2.2. Sensor de temperatura utilizado en el prototipo

Para realizar las pruebas de validación de temperatura se utiliza un sensor DS18B20 y se realiza su acondicionamiento por medios digitales. Se aprovecha la estructura modular de software del sistema para cambiar el módulo original del sensor RTD PT100 por uno diseñado para recibir, acondicionar y enviar la información al socket del servidor sin interferir procesos no directamente relevantes.

Ya que la precisión del sensor RTD PT100 se puede confirmar a través de su hoja de datos [95], el estándar IEC 60751 [18] y la simulación realizada previamente, lo que se busca validar a través del uso del sensor DS18B20 es la precisión de las mediciones de temperatura a través de todo el sistema. Para mantener la consistencia con el diseño planteado, se opera el sensor en un rango de temperaturas de -10 a 80 °C, pues según su hoja de datos, en este rango su incertidumbre es de ± 0.5 °C. [97]

Para configurar el sensor DS18B20 se utiliza la configuración de un cable para GPIO de la Raspberry Pi, donde se comunica con el sensor por medio de su dirección GPIO única.

Una ventana de comandos donde se ejecuta el proceso de configuración se muestra en la figura 5.9.



```
jpauly@raspberrypi: /sys/bus/w1/devices/28-3ce1d4435209
File Edit Tabs Help
jpauly@raspberrypi:~ $ cd /sys/bus/w1/devices/
jpauly@raspberrypi:/sys/bus/w1/devices $ cd
jpauly@raspberrypi:~ $ sudo modprobe w1-gpio
jpauly@raspberrypi:~ $ sudo modprobe w1-therm
jpauly@raspberrypi:~ $ cd /sys/bus/w1/devices/
jpauly@raspberrypi:/sys/bus/w1/devices $ ls
28-3ce1d4435209 w1_bus_master1
jpauly@raspberrypi:/sys/bus/w1/devices $ cd^C
jpauly@raspberrypi:/sys/bus/w1/devices $ cd 28-3ce1d4435209
jpauly@raspberrypi:/sys/bus/w1/devices/28-3ce1d4435209 $ ls
alarms      eeprom_cmd  hwmon  power      temperature
conv_time   ext_power   id      resolution uevent
driver      features    name    subsystem  w1_slave
jpauly@raspberrypi:/sys/bus/w1/devices/28-3ce1d4435209 $ cat w1_slave
8a 01 55 05 7f a5 a5 66 4c : crc=4c YES
8a 01 55 05 7f a5 a5 66 4c t=24625
jpauly@raspberrypi:/sys/bus/w1/devices/28-3ce1d4435209 $
```

Figura 5.9: Ventana de comandos para la detección y activación de la funcionalidad de un hilo para el sensor DS18B20.

El módulo de control para el sensor DS18B20 se puede encontrar en el apéndice 1: “Códigos y series de comandos”.

5.2.3. Motor y controlador utilizado en el prototipo

El actuador utilizado para las pruebas de validación es un motor DC GM25-370CA conectado a un encoder magnético AS5600. Para poder conocer la frecuencia real de rotación del motor, se utiliza un “driver” para motor DC L298N, y se alimenta a ambos con una fuente de 12 VCD.

Seguidamente, se crea una secuencia de comandos en Python para poder variar la frecuencia de rotación del motor desde 0 Hz a 30 Hz. Para lograrlo, se envía una señal PWM con frecuencia de 2000 Hz a la entrada de lógica del controlador L298N, y se varía el régimen de trabajo de la onda para obtener una respuesta porcentual del motor, según lo establece su hoja de datos [98].

Para poder determinar el régimen de trabajo necesario, se examina la hoja de datos del motor GM25-370CA [99], donde se puede observar que su velocidad sin carga es de 2160 RPM, lo que equivale a 36 Hz. Como resultado, se utiliza la siguiente ecuación para determinar los regímenes de trabajo para cada frecuencia a probar:

$$RT = \frac{f}{36} \quad (5.1)$$

Donde f es la frecuencia a la que se desea que gire el motor y RT es el régimen de trabajo de la onda PWM. Como resultado, se obtiene el cuadro 5.1.

Cuadro 5.1: Frecuencia deseada de operación del motor y su mapeo al régimen de trabajo de la señal PWM

Frecuencia deseada (Hz)	Régimen de Trabajo
5	0,139
10	0,278
15	0,417
20	0,556
25	0,694
30	0,833

El código utilizado para controlar el motor se puede encontrar en el apéndice 1: “Códigos y series de comandos”, y todos los planos del prototipo se pueden encontrar en el apéndice 2: “Planos y diagramas”. Por último, en las figuras 5.10, 5.11 y 5.12 se muestran diferentes vistas del prototipo. Es importante notar que no se incluye la alimentación del motor en las imágenes.

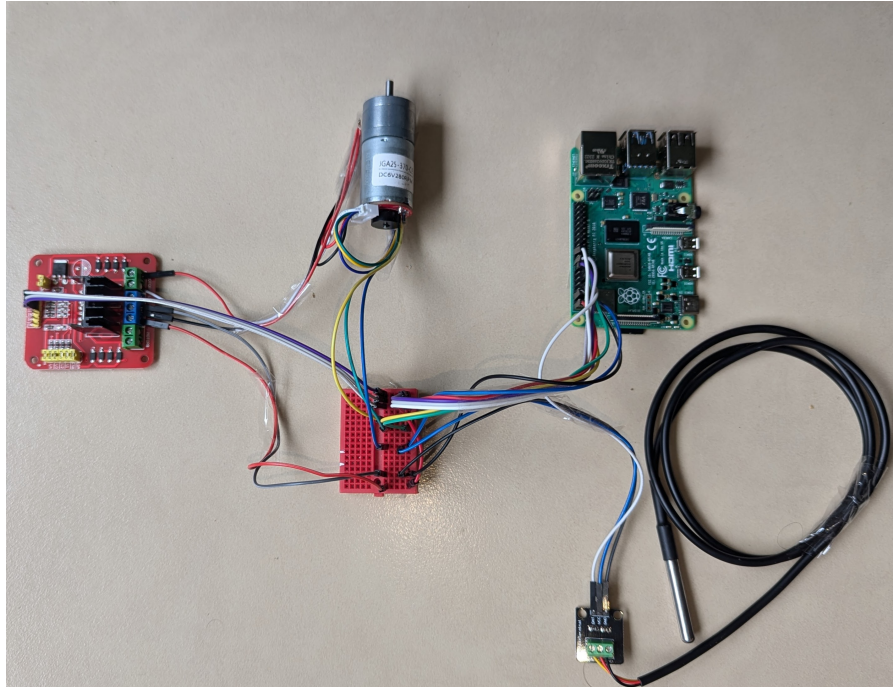


Figura 5.10: Vista completa del prototipo operacional.

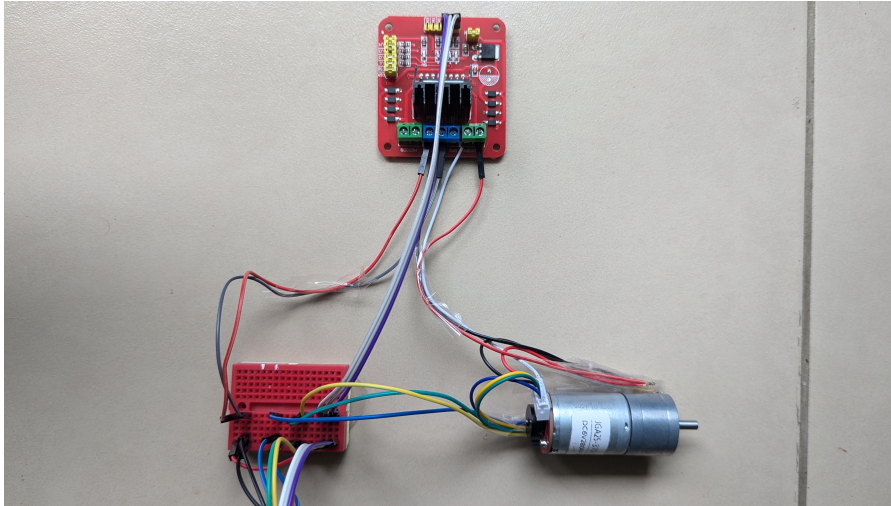


Figura 5.11: Vista con acercamiento al motor DC, el controlador L298N y el encoder AS5600S.

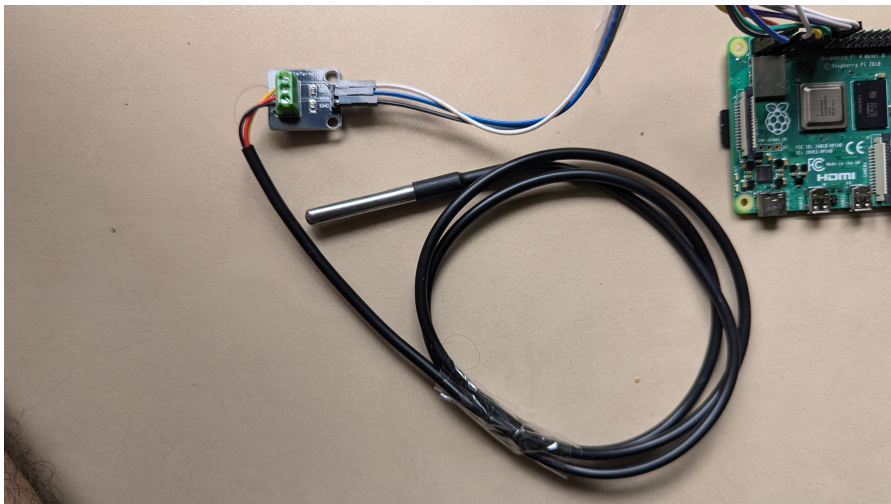


Figura 5.12: Vista con acercamiento al sensor de temperatura DS18B20 y su tarjeta de acondicionamiento.

5.3. Ejecución y Resultados de las pruebas de validación

5.3.1. Prueba general de integridad, tiempo de despliegue y frecuencia de subida

Para validar la velocidad de transmisión de datos, el tiempo en procesar la información y la integridad de los datos transmitidos, se agrega una celda a cada serie de datos que contiene un número de identificación para poder rastrear el recorrido de cada dato individual. El número de identificación se agrega en el momento en que la Raspberry Pi muestrea las lecturas de los sensores.

Para cada serie de pruebas, se configuró la temperatura aceptable a 28 °C, y se colocó el sensor en agua a temperatura ambiente, y se configuró para que operara a una frecuencia nominal de 15 Hz. Estos valores se escogieron para facilitar la ejecución de las pruebas; además, el valor específico de cada dato no es relevante para las pruebas de validación en cuestión.

Se modificó el código del socket del servidor para guardar cada serie de datos enviada en un archivo llamado `rastreo_integridad.csv`, de manera similar al archivo temporal generado por el cliente.

Se guardaron 3 series de prueba, cada una de 60, 30 y 15 minutos respectivamente, y se guardan los archivos de rastreo del servidor, los machotes de trazabilidad y los archivos temporales del cliente para cada prueba.

Integridad de los datos

Al utilizar los archivos de rastreo de integridad en conjunto con el número de identificación de cada serie de datos, es posible comparar directamente el valor de los datos en ambos extremos de la cadena de transmisión.

Una vez ejecutadas las pruebas, se combinan las columnas de hora de envío, temperatura registrada y frecuencia de rotación de cada archivo `rastreo_integridad.csv` con su archivo `temp.csv` del cliente respectivo, y por medio de la funcionalidad SORT de Excel se alinean los registros en base a su número de identificación.

Por último, se comparan las celdas relevantes para cada variable, y se cuenta el número de casillas cuyo valor no coincida. En la figura 5.13 se muestra una captura de pantalla que ejemplifica el procedimiento. Las operaciones se realizan dentro de los archivos `calculos_x_minutos.xlsx`.

ID	hora_recibido	hora_envio	hora_envio_grafico	tiempo_procesamiento	freq	temp_c	hora_envio_rastreo	tiempo_procesamiento_rastreo	freq_rastreo	temp_c_rastreo	Diferencia_hora_envio	Porcentaje de exito	Diferencia_frecuencia
0	00:35.1	00:35.7	16:00:35	00:01.6	15.017	26.187	00:35.7	00:01.6	15.017	26.187	0.00	=COUNTIF(M2:M258,0)/COUNT(M2:M258)*100	
1	00:37.4	00:39.4	16:00:39	00:01.6	15.087	26.187	00:39.4	00:01.6	15.087	26.187	0.00		
2	00:41.1	00:43.0	16:00:42	00:01.6	14.986	26.125	00:43.0	00:01.6	14.986	26.125	0.00		
3	00:44.7	00:46.6	16:00:46	00:01.6	14.946	26.187	00:46.6	00:01.6	14.946	26.187	0.00		
4	00:48.3	00:50.2	16:00:50	00:01.6	15.135	26.187	00:50.2	00:01.6	15.135	26.187	0.00		
5	00:51.9	00:53.8	16:00:53	00:01.6	15.044	26.187	00:53.8	00:01.6	15.044	26.187	0.00		
6	00:55.6	00:57.4	16:00:57	00:01.6	14.856	26.187	00:57.4	00:01.6	14.856	26.187	0.00		
7	00:59.1	01:01.1	16:01:01	00:01.6	14.994	26.187	01:01.1	00:01.6	14.994	26.187	0.00		
8	01:02.8	01:04.7	16:01:04	00:01.6	14.979	26.187	01:04.7	00:01.6	14.979	26.187	0.00		
9	01:06.4	01:08.3	16:01:08	00:01.6	14.852	26.187	01:08.3	00:01.6	14.852	26.187	0.00		
10	01:10.0	01:11.9	16:01:11	00:01.6	14.894	26.187	01:11.9	00:01.6	14.894	26.187	0.00		
11	01:13.6	01:15.5	16:01:15	00:01.6	15.175	26.187	01:15.5	00:01.6	15.175	26.187	0.00		
12	01:17.2	01:19.1	16:01:19	00:01.6	14.993	26.187	01:19.1	00:01.6	14.993	26.187	0.00		
13	01:20.8	01:22.8	16:01:22	00:01.6	15.005	26.187	01:22.8	00:01.6	15.005	26.187	0.00		
14	01:24.4	01:26.4	16:01:26	00:01.6	15.069	26.187	01:26.4	00:01.6	15.069	26.187	0.00		
15	01:28.1	01:30.0	16:01:29	00:01.6	15.157	26.187	01:30.0	00:01.6	15.157	26.187	0.00		
16	01:31.7	01:33.6	16:01:33	00:01.6	14.853	26.187	01:33.6	00:01.6	14.853	26.187	0.00		
17	01:35.3	01:37.2	16:01:37	00:01.6	14.836	26.187	01:37.2	00:01.6	14.836	26.187	0.00		
18	01:38.9	01:40.8	16:01:40	00:01.6	14.915	26.187	01:40.8	00:01.6	14.915	26.187	0.00		
19	01:42.5	01:44.5	16:01:44	00:01.6	14.84	26.187	01:44.5	00:01.6	14.84	26.187	0.00		
20	01:46.1	01:48.1	16:01:48	00:01.6	15.176	26.187	01:48.1	00:01.6	15.176	26.187	0.00		
21	01:49.8	01:51.7	16:01:51	00:01.6	15.109	26.187	01:51.7	00:01.6	15.109	26.187	0.00		
22	01:53.4	01:55.3	16:01:55	00:01.6	15.122	26.187	01:55.3	00:01.6	15.122	26.187	0.00		
23	01:57.0	01:58.9	16:01:58	00:01.6	14.857	26.187	01:58.9	00:01.6	14.857	26.187	0.00		
24	02:00.6	02:02.5	16:02:02	00:01.6	14.973	26.187	02:02.5	00:01.6	14.973	26.187	0.00		
25	02:04.2	02:06.2	16:02:06	00:01.6	14.979	26.187	02:06.2	00:01.6	14.979	26.187	0.00		

Figura 5.13: Captura de pantalla de archivo de Excel cálculos_15_minutos.xlsx.

Una vez realizado el procedimiento sobre cada uno de los archivos de prueba, se observa que el porcentaje de integridad de los datos se aproxima al 99.99%. No se puede afirmar con certeza que la transmisión de los datos tiene una integridad del 100%, ya que series de datos más extensas, eventualidades o anomalías no planificadas pueden afectar dicha métrica. Sin embargo, dentro de las pruebas realizadas, la integridad de los datos transmitidos cae dentro de los parámetros requeridos.

Tiempo en desplegar datos en el gráfico

Para encontrar el tiempo promedio en cada etapa de la transmisión, y el tiempo que toma llevar un dato desde su captura hasta su graficación, se vuelven a utilizar los archivos contabilidad_de_tiempos_x_minutos.xlsx para cada prueba, y se calcula el promedio de cada etapa, como se muestra en la figura 5.14:

pto	Diferencia_envio_recibido	Tiempo promedio de transmision	Tiempo promedio de procesado	Diferencia_recibido_graficado	Tiempo promedio de envio a graficador	Tiempo promedio end-to-end (segundos)
2	1.6	00:00.6	00:01.9	00:01.6	00:01.6	00:04.9
3	1.6	00:02.0	00:01.6	00:01.6	00:01.6	
4	1.6	00:01.9	00:00.004	00:00.9	00:01.4	
5	1.6	00:01.9		00:01.3		
6	1.6	00:02.2		00:02.0		
7	1.6	00:01.9		00:01.1		
8	1.6	00:01.8		00:01.4		
9	1.6	00:02.0		00:01.9		
10	1.6	00:01.9		00:01.2		
11	1.6	00:01.9		00:01.6		
12	1.6	00:01.9		00:01.0		
13	1.6	00:01.9		00:01.4		
14	1.6	00:01.9		00:01.8		
15	1.6	00:02.0		00:01.2		
16	1.6	00:02.0		00:01.6		
17	1.6	00:01.9		00:00.9		
18	1.6	00:01.9		00:01.3		
19	1.6	00:01.9		00:01.7		
20	1.6	00:01.9		00:01.1		

Figura 5.14: Captura de pantalla de archivo de Excel contabilidad_de_tiempos_15_minutos.xlsx que muestra tiempos promedios en diferentes etapas del ciclo de captura y graficación de datos.

Una vez realizado el proceso para cada archivo de prueba, se obtienen los valores de tiempos mostrados en el cuadro 5.2.

Cuadro 5.2: Duración promedio de cada etapa del proceso del sistema

Etapa	Duración (s)
Captura y procesamiento	1,600
Transmisión	0,004
Ejecución de secuencias	1,896
Graficación	1,100
Total	4,600

Frecuencia de subida a la base de datos

Para verificar la frecuencia de subida de datos, es suficiente con confirmar que la funcionalidad de subida de datos del socket del cliente funciona apropiadamente.

Con este fin, durante la ejecución de las pruebas de integridad se configuró la frecuencia de subida a 6 minutos, para tener un mayor tamaño de muestra. Para almacenar la información se utilizan los archivos `Machote_trazabilidad_x_minutos.csv`.

Tras concluir las pruebas, simplemente se analizan las estampillas de tiempo de cada archivo relevante para confirmar la frecuencia de subida requerida. En la figura 5.15 se muestra el resultado de la prueba de 15 minutos de duración:

	F	G	H	I	J	K
	Diferencia_envio_recibido	Tiempo promedio de transmision	Tiempo promedio de procesado	Diferencia_recibido_graficado	Tiempo promedio de envio a graficador	Tiempo promedio end-to-end (segundos)
1	1.6	00:00.6	00:01.9	00:01.6	00:01.6	00:04.9
2	1.6	00:02.0		00:01.6	00:01.4	
3	1.6	00:01.9	00:00.004	00:00.9		
4	1.6	00:01.9		00:01.3		
5	1.6	00:02.2		00:02.0		
6	1.6	00:01.9		00:01.1		
7	1.6	00:01.8		00:01.4		
8	1.6	00:02.0		00:01.9		
9	1.6	00:01.9		00:01.2		
10	1.6	00:01.9		00:01.6		
11	1.6	00:01.9		00:01.0		
12	1.6	00:01.9		00:01.4		
13	1.6	00:01.9		00:01.8		
14	1.6	00:02.0		00:01.2		
15	1.6	00:02.0		00:01.6		
16	1.6	00:01.9		00:00.9		
17	1.6	00:01.9		00:01.3		
18	1.6	00:01.9		00:01.7		
19	1.6	00:01.9		00:01.1		
20	1.6	00:01.9		00:01.1		

Figura 5.15: Captura de pantalla de archivo de Excel `Machote_trazabilidad_15_minutos.csv` que muestra cada entrada que se sube a la base de datos.

Como se puede observar, se realizan 5 subidas a la base de datos en el periodo de 30 minutos, lo que coincide con lo esperado. De manera similar, se confirma que se realizan 3 y 10 subidas para las pruebas de 15 y 60 minutos respectivamente.

Por lo tanto, la frecuencia de subida a la base de datos es certera al tiempo asignado a la variable de tiempo de subida, por lo que el sistema es capaz de realizar una carga a la base de datos cada 5 minutos o menos.

Todos los archivos mencionados para estas pruebas pueden ser encontrados en el apéndice 3: “Formatos y archivos de Excel y CSV”.

5.3.2. Incertidumbre de las medidas de temperatura

La ejecución de la prueba de incertidumbre de temperatura consistió en llevar un recipiente con agua a cada una de las temperaturas establecidas por la prueba de validación, y tomar 35 muestras con el sistema. Se utilizó un termómetro digital como patrón para las pruebas, y las muestras se tomaron una vez que el sensor DS18B20 llegó a una temperatura estable. En la figura 5.16 se muestra el termómetro digital utilizado como patrón, mientras que en la figura 5.17 se muestran ejemplos de las pruebas realizadas a 20 °C, y en la figura 5.18 se muestra un ejemplo de las pruebas realizadas para 40 °C y las demás temperaturas mayores.



Figura 5.16: Termómetro digital utilizado como patrón para las pruebas de incertidumbre de medidas de temperatura.



Figura 5.17: Ejemplo de la configuración para las pruebas de medición de temperatura a 20 °C.



Figura 5.18: Ejemplo de la configuración para las pruebas de medición de temperatura a 40 °C.

Nótese que en la figura 5.18 no se muestran los componentes en la imagen, ya que se mantuvieron alejados de la fuente de calor para garantizar su seguridad.

Una vez realizadas las pruebas a 20, 40, 60, y 80 °C, se convierten los archivos .CSV generados a formato .xlsx para preservar cualquier operación realizada sobre ellos, y se calcula: el promedio, la desviación estándar, el porcentaje de error respecto al patrón, y la desviación mínima y máxima para cada intervalo de prueba. En la figura 5.19 se muestra una captura de pantalla del archivo de Excel donde se realizó el análisis de la prueba a

60 °C, y en el cuadro 5.3 se muestran los resultados tabulados para cada prueba.

Figura 5.19: Ejemplo de la hoja de cálculo utilizada para la prueba de medición de temperatura a 60 °C.

Cuadro 5.3: Promedio, desviación estándar, valores máximos, y mínimos para las pruebas de incertidumbre de las medidas de temperatura.

Temperatura de prueba (°C)	Promedio(°C)	Desviación estándar (± °C)	Desviación positiva máxima (°C)	Desviación negativa máxima (°C)
20	20,066	0,199	0,415	-0,315
40	40,047	0,220	0,395	-0,332
60	60,090	0,210	0,443	-0,301
80	80,041	0,211	0,396	-0,325

Adicionalmente, en el cuadro 5.4 se muestran los porcentajes de error respecto al patrón para cada prueba.

Cuadro 5.4: Error respecto al patrón para cada prueba de incertidumbre de las medidas de temperatura.

Temperatura de prueba (°C)	Promedio(°C)	% de error respecto al patrón
20	20,066	0,33
40	40,047	0,12
60	60,090	0,13
80	80,041	0,05

Al analizar los contenidos de los cuadros 5.4 y 5.3 se puede afirmar que la mayor desviación estándar a través de todas las pruebas es de ± 0.22 °C, y el mayor error respecto al patrón es de 0,330 %.

Seguidamente, se calcula la incertidumbre de las mediciones, se utiliza la incertidumbre tipo A [100], y se usa la mayor desviación estándar de la muestra como valor más conservador:

$$\mu_A = \frac{S_{mayor}}{\sqrt{n}} = \frac{0,22}{\sqrt{35}} = 0,037 \quad (5.2)$$

Para propósitos de la implementación final se utiliza el sensor RTD P100 de Omega, que corresponde a un sensor RTD de clase A, por lo que su incertidumbre asociada es de $\pm 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$ [35]. Al combinar ambas incertidumbres se obtiene que:

$$\mu_{total} = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_{RTD}^2} = \sqrt{0,037^2 + 0,12^2} = 0,125 \quad (5.3)$$

Por lo que la incertidumbre total del sistema, considerando el sistema de toma de medidas y el sensor RTD PT100, es de $\pm 0,125 \text{ }^\circ\text{C}$.

Todos los archivos utilizados para realizar el análisis anterior se pueden encontrar en el apéndice 2, dentro de la carpeta “Pruebas de incertidumbre de temperatura”.

5.3.3. Incertidumbre de las medidas de elementos rotativos

El procedimiento para determinar la incertidumbre de las medidas de la lectura de los elementos rotativos es similar al de las medidas de temperatura, con la notable excepción de que el encoder magnético AS5600S no tiene una incertidumbre medible, ya que este sensor solamente envía pulsos binarios. Por lo tanto, solo es aplicable la incertidumbre tipo A de las mediciones.

Para realizar las pruebas, se inicializa el archivo `controlador_motor_dc.py` junto a los sockets de ambas partes del sistema, una vez verificada la conexión entre los sockets, se selecciona la frecuencia de rotación deseada, y se inicia la transmisión de los datos. En las figuras 5.20 y 5.21 se muestra la vista conjunta del servidor junto al controlador del motor, y la interfaz de recepción de datos del cliente, respectivamente.

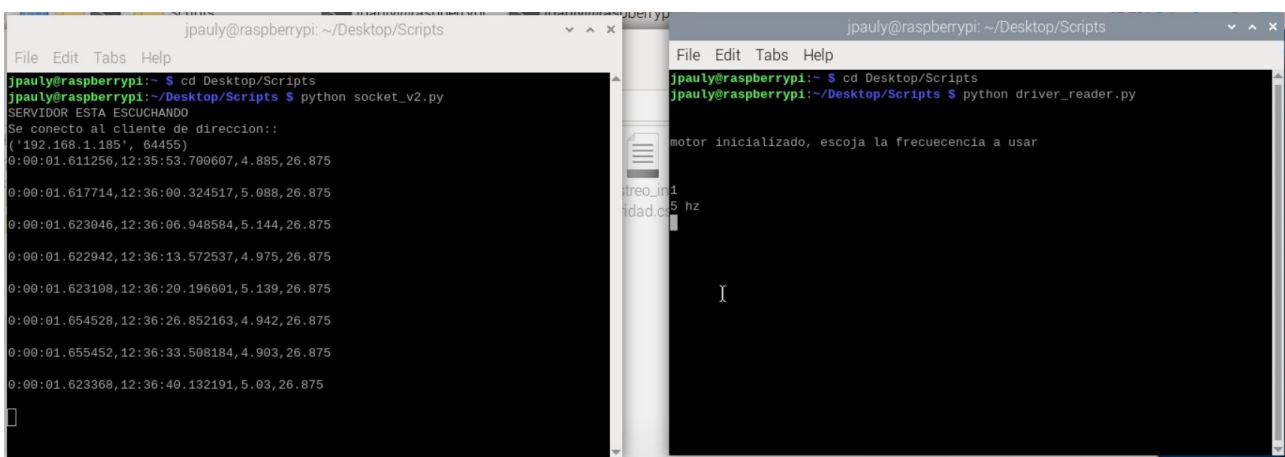


Figura 5.20: Vista de la interfaz del socket del servidor y del controlador del motor DC durante la prueba a 5 Hz.

```

PS C:\Users\paul\OneDrive\Desktop\PFG\Scripts Python\Lector_de_datos> & "c:/Users/paul/OneDrive/Desktop/PFG/Scripts Python/Lector_de_datos/.env/Scripts/python.exe"
"c:/Users/paul/OneDrive/Desktop/PFG/Scripts Python/Lector_de_datos/socket_cliente.py"
Por Favor, introduzca la temperatura nominal del aceite:
28
['0:00:01.597397', '12:40:54.020779', '5.139', '26.875']
1
['0:00:01.614512', '12:40:57.636523', '5.03', '26.937']
2

```

Figura 5.21: Vista de la interfaz de recepción de datos del cliente.

En la figura 5.22 se muestra un ejemplo del procedimiento realizado en Excel para la prueba de 20 Hz, mientras que en los cuadros 5.5 y 5.6 se muestran los resultados tabulados para cada prueba y los porcentajes de error respecto a la frecuencia de rotación ideal para cada prueba.

ID	hora_recib	hora_envic	hora_envic	tiempo_pr	freq	temp_c	Frecuencia Promedio	Desviacion Estandar	% Error respecto al Patron	Desviacion positiva maxima	Desviacion Negativa maxima
0	26:31.3	26:31.4	16:26:31	00:01.6	19.966	26.187	20.119	0.205	0.594		-0.156
1	26:33.3	26:35.0	16:26:35	00:01.6	20.454	26.187					
2	26:36.7	26:38.6	16:26:38	00:01.6	20.338	26.25					
3	26:40.3	26:42.2	16:26:42	00:01.6	19.992	26.25					
4	26:43.9	26:45.9	16:26:45	00:01.6	20.174	26.187					
5	26:47.6	26:49.5	16:26:49	00:01.6	20.276	26.187					
6	26:51.3	26:53.1	16:26:53	00:01.6	20.385	26.187					
7	26:54.8	26:56.7	16:26:56	00:01.6	19.979	26.187					
8	26:58.4	27:00.3	16:27:00	00:01.6	19.967	26.187					
9	27:02.0	27:03.9	16:27:03	00:01.6	19.907	26.187					
10	27:05.6	27:07.6	16:27:07	00:01.6	20.355	26.25					
11	27:09.3	27:11.2	16:27:11	00:01.6	19.939	26.187					
12	27:12.9	27:14.8	16:27:14	00:01.6	20.313	26.25					
13	27:16.5	27:18.4	16:27:18	00:01.6	19.939	26.187					
14	27:20.1	27:22.0	16:27:22	00:01.6	19.865	26.25					
15	27:23.7	27:25.6	16:27:25	00:01.6	20.167	26.187					
16	27:27.3	27:29.3	16:27:29	00:01.6	19.924	26.25					
17	27:30.9	27:32.9	16:27:32	00:01.6	20.029	26.25					

Figura 5.22: Ejemplo de la hoja de cálculo utilizada para la prueba de medición de frecuencia a 20 Hz.

Cuadro 5.5: Promedio, desviación estándar, valores máximos y mínimos para las pruebas de incertidumbre de las medidas de frecuencia de rotación.

Frecuencia ideal (Hz)	Promedio (Hz)	Desviación estándar (\pm Hz)	Desviación positiva máxima (Hz)	Desviación negativa máxima (Hz)
5	4,938	0,172	0,176	-0,476
10	9,992	0,110	0,165	-0,169
15	15,049	0,166	0,413	-0,177
20	20,119	0,205	0,454	-0,156
25	25,117	0,220	0,472	-0,170
30	30,115	0,238	0,493	-0,349

Cuadro 5.6: Error respecto a la frecuencia ideal para cada prueba de incertidumbre de las medidas de frecuencia de rotación.

Frecuencia ideal (Hz)	Promedio (Hz)	% de error respecto a frecuencia ideal
5	4,938	1,235
10	9,992	0,075
15	15,049	0,329
20	20,119	0,594
25	25,117	0,466
30	30,115	0,382

A través de todas las pruebas, la mayor desviación estándar es de 0,238 Hz y el mayor error es de 1,235%. La diferencia en errores y desviaciones estándar entre las diferentes frecuencias de prueba puede ser atribuida a cambios en la velocidad de muestreo del encoder o de la Raspberry Pi debido a picos en la velocidad de lectura y procesamiento, pues una diferencia de unos cuantos milisegundos entre ciclos de ejecución puede resultar en lecturas de frecuencia diferentes.

De manera similar a la prueba de incertidumbre de las medidas de temperatura, se utiliza la ecuación 5.2 para determinar la incertidumbre tipo A de las mediciones. Como resultado, se obtiene una incertidumbre de 0.04 Hz para el encoder magnético AS5600S.

5.3.4. Levantamiento de alarma de temperatura

Para esta prueba de validación, se toma un archivo CSV con 40 valores de temperatura de la prueba de confiabilidad matemática, donde la temperatura ideal es de 28 °C, y se insertan manualmente 12 valores anómalos.

Seguidamente, se suben estos datos a la Raspberry Pi y se envían por medio de sockets al cliente, con la finalidad de que, cuando se procesen estos datos, se levante una alarma de temperatura elevada para cada punto de datos.

En total, se colocan 6 puntos con desviación positiva y 6 con desviación negativa, de tal manera que, por ejemplo, para la desviación de 3 grados de temperatura, se colocan valores de 31 °C y de 25 °C.

Además, se añade un contador de alarmas al socket del cliente, para llevar la cuenta de cuántas alarmas se levantaron. Se deben detectar 9 anomalías, ya que los cambios de 3 °C no superan el límite requerido por el cliente y no deberían ser reportadas.

El archivo utilizado para la prueba es “entradas_modificadas” y se puede encontrar en el apéndice 3: “Formatos y archivos de Excel y CSV”.

En las figuras 5.23, 5.24 y 5.25 se muestran la primera alarma, una alarma en medio del recorrido y la última alarma respectivamente.

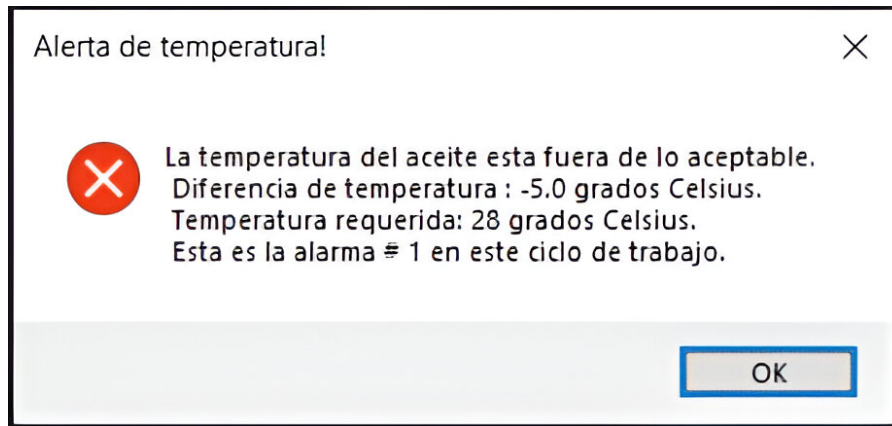


Figura 5.23: Alarma #1, correspondiente al primer dato anómalo en la prueba.

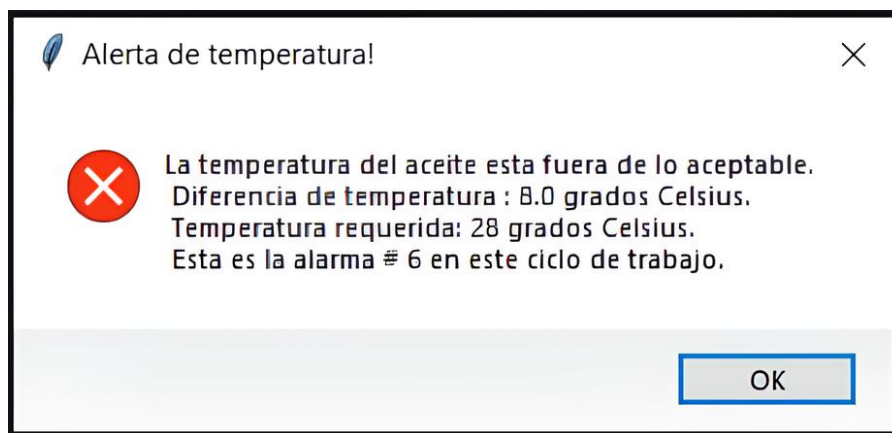


Figura 5.24: Alarma #6, correspondiente a un dato medio con desviación de 8 °C.

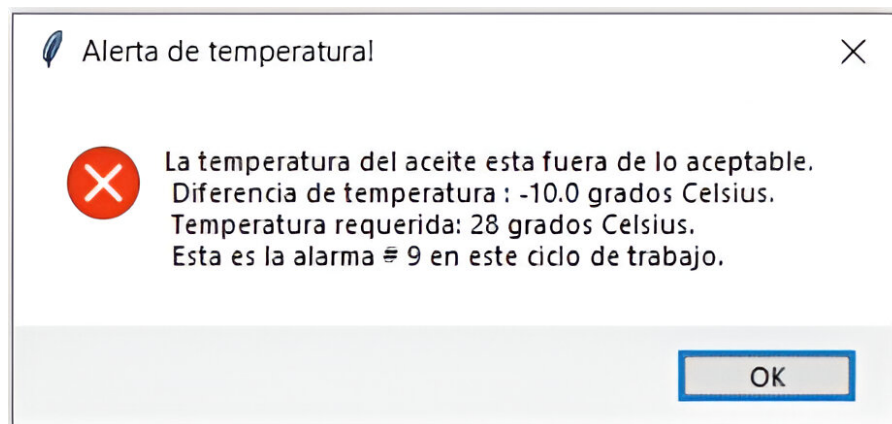


Figura 5.25: Alarma #9, correspondiente al último dato anómalo en la prueba.

Adicionalmente, se incluyó un paro y alarma en la consola para detectar cuando un dato dispara la alarma. Como se muestra en la figura 5.26, las desviaciones de 3°C no levantaron la alarma.

```
PS C:\Users\paul\OneDrive\Desktop\PFG\Scripts Python\Lector_de_datos> & "c:/Users/paul/OneDrive/Desktop/PFG/Scripts Python/Lector_de_datos/.venv/Scripts/python.exe"
"c:/Users/paul/OneDrive/Desktop/PFG/Scripts Python/Lector_de_datos/prueba_alarma.py"
Por Favor, introduzca la temperatura nominal del aceite:
28
26.125
31.0
26.062
26.125
26.062
25.0
26.125
26.125
26.062
31.0
26.062
26.062
25.0
26.062
26.062
31.0
26.062
26.062
23.0
ALERTA DE TEMPERATURA, presione enter para continuar
```

Figura 5.26: Salida de la consola en prueba de levantamiento de alarma.

Por lo tanto, como el sistema fue capaz de encontrar todas las anomalías e ignorar aquellos valores que caen dentro del rango aceptable, se considera que la prueba fue exitosa y que el sistema es capaz de detectar anomalías de temperatura con al menos un °C de precisión.

5.3.5. Tiempo transcurrido antes de fallas eléctricas o mecánicas

Para verificar el cumplimiento de la métrica de periodicidad promedio de mantenimiento de sensores rotativos, los sensores del sistema deben ser capaces de operar un mínimo de 1728 horas sin presentar fallas significativas.

Debido al contexto del presente proyecto, se busca verificar la durabilidad de los sensores por medio de cálculos basados en las características provistas por el fabricante en sus respectivas hojas de datos e información de producción.

Sensor AS5600S

Parte de la razón por la que se seleccionó el sensor AS5600S para tomar las medidas de frecuencia rotacional es su capacidad de operar sin ningún tipo de movimiento o fricción por parte del sensor. Durante su funcionamiento, el sensor se encuentra estacionario mientras un imán permanente de neodimio rota. Por lo que el único degradamiento que presenta el sensor proviene del deterioro de sus conexiones eléctricas.

Según la hoja de datos del sensor [88], su temperatura máxima de operación es de 260 °C, lo cual se encuentra por encima de la temperatura esperada de 65 °C en las posiciones determinadas para los sensores en la maquinaria. Por lo tanto, se puede decir que el sensor

posee un factor de seguridad de 4,33 ante la temperatura, que se considera, por medio de criterio del diseñador, suficiente para que la temperatura ambiental no tenga mayor efecto en la durabilidad del sensor.

Ya que no hay acción mecánica a la cual comparar ciclos de trabajo, se utiliza el estudio estadístico realizado por RLS d.o.o. [101], que es un significativo productor de sensores rotativos. El estudio indica que, bajo condiciones de 125 °C, se presentará una falla cada 39 años, en promedio, con una confiabilidad del 90 %.

Con la información presentada anteriormente, se puede afirmar con seguridad que el sensor AS5600S cumple y supera las expectativas para su periodo de operación.

Sensor RTD PT100

En el caso del sensor de temperatura seleccionado, el RTD PT100-H de Omega, el fabricante indica que la protección del sensor corresponde a un grado IP69 [95], lo que indica el mayor grado de protección ante polvo y líquidos para electrónicos en el mercado, con aislamiento total de interferencias mecánicas y protección contra inmersión prolongada en líquidos a altas temperaturas.

Mientras que no se logró encontrar un estudio que indique una cifra específica de durabilidad para los sensores, uno de sus fabricantes, Omega, expresa que un RTD PT100 puede durar muchos años antes de empezar a comprometer la incertidumbre de sus mediciones [35].

Tiempo conservador requerido

Tomando en cuenta la información presentada, se puede afirmar que los sensores no son un punto de falla considerable, sin embargo, el sistema no puede permanecer sin mantenimiento o revisiones periódicas, debido a otros posibles puntos de falla difíciles de predecir, como corrosión, obstrucciones y conexiones defectuosas.

Como consecuencia, se recomienda que se realice una inspección una vez cada dos meses, como estimado conservador, lo cual equivale a alrededor de 2000 horas de operación continua.

5.3.6. Volumen del sistema

Para determinar el volumen del sistema, solo se toma en cuenta la carcasa, ya que es la única parte del sistema que puede interferir potencialmente con el desplazamiento en

la planta de producción, ya que los sensores y sus acoples se colocan fuera del camino habitual de los trabajadores.

Según lo discutido en la sección 4.7.3, y los planos mostrados en el apéndice 2: “Planos y diagramas”, las dimensiones de la carcasa son de 15.1 cm x 12.0 cm x 4.6 cm, que equivale a 833,5 centímetros cúbicos, lo cual es menor al volumen máximo propuesto en las métricas de 300 000 centímetros cúbicos.

5.3.7. Diferencia entre el tiempo de residencia teórico calculado y el reportado por el sistema para una frecuencia dada

Para realizar la prueba, se realizan 34 mediciones a los mismos intervalos de frecuencia utilizados en la prueba de incertidumbre del encoder AS5600S, pero solamente se almacena el dato de tiempo de residencia calculado en tiempo real durante la transmisión y almacenamiento de información.

Seguidamente, se encuentra el promedio de los tiempos de residencia calculados, y se comparan con el tiempo de residencia teórico, que se calcula por medio de la ecuación 4.7 al utilizar los valores ideales de frecuencia de rotación. Los resultados se muestran en el cuadro 5.7.

Cuadro 5.7: Promedio, desviación estándar, y porcentaje de error respecto al tiempo ideal del tiempo de residencia calculado.

Frecuencia de prueba (Hz)	Tiempo de residencia ideal (s)	Tiempo de residencia medido promedio (s)	Desviación estándar (s)	% de Error
5	160,00	160,09	3,28	0,06
10	80,00	80,07	0,88	0,08
15	53,33	53,28	0,41	0,1
20	40,00	39,97	0,20	0,08
25	32,00	31,99	0,15	0,04
30	26,67	26,64	0,15	0,08

La diferencia en el error y la desviación estándar en las diversas pruebas puede ser atribuida al tamaño de la muestra, ya que al ser relativamente limitada, cualquier pico en la velocidad de operación del motor, o en el tiempo de procesamiento de las secuencias de comandos puede ocasionar divergencias. Con un mayor tamaño de muestra, es probable que los parámetros de error y desviación estándar de las pruebas se asemejen más entre sí [69].

Según lo mostrado en el cuadro 5.7, es posible afirmar que el porcentaje de error entre el tiempo de residencia teórico y el calculado por el sistema es de 0,073 % en promedio, lo cual es significativamente menor al error de 5 % propuesto originalmente.

Los archivos utilizados para esta prueba se pueden encontrar en el apéndice 3, dentro de la carpeta llamada “Pruebas de Tiempo de Residencia”.

5.3.8. Complejidad del sistema e interfaz de usuario

Con el fin de recibir retroalimentación por parte de los posibles usuarios, se redactó un manual del usuario básico, que delinea los puntos principales de la instalación, uso y mantenimiento del sistema. Este documento se distribuyó, junto a una encuesta de “Google Forms”, a 5 colaboradores al azar del departamento de mantenimiento.

De las 5 personas que respondieron la encuesta, ninguna ha tenido experiencia previa con programación o con una Raspberry Pi. Por otro lado, 3 de ellas tienen experiencia previa con utilizar programas de Microsoft Office, y 4 tienen experiencia con planos eléctricos y mecánicos. Dicha división se resalta al considerar que, en promedio en una escala del 1 al 10, los aspectos mecánicos y eléctricos del sistema tienen una complejidad percibida de 5, mientras que los aspectos informáticos tienen una dificultad percibida promedio de 7,6.

Por lo tanto, la capacitación sobre el uso del sistema debe tener un énfasis en los aspectos informáticos del sistema, para construir una base de conocimientos fuerte dentro de la empresa.

Todos los participantes contestaron que están dispuestos a llevar una capacitación, y la distribución de horas que están dispuestos a invertir se muestra en la figura 5.27.

¿Cuántas horas en total, estaría dispuesto/a a dedicarle a esta capacitación?

5 respuestas

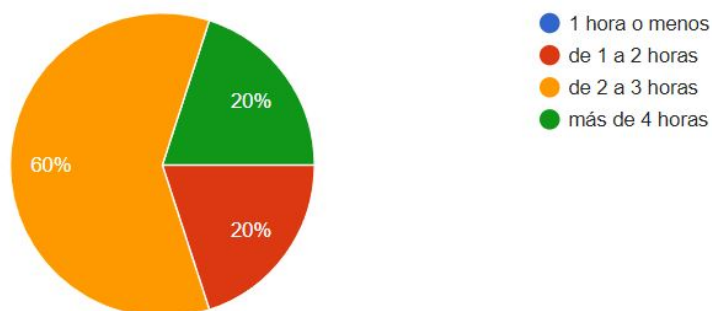


Figura 5.27: Diagrama de pastel de las horas que cada participante está dispuesto a dedicar a la capacitación para utilizar el sistema.

Mientras que hay personal dispuesto a dedicar 4 horas a la capacitación, el promedio de horas deseables para una capacitación es de 2,6.

Por otro lado, también se les pidió a los colaboradores que estimaran el tiempo que les tomaría realizar una inspección general del sistema en el contexto del mantenimiento rutinario, los resultados se muestran en la figura 5.28.

¿Cuanto tiempo cree que le tomaría realizar una inspección rutinaria del sistema?

5 responses

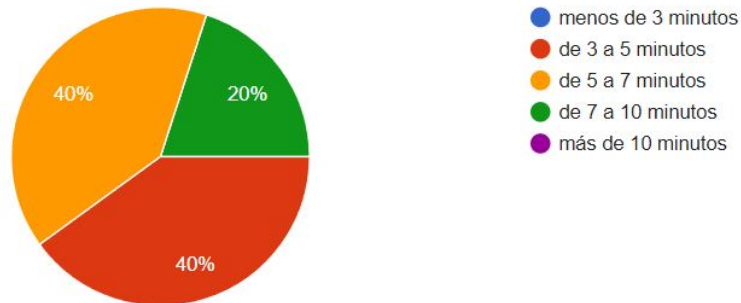


Figura 5.28: Diagrama de pastel de las horas que cada participante estima tardar en realizar una inspección de mantenimiento del sistema.

Con la información de la figura 5.28, se puede estimar que el tiempo promedio de inspección y desmontaje para el mantenimiento es de aproximadamente 5,7 minutos.

Es muy importante aclarar que estas medidas se deben utilizar solamente como un estimado inicial, tanto los tiempos como los planes para la capacitación y el mantenimiento deben ser constantemente mejorados a lo largo de su implementación para llevarlos a un estado óptimo.

Los resultados de la encuesta, exportados en formato de Excel, se pueden encontrar en el apéndice 6: “Resultados de las encuestas”, y el manual del usuario se puede encontrar en el apéndice 4.

5.3.9. Intervalo de confianza matemática de las medidas

Para encontrar el intervalo de confianza de las medidas, se utiliza la siguiente ecuación, obtenida del libro “Practical Reliability Engineering, Fifth Edition” de O’Connor [39]:

$$M_{1-\alpha} = \bar{X} \pm Z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5.4)$$

Donde:

- \bar{X} es la media de la muestra.
- $M_{1-\alpha}$ es el intervalo de confianza a una significación dada.
- α es la significación del intervalo.
- Z es un valor derivado de tablas probabilísticas en base a α .
- S es la desviación estándar de la muestra.

- n es el número de datos en la muestra.

Para una confianza del 95 %:

- $1 - \alpha = 0,05$
- $Z_{0,025} = 1,96$, utilizando la tabla de valores de Z estándar [70]

Por lo tanto:

$$IC_{0,95} = (-1,96; 1,96) \quad (5.5)$$

Seguidamente, se procede a encontrar la desviación estándar, número de datos y media para cada intervalo de prueba para frecuencia y temperatura, y se utiliza la ecuación 5.3 en Excel para encontrar la distancia a la media para cada prueba. En los cuadros 5.8 y 5.9 se muestran los intervalos de confianza para cada prueba realizada.

Cuadro 5.8: Media, intervalos de confianza y márgenes de los intervalos para cada prueba de temperatura.

Temperatura de prueba (°C)	Media muestral (°C)	Intervalo de confianza (\pm °C)	Margen inferior (°C)	Margen superior (°C)
20	20,056	0,063	19,993	20,119
40	40,058	0,076	39,982	40,134
60	60,090	0,065	60,025	60,155
80	79,958	0,061	79,897	80,019

Cuadro 5.9: Media, intervalos de confianza y márgenes de los intervalos para cada prueba de frecuencia de rotación.

Frecuencia de prueba (Hz)	Media muestral (Hz)	Intervalo de confianza (\pm Hz)	Margen inferior (Hz)	Margen superior (Hz)
5	5,017	0,074	4,943	5,091
10	9,980	0,076	9,904	10,056
15	15,015	0,081	14,934	15,096
20	19,941	0,084	19,857	20,025
25	24,984	0,083	24,901	25,067
30	29,935	0,082	29,853	30,017

Una vez obtenidos los intervalos de confianza, se realiza una segunda ronda de mediciones de confirmación, y se extrae la media muestral de cada una de estas. Para poder afirmar con certeza que la confiabilidad de las medidas es del 95 %, la media de las medidas de confirmación (μ_c) debe encontrarse dentro del intervalo de confianza para su prueba correspondiente [39]. En los cuadros 5.10 y 5.11 se puede observar dicha comparación.

Cuadro 5.10: Comparación entre μ_c y los márgenes del intervalo de confianza del 95 % para las pruebas de temperatura.

Temperatura de prueba (°C)	μ_c (°C)	Margen inferior (°C)	Margen superior (°C)
20	20,083	19,993	20,119
40	40,031	39,982	40,134
60	60,027	60,025	60,155
80	80,013	79,897	80,019

Cuadro 5.11: Comparación entre μ_c y los márgenes del intervalo de confianza del 95 % para las pruebas de frecuencia de rotación.

Frecuencia de prueba (Hz)	μ_c (Hz)	Margen inferior (Hz)	Margen superior (Hz)
5	5,039	4,943	5,091
10	9,989	9,904	10,056
15	14,983	14,934	15,096
20	19,984	19,857	20,025
25	24,974	24,901	25,067
30	29,997	29,853	30,017

Al utilizar la información contenida en los cuadros 5.10 y 5.11, se puede afirmar con seguridad que las medidas de temperatura y frecuencia capturadas por el sistema tienen una confianza de al menos 95 %, debido a que todas las medias de las pruebas de confirmación se encuentran contenidas dentro de los intervalos de confianza generados con datos experimentales.

Todos los archivos de Excel utilizados para el análisis, que contienen los datos medidos y los procedimientos mencionados anteriormente, se pueden encontrar en el apéndice 3: “Formatos y archivos de Excel y CSV”, dentro de la carpeta “Pruebas de Confianza Matemática” clasificados según el sensor utilizado en la prueba y el valor esperado de cada prueba.

5.4. Otras métricas a examinar

La presente sección busca recopilar los grados de cumplimiento de algunas de las métricas presentadas en la sección 3.6 para comodidad del lector, ya que los temas relevantes se abordan a lo largo del documento.

5.4.1. Temperatura de operación máxima de los sensores

Se puede extraer la información necesaria de la sección 5.3.5, que indica que la temperatura máxima del sensor AS5600S para operación prolongada supera los 125 °C, mientras que para el sensor RTD PT100H de Omega, en su hoja de datos se indica una temperatura máxima de operación de 250 °C.

Ambos sensores cumplen satisfactoriamente la métrica de temperatura máxima de operación, pues los valores ideales propuestos son 65 °C y 250 °C respectivamente.

5.4.2. Compatibilidad con norma ISO 22000 y seguridad interna de PRO

Como se discute en la sección 3.4.4 y a lo largo de la sección 4.7, se seleccionaron materiales como el PLA y el acero inoxidable, que no liberan partículas tóxicas o perjudiciales a la salud humana incluso cuando se exponen a altas temperaturas, por lo que los materiales utilizados cumplen con los lineamientos de la norma ISO 22000 y seguridad interna del Grupo PRO discutidos en la sección 2.2.

Similarmente, debido a los materiales empleados en su diseño, la carcasa es capaz de resistir contacto directo con aceite a temperaturas mayores a 250 °C y proteger sus componentes de sus efectos.

5.4.3. Tiempo promedio de entrega de componentes

Durante el desarrollo del proyecto, se realizó la compra de los componentes para el prototipo por medio de la plataforma digital de CR Cibernética [102], en promedio, se tomaron 3 días hábiles para entregar los componentes.

Por otro lado, para componentes más especializados, como el RTD PT100 de Omega y su cableado, se puede tomar hasta 2 semanas en realizar la entrega, sin embargo, el riesgo de atraso por este componente es mitigado por su excelente durabilidad, y con un adecuado manejo de inventario de repuestos, se pueden evitar retrasos por mantenimiento casi totalmente.

5.4.4. Costo estimado de un modelo funcional

Con el fin de crear una lista de componentes para que el cliente logre el desarrollo de un sistema completo, se crea el cuadro 5.12:

Cuadro 5.12: Tabla de costos estimados para un modelo funcional.

Componente	Precio (USD)	Cantidad	Total
Raspberry Pi 4	49.50	1	49.5
Sensor RTD PT100H de 3 hilos MAX31865	67.80	1	67.80
Cable OMEGACLAD de 3 hilos	14.95	1	14.95
Cable OMEGACLAD de 3 hilos	14.71 por metro	5 metros	73.55
Sensor AS5600s	3.80	4	15.20
LEDs	0.18	4	0.72
Amplificadores Operacionales LT 6233	1.90	5	9.50
Resistencias Variadas y cableado (aproximado)	8.00	N/A	8.00
Lámina Acero inoxidable 400 x 400 mm	40.36	1	40.36
Maquinado de Acero Inoxidable (aproximado)	40	1 hora CNC	40.00
Impresiones 3D en PLA (aproximado)	24	N/A	24.00
Tornillería (aproximado)	10	N/A	10.00
Total			353.58

Los valores para los componentes electrónicos se recopilaron del sitio de CR Cibernética [102], mientras que el sensor RTD se cotizó desde la página web de Omega electronics [35].

El costo de las láminas de acero inoxidable, así como el servicio de corte y maquinado CNC se obtuvieron de la página de Carbone Costa Rica, ya que presentan una opción local de rápida entrega. [103]

Por último, la cotización para la impresión en 3D se extrajo de la página de DGtalic Costa Rica.[104]

5.5. Nivel de cumplimiento de las métricas

En el cuadro 5.13 se muestran los valores obtenidos en las pruebas de validación, junto a los valores marginales e ideales originalmente propuestos.

Cuadro 5.13: Comparación entre valores marginales e ideales propuestos originalmente, contra aquellos obtenidos en las pruebas del sistema diseñado.

Métrica	Descripción	Unidad	Valor ideal	Valor Marginal	Valor obtenido en validación
1	Presencia de sensores rotativos, y de temperatura	Binario	N/A	N/A	Presente
2	Almacenamiento del contenido de los datos durante su recorrido	%	> 99	> 95	≥ 99
3	Incertidumbre de las medidas del sensor de temperatura	± °C	≥ 0,5	≥ 5	0,125
4	Incertidumbre de las medidas de los sensores de rotativos	± Hz	≥ 0,5	≥ 2	0,238
5	Frecuencia de cargas a la base de datos	min	5	15	≤ 5
6	Tiempo en desplegar estado al graficador	min	≤ 0,5	≤ 6	≤ 0,1
7	Precisión del límite de temperatura para desplegar alarma	± °C	3	5	≥ 1
8	Temperatura máxima del termo sensor	°C	≥ 250	≥ 204	250
9	Temperatura de operación máxima de los sensores rotativos	°C	≥ 65	≥ 40	125
10	Periodicidad promedio de mantenimiento de sensores rotativos	h	≥ 1728	≥ 576	≥ 2000
11	Presencia de mapeo de tiempo de residencia de operación a frecuencia de rotación	Binario	N/A	N/A	Presente
12	Error entre tiempo de residencia real y medido	%	< 5	< 10	0,073
13	Compatibilidad con norma ISO 22000 y seguridad interna de PRO	Binario	N/A	N/A	Compatibilidad aceptable
14	Temperatura máxima que resiste la carcasa	°C	≥ 200	≥ 170	≥ 220
15	Dimensiones del punto de recolección	cm ³	≤ 300000	≤ 500000	843 aprox.
16	Tiempo promedio de montaje/desmontaje	min	≤ 4.8	≤ 9.6	5,7
17	Tiempo promedio de entrega de componentes	días	≤ 3	≤ 5	≥ 3
18	Tiempo en capacitar nuevo operario en uso del sistema	h	< 3	< 6	2,6
19	Confiabilidad de las medidas rotativas y de temperatura	%	≥ 95%	≥ 90%	≥ 95%
20	Costo estimado de un modelo funcional	USD	< 3000	< 5000	353,58

5.6. Análisis económico

Para poder realizar un estimado del valor económico otorgado por el sistema diseñado, se consultó por medio de mensaje de texto a la gerente de producción del Grupo PRO, Lindsay Leiva [105]. Según la información provista, el costo de producción por hora de la freidora se puede descomponer en unos cuantos factores:

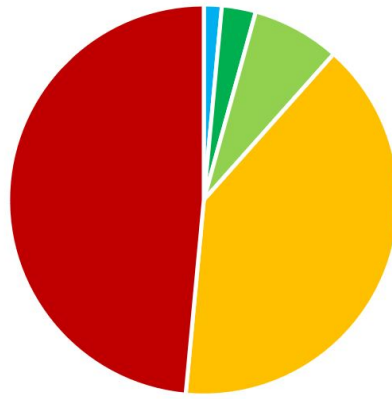
- **Costos de electricidad:** Mientras que no se pudo dar un monto específico de uso por hora para la freidora #5, se logra identificar que las freidoras de la empresa tienden a consumir alrededor de 10 kWh. Según el sitio de la CNFL, el costo de un kWh ronda los ¢71,28 [106]. Por lo tanto, el costo aproximado de consumo eléctrico es de ¢712,8.
- **Costos de materia prima:** En la freidora 5 se procesan alrededor de 20 kg de plátano por hora. Según el PIMA (PROGRAMA INTEGRAL DE MERCADEO AGROPECUARIO) [107], el costo mayorista de un plátano maduro es de ¢105,56, con un peso promedio de 110 g sin cáscara. Por lo tanto, se consume alrededor de ¢19 192,72 por hora en plátano.

El uso de aceite de fritura no se mide igual que la materia prima, ya que este se cambia después de cierto punto de saturación. Ya que este tiempo no se ha medido en la empresa, se utiliza un aproximado de \$7 USD o ¢3 500 por hora.

En total, los gastos de materia prima rondan los ¢22 692 por hora.

- **Salario de los operarios:** A lo largo de la cadena de producción de la freidora 5, se emplean 8 personas. Mientras que no se compartieron detalles del salario individual de cada miembro del personal, se comunicó que el salario promedio entre estos es de ¢700 000 al mes, lo que equivale a aproximadamente ¢2 916 por hora. Al tomar en cuenta los 8 operarios, el costo por hora/operario es de ¢23 333.
- **Uso de gas propano:** Se utiliza un promedio de 2,5 kg de gas propano por hora para operar la freidora. Considerando el precio planteado por RECOPE [108] de ¢539,65 por kilogramo de GLP rico en propano, se consume el equivalente a ¢1 349 por hora en combustible.

Considerando todos los factores anteriores, se puede encontrar que el costo por hora de operación estimado de la freidora #5 es de ¢48 096, una visualización del porcentaje de los costos se presenta en la figura 5.29.



■ Consumo electrico ■ Gas Propano ■ Aceite ■ Materia Prima ■ Costo de Personal

Figura 5.29: División de los gastos por hora en la freidora #5.

Considerando que la mayor pérdida descubierta ha sido equivalente a una jornada de 8 horas de producción continua [3], y una pérdida promedio de 4.5 horas al mes, se estima que el sistema propuesto es capaz de ahorrar a la empresa ₡216 432 en promedio mensualmente, con un potencial de ahorrar hasta ₡384 766 en el caso de evitar una operación errónea de 8 horas.

Adicionalmente, el sistema de monitoreo y graficación continua reduce significativamente el tiempo de detección de errores, al funcionar como un sistema de monitoreo de mantenimiento preventivo. Al tener una medida certera del desempeño de la freidora #5, se puede establecer un umbral de desempeño a mantener, lo cual permite optimizar el mantenimiento y proveer mayor ahorro tanto en componentes como en horas laborales del personal de mantenimiento.

Para calcular el potencial beneficio económico a largo plazo, se utilizan los indicadores VAN (Valor Actual Neto) y TIR (Tasa Interna de Retorno), cuyas fórmulas se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$0 = \sum_{n_i=1}^n \frac{Fn}{(TIR + 1)^n} - I_o \quad (5.6)$$

$$VAN = I_o + \sum_{n_i=1}^n \frac{Fn}{(k + 1)^n} \quad (5.7)$$

Donde [109]:

- Fn es el flujo de caja, o ganancia en un periodo.
- n es el número de periodos.
- lo es la inversión inicial.
- K es la tasa de descuento.

Primero, se debe calcular el TIR para poder encontrar la tasa a la cual el proyecto es rentable, para lograrlo, se utiliza el costo estimado del prototipo como inversión inicial, a un periodo de 12 meses. Para F_n se usa el ahorro estimado en pérdidas mensuales de ₡216 432 o \$421,53.

Lo es la inversión inicial, la cual toma en cuenta los \$ 353,58 del costo estimado del sistema, los \$ 184 requeridos para construir el prototipo, y unos \$ 800 de mano de obra del ingeniero que desarrolle la instalación.

Para la tasa de descuento (k) se utiliza el valor de 0.25 propuesto por Thompson, A. A., Strickland y A. J. en su libro "Crafting and Executing Strategy: The Quest for Competitive Advantage." [109]. El valor de k descrito es recomendado para proyectos cuya tasa es desconocida o no aplicable debido a su naturaleza.

Al ingresar los valores en la ecuación 5.2 y aplicar métodos iterativos en Excel (ver apéndice 3), se encuentra que el TIR es de 0,2944 o 29,44 %. Este valor puede parecer elevado a primera vista, pero cuando se considera que se puede recuperar la inversión inicial en tres meses y medio, resulta razonable.

El mismo procedimiento se aplica a la ecuación 5.3 y se obtiene un VAN de \$159,02 en un plazo de 12 meses. Lo que indica una ganancia moderada para la empresa.

5.7. Impacto del proyecto sobre la industria

El presente proyecto provee a la pequeña y mediana empresa con un sistema de bajo costo y rápido de implementar, en comparación a otros sistemas competidores. Adicionalmente, la construcción modular, y el uso de software de libre uso, permite a cualquier empresa adaptar el sistema a sus necesidades específicas, sin verse afectados por problemas de compatibilidad entre los componentes, ya que se puede utilizar virtualmente cualquier serie de sensores.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Por medio de entrevistas, análisis de datos y teoría de sistemas automatizados, se logró diagnosticar las deficiencias del sistema original de rastreo de trazabilidad, cuyas fallas principales consistían de una incertidumbre de ± 3 °C del sensor de temperatura, vulnerabilidad de información, y ambigüedad de la frecuencia de rotación de los actuadores.
- Al estudiar la maquinaria, así como las necesidades expresadas por el cliente, se logró identificar los puntos de datos, actuadores y señales más importantes para garantizar la calidad de los procesos de trazabilidad en la empresa, principalmente, la necesidad de una incertidumbre no mayor a $\pm 0,5$ °C para las medidas de temperatura, y de $\pm 0,3$ Hz para la medida de frecuencia de los actuadores.
- Por medio de teoría de diseño de sistemas automatizados y procesos ingenieriles, se logró diseñar un sistema efectivo para la captura, acondicionamiento y validación de información crítica de las diferentes variables de la maquinaria, incluyendo temperatura del aceite de fritura con una incertidumbre de $\pm 1,25$ °C, frecuencia de rotación de múltiples motores con una incertidumbre de $\pm 0,238$ Hz, y hora de captura, con lo cual se elimina la ambigüedad previamente presente en las prácticas de trazabilidad de la empresa.
- Utilizando buenas prácticas de manejo y seguridad de datos, se diseñó una solución de software capaz de almacenar la información recolectada con pérdidas menores al 1 %, garantizar la transparencia de las mediciones gracias a una confianza matemática mayor al 95 %, alertar al usuario ante anomalías de temperatura y graficar en menos de 5 segundos los parámetros críticos de la maquinaria.

6.2. Recomendaciones

- La mejora continua de la interfaz gráfica del sistema puede resultar beneficiosa, para hacerla cada vez más amigable con el usuario y así reducir el tiempo de toma de decisiones.
- Sería altamente beneficioso para el control de la trazabilidad si se incluye un monitor a la Raspberry Pi que pueda desplegar el gráfico en tiempo real y permitir reducir el tiempo de reacción ante anomalías.
- Debido a que el sistema está programado para funcionar con sensores RTD PT100, es recomendable manejar repuestos para el sensor y su cableado especializado, para evitar atrasos en la reparación del sistema por tiempos de entrega o por necesidad de adaptar el sistema a otro tipo de sensor.
- Las pruebas realizadas se efectuaron en un ambiente controlado y con variables diferentes a las que se encuentran presentes en la planta de producción, por lo que se recomienda repetir las pruebas de validación con el diseño final una vez que se logre una implementación completa.
- Se debe enfatizar la importancia de que cada miembro del personal de mantenimiento reciba una capacitación completa acerca de las particularidades del sistema, incluso si el programa de capacitación debe cubrir elementos fuera de su zona habitual de trabajo, como por ejemplo, programación básica en Python. Así, la empresa tendrá la capacidad interna de mantener y mejorar el sistema constantemente.
- El sistema fue diseñado con la posibilidad de implementarse a toda la maquinaria productiva de la planta; sin embargo, es importante examinar cada equipo con cuidado antes de intentar implementar el sistema en estos, ya que los sensores óptimos para cada máquina pueden variar.

Bibliografía

- [1] P. Ortiz. *8 beneficios de implementar un sistema de trazabilidad*. 5/01/2021. URL: <https://www.clavei.es/blog/beneficios-de-implementar-un-sistema-de-trazabilidad#:~:text=La%20trazabilidad%20nos%20permite%20conocer,los%20que%20ha%20podido%20transcurrir> (visitado 25-05-2024).
- [2] Universidad de Cartagena. *Reflexiones sobre la logística inversa*. 2020. URL: <https://www.upct.es/~gio/trazabilidad.htm> (visitado 25-05-2024).
- [3] Grupo PRO. “Primera, y segunda Entrevista realizada a Gustavo Chiroy”. En: 24/07/2024, Ver Apéndice 5.
- [4] Prof. Ana María Murillo Morgan y Prof. Carlos Adrián Salazar Garcí. *Guía para la presentación del informe final*. Cartago, Costa Rica: ITCR, 2012.
- [5] S. D. Eppinger K. T. Ulrich. *Diseño y desarrollo de productos 5ta edición*. Reading, Massachusetts: McGrawHill Education, 2012.
- [6] ISO Central Secretary. *ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements*. en. Standard ISO 9001:2015/Amd 1:2024. Geneva, CH: International Organization for Standardization, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/62085.html>.
- [7] Heat y Control. *Mastermatic Prepared Foods Fryer*. 2024. URL: <https://www.heatandcontrol.com/model/mastermatic-prepared-foods-fryer> (visitado 26-08-2024).
- [8] SafetyCulture Content Team. *How to Implement Food Safety: A Manufacturer's Guide*. 16/05/2024. URL: <https://safetyculture.com/topics/food-safety/> (visitado 23-08-2024).
- [9] FDA. *FY 2023 FDA Budget Summary*. 2024. URL: <https://www.fda.gov/media/157193/download> (visitado 23-08-2024).
- [10] ISO Central Secretary. *ISO 22000:2018 Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chains*. en. Standard ISO 22000:2018/Amd 1:2024. Geneva, CH: International Organization for Standardization, 2024. URL: <https://www.iso.org/standard/65464.html>.
- [11] Grupo PRO G. Chiroy. *IPF-02 Instructivo de Trabajo Freidor #5*. Ver Anexo 5.

-
- [12] M. Toledo. *Brix: The Essential Knowledge*. 2024. URL: <https://www.mt.com/us/en/home/perm-lp/product-organizations/ana/brix-meters.html#:~:text=Brix%20is%20a%20measure%20of,in%20100%20grams%20of%20solution>. (visitado 24-08-2024).
- [13] *Registros de trazabilidad F1, F2, F3, F4, F5, Horno y peladora. Ver Anexo 6.*
- [14] BC Campus. *15.3 Resistance and Resistivity*. 2020. URL: <https://pressbooks.bccampus.ca/practicalphysicsphys1104/chapter/20-3-resistance-and-resistivity/> (visitado 27-08-2024).
- [15] Process solutions automation y control INC. *How do RTD Temperature Sensors Work?* 25/10/2019. URL: <https://psctexas.com/how-does-rtd-temperature-sensors-work/> (visitado 27-08-2024).
- [16] TE connectivity. *Sensores RTD*. 2024. URL: <https://www.te.com/es/products/sensors/temperature-sensors/resources/understanding-rtds.html> (visitado 10-08-2024).
- [17] C. Wells. *Signal Conditioning and Linearization of RTD Sensors*. 24/09/201. URL: <https://www.ti.com/lit/ug/tidu433/tidu433.pdf> (visitado 26-08-2024).
- [18] International Electrotechnical Commission. *IEC 60751 Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*. en. Standard IEC 63753:2022/Amd 1:2024. International Electrotechnical Commission, 2024. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/63753>.
- [19] Melexis. *What is the Hall-effect?* 2024. URL: <https://www.melexis.com/en/news/tech-talks/hall-effect> (visitado 27-08-2024).
- [20] Dynapar. *Magnetic Encoders*. 2024. URL: https://www.dynapar.com/Technology/Encoder_Basics/Magnetic_Encoder/ (visitado 27-08-2024).
- [21] DroneBot Workshop. *Using Rotary Encoders with Arduino*. 23/03/2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=V1txmR8GXzE> (visitado 28-08-2024).
- [22] G. M. Smith. *What Is Signal Conditioning or Signal Conditioner?* 24/09/2021. URL: <https://dewesoft.com/blog/what-is-signal-conditioning> (visitado 26-08-2024).
- [23] Analog Devices Inc. *MAX31865 RTD-to-Digital Converter*. 2024. URL: <https://www.analog.com/en/products/max31865.html#documentation> (visitado 27-08-2024).
- [24] Analog Devices Inc. *MAX31865 RTD-to-Digital Converter datasheet*. 2015. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX31865.pdf> (visitado 27-08-2024).
- [25] L. Rhodes. *Encoder Signal Overview And How to Troubleshoot Common Issues*. 25/07/2024. URL: https://www.dynapar.com/Knowledge/Encoder_Issues/Encoder_Signal/ (visitado 28-08-2024).

-
- [26] All About Circuits. *How to Low-Pass Filter a Square Wave*. 7/03/2019. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-to-low-pass-filter-a-square-wave/> (visitado 28-08-2024).
- [27] Adafruit. *Serial Peripheral Interface (SPI)*. 2024. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all> (visitado 04-09-2024).
- [28] A. Islam. *All you need to know about the GPIO*. 16/06/2020. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/all-you-need-know-gpio-akib-islam/> (visitado 11-09-2024).
- [29] FPGA Key. *GPIO*. 2024. URL: <https://www.fpga-key.com/wiki/details/322#:~:text=Advantage,-Advantages%20of%20GPIO&text=Low%20power%20consumption%3A%20GPIO%20has,speed%20even%20in%20standby%20mode.> (visitado 11-09-2024).
- [30] Lenovo. *What is interprocess communication (IPC)?* 2024. URL: <https://www.lenovo.com/us/en/glossary/ipc/?srsltid=AfmB0orLQn0hM2wWgX9CJ22o-nC3edxV5gY9eYYVdX> (visitado 04-09-2024).
- [31] Geeks for Geeks. *Sockets in computer networks*. 22/12/2022. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/socket-in-computer-network/> (visitado 04-09-2024).
- [32] Grupo PRO. "Encuesta realizada a Gustavo Chiroy sobre la importancia de cada necesidad establecida, realizada en google forms". En: 10/08/2024, Ver Apéndice 6.
- [33] Equipos y laboratorios de Colombia. *EL EFECTO TERMOELÉCTRICO*. 2022. URL: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/el-efecto-termoelEctrico> (visitado 10-08-2024).
- [34] TE connectivity. *Tipos de termopares*. 2024. URL: <https://www.te.com/es/products/sensors/temperature-sensors/resources/thermocouple-types.html> (visitado 10-08-2024).
- [35] Omega Engineering. *PR-10 RTD*. 2024. URL: omega.com/pptst/PR-10.html (visitado 10-08-2024).
- [36] Arduino LLC. *Arduino UNO WiFi*. 14/03/2024. URL: <https://docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-uno-wifi/> (visitado 10-08-2024).
- [37] Raspberry Pi Foundation. *Meet the Raspberry Pi 5*. 2024. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/> (visitado 10-08-2024).
- [38] P. Gupta. *WHAT IS FPGA INTRODUCTION TO FPGA BASICS*. 21/06/2023. URL: <https://fpgainsights.com/fpga/fpga-basics/> (visitado 10-08-2024).
- [39] A. Kleyner Patrik D. T. O'Connor. *Practical Reliability Engineering, Fifth Edition*. John Wiley y Sons, 2012.
- [40] Ametherm Inc. *What Is An NTC Thermistor*. 2013. URL: <https://www.ametherm.com/thermistor/what-is-an-ntc-thermistor> (visitado 17-08-2024).

-
- [41] Mouser electronics. *+ 200 C NTC Thermistors*. 2024. URL: <https://www.mouser.com/c/circuit-protection/thermistors/ntc-thermistors/?maximum%20operating%20temperature=%2B%20200%20C> (visitado 17-08-2024).
- [42] Dywer Omega. *How Do Infrared Thermometers Work?* 2024. URL: <https://www.omega.com/en-us/resources/infrared-thermometer-how-work> (visitado 17-08-2024).
- [43] ThermoWorks. *Infrared Emissivity Table*. 2024. URL: <https://www.thermoworks.com/emissivity-table/> (visitado 17-08-2024).
- [44] Calnex electronics limited. *Non-Contact Infrared Sensors in the Food Processing Industry*. 25/06/2019. URL: <https://www.calnex.co.uk/non-contact-infrared-sensors-food-processing-industry/> (visitado 17-08-2024).
- [45] H. Austerlitz. *Data Acquisition Techniques Using PCs, second edition*. Elsevier Inc., 2003.
- [46] Anaheim Automation. *Encoders Guide*. 3/2023. URL: <https://anaheimautomation.com/blog/post/encoders-guide?srsltid=AfmB0opg3q9FSAEIXBtfew2AU9WcvBLfmlA5cdKrf2SL> (visitado 19-08-2024).
- [47] Y. Huang. *HOW DOES A TACHOMETER WORK?* 19/07/2021. URL: <https://kus-usa.com/resources/how-does-a-tachometer-work/> (visitado 19-08-2024).
- [48] T. Olujinmi. *5 Different Ways to Power a Raspberry Pi*. 16/02/2023. URL: <https://www.makeuseof.com/raspberry-pi-power-methods/#:~:text=The%20most%20common%20way%20to,the%20USB%20Type-C%20connector..> (visitado 17-08-2024).
- [49] Inc. Cisco Systems. *What Is Power over Ethernet (PoE)?* 2024. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise-networks/what-is-power-over-ethernet.html> (visitado 17-08-2024).
- [50] Wi-Fi Alliance. *Wi-Fi delivers strong IoT advantage*. 14/07/2022. URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-delivers-strong-iot-advantage> (visitado 17-08-2024).
- [51] J. Samara. *Bluetooth vs. Wi-Fi for IoT Devices: Making the Right Choice*. 23/10/2023. URL: <https://www.pondiot.com/blog/bluetooth-vs-wifi-for-iot-devices-making-the-right-choice> (visitado 17-08-2024).
- [52] L. Rosencrance. *Zigbee*. 2024. URL: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/ZigBee> (visitado 17-08-2024).
- [53] Inc. Cisco Systems. *What Is Ethernet?* 2024. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise-networks/what-is-ethernet.html> (visitado 17-08-2024).

-
- [54] CADENCE PCB SOLUTIONS. *How Ethernet Differential Impedance Influences High-Speed Design*. 2022. URL: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2022-how-ethernet-differential-impedance-influences-highspeed-design> (visitado 17-08-2024).
- [55] Python Software Foundation. *Python Setup and Usage*. 2024. URL: <https://docs.python.org/3/using/index.html> (visitado 17-08-2024).
- [56] C. Y. Wijaya. *Essential Python Libraries for Data Manipulation*. 20/05/2024. URL: <https://www.kdnuggets.com/essential-python-libraries-for-data-manipulation> (visitado 17-08-2024).
- [57] Microsoft Inc. *Getting started with VBA in Office*. 7/06/2022. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/office/vba/library-reference/concepts/getting-started-with-vba-in-office> (visitado 17-08-2024).
- [58] Microsoft Inc. *Microsoft C++, C, and Assembler documentation*. 2024. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/cpp/?view=msvc-170> (visitado 17-08-2024).
- [59] Microsoft. *What is Power BI?* 22/03/2024. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/power-bi/fundamentals/power-bi-overview> (visitado 17-08-2024).
- [60] Simply Learn. *Introduction to MiniTab: Data analysis, stats And process improvement tools*. 3/05/2023. URL: [https://www.simplilearn.com/what-is-minitab-data-analysis-tool-article#:~:text=The%20mini%20tab%20software%20is, and%20Improve%2C%20Control\)%20roadmap.](https://www.simplilearn.com/what-is-minitab-data-analysis-tool-article#:~:text=The%20mini%20tab%20software%20is, and%20Improve%2C%20Control)%20roadmap.) (visitado 17-08-2024).
- [61] M. Silvero. *What's So Great About Jupyter Notebook?* 19/09/2023. URL: <https://builtin.com/software-engineering-perspectives/jupyter-notebook> (visitado 17-08-2024).
- [62] S. Naghiloo. *Polycarbonate vs. Acrylic Melting Point And Uses*. 2024. URL: <https://study.com/academy/lesson/polycarbonate-vs-acrylic.html#:~:text=Acrylic%20can%20be%20used%20at, is%20only%20160%20degrees%20Celsius.> (visitado 17-08-2024).
- [63] T. Polygenis. *A Comprehensive Guide to PLA Melting Point and How it Influences 3D Printing*. 17/05/2023. URL: <https://www.wevolver.com/article/pla-melting-point> (visitado 17-08-2024).
- [64] Palmetto Industries. *Food Grade Plastic: Which Plastics Are Safe For Food Storage*. 11/03/2022. URL: <https://www.palmetto-industries.com/safe-food-grade-plastic/> (visitado 21-08-2024).
- [65] Biblioteca Nacional de Medicina de E.E. U. U. *Intoxicación con tolueno y xileno*. 2024. URL: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002829.htm> (visitado 21-08-2024).

-
- [66] S. Farahani. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Elsevier Inc., 2008.
- [67] datasciencetalk.com. *Which software to use, Minitab, R or Python?* 2020. URL: <https://datasciencetalk.com/which-software-to-use-minitab-r-or-python/> (visitado 20-08-2024).
- [68] Adafruit. *Getting started with your Raspberry Pi*. 2024. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/getting-started.html> (visitado 11-09-2024).
- [69] A. Reding-Bernal J.A. García-García. "Cálculo del tamaño de la muestra en investigación en educación médica". En: *Investigación educ. médica vol.2 no.8* (2013).
- [70] R. P. Jiménez. *Standard Normal Distribution Probabilities Table*. 2024. URL: https://www.craftonhills.edu/current-students/tutoring-center/mathematics-tutoring/distribution_tables_normal_studentt_chisquared.pdf (visitado 11-09-2024).
- [71] C. Taylor. *Range Rule for Standard Deviation*. 16/07/2024. URL: <https://www.thoughtco.com/range-rule-for-standard-deviation-3126231> (visitado 11-09-2024).
- [72] Dynapar. *What is a Quadrature Output?* 2024. URL: <https://www.dynapar.com/faq/what-is-a-quadrature-output> (visitado 11-09-2024).
- [73] R. Sacks-Davis E. Bertino B. C. Ooi. *Indexing Techniques for Advanced Database Systems (Advances in Database Systems, 8)*. Kluwer Academic, 1997.
- [74] J. M. Martín del Campo. *EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN DATOS EXPERIMENTALES*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.
- [75] Jakar Electronics. *OMEGA CLAD™ Mineral Insulated RTD Cable (Pt100)*. 2024. URL: <https://www.jakar.cz/en/p/omegaclad-mineral-insulated-rtd-cable-pt100#:~:text=Coil%20lengths%20of%2050%20to%20100%20ft%20are%20typical>. (visitado 21-09-2024).
- [76] AM Osram. *ams AS5600 Position Sensor*. 2024. URL: <https://ams-osram.com/products/sensors/position-sensors/ams-as5600-position-sensor> (visitado 29-08-2024).
- [77] A. Piltch. *Raspberry Pi 5's Wi-Fi Tested: Up to 3x Faster*. 30/09/2023. URL: <https://www.tomshardware.com/news/raspberry-pi-5-wi-fi-faster#:~:text=Near%20the%20router%2C%20the%20Raspberry,of%2063.8%20and%2063.4%20Mbps> (visitado 11-08-2024).
- [78] Adafruit. *Raspberry Pi 15W USB-C Power Supply*. 2024. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/type-c-power-supply/> (visitado 29-08-2024).
- [79] Adafruit. *Raspberry Pi 15.3W USB-C Power Supply Datasheet*. 2024. URL: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/4298/4298_Product-Brief.pdf (visitado 16-09-2024).

-
- [80] Analog Devices INC. *Filter Wizard*. 2024. URL: <https://tools.analog.com/en/filterwizard/> (visitado 28-08-2024).
- [81] M. T. Thompson. *Intuitive Analog Circuit Design (Second Edition)*. Elsevier Inc, 2014.
- [82] C. W. de Silva. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. Elsevier Science Ltd., 2001.
- [83] Adafruit. *Adafruit_MAX31865Repository*. 2024. URL: https://github.com/adafruit/Adafruit_MAX31865 (visitado 31-08-2024).
- [84] Curious Scientist. *MAX31865 - Pt100 RTD module*. 24/04/2024. URL: <https://curiousscientist.tech/blog/max31865-pt100-rtd> (visitado 31-08-2024).
- [85] The FreeCAD Team. *Free CAD*. 2024. URL: <https://www.freecad.org> (visitado 18-09-2024).
- [86] PINGOOD enterprises. *Carcasa de plástico para LED*. 2024. URL: <https://www.pingood.com.tw/es/category/36940.html?page=2> (visitado 21-09-2024).
- [87] Dai Nippon Printing Co. *What are Heat Sinks?* 2024. URL: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/4298/4298_Product-Brief.pdf (visitado 18-09-2024).
- [88] Ams Systems. *AS5600 Datasheet (PDF) - ams AG*. 2024. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/621657/AMSCO/AS5600.html> (visitado 07-09-2024).
- [89] SB Components UK. *Raspberry Pi 4 B vs Raspberry Pi 3 B+*. 25/07/2019. URL: <https://shop.sb-components.co.uk/blogs/posts/raspberry-pi-4-b-vs-raspberry-pi-3-b> (visitado 21-09-2024).
- [90] Okin Electronics. *Carcasa de plástico para LED*. 2024. URL: https://www.amazon.com/Dorhea-Raspberry-30x30x7mm-Brushless-Cooling/dp/B07G97L9TL/ref=sr_1_4?dib=eyJ2IjojMSJ9.GkcvuN4syNWLFGVfjyw1t4EaBCE0a6-vIuN2sXSrFx45vFJxSHa93hyuS9bs3DlmQ5c41UUGJxtinpfuUCU5e9J9fiok_MrcdYxDiyiw6Gm3suIbcWeId-JjoeTrRC1MA2nHz81FaWgYrHEFyFvgvbADHEDpUsdym1ovwGqaBg1YiHpQHPLWju0sxJF1N-vbPNZyV1DvrKA6mvg0pgsS5e3A.QHUtV_CY620KKt9BJz1FzsedT7oeitaFLH5qShFq0K4&dib_tag=se&keywords=3v%2Bfan&qid=1726959852&sr=8-4&th=1 (visitado 22-09-2024).
- [91] W3 Schools. *Python list() Function*. 2024. URL: https://www.w3schools.com/python/ref_func_list.asp (visitado 01-10-2024).
- [92] A. Garg. *Modular programming: beyond the spaghetti mess*. 2024. URL: <https://www.kdnuggets.com/introduction-to-multithreading-and-multiprocessing-in-python> (visitado 07-10-2024).
- [93] N. Nelamali. *Pandas Write to Excel with Examples*. 2024. URL: <https://sparkbyexamples.com/pandas/pandas-write-to-excel-with-examples/> (visitado 09-10-2024).

-
- [94] M. Macdonald. *Modular programming: beyond the spaghetti mess*. 2024. URL: <https://www.tiny.cloud/blog/modular-programming-principle> (visitado 02-10-2024).
- [95] Omega electronicis. *pr-10-spec-sheet*. 2024. URL: <https://jakar.s18.cdn-upgates.com/9/961308083c56f4-pr-10-spec-sheet.pdf> (visitado 15-10-2024).
- [96] Mitchel Electronics Inc. *Encoder Alignment: Isn't Important – It's Critical*. 2024. URL: <https://www.mitchell-electronics.com/encoder-alignment-isnt-important-its-critical/> (visitado 16-10-2024).
- [97] Maxim integrated circuits. *DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. 2024. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18B20.pdf> (visitado 19-10-2024).
- [98] STMicroelectronics. *Dual full-bridge driver*. 2000. URL: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf (visitado 19-10-2024).
- [99] LTD (HK) INDUSTRIAL CO. *GM25-370CA*. 2014. URL: <https://p.globalsources.com/IMAGES/PDT/SPEC/301/K1123392301.pdf> (visitado 19-10-2024).
- [100] Departamento de Física Aplicada I Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Sevilla. *ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS*. Universidad de Sevilla, 2014.
- [101] RLS d.o.o. *How reliable are magnetic encoders?* 2024. URL: https://www.rls.si/eng/faq/index/show/cat_id/2/faq/2/#:~:text=At%20worst%20case%20we%20can,potential%20failure%20in%2039%20years. (visitado 20-10-2024).
- [102] CR cibernetica. *Shipping Returns*. 2024. URL: <https://www.crcibernetica.com/shipping-returns/> (visitado 20-10-2024).
- [103] CR cibernetica. *Pagina de Cotizaciones*. 2024. URL: https://carbonestore.cr/collections/laminas-y-planchas?srsltid=AfmBOopc2TMZmK_AGyvcBy3LsLQNocq1gWG51m1sTH (visitado 21-10-2024).
- [104] DG Talic Costa Rica. *Pagina principal*. 2024. URL: <https://dgtalic.com> (visitado 21-10-2024).
- [105] Grupo PRO. “Pregunta enviada por mensaje de texto a la gerente de produccion del Grupo PRO Lindsay Leiva”. En: 16/09/2024, Ver Anexo 1.
- [106] CNFL Costa Rica. *Tarifas Vigentes*. 2024. URL: <https://www.cnfl.go.cr/servicios/electricos/inmuebles/tramites/tarifas> (visitado 19-10-2024).
- [107] PIMA. *SISTEMA DE INFORMACION DE MERCADOS MAYORISTAS BOLETIN DE PRECIOS: PRECIOS DE MAYORISTA A MINORISTA PROGRAMA INTEGRAL DE MERCADEO AGROPECUARIO SIFPIMA SIMM CENADA, HEREDIA, COSTA RICA*. 2024. URL: <https://www.pima.go.cr/wp-content/uploads/2021/07/SIMM%20-%20Bolet%20C3%ADn%20de%20Precios%202021-07-13.pdf> (visitado 19-10-2024).

-
- [108] RECOPE Costa Rica. *Precios Vigentes*. 2024. URL: <https://www.recope.go.cr/productos/precios-nacionales/tabla-precios/> (visitado 19-10-2024).
- [109] A. J. Strickland A.A. Thompson. *Crafting and Executing Strategy: The Quest for Competitive Advantage*. McGraw-Hill Education, 2019.

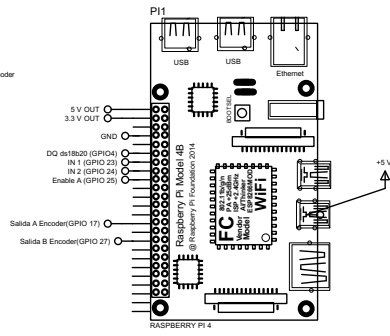
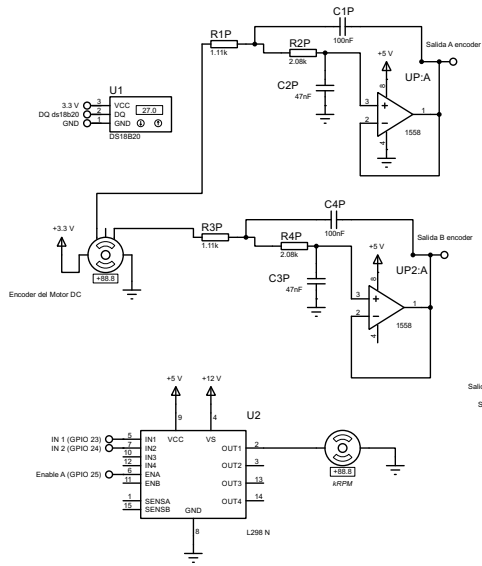
Capítulo 7

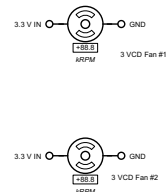
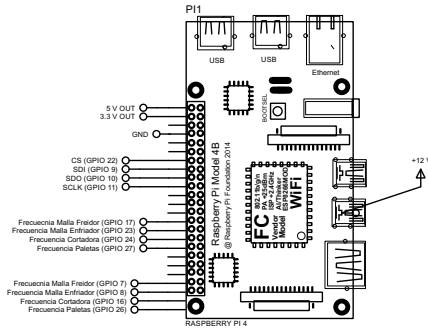
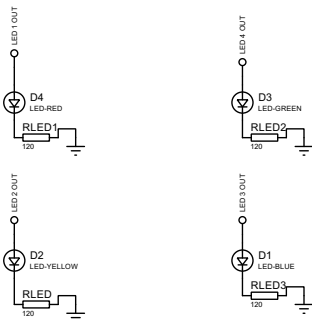
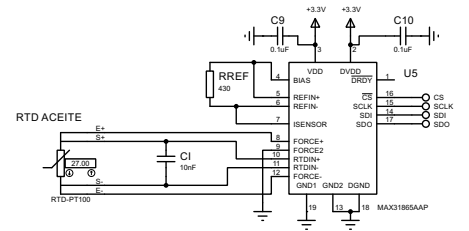
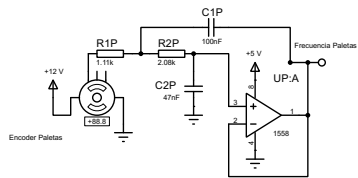
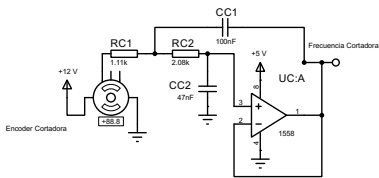
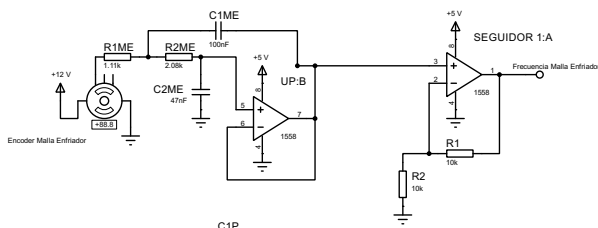
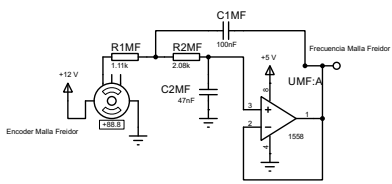
Apéndices

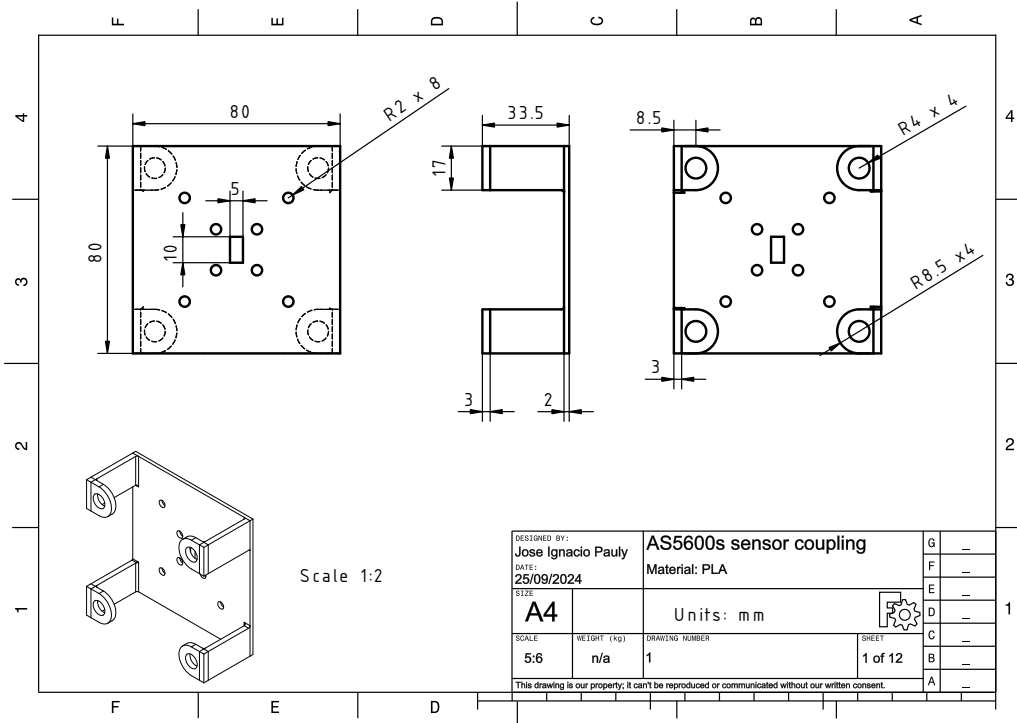
7.1. Apéndice 1: Códigos y series de comandos

Para facilitar la lectura del código por medio de un formato mas amigable para el lector, todos los archivos utilizados se pueden encontrar en el siguiente repositorio público de Github: <https://github.com/JIPauly/Anexo-1-Codigos-y-series-de-comandos>

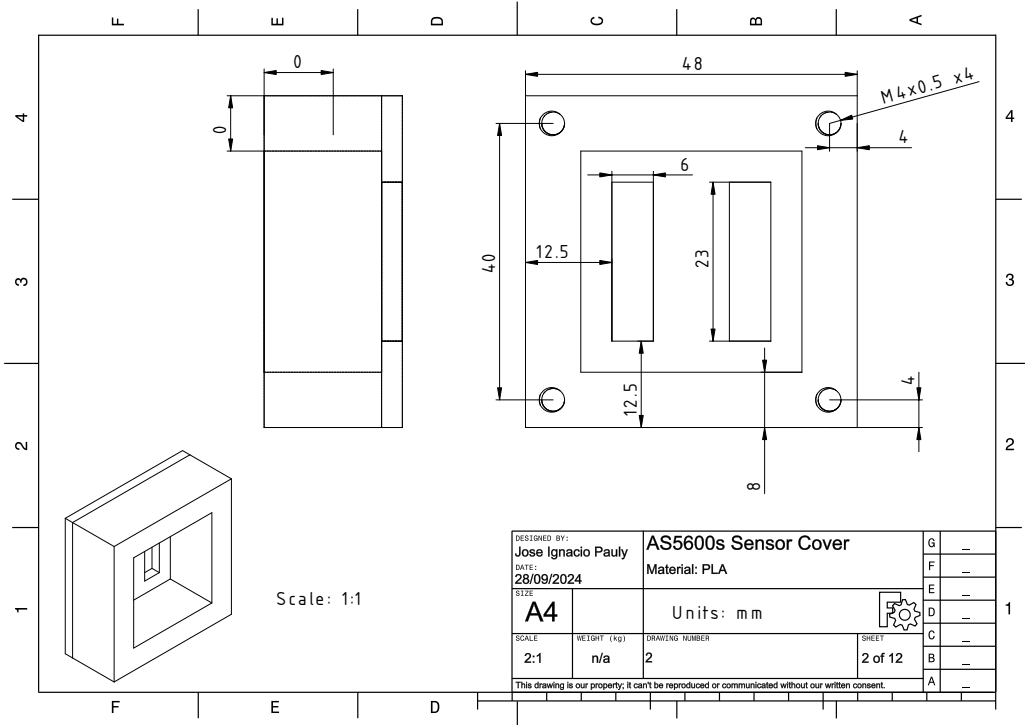
7.2. Apéndice 2: Planos y diagramas

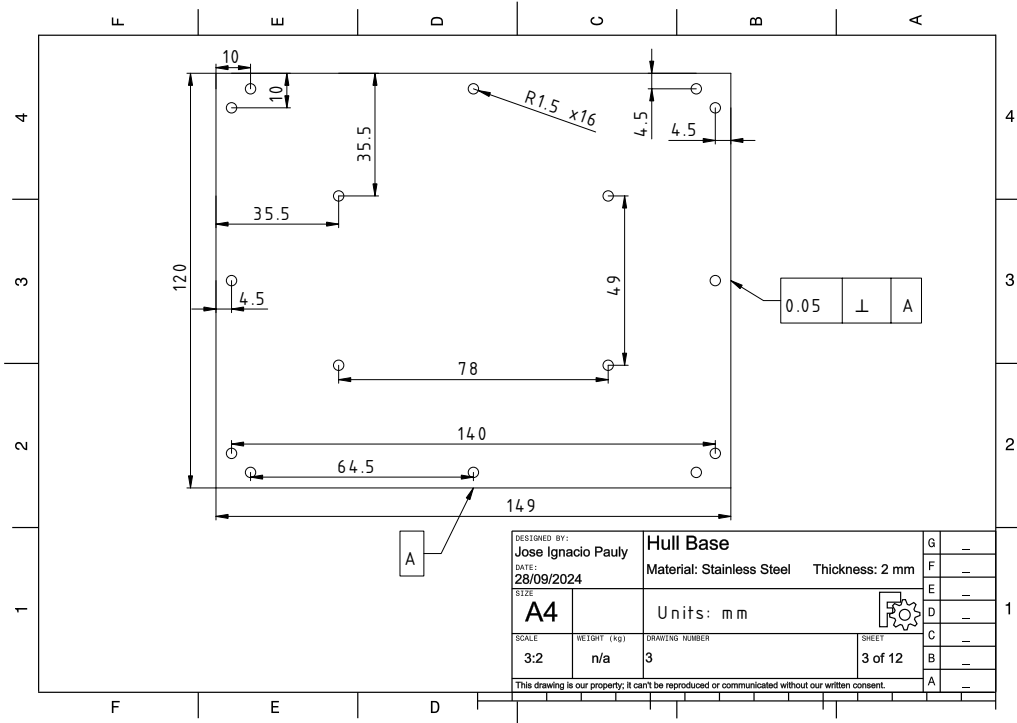




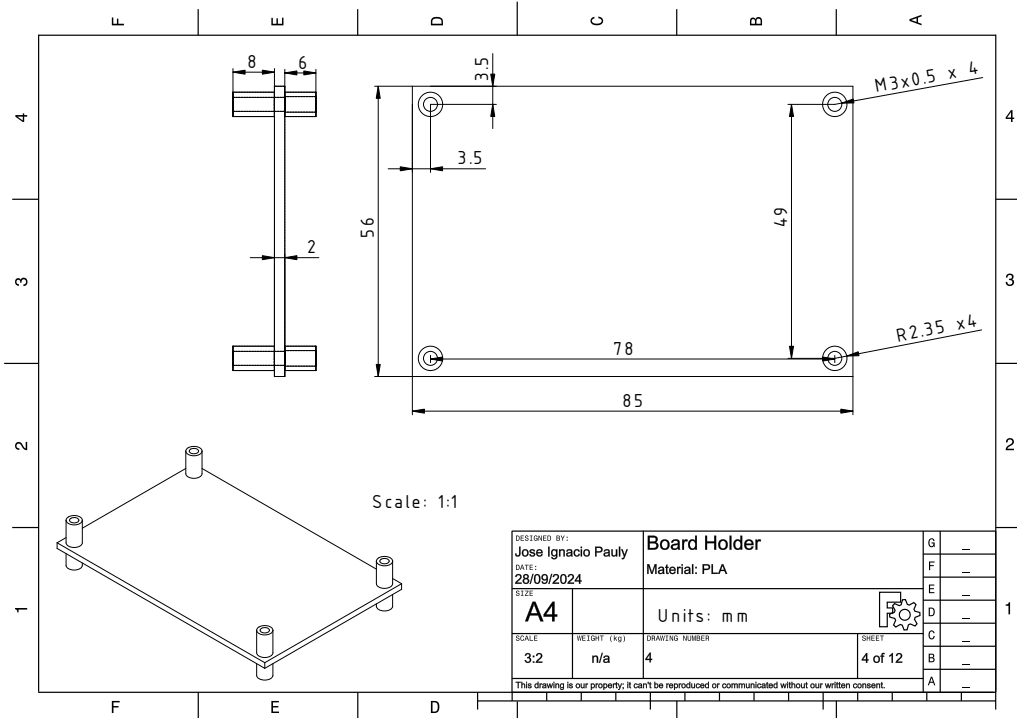



DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		AS5600s sensor coupling		G	-
DATE: 25/09/2024		Material: PLA		F	-
SIZE: A4	Units: mm		D		-
SCALE: 5:6	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 1	SHEET: 1 of 12	C	-
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.				B	-
				A	-

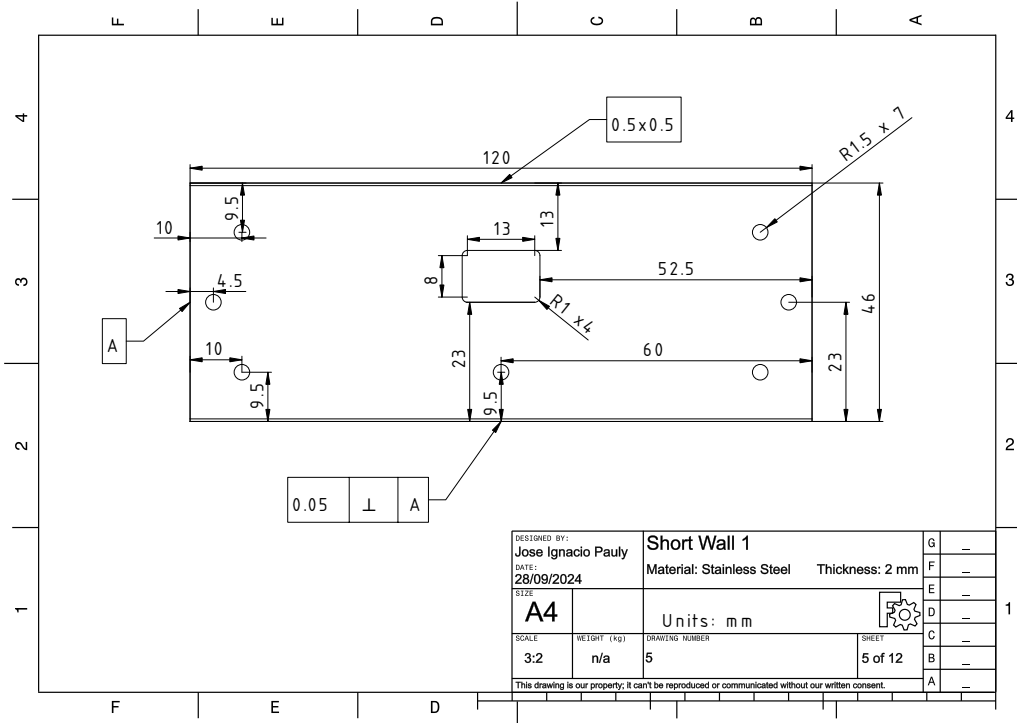




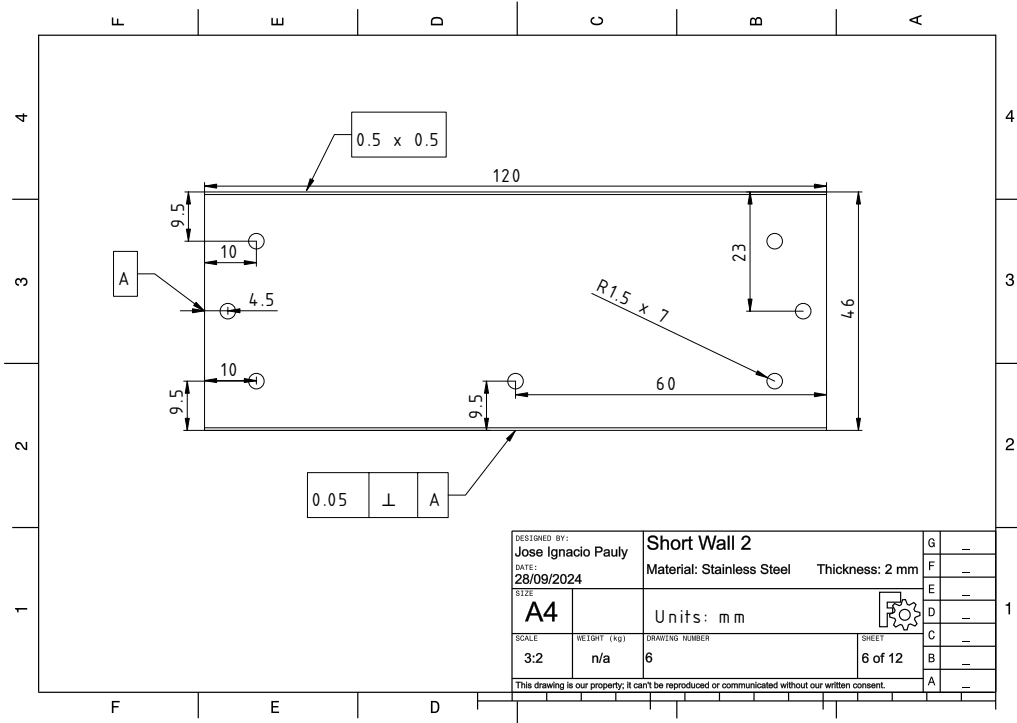
DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Hull Base		G	-
DATE: 28/09/2024		Material: Stainless Steel Thickness: 2 mm		F	-
SIZE: A4	Units: mm		D		-
SCALE: 3:2	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 3	SHEET: 3 of 12	C	-
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.				B	-
				A	-



DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Board Holder		G	-
DATE: 28/09/2024		Material: PLA		F	-
SIZE: A4		Units: mm		E	-
SCALE: 3:2	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 4	SHEET: 4 of 12	D	-
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.				C	-
				B	-
				A	-

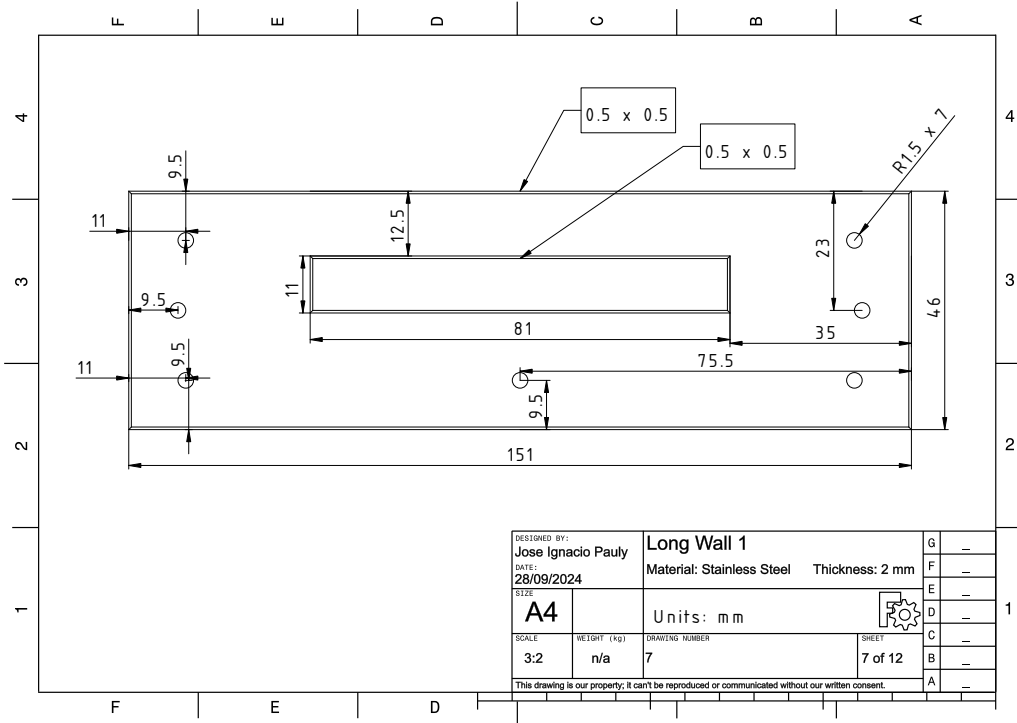


DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Short Wall 1		G	-	
DATE: 28/09/2024		Material: Stainless Steel Thickness: 2 mm		F	-	
SIZE: A4	Units: mm		D		-	
SCALE: 3:2	WEIGHT (kg): n/a	DRAWING NUMBER: 5	SHEET: 5 of 12		E	-
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.				C	-	
				B	-	
				A	-	

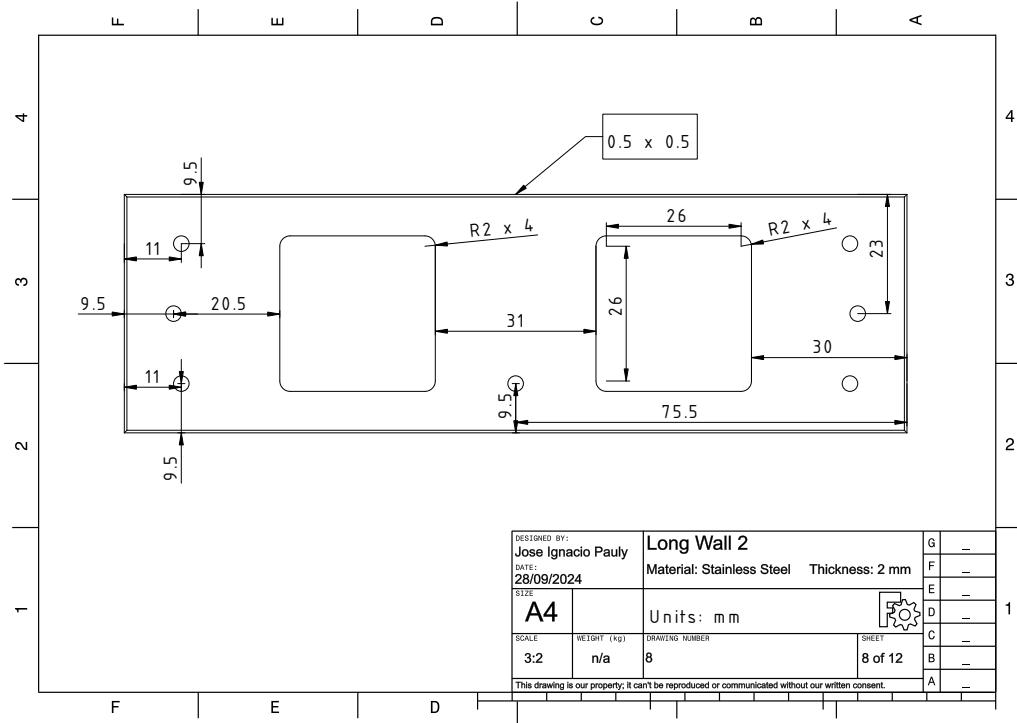


DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Short Wall 2	
DATE: 28/09/2024		Material: Stainless Steel Thickness: 2 mm	
SIZE: A4	Units: mm		
SCALE: 3:2	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 6	SHEET: 6 of 12
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.			

G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

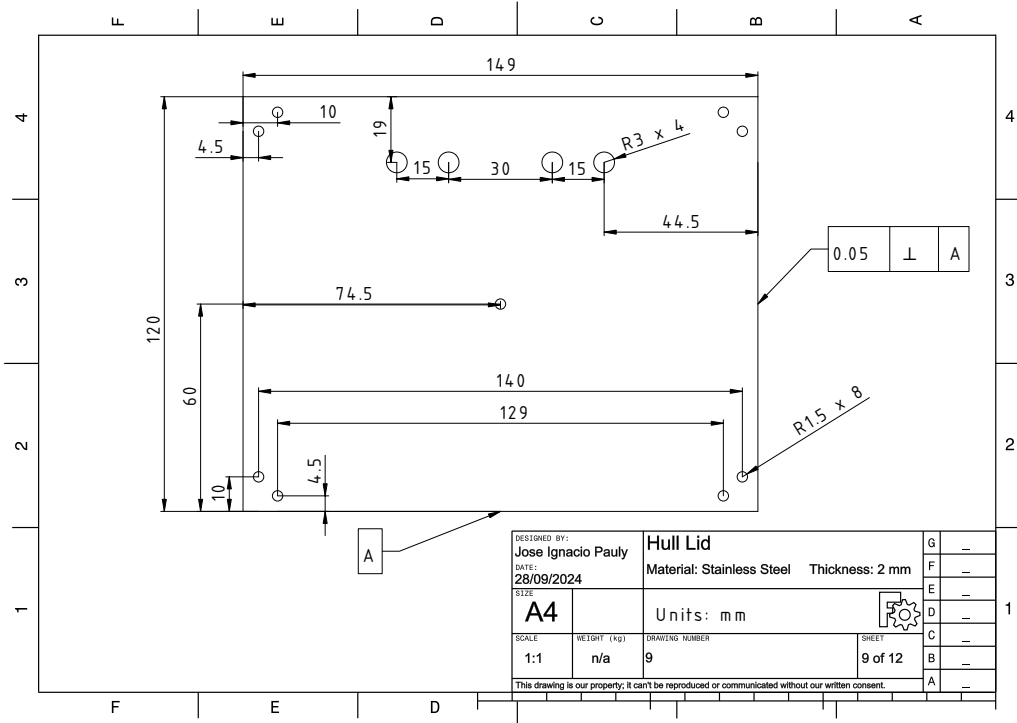


DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Long Wall 1		G	-
DATE: 28/09/2024		Material: Stainless Steel Thickness: 2 mm		F	-
SIZE: A4		Units: mm		E	-
SCALE: 3:2	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 7	SHEET: 7 of 12	D	-
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.				C	-
				B	-
				A	-



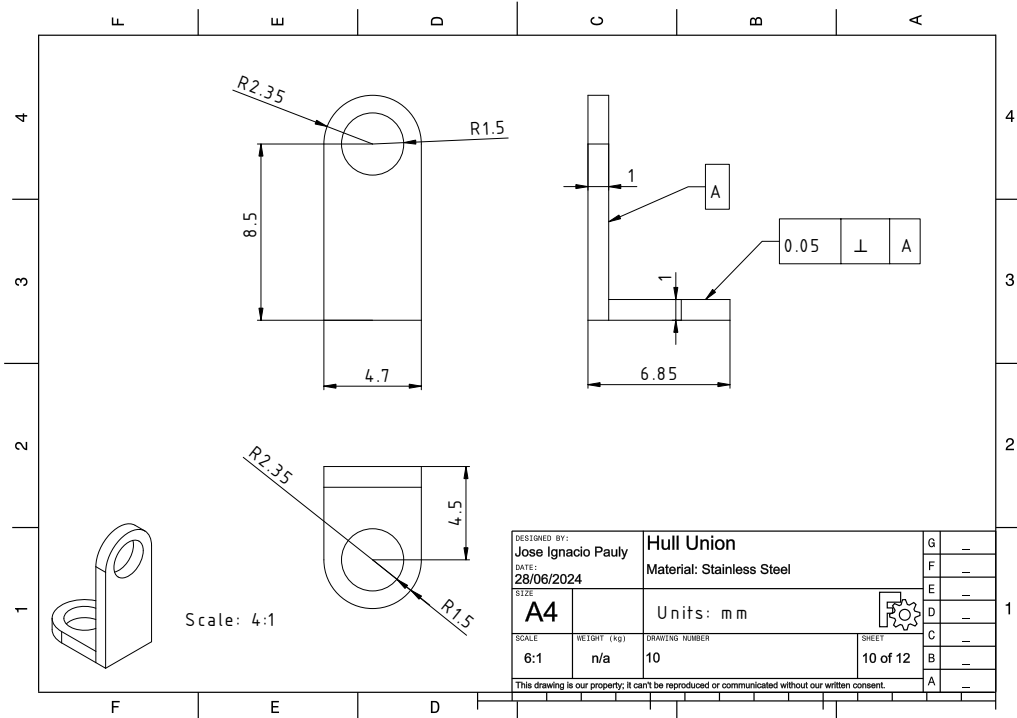
DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Long Wall 2	
DATE: 28/09/2024		Material: Stainless Steel Thickness: 2 mm	
SIZE: A4		Units: mm	
SCALE: 3:2	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 8	SHEET: 8 of 12
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.			

G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

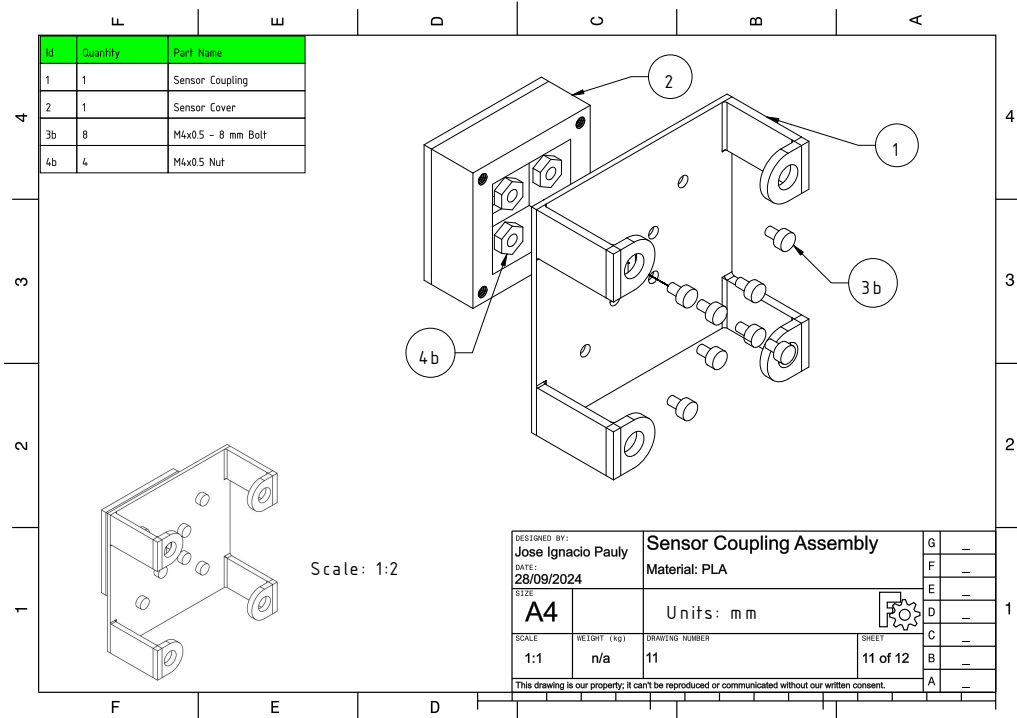


DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Hull Lid	
DATE: 28/09/2024		Material: Stainless Steel Thickness: 2 mm	
SIZE: A4	Units: mm		
SCALE: 1:1	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 9	SHEET: 9 of 12
This drawing is our property, it can't be reproduced or communicated without our written consent.			

G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-




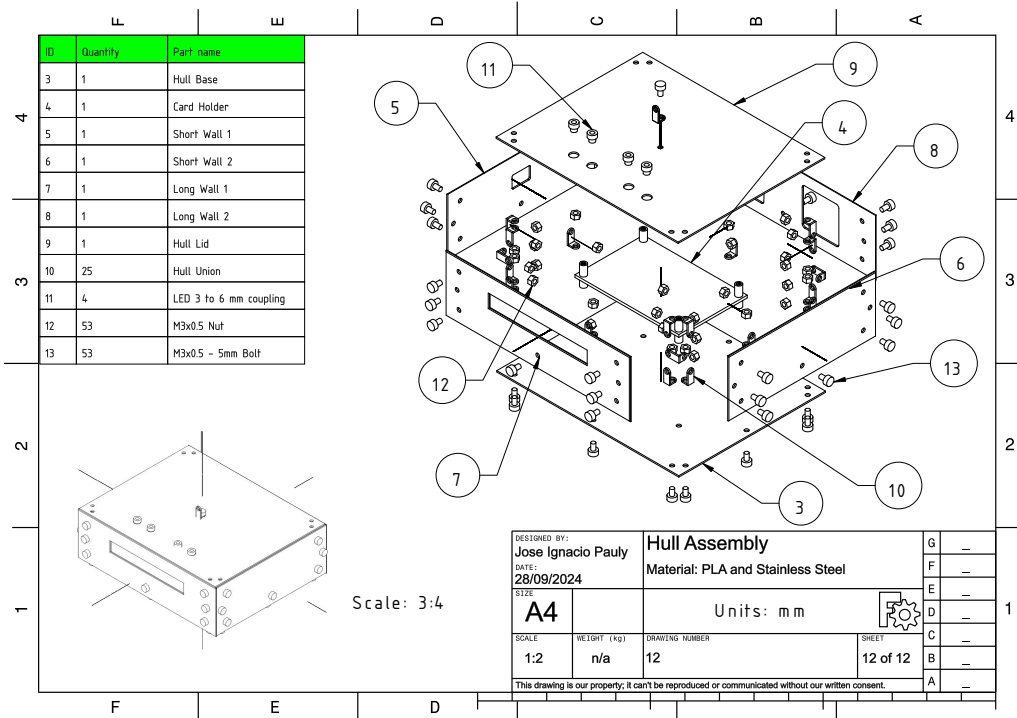
DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Hull Union		G
DATE: 28/06/2024		Material: Stainless Steel		F
SIZE: A4	Units: mm		D	
SCALE: 6:1	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 10	SHEET: 10 of 12	C
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.				B
				A



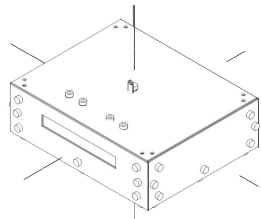
Id	Quantity	Part Name
1	1	Sensor Coupling
2	1	Sensor Cover
3b	8	M4x0.5 - 8 mm Bolt
4b	4	M4x0.5 Nut

Scale: 1:2

DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Sensor Coupling Assembly		G	-
DATE: 28/09/2024		Material: PLA		F	-
SIZE: A4	Units: mm				
SCALE: 1:1	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 11			
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.				E	-
				D	-
				C	-
				B	-
				A	-



ID	Quantity	Part name
3	1	Hull Base
4	1	Card Holder
5	1	Short Wall 1
6	1	Short Wall 2
7	1	Long Wall 1
8	1	Long Wall 2
9	1	Hull Lid
10	25	Hull Union
11	4	LED 3 to 6 mm coupling
12	53	M3x0.5 Nut
13	53	M3x0.5 - 5mm Bolt



Scale: 3:4

DESIGNED BY: Jose Ignacio Pauly		Hull Assembly		G	-
DATE: 28/09/2024		Material: PLA and Stainless Steel		F	-
SIZE: A4	Units: mm		D		-
SCALE: 1:2	WEIGHT (KG): n/a	DRAWING NUMBER: 12	SHEET: 12 of 12	C	-
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written consent.				B	-
				A	-

7.3. Apéndice 3: Formatos y archivos de Excel y CSV

Debido a su extensión, y formato, todos los archivos .xlsx y .csv se pueden encontrar en el siguiente enlace de Google Drive, clasificados según el capítulo en que se utilizan a través del informe:

https://drive.google.com/drive/folders/17S0sJ_wt2LZz4YTxXa0hsd3XBJIRNK88?usp=sharing

7.4. Apéndice 4: Manual del usuario básico para el sistema



Manual del usuario para el sistema
automático de trazabilidad para el freidor
#5.

Última modificación: 27/10/2024

Contenidos

Nota previa.....	3
Instalación	3
Programas y códigos	3
Componentes necesarios:.....	4
Ensamble de los componentes	4
Colocación de los sensores en el freidor #5.....	6
Como usar el sistema	9
Mantenimiento	10
Puntos de falla e indicadores	10

Nota previa

A lo largo del presente documento, se hace referencia a diagramas, planos, y archivos de código, los cuales proveen información más detallada de como ensamblar o conectar ciertos componentes. Los archivos mencionados se pueden encontrar como anexos, o como enlaces a páginas web donde se almacenan los mismos.

De la misma manera, este documento presenta una introducción general al sistema, si se desea entenderlo más a profundidad, se recomienda examinar el documento de diseño que acompaña a este manual.

Instalación

Programas y códigos

Todos los programas y códigos necesarios pueden ser encontrados en el siguiente enlace:

<https://github.com/JIPauly/Anexo-1-Codigos-y-series-de-comandos>

Previo a cualquier ensamble o conexión, se debe conectar la Raspberry Pi a un monitor, y teclado por medio de sus puertos USB. Una vez realizado esto, se puede conectar a la red Wifi de la planta de manera similar a una computadora corriente.

Seguidamente, se debe configurar una cuenta de “Raspberry Pi Connect” al seguir las instrucciones en esta página web : <https://www.raspberrypi.com/news/raspberry-pi-connect/>. Realizar esta configuración permite acceder a la Raspberry Pi desde cualquier dispositivo de manera inalámbrica, por lo que no se requiere el monitor en el futuro.

Una vez configurada la Raspberry Pi, se debe crear una carpeta llamada “scripts” dentro del escritorio, y colocar en su interior los siguientes archivos:

- leer_encoder_v2.py
- socket_servidor.py
- RTD_Pt100.py

Los archivos pueden ser directamente descargados de la página web, o transferidos por medio de una llave USB.

Por último, diríjase al escritorio de la computadora en la oficina de mantenimiento, y cree una carpeta en el escritorio llamada “Rastreador de Trazabilidad” y coloque en su interior los siguientes archivos:

- socket_cliente.py
- graficador.py

Con esto, la configuración del sistema está completa.

Componentes necesarios:

Para poder ensamblar el sistema, se requieren los siguientes componentes:

- Partes de la carcasa, detalladas en el apéndice “Planos de la carcasa”.
- 53 tornillos M3x0.5 -5 mm.
- 53 tuercas M3x0.5.
- 4 luces LED de 3 mm , una de cada color: Amarillo, Rojo, Azul, y Verde.
- 1 sensor de temperatura RTD PT100 de OMEGA de 3 hilos.
- 1 circuito MAX 31865
- Al menos 2 metros de cableado OMEGACLAD de 3 hilos.
- 1 Raspberry Pi 4
- Cargador 5 V CD para la Raspberry Pi, aunque cualquier cargador tipo C es aceptable.
- 4 encoders magnéticos AS5600s, con sus imágenes y pegamento incluido.
- Cableado de cobre para electrónica, al menos 4 metros.
- 2 ventiladores de 3 V DC de 30 x 30 mm.
- Diversas resistencias, capacitadores, y amplificadores operacionales detallados en el apéndice “Planos para conexiones electrónicas”

Ensamble de los componentes

El primer paso del procedimiento es ensamblar la carcasa, y los acoples de los sensores, tal y como se muestra en los planos mecánicos adjuntos al final de este documento. Es importante mencionar que tanto la Raspberry Pi, como los sensores AS5600s deben colocarse en sus carcasas antes de realizar las conexiones eléctricas, ya que resultara más sencillo mover los componentes una vez ensamblados. Al mismo tiempo, se recomienda no atornillar la tapa de la carcasa hasta el último paso.

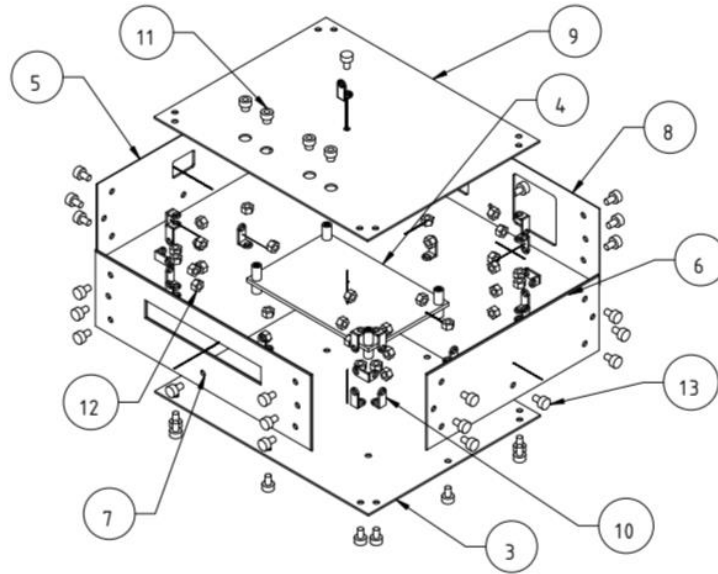


Figura 1: Ensamble general de la carcasa.

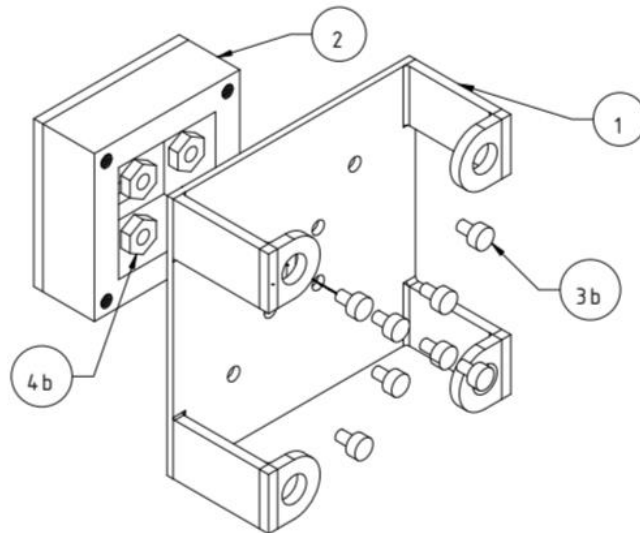


Figura 2: Diagrama de acople para el sensor AS5600s

Una vez que la carcasa está ensamblada, y la Raspberry pi, MAX31865, y el sensor AS5600s están unidos a sus acoples, se deben realizar las conexiones eléctricas. Para realizarlo, se debe seguir el diagrama eléctrico mostrando en el apéndice “Planos de conexiones electrónicas”.

En el diagrama mencionado, se resaltan a que terminales, o “pines” de la Raspberry Pi se debe colocar cada conexión, la posición exacta de cada pin, y su nombre, se muestran en la figura 3. Es

esencial que la Raspberry Pi se encuentre en la misma posición que en la figura, y que no se encuentre conectada a ninguna fuente de energía durante la conexión.

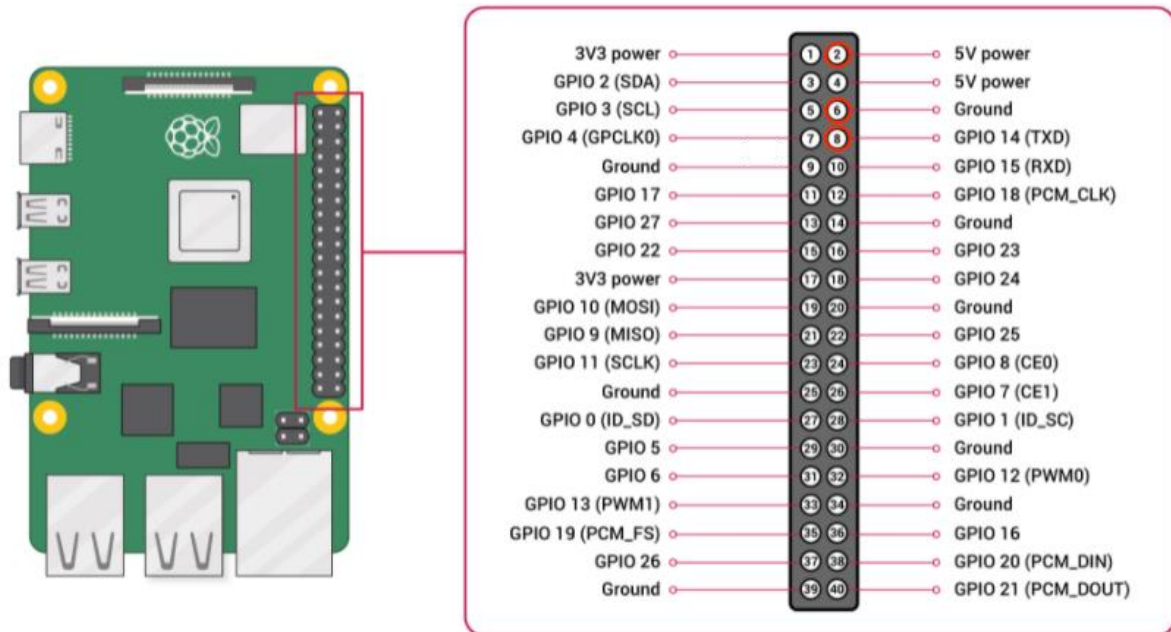


Figura 3: Pines de la Raspberry pi y su nombre.

Para facilitar el flujo de trabajo, se recomienda ensamblar los circuitos en partes, como las que se muestran en el diagrama eléctrico, antes de conectar todo a la Raspberry Pi. Es decir, se deben ensamblar los circuitos de cada sensor, pero no conectarlos hasta que se hayan colocado en la maquinaria.

Colocación de los sensores en el freidor #5

Existen 4 posiciones para los acoples de los sensores AS5600s, como se muestran en las figuras 4, 5, 6, y 7.



Figura 4: Posición para el sensor de la cortadora.

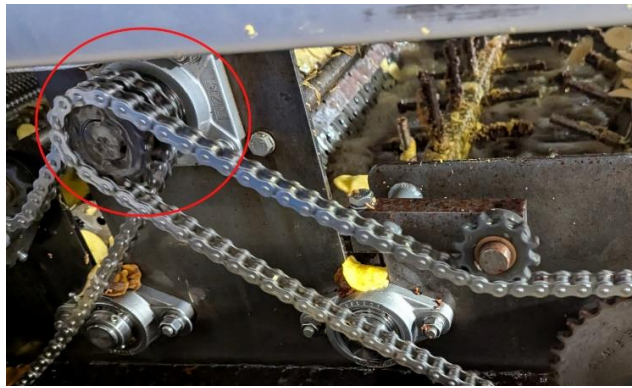


Figura 5: Posición para el sensor de las paletas.

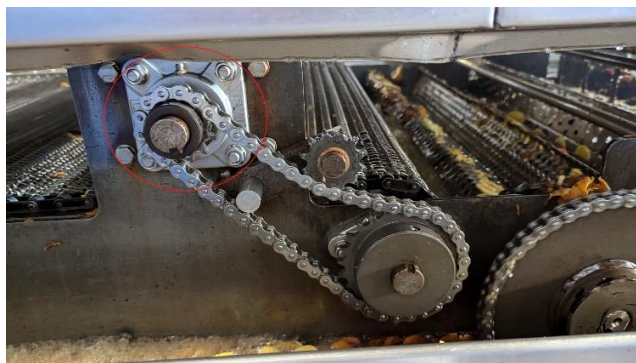


Figura 6: Posición para el sensor de la malla de fritura.



Figura 7: Posición para el sensor de la malla de enfriamiento.

- 1) Para colocar cada uno, la máquina debe estar en paro total. Comience por limpiar el eje expuesto de cada motor con desengrasante y una toalla de microfibra. Seguidamente, encuentre el centro del eje, y márkelo, una vez que está seguro de que ha encontrado el centro exacto, coloque una pequeña cantidad de adhesivo al punto y presione el imán firmemente contra este y sostenga por 1 minuto mientras seca el pegamento.
- 2) Una vez colocados los imanes, retire los 4 tornillos en las puntas de cada carátula de cada motor, y colóquelos a un lado. Proceda a alinear cada uno de los agujeros en los “brazos” de los acoples con los agujeros en la carátula, y vuelva a insertar y ajustar los tornillos. Para colocar los sensores en la cortadora, debe retirar primero la cubierta posterior del motor.
- 3) Coloque la carcasa en la posición mostrada en la figura 8.



Figura 8: Posicionamiento de la carcasa (caja roja) y cableado (líneas rojas) en el freidor #5.

- 4) Coloque y asegure el sensor RTD PT100 directamente encima de la carcasa, y sumérjalo a 50 cm de profundidad.

- 5) Por último, conecte los cables de cada sensor a la Raspberry Pi como se muestra en el diagrama eléctrico y llévelos por la ruta mostrada por las líneas rojas en la figura 8, cubra y asegure los cables al piso con cinta adhesiva industrial.

Como usar el sistema

Para poder utilizar el sistema, la Raspberry Pi, los sensores, sus conexiones, y todos los archivos necesarios deben estar configurados como se muestra en las secciones anteriores. Sin embargo, una vez realizado esto, utilizarlo es sencillo.

Primero, se debe acceder a la Raspberry Pi por medio del enlace de “Raspberry Pi Connect”, y se debe ejecutar el archivo “socket_cliente.py”.

Seguidamente, se debe ir al computador en la oficina de mantenimiento, y ejecutar el archivo

“socket_cliente.py” e ingresar la temperatura a la que debe estar el durante la jornada de producción del producto actual.

Por último, se debe ejecutar el archivo graficador.py, el cual mostrará el estado de la temperatura y velocidad de los diferentes motores en tiempo real. Al mismo tiempo, el programa generará un archivo de Excel llamado “Machote de Trazabilidad.xlsx” el cual almacena la información de la máquina cada 15 minutos.

Mantenimiento

El mantenimiento del sistema consiste en aplicar los principios del mantenimiento preventivo. Se recomienda realizar una inspección general del sistema cada dos meses, donde se revise la integridad de sus conexiones y sensores, y así como revisar que todo su cableado se encuentre intacto.

Es aconsejable limpiar cualquier acumulación de aceite, o partículas solidas que se forme alrededor de los sensores unidos a los motores, ya que esta acumulación puede llevar a deterioro y lecturas incorrectas.

Puntos de falla e indicadores

La carcasa del sistema cuenta con 4 luces LED de diferentes colores, y cada una tiene un comportamiento esperado, que ayuda a diagnosticar errores.

- **LED Verde:** Se mantiene encendida cuando el sistema está conectado a una fuente de energía. Si esta LED no se encuentra encendida durante la operación, se debe revisar el flujo de corriente y la conexión de energía a la Raspberry Pi.
- **LED Azul:** Parpadea cada vez que se recolecta la información de los sensores. Si este LED permanece apagado, puede significar un error en la conexión, o estado de los sensores. En este caso, de debe verificar la integridad de los sensores y de sus conexiones a la Rapsberry Pi.
- **LED Amarillo:** Normalmente debe estar apagada. Si esta se enciende, quiere decir que hubo un error al intentar enviar los datos a la computadora de la oficina de mantenimiento. En este caso se recomienda revisar que todos los programas necesarios estén corriendo tanto en la computadora de mantenimiento como en la Raspberry Pi.
- **LED Rojo:** Normalmente debe estar apagada. Si se enciende, indica que la Raspberry Pi intentó tomar información de un sensor, pero no obtuvo respuesta, o que hubo un corto en las

conexiones de la carcasa. En caso de que ocurra esto, inmediatamente se debe revisar la integridad de los sensores, y sus conexiones, además de verificar que ningún componente electrónico haya entrado en contacto directo con el aceite o algún otro líquido.

En caso de que algún sensor o componente se encuentre comprometido, y una limpieza y reconexión no resuelva el problema, se debe reemplazar por un repuesto. Sin embargo, el primer procedimiento ante una falla siempre debería ser volver a descargar los archivos, y reiniciar la Raspberry Pi, ya que esto puede resolver un gran número de errores.

7.5. Apéndice 5: Entrevistas

El formato de las entrevistas varía entre mensajes de texto, y grabaciones de audio, por lo que se pueden encontrar en el siguiente enlace de Google Drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/13e5Et4EQfIYnKB1k1Y3-H-JH0CRkYY9x?usp=sharing>

7.6. Apéndice 6: Resultados de las encuestas

Los archivos extraídos de Google Forms con las respuestas a las entrevistas se pueden encontrar en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1J6KcS7EmKDX02_YV8H9ScTEomVd9YBuX?usp=drive_link

Capítulo 8

Anexos

8.1. Anexo 1: Requerimientos de seguridad para el freidor #5

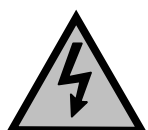
Safety Considerations

All Heat and Control, Inc. equipment is engineered and manufactured for reliable operation with an emphasis placed on the safety of the trained operators. As with all machinery involving moving components, injury may occur if proper safety procedures are not followed. Dangerous situations may occur if the machinery is not operated correctly and safely or if the equipment is not maintained properly.

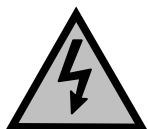
During the manufacture of the equipment, full consideration is given to the safety of operators and service personnel. As safe operation is of paramount importance to your company, and to Heat and Control, no risks should be taken. The first responsibility for safety must reside with operation, sanitation, and maintenance personnel and every care should be taken. Please read this entire manual before operating the new equipment for which this Technical Manual applies.

General Safety Guidelines

1. Report all unsafe conditions, equipment, and practices to your supervisor.
2. Know the location of all Emergency Stop pushbuttons and all safety disconnect switches.



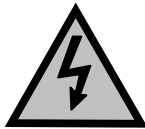
Be aware that Heat and Control machinery is typically powered by high voltage. Only authorized personnel should service the equipment.



The Heat and Control Service Department, in Hayward, California, offers training in the operation, sanitation, and maintenance of all types of H&C manufactured processing equipment.. You may contact the Process Service Department at (800) 227-5980 during normal Pacific Coast working hours and by dialing (800) 228-9902 after hours.

The Heat and Control equipment may have multiple voltage sources. Isolate all electrical sources before servicing.

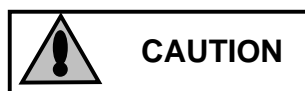
General Safety Guidelines (Continued)



Over current protection is required for all 24V, 120V, 240V, and 480V circuits.



<ul style="list-style-type: none">• Always disconnect power from machinery before performing any maintenance.
<ul style="list-style-type: none">• Observe all cautions and warnings placed on the equipment and as printed in this manual.
<ul style="list-style-type: none">• Inspect all equipment and tools before use. Do not use faulty, broken or incorrect equipment.
<ul style="list-style-type: none">• Do not wear loose articles of clothing.• Do not wear jewelry or watches while operating or working on any HeatWave Fryer System Equipment.



<ul style="list-style-type: none">• Use only ladders, platforms, and handrails that have been safety approved by your facility.
<ul style="list-style-type: none">• Always wear eye and ear protection when operating Heat and Control, Inc. equipment.
<ul style="list-style-type: none">• Keep foreign objects out of the processing equipment work area.
<ul style="list-style-type: none">• Clean up spill immediately.

General Safety Precautions

A safety conscious approach to the operation and maintenance of equipment generally, can be summarized as follows:

1. **NEVER** operate any machine unless adequate training has been provided for the safe operation of the equipment.
2. **NEVER** reach to clear any foreign material from any powered equipment, or from any automated equipment that could start without warning.
3. **ALWAYS** perform the **Safety Shut-Down Procedures** first, before performing adjustments or maintenance on any piece of equipment.
4. **ALWAYS** keep fingers and other body parts out of operating machinery.
5. Shut down of any line equipment must be preceded by shut-down of all upstream items of equipment feeding the machine.
6. **DO NOT** attempt electrical or mechanical repairs unless you are qualified to carry out such work.
7. **ALWAYS** ensure "**Lock-Out**" and "**Tag-Out**" of the electrical power, **BEFORE** beginning work on any machine. Refer to the Safety Lock-Out Procedures for details.
8. **NEVER** bypass safety interlocks.
9. **NEVER** start any machine without verifying that personnel are not inside, on or under the machine, and that the machine is fully assembled and in operational condition with all guards installed.
10. **ALL** plant employees should familiarize themselves with the location of any and all **Emergency Stop Push-buttons**, to facilitate their use in case of an emergency.

Caustic Handling (Sodium Hydroxide - NaOH)

For satisfactory cleaning on the cooking equipment manufactured by Heat and Control, Inc, it is recommended that a strong caustic cleaning solution be used. Please contact your local chemical and sanitation experts for an application that will be best for your particular needs.

The use of strong caustic cleaning agents will cause serious burning to skin and eyes if not handled properly. Your local chemical and sanitation supplier can recommend and provide you with the necessary chemicals for use in your sanitation procedures. The training necessary for the safe handling and use of the cleaners can and should also be provided by your local chemical supplier.

When handling strong chemicals, such as Sodium Hydroxide, it is essential that full protective clothing and eye protection be worn while working with this cleaning agent. Should accidental contact occur, immediately remove any caustic soaked clothing, wash the affected area with copious quantities of clean water and seek immediate medical assistance. To ensure minimal delay in carrying out the above washing, **all employees should be aware of the location of the nearest safety shower.**

Safety Lock-Out Procedures

Purpose

This portion sets out Heat and Control's own procedures for lock-out of energy sources from equipment that could cause injury to personnel. It is recommended that this be the minimum procedure standard adopted by the purchaser of this system.

Responsibility

The responsibility for seeing that this procedure is followed is binding upon all employees. All employees must be instructed in the safety significance of the lock-out procedure by their department supervisor and in the purpose and use the lock-out procedure.

Preparation for Lock-Out

Employees authorized to perform lock-out must be certain as to which switch, valve or other energy isolating devices apply to the equipment being locked out. More than one energy source (electrical, mechanical or others) may be involved. Any questionable identification of sources must be cleared by the employees with their supervisors. Before lock-out commences, job authorization must be obtained.

Safety Lock-Out Procedures (Continued)

Sequence of Lock-Out Procedure

1. **'Notification'** - Notify all affected employees that a lock-out is required, and state the reason for the lock-out.
2. **'Shut Down'** - If the equipment is operating, shut down using normal stopping procedures.
3. **'Disconnect & Isolate'** – Disconnect and isolate any and all energy sources pertaining to the anticipated maintenance requirements. Operate the switch, valve, or other energy isolating device(s) so that the energy source(s) (electrical, mechanical, hydraulic, etc.) is disconnected or isolated from the equipment. Stored energy, such as that in capacitors, springs, elevated machine members, rotating flywheels, hydraulic systems, and air, gas, steam, or water pressure, etc., must also be dissipated or restrained by methods such as grounding, repositioning, blocking, bleeding, etc.
4. **'Lock-Out'** – Lock out energy isolating devices with an assigned individual lock.
5. **'Attempt Operation'** - After ensuring that no personnel is exposed and that the equipment is disconnected from the energy sources, operate the controls to attempt to start the equipment. This makes certain that the equipment does not operate. Once this is confirmed, return the controls to the 'OFF' position.
6. **Equipment is now 'Locked Out'** - It should now be safe to continue with the outlined maintenance work that is required.

Safety Lock-Out Procedures (Continued)

Restoring Equipment to Service

1. When the job is completed and the equipment is ready for testing or normal service, check the equipment area to see that no one is exposed.
2. When the equipment is clear, remove all locks. The energy isolating devices may be operated to restore energy to the equipment.

Procedure Involving More Than One Person

In the preceding steps, if more than one individual is required to lock-out equipment, each person places his/her own personal lock on the energy isolating device(s). One designated individual of a work crew or a supervisor, with the knowledge of the crew, may lock-out equipment for the whole crew. In such cases, it may be the responsibility of the individual to carry out all the steps of the lock-out procedure and inform the crew when it is safe to work on the equipment. Additionally, the designated individual does not remove a crew lock until it has been verified that all individuals are clear.

Rules For Using the Lock-Out Procedure

All equipment must be locked out to protect against accidental or inadvertent operation when such operation could cause injury to personnel. Do not attempt to operate any switch, valve or other energy device bearing a lock.

Safety Warning Labels

The safety warning labels described in this section of the Technical Manual are used to point out where potential danger may exist and where caution should be exercised.

It is recommended that plant owners and managers review where these labels are mounted on Heat and Control equipment. If labels on Heat and Control equipment are missing or illegible, Heat and Control will supply new labels at no charge.

To order additional labels or to request additional information you may contact our Spare Parts Department at (510) 259-0500.

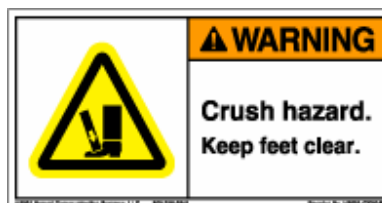
Pinch / Crush Labels



Part # 20514680



Large Size - Part # 20516017
Small Size – Part # 20516925



Part # 20516025

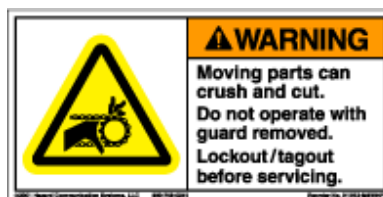
Belt / Chain / Gear Safety Labels

Typical Location

Any location where operation without safety guards in place is dangerous and consequently, could cause injury to hands and fingers; e.g. Conveyor end rolls, sheeter rolls, slide gates, etc, where fingers may get caught, pinched, or drawn into the equipment.



Part # 20514605



Large Size – Part # 20514604
Small Size – Part # 20515168



Small Size – Part # 20214603



Part # 20515169

Rotating Shaft Safety Labels

Typical Location

Any location where operation without guards in place is dangerous and consequently, could cause serious injury to hands and to fingers; e.g. Conveyor end rolls, sheeter rolls, etc, where fingers may get caught, pinched, or drawn into the equipment



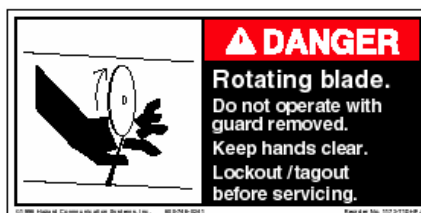
Part # 20514840



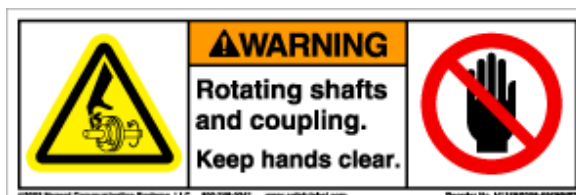
Part # 20516571



Part # 20515452



Rotating Blade Label – Part # 20515453



Part # 20516894



Part # 20516572

Cutting / Puncturing Warning Labels



Part # 20515452



Rotating Blade Danger Labels – Part # 20515453

Electrical Warning Labels



Part # 20515171



Part # 20515172

Burn / Heat / Steam Warning Labels



Hot Liquids Hazard Labels – Part # 20515070



Part # 20515968



Part # 20515072



Large Size – Part # 20515071
Small Size – Part # 20516146



Part # 20517296



Part # 20515448



Part # 20516009



Part # 20516010

General Avoidance Warning Labels



Large Size – Part # 20514900



Part # 20515447



Large Size – Part # 20516018



Large Size – Part # 20516878



Large Size – Part # 20514784

8.2. Anexo 2: Resumen de la norma ISO 22000

Debido a que su extensión es significativa, el resumen de la norma ISO 22000 utilizado se puede encontrar en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1v0wUpXn2sY5uNsetM14v5Ery9o1J4cMj?usp=sharing>

8.3. Anexo 3: IPF-02 Instructivo de Trabajo Freidor #5

Debido a que se encuentra en formato .xlsx, se optó por almacenar el anexo en la siguiente carpeta de Google Drive para preservar su legibilidad: <https://drive.google.com/drive/folders/1v0wUpXn2sY5uNsetM14v5Ery9o1J4cMj?usp=sharing>

8.4. Anexo 4: Registros de trazabilidad F1, F2, F3, F4, F5, horno y peladora.

Debido a que se encuentra en formato .xlsx, se optó por almacenar el anexo en la siguiente carpeta de Google Drive para preservar su legibilidad: <https://drive.google.com/drive/folders/1v0wUpXn2sY5uNsetM14v5Ery9o1J4cMj?usp=sharing>

8.5. Anexo 5: Hojas de datos

Por su gran cantidad de contenido, y para facilitar la búsqueda de hojas de datos específicas, se optó por almacenar todas las hojas de datos utilizadas en la siguiente carpeta de Google Drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/1MM5f1bx0hu8CPrYyQz6zAxsIizXDazII?usp=sharing>

8.6. Nota importante

En caso de requerir cualquier archivo que se haya adjuntado a este informe como anexo o apéndice, todos se pueden encontrar en la siguiente carpeta de Google Drive:

https://drive.google.com/drive/folders/1_h3ynp0h8ukWKv4FQHkq7_bV1MtYNYMw?usp=sharing