



UNIVERSIDAD INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y
CONDICIONES DE ILUMINACIÓN EN CÁMARAS DE REFRIGERACIÓN**

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial

Autor

Hurtado Aguirre Byron Jeferson

Tutora

Ing. Blanca Liliana Topón Visarréa MSc.

QUITO – ECUADOR

2026

AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR
PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y
PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR

Yo, Hurtado Aguirre Byron Jeferson, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular con el nombre “DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONDICIONES DE ILUMINACIÓN EN CÁMARAS DE REFRIGERACIÓN.”, como requisito para optar al grado de Ingeniero Industrial y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito, a los 11 días del mes de abril de 2026, firmo conforme:

Autor: Byron Jeferson Hurtado Aguirre.

Firma:

Número de Cédula: 1725845471

Dirección: Pichincha, Quito, Pomasqui, La Herlinda.

Correo Electrónico: bhurtado@indoamerica.edu.ec

Teléfono: 0990041462

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Integración Curricular “DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONDICIONES DE ILUMINACIÓN EN CÁMARAS DE REFRIGERACIÓN” presentado Byron Jeferson Hurtado Aguirre, para optar por el Título Ingeniero Industrial.

CERTIFICO

Que dicho Trabajo de Integración Curricular ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte los Lectores que se designe.

Quito, 11 de abril del 2026

.....

Ing. Blanca Liliana Topón Visarréa MSc.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Integración Curricular, como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Industrial, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor.

Quito, 11 de abril de 2026

.....

Byron Jeferson Hurtado Aguirre

1725845471

APROBACIÓN DE LECTORES

El Trabajo de Integración Curricular ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONDICIONES DE ILUMINACIÓN EN CÁMARAS DE REFRIGERACIÓN, previo a la obtención del Título de Ingeniero Industrial, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del Trabajo de Integración Curricular.

Quito, 11 de abril de 2026

.....

Ing. Fábian Alberto Sarmiento Ortiz MSc

LECTOR

.....

Ing. Christian Eduardo Iza Llumigusin MSc

LECTOR

DEDICATORIA

Dedico este logro principalmente a mis padres, quienes con su amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por enseñarme que, a pesar de las dificultades, con esfuerzo, humildad y perseverancia se pueden alcanzar grandes metas. Me llena de orgullo decir que vengo de una familia humilde, de bajos recursos económicos, pero rica en valores, responsabilidad y un gran espíritu de superación. A mis hermanas y a mi hermano, quienes siempre han estado presentes brindándome su apoyo y motivación para seguir adelante en cada paso que doy.

A mi esposa Gaby, mi compañera de vida, quien con su amor, paciencia y apoyo incondicional ha sido mi mayor motivación para superarme cada día y alcanzar este importante logro.

Y a ti, mi bebé, que aún no llegas al mundo, pero ya llenas nuestras vidas de ilusión y esperanza. Este triunfo también es para ti, porque desde hoy quiero que sepas que los sueños se alcanzan con esfuerzo, dedicación y amor por lo que se hace. Aquí te esperamos con todo nuestro corazón.

Finalmente, quiero expresar una frase que resume este momento de mi vida:
“Detrás de cada logro siempre están unos padres que, con amor, sacrificio y apoyo incondicional, hicieron posible que hoy este sueño se haga realidad.”

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias por inculcarme valores, enseñarme a luchar por mis sueños y demostrarme que con dedicación y perseverancia todo es posible.

A mis hermanas y a mi hermano, por su apoyo constante, por sus palabras de ánimo y por acompañarme en este proceso de formación personal y profesional.

A mi esposa Gaby, quien ha sido una parte fundamental en este camino. Gracias por tu amor, paciencia y comprensión durante este proceso, y por ser el motor que me impulsa a seguir creciendo y superándome cada día.

A mis suegros, quienes han sido testigos del esfuerzo realizado para alcanzar esta meta y que, de una u otra manera, también han brindado su apoyo.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de forma directa o indirecta, contribuyeron con su apoyo, consejos y motivación para que este proyecto se haga realidad.

INDICE DE CONTENIDOS

TEMA:.....	I
AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR.....	II
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	III
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	IV
APROBACIÓN DE LECTORES.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
INDICE DE CONTENIDOS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
RESUMEN EJECUTIVO	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO I.....	1
Introducción.....	1
Marco teórico.....	2
Sistema de refrigeración	2
Elementos principales del sistema de refrigeración.....	4
NORMATIVA.....	5
Sistema de monitoreo de temperatura.....	6

Antecedentes.....	8
Justificación.....	9
Objetivos.....	11
Objetivo general:.....	11
Objetivos Específicos:	11
CAPITULO II.....	12
Ingeniería del Proyecto.....	12
Diagnóstico de la situación actual de la empresa:	12
Cadena de frío	17
Diagrama AS – IS.	19
Análisis de tiempos de respuesta:	25
FODA.....	31
La herramienta de los 5 porqués.	33
Tabla comparativa entre herramientas.....	35
Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF).....	37
Diagrama Ishikawa	38
Área de estudio:	40
Modelo operativo.....	40
CAPITULO III	44
Propuesta y Resultados Esperados.....	44
Desarrollo de la propuesta:.....	44
PLANEAR.....	46

Análisis de Normativa.....	46
Casa de la calidad.....	47
Dimensionamiento de los dispositivos de entrada	53
Dimensionamiento del controlador	62
Dimensionamiento de los dispositivos de salida.....	64
HACER.....	69
Programación.	70
Conexión (prototipo diagramas)	96
Plan de mantenimiento tradicional (sin sistema de monitoreo)	99
Plan de mantenimiento (Sistema de monitoreo)	101
Análisis comparativo de desempeño del sistema de mantenimiento	103
VERIFICAR	105
Diagrama TO-BE	106
MTTR (Tiempo Medio de Reparación)	106
MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas)	107
Disponibilidad.....	108
Tiempo Total Mensual	108
Tiempo De Detección	109
Frecuencia De Fallas	109
Tiempo Fuera De Servicio	110
Cumplimiento del tiempo objetivo (< 3h).....	110
Costo Por Intervención.....	110

Resultados	111
Análisis de resultados:.....	114
ACTUAR.....	115
Análisis de costos.....	116
Cronograma de actividades para la aplicación de la propuesta	122
CAPITULO IV	124
Conclusiones y Recomendaciones.....	124
Conclusiones:	124
Recomendaciones:.....	125
BIBLIOGRAFIA.....	126
ANEXOS.....	130
Anexo 1: Ficha técnica – microcontrolador ESP8266.....	130
Anexo 2: Ficha técnica – Sonda SB70 18/22	131
Anexo 3: Ficha técnica – SHT31	132
Anexo 4: Ficha técnica – ADS1115	133
Anexo 5: Ficha técnica – Pantalla OLED.....	134
Anexo 6: Código – Arduino IDE.....	135
Anexo 7: Cursograma AS – IS	142
Anexo 8: Diagrama AS – IS	143
Anexo 9: Diagrama TO – BE	144
Anexo 10: Diagrama de flujo Algoritmo.....	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°. 1	Elementos del sistema de refrigeración de cuartos fríos	4
Tabla N°. 2	Vida útil de luminarias LED en cámaras frigoríficas.....	16
Tabla N°. 3	Vida útil de luminarias Fluorescente en cámaras frigoríficas	16
Tabla N°. 4	Resumen del análisis de tiempos.....	31
Tabla N°. 5	Tabla comparativa Objetivos vs FODA vs 5 por qué?.....	36
Tabla N°. 6	Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF)	37
Tabla N°. 7	Matriz (Problema, causa, variable, solución y evidencia).....	39
Tabla N°. 8	Tabla comparativa de la normativa	47
Tabla N°. 9	Tabla comparativa de la normativa	48
Tabla N°. 10	Tabla QUÉ vs CÓMO.	49
Tabla N°. 11	Dispositivos de entrada	53
Tabla N°. 12	Matriz comparativa – Sensor de Temperatura	54
Tabla N°. 13	Dispositivo ADS1115	55
Tabla N°. 14	Configuración ADS1115.....	56
Tabla N°. 15	Dispositivo Sonda de temperatura.....	58
Tabla N°. 16	Dispositivo luz digital	62
Tabla N°. 17	Tabla del controlador	62
Tabla N°. 18	Dispositivo controlador ESP8266	63
Tabla N°. 19	Dispositivos de salida.....	64
Tabla N°. 20	Características OLED.....	65
Tabla N°. 21	Leds de alarma	68
Tabla N°. 22	Leds vs evento	69
Tabla N°. 23	Librerías	74
Tabla N°. 24	Argumento técnico – librerías	75

Tabla N°. 25	Límites operativos	77
Tabla N°. 26	Fórmulas paso 1 – Lectura ADS1115	79
Tabla N°. 27	Datos.....	86
Tabla N°. 28	Protocolos de comunicación.....	90
Tabla N°. 29	Campos de monitoreo – Field	91
Tabla N°. 30	Sistema de comunicación IOT: HTTP vs HTTPS	91
Tabla N°. 31	Leds - funcionamiento.....	93
Tabla N°. 32	Actividades plan de mantenimiento tradicional	99
Tabla N°. 33	Propuesta del plan de mantenimiento tradicional	100
Tabla N°. 34	Actividades del plan de mantenimiento con sistema de monitoreo	101
Tabla N°. 35	Propuesta del plan de mantenimiento con sistema de monitoreo.....	102
Tabla N°. 36	Indicadores de mantenimiento AS IS vs TO BE.....	103
Tabla N°. 37	Tabla resumen de indicadores de mantenimiento	111
Tabla N°. 38	Análisis de resultados telemetría.....	112
Tabla N°. 39	Análisis de resultados - total	113
Tabla N°. 40	Análisis de resultados.....	114
Tabla N°. 41	Acciones de mejora	116
Tabla N°. 42	Costo de componentes.....	117
Tabla N°. 43	Costo de ingeniería y desarrollo humano.....	118
Tabla N°. 44	Costo total Capex	119
Tabla N°. 45	Análisis de costos Software y conectividad	119
Tabla N°. 46	Acciones de mejora	120
Tabla N°. 47	Cronograma sugerido para implementar	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°. 1	Sistema de refrigeración de cuartos fríos.....	3
Figura N°. 2	Pirámide de automatización industrial.....	7
Figura N°. 3	Temperaturas de refrigeración y congelación.....	8
Figura N°. 4	MTS - Make to stock	13
Figura N°. 5	Cadena de Frío	17
Figura N°. 6	Controlador de temperatura	18
Figura N°. 7	Condiciones normales de temperatura.....	19
Figura N°. 8	Diagrama AS – IS	20
Figura N°. 9	Diagrama SIPOC	22
Figura N°. 10	Cursograma analítico	24
Figura N°. 11	Análisis marzo	27
Figura N°. 12	Análisis abril.....	28
Figura N°. 13	Análisis Mayo	29
Figura N°. 14	FODA	31
Figura N°. 15	Diagrama de los 5 ¿por qué?	34
Figura N°. 16	Diagrama Ishikawa	38
Figura N°. 17	Ciclo PHVA.....	41
Figura N°. 18	Modelo Operativo	41
Figura N°. 19	Pirámide de la automatización industrial.....	44
Figura N°. 20	PHVA – Primera etapa – Planear	46
Figura N°. 21	Cálculo – casa de calidad.....	50
Figura N°. 22	Casa de la calidad	51
Figura N°. 23	Convertidor ADC - ADS1115	55
Figura N°. 24	Curva R-T termistor NTC.....	58

Figura N°. 25	Sonda de temperatura - SB70 FULL GAUGE 18/22	59
Figura N°. 26	Sensor de humedad y temperatura	60
Figura N°. 27	Sensor de luz.....	62
Figura N°. 28	Microcontrolador ESP8266	63
Figura N°. 29	Flujo de señal Temperatura hacia Microcontrolador ESP8266	64
Figura N°. 30	Flujo de señal de humedad hacia Microcontrolador ESP8266	64
Figura N°. 31	Flujo de señal de luz hacia Microcontrolador ESP8266.....	64
Figura N°. 32	Pantalla OLED - SSD1306	66
Figura N°. 33	LED.....	67
Figura N°. 34	PHVA – Segunda etapa - Hacer	70
Figura N°. 35	Estructura del código	70
Figura N°. 36	Interfaz ARDUINO – IDE.....	72
Figura N°. 37	Software ARDUINO IDE – Detectar dispositivo.....	73
Figura N°. 38	Librerías – Arduino IDE.....	75
Figura N°. 39	Parámetros de calibración.....	77
Figura N°. 40	Proceso matemático	78
Figura N°. 41	NTC – Temperatura vs Resistencia	84
Figura N°. 42	Parámetros de arranque.....	87
Figura N°. 43	Parámetros de red y autenticación servidores externos.....	92
Figura N°. 44	Interfaz ThingSpeak – login	92
Figura N°. 45	Modo: ONLINE VS OFFLINE	93
Figura N°. 46	Monitoreo – ThingSpeak (http)	94
Figura N°. 47	Armado del código para Notificaciones en Telegram.....	95
Figura N°. 48	Interfaz – Telegram (https)	95
Figura N°. 49	Conexión ESP8266 + ADS1115 + SONDA FULLGAUGE.....	96

Figura N°. 50	Conexión Esquemática – parte 1	96
Figura N°. 51	Conexión SSD1306	97
Figura N°. 52	Conexión Esquemática – parte 2	97
Figura N°. 53	Conexión LED – ALARMAS – Hardware final	98
Figura N°. 54	Conexión LED - ALARMAS	98
Figura N°. 55	Verificar - Resultados	105
Figura N°. 56	Diagrama TO – BE	106
Figura N°. 57	Verificar – Resultados	115

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA: DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONDICIONES DE ILUMINACIÓN EN CÁMARAS DE REFRIGERACIÓN.

AUTOR: Byron Jeferson Hurtado Aguirre

TUTORA: Ing. Blanca Liliana Topón Visarréa MSc.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema de monitoreo automatizado para cámaras de refrigeración mediante tecnología IoT, con el fin de mejorar la detección de fallas y reducir los tiempos de respuesta en mantenimiento. El problema identificado radica en la dependencia de inspecciones manuales, lo que genera retrasos en la detección de anomalías y un tiempo medio de reparación (MTTR) de 4,12 horas. La metodología se basa en el ciclo PHVA, incluyendo el análisis AS-IS, el diseño TO-BE y la evaluación mediante indicadores de mantenimiento. Como resultado, el MTTR se redujo a 1,17 horas (-71,6%) y el tiempo total de mantenimiento mensual de 125 a 35,08 horas (-71,9%). El tiempo de detección disminuyó de 2,5 horas a 0,01 horas (-99,6%) y la disponibilidad aumentó de 85,3% a 95,4%. El sistema presenta una latencia promedio de 4,5 segundos y una integridad de datos del 98,5%. En términos económicos, el costo de implementación es de 1,726 USD y el costo operativo anual de 61,20 USD, con una reducción estimada superior al 75% frente a soluciones comerciales. Se concluye que el sistema permite la transición hacia mantenimiento predictivo, mejorando la eficiencia operativa y la continuidad de la cadena de frío.

Descriptor: monitoreo iot, mantenimiento predictivo, cámaras de refrigeración, indicadores de mantenimiento

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA: Design of a Temperature and Lighting Conditions Monitoring System for Refrigeration Chambers

AUTOR (A): Byron Hurtado Aguirre

TUTOR (A): Ing. Blanca Liliana Topón Visarréa MSc

ABSTRACT

THEME

Design of a Temperature and Lighting Conditions Monitoring System for Refrigeration Chambers

ABSTRACT

This study aims to design an automated monitoring system for refrigeration chambers using Internet of Things (IoT) technology, with the purpose of improving fault detection and reducing maintenance response times. The problem identified lies in the reliance on manual inspections, which causes delays in anomaly detection and results in a Mean Time to Repair (MTTR) of 4.12 hours. The methodology is grounded in the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle, encompassing an AS-IS analysis, a TO-BE design, and evaluation through maintenance performance indicators. As a result, the MTTR was reduced to 1.17 hours (71.6%), and total monthly maintenance time decreased from 125 to 35.08 hours (71.9%). Detection time dropped from 2.5 hours to 0.01 hours (99.6%), while system availability increased from 85.3% to 95.4%. The system demonstrates an average latency of 4.5 seconds and a data integrity rate of 98.5%. From an economic standpoint, the implementation cost amounts to USD 1,726, with an annual operating cost of USD 61.20, representing an estimated reduction of over 75% compared to commercial solutions. It is concluded that the system enables a transition toward predictive maintenance, thereby enhancing operational efficiency and ensuring cold chain continuity.

KEYWORDS: lot monitoring, predictive maintenance, refrigeration systems, maintenance indicators.



CAPÍTULO I

Introducción

La cadena de frío en la industria alimenticia es fundamental para garantizar la calidad y trazabilidad de los productos. La adecuada operatividad de las cámaras de refrigeración permite mantener condiciones óptimas de almacenamiento, evitando la pérdida de calidad y asegurando la continuidad de los procesos productivos.

Sin embargo, estos sistemas enfrentan diversos desafíos operativos, especialmente en lo relacionado con el mantenimiento, ya sea programado, rutinario o correctivo. Una gestión inadecuada puede generar fallas que afecten tanto la operatividad como las condiciones de conservación de los productos.

A nivel internacional, empresas como Walmart utilizan sistemas de monitoreo de cámaras de refrigeración basados en tecnologías IoT, PLCs y sensores, que permiten gestionar el ciclo de refrigeración en tiempo real de manera precisa y eficiente. Según (TECNOINCAR, 2024), estos sistemas emplean sensores y algoritmos que ajustan automáticamente la temperatura en función de las condiciones del entorno y los requerimientos del producto, optimizando además el consumo energético. En este contexto, el monitoreo en tiempo real permite una toma de decisiones inmediata frente a variaciones que puedan afectar la inocuidad de los alimentos.

En Ecuador, las industrias alimenticias han comenzado a modernizar sus sistemas de refrigeración mediante la incorporación de tecnologías de monitoreo IoT y análisis de datos en tiempo real. Estas herramientas fortalecen la capacidad de respuesta ante eventos críticos. Un ejemplo de ello es Nestlé, que ha implementado estrategias de mantenimiento predictivo basadas en inteligencia artificial y sensores IoT, lo que permite detectar irregularidades en

tiempos mínimos y reducir los periodos de inactividad. Asimismo, la integración de plataformas digitales y la capacitación del personal son factores clave para el éxito de estas prácticas.

En el contexto de las pequeñas y medianas empresas del sector alimenticio, se evidencia un bajo nivel de automatización en los sistemas de monitoreo de cámaras de refrigeración, predominando el uso de controles manuales y dispositivos analógicos. Esta situación se observa en una cadena de restaurantes ubicada en el cantón Quito, provincia de Pichincha, con más de 25 años de trayectoria en la preparación de carnes al carbón, donde no existe monitoreo en tiempo real de variables críticas como la temperatura y la iluminación.

La principal causa de esta problemática radica en la dependencia de procesos manuales de supervisión, los cuales no permiten una detección oportuna de desviaciones en la cadena de frío. Como consecuencia, se generan retrasos significativos en los tiempos de respuesta ante fallas operativas, alcanzando valores superiores a 117 horas en intervenciones de mantenimiento, lo que evidencia una gestión reactiva y poco eficiente.

Este escenario tiene un impacto directo en la inocuidad de los productos alimenticios, incrementando el riesgo de proliferación bacteriana, así como pérdidas económicas por deterioro de productos y posibles incumplimientos de la normativa vigente establecida por entidades como ARCSA e INEN. En este contexto, surge la necesidad de implementar un sistema automatizado de monitoreo que permita optimizar la toma de decisiones, reducir los tiempos de respuesta y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad en la cadena de frío.

Marco teórico

Sistema de refrigeración

Un sistema de refrigeración para cuartos fríos es un conjunto de equipos y mecanismos cuya función es mantener condiciones térmicas controladas dentro de un espacio cerrado. Su

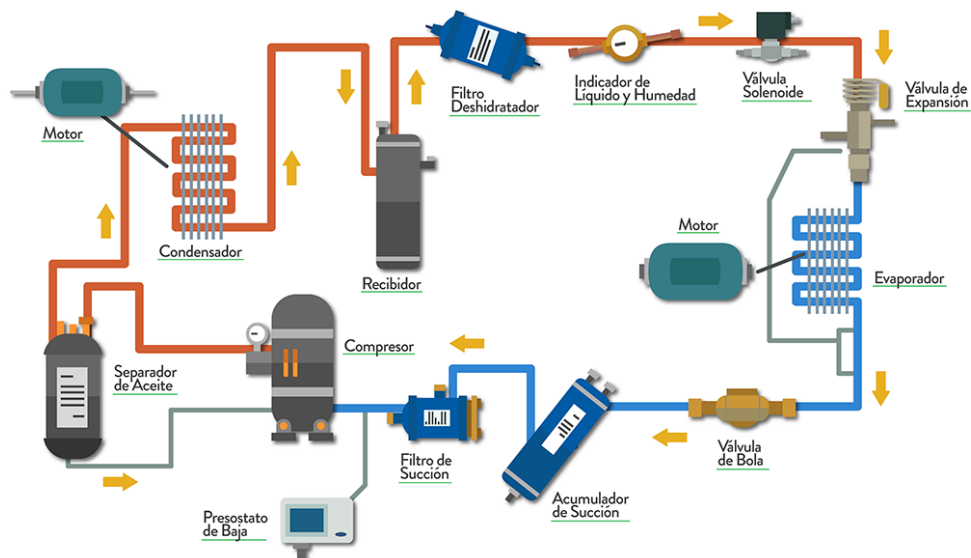
propósito es conservar productos perecederos en condiciones óptimas, garantizando su calidad e inocuidad durante el almacenamiento.

Está compuesto por elementos fundamentales como el compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador, los cuales operan de forma integrada para extraer el calor del interior y transferirlo al exterior mediante un ciclo termodinámico de refrigeración.

Adicionalmente, estos sistemas incorporan aislamiento térmico y dispositivos de control que permiten regular y estabilizar la temperatura, optimizando el consumo energético y asegurando condiciones operativas adecuadas. De acuerdo con lineamientos técnicos establecidos por la (ASHRAE, 2021) y (INEN, INEN 1334: Manipulación y almacenamiento de alimentos refrigerados., 2021), los sistemas de refrigeración deben garantizar precisión en el control térmico, eficiencia energética y confiabilidad en la conservación de productos alimenticios.

Figura N°. 1

Sistema de refrigeración de cuartos fríos.



Nota. Adaptado de un esquema del ciclo de refrigeración por compresión de vapor. (ASHRAE, 2021)

Elementos principales del sistema de refrigeración

De acuerdo con (ASHRAE, 2021), detallan los principales elementos de un sistema de refrigeración.

Tabla N°. 1

Elementos del sistema de refrigeración de cuartos fríos

Tabla: Elementos del sistema de refrigeración en cuartos frío			
Categoría	Elemento	Función principal	Ubicación típica
Ciclo de refrigeración	Compresor	Comprime el refrigerante y lo impulsa al condensador	Exterior del cuarto frío
	Condensador	Disipa calor y convierte el refrigerante en líquido	Exterior, con ventilación
	Válvula de expansión	Disminuye la presión del refrigerante líquido	La sección de tubería ubicada previo al evaporador corresponde a la línea donde el refrigerante líquido reduce su presión antes de ingresar al proceso de intercambio térmico.
	Evaporador	Captura el calor del aire interior	Dentro del cuarto frío
Auxiliares	Refrigerante	Transporta calor entre interior y exterior	Circuito cerrado
	Ventiladores	Mejoran transferencia de calor en evaporador y condensador	Evaporador y condensador
	Tuberías y conexiones	Conducen refrigerante entre componentes	Todo el sistema
	Receiver (tanque líquido)	Almacena refrigerante líquido antes de expansión	Cerca del condensador
	Separador de aceite	Evita circulación de aceite por el sistema	Línea de descarga del compresor

	Filtros/deshidratadores	Eliminan humedad e impurezas del refrigerante	Línea de líquido
--	-------------------------	---	------------------

Nota. La tabla expone de manera general los elementos fundamentales que integran un sistema de refrigeración. Elaboración propia.

NORMATIVA

Normativa Aplicable

Para el desarrollo del presente estudio, se consideran disposiciones de carácter legal, normativo y operativo relacionadas con la conservación de alimentos en sistemas de refrigeración, las cuales se clasifican de la siguiente manera:

Normativa Obligatoria (Marco Legal Sanitario)

Corresponde a regulaciones de cumplimiento obligatorio en el territorio ecuatoriano, orientadas a garantizar la inocuidad de los alimentos y las condiciones adecuadas de almacenamiento.

La ARCSA, mediante la Resolución (ARCSA-DE-2022-016-AKRG, 2023) establece la Norma Técnica Sanitaria para Alimentos Procesados, la cual define los requisitos de almacenamiento, incluyendo el control de temperatura, humedad, trazabilidad y registros, en el marco de las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) (ARCSA, 2023).

De igual manera, el INEN establece la norma (INEN, INEN 1334: Manipulación y almacenamiento de alimentos refrigerados., 2021), que regula las condiciones de almacenamiento y transporte de alimentos procesados, así como la norma (INEN, NTE INEN 1529-5, 2026), orientada a la conservación de carnes y productos cárnicos, definiendo parámetros técnicos para su preservación (INEN, INEN 1334: Manipulación y almacenamiento de alimentos refrigerados., 2021)

Criterio Técnico De Operación (Referencial)

Desde el punto de vista técnico, los rangos de operación comúnmente aceptados para la conservación de alimentos en sistemas de refrigeración establecen temperaturas de 0 a 4 °C para refrigeración e igual o menor a -18 °C para congelación, los cuales garantizan la estabilidad microbiológica y la calidad del producto durante su almacenamiento (INEN, INEN 1334: Manipulación y almacenamiento de alimentos refrigerados., 2021).

Estos valores se encuentran alineados con estándares técnicos nacionales e internacionales utilizados en la industria alimentaria.

Procedimiento interno (SOP)

A nivel operativo, la empresa objeto de estudio adopta Procedimientos Operativos Estándar (SOP), en los cuales se definen los setpoints de temperatura para las cámaras de refrigeración y congelación, así como los mecanismos de registro y control de las condiciones de almacenamiento.

Estos procedimientos permiten evidenciar el cumplimiento de la normativa sanitaria mediante registros continuos, facilitando la trazabilidad y el control de las variables críticas del proceso.

Sistema de monitoreo de temperatura.

Un sistema de monitoreo en cámaras de refrigeración constituye una herramienta tecnológica orientada a la supervisión, registro y control en tiempo real de variables críticas del proceso, tales como la temperatura y las condiciones de iluminación. Su finalidad es garantizar la conservación de los productos, la seguridad operativa y el cumplimiento de estándares de calidad e inocuidad alimentaria.

Estos sistemas permiten asegurar el control de puntos críticos dentro de la cadena de frío, en concordancia con lineamientos establecidos por el sistema HACCP y la norma ISO 22000 (ISO, 2018).

Desde el punto de vista técnico, un sistema de monitoreo integra sensores, dispositivos de adquisición de datos, módulos de comunicación y plataformas de gestión, que permiten la captura, transmisión y análisis continuo de la información. Esta integración contribuye a la optimización de recursos, la reducción de pérdidas por desviaciones térmicas y la mejora de la eficiencia energética (ASHRAE, 2021)

Adicionalmente, la implementación de sistemas automatizados facilita el cumplimiento de la normativa vigente, al permitir el registro continuo de variables, la generación de alertas tempranas y la trazabilidad de la información, aspectos fundamentales en entornos industriales.

Pirámide de automatización industrial

La pirámide de automatización industrial es un modelo jerárquico que describe los niveles de control y gestión dentro de un sistema productivo. En el nivel 0 se encuentran los sensores y actuadores, mientras que en el nivel 1 se ubican los sistemas de control como PLC o microcontroladores. En el nivel 2 se integran sistemas de supervisión como SCADA, y en niveles superiores se encuentran los sistemas de gestión como MES y ERP.

Este modelo permite comprender la estructura de los sistemas industriales y la interacción entre los distintos niveles de operación.

Figura N°. 2

Pirámide de automatización industrial.



Nota. Adaptado de la arquitectura de automatización industrial propuesta por ((ISA), 2021)

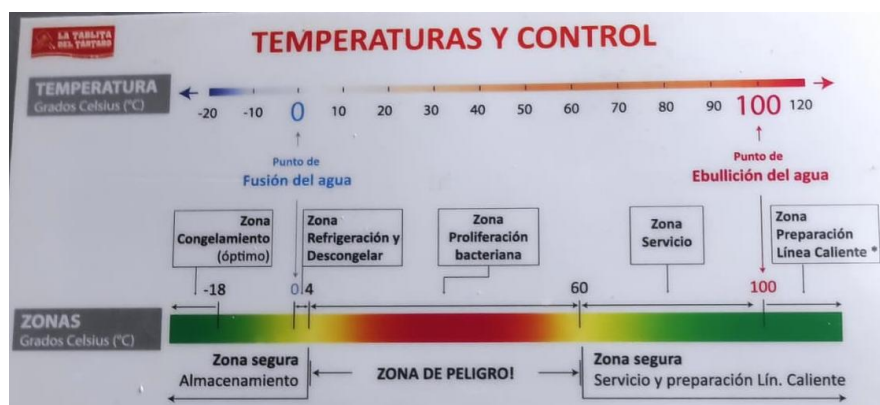
Antecedentes

En el contexto nacional, pequeñas y medianas empresas aún dependen de sistemas manuales o análogos, lo que provoca demoras en la detección de fallas y afecta la conservación de los alimentos. En la actualidad, la empresa objeto de estudio se dedica a la producción de alimentos y al suministro para una cadena de restaurantes de comida rápida. El control de temperatura e iluminación en las cámaras de refrigeración se lleva a cabo de manera principalmente empírica, lo que ha generado una limitada documentación sobre dicho procedimiento. No obstante, a través de la observación directa al personal de mantenimiento y la interacción con el área de logística, ha sido posible identificar el proceso que actualmente se aplica en la gestión del monitoreo de estos equipos.

La normativa con la cual se rige la empresa caso de estudio está establecida con la entidad (INEN - Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2021), donde habla sobre las técnicas sanitarias para alimentos procesados y la (Agencia Nacional de Regulación, 2023), se adjunta a continuación la tabla de temperaturas vigente para el proceso de monitoreo cámaras de refrigeración.

Figura N°. 3

Temperaturas de refrigeración y congelación.



Nota. Se evidencia la tabla de temperaturas y control en una cadena de frío y tiene en refrigeración de 0°C a 4°C, y congelación igual o menor a -18°C. Tomada de registros POE, por La Tablita del Tártaro, 2022.

El proceso actual interviene el equipo de logística y el equipo de mantenimiento, cabe recalcar que, este proceso, en múltiples ocasiones, no se cumple, por varios factores, por ejemplo, por descuido del operador de logística quien no notifica sobre las novedades encontradas en el día a día a su jefe inmediato, por demoras en la compra de repuestos, por demoras en las visitas realizadas por parte del equipo de mantenimiento, por una notificación tardía del equipo de logística hacia mantenimiento, en consecuencia, cada uno de esos tiempos muertos, incide en tener un equipo de refrigeración fuera de servicio, provocando, productos en zonas de proliferación de bacterias por un aumento de temperatura, lo que provoca una pérdida en la cadena de frío, los productos más comunes de almacenamiento en las cámaras de refrigeración y congelación son los siguientes, carnes, verduras, frutas, hortalizas, postres, entre otros. Por ello, surge la necesidad de incorporar sistemas automatizados que garanticen un monitoreo continuo y eficiente, cumpliendo con normativas de control sanitario como el HACCP y las regulaciones de ARCSA.

Justificación

Importancia

El presente estudio es relevante debido a que aborda una problemática crítica en el sector alimentario: la supervisión de la cadena de frío en cámaras de refrigeración. La adecuada conservación de productos perecederos, como carnes, frutas y hortalizas, es fundamental para garantizar su calidad e inocuidad. Sin embargo, la ausencia de sistemas automatizados en el monitoreo de variables críticas genera retrasos en la detección de fallas, lo que puede comprometer la seguridad alimentaria y la eficiencia operativa de las empresas.

Impacto

La implementación del sistema propuesto generará impactos positivos en distintos ámbitos. A nivel empresarial, permitirá mejorar la capacidad de respuesta ante fallas y reducir pérdidas económicas asociadas al deterioro de productos. En el ámbito operativo, optimizará las actividades del personal, disminuyendo errores humanos y mejorando la eficiencia en los procesos de mantenimiento. Desde una perspectiva tecnológica, promueve la modernización mediante la integración de soluciones basadas en IoT.

Utilidad

La utilidad del proyecto radica en la implementación de un sistema de monitoreo continuo y preciso, que facilite la detección oportuna de variaciones en variables críticas como la temperatura y la iluminación. Esto permitirá una toma de decisiones más eficiente, el registro automático de datos y la trazabilidad de la información. Además, contribuirá al cumplimiento de normativas sanitarias vigentes, fortaleciendo los procesos de control y aseguramiento de la calidad.

Beneficiarios

Los principales beneficiarios de este proyecto son la empresa objeto de estudio, sus colaboradores, los consumidores y la comunidad en general. La organización optimizará sus procesos, reducirá pérdidas y fortalecerá su cumplimiento normativo. El personal contará con herramientas más eficientes para el desarrollo de sus actividades. Los consumidores accederán a productos con mayores garantías de calidad e inocuidad, mientras que la comunidad se beneficiará del cumplimiento de estándares sanitarios y de seguridad alimentaria.

Factibilidad

El desarrollo del sistema propuesto es factible desde el punto de vista técnico y científico, debido a la disponibilidad de tecnologías como sensores de temperatura, controladores digitales y plataformas basadas en IoT, las cuales pueden integrarse de manera

modular. Asimismo, el conocimiento técnico requerido es accesible y adaptable a las condiciones de la empresa.

Adicionalmente, el sistema ha sido concebido como una solución escalable, lo que permite su futura migración hacia entornos industriales mediante el uso de controladores PLC, sensores certificados y protocolos de comunicación industrial, garantizando su aplicabilidad en contextos de mayor exigencia.

Objetivos

Objetivo general:

Diseñar un sistema de monitoreo para cámaras de refrigeración mediante un equipo de sistema automático que reduzca los tiempos de respuesta ante fallas operativas.

Objetivos Específicos:

- Diagnosticar la situación actual de la empresa a través de un análisis histórico de las áreas de logística y mantenimiento, con el fin de identificar tiempo de respuesta y confiabilidad operativa.
- Seleccionar los elementos de automatización y control a partir de un análisis detallado de las necesidades específicas de las cámaras de refrigeración, con el propósito de garantizar un monitoreo adecuado de la cadena de frío.
- Diseñar el sistema de monitoreo de parámetros de temperatura e iluminación mediante software y Arduino, reduciendo el tiempo de respuesta ante variaciones críticas.

CAPITULO II

Ingeniería del Proyecto

Diagnóstico de la situación actual de la empresa:

La empresa objeto de estudio pertenece al sector alimenticio y se dedica a la producción y abastecimiento de productos cárnicos para una cadena de restaurantes de comida rápida, especializada en carnes al carbón, parrilladas y cortes de primera calidad. Opera bajo condiciones semiindustriales y cuenta con procesos de almacenamiento en frío para la conservación de materias primas y productos terminados, los cuales son fundamentales dentro de su cadena de suministro.

Su sistema productivo se basa en el modelo Make to Stock (MTS), el cual consiste en la fabricación anticipada de productos en función de pronósticos de demanda, con el objetivo de garantizar la disponibilidad inmediata al cliente (Hernández, 2022).

Desde el punto de vista operativo, la implementación del modelo MTS implica un incremento significativo en los niveles de inventario, lo que genera una mayor dependencia de los sistemas de almacenamiento refrigerado para la conservación de productos perecederos. En este contexto, el volumen de productos almacenados en cámaras de refrigeración y congelación aumenta, intensificando la criticidad del control térmico dentro de la cadena de frío.

Como consecuencia, cualquier desviación en las condiciones de temperatura o fallas en los equipos de refrigeración puede generar un impacto directo sobre grandes volúmenes de inventario, incrementando el riesgo de deterioro de productos, pérdidas económicas y afectaciones a la inocuidad alimentaria. De acuerdo con lineamientos establecidos por la FAO, la ruptura de la cadena de frío constituye uno de los principales factores de riesgo en la

conservación de alimentos perecederos, debido a la proliferación de microorganismos y la degradación de la calidad del producto (FAO, 2020).

En este contexto, el modelo MTS no solo mejora la disponibilidad de productos, sino que también exige la implementación de sistemas de monitoreo continuo que permitan supervisar las condiciones de almacenamiento en tiempo real, detectar desviaciones oportunamente y reducir el impacto de fallas en la cadena de frío, garantizando la seguridad alimentaria y la estabilidad operativa del sistema.

Figura N°. 4

MTS - Make to stock



Nota. En la figura se presentan las características principales del modelo de producción Make to Stock (MTS). Elaboración propia.

El riesgo de ruptura de la cadena de frío es uno de los principales factores que afectan la conservación de productos alimenticios. De acuerdo con la normativa aplicada en la empresa objeto de estudio, el almacenamiento de carnes rojas y blancas se realiza en un rango de temperatura entre $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ARCSA, 2023). Por otro lado, productos como hortalizas y verduras se almacenan en cámaras de refrigeración con temperaturas entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (INEN, INEN 1334: Manipulación y almacenamiento de alimentos refrigerados., 2021)

La cadena de frío comprende un conjunto de procesos logísticos que garantizan que los productos perecederos mantengan temperaturas adecuadas desde su producción hasta el consumo final. La correcta gestión de estos parámetros es fundamental para asegurar la calidad,

inocuidad y vida útil de los alimentos, especialmente en productos cárnicos. El incumplimiento de estos rangos puede generar proliferación microbiana, pérdida de textura, oxidación lipídica y descomposición acelerada, comprometiendo la seguridad alimentaria.

Iluminación – LED - FLUORESCENTE

En las cámaras de refrigeración y congelación, las condiciones de operación principalmente bajas temperaturas, humedad, condensación y ciclos térmicos influyen directamente en el desempeño y la vida útil de los sistemas de iluminación. Estas variables generan una mayor frecuencia de fallas y reemplazos, especialmente en tecnologías más sensibles al entorno.

En la *Tabla N.º 2* y *Tabla N.º 3* presentan una estimación del comportamiento de la vida útil para luminarias LED y fluorescentes, respectivamente, bajo distintas condiciones de temperatura. Para su desarrollo, se consideran valores nominales de 50 000 horas para tecnología LED y 15 000 horas para luminarias fluorescentes a una temperatura de referencia de 25 °C, de acuerdo con especificaciones técnicas de fabricantes (Signify, 2022); (OSRAM, 2023).

Desde el punto de vista técnico, la vida útil de los sistemas de iluminación no es un valor fijo, sino que depende de las condiciones de operación. En el caso de los LED, su funcionamiento basado en semiconductores les permite mantener un desempeño estable en ambientes de baja temperatura, siendo más sensibles a factores como la temperatura de unión interna. Por el contrario, las luminarias fluorescentes presentan una mayor dependencia de variables ambientales, debido a que su funcionamiento se basa en procesos de descarga eléctrica en gas y el uso de balastos, los cuales se ven afectados por el frío, generando pérdidas de eficiencia, dificultades de arranque y mayor desgaste (Energy, 2023).

Debido a esta diferencia tecnológica, en condiciones de congelación las luminarias fluorescentes pueden experimentar reducciones significativas en su vida útil, lo que incrementa

la frecuencia de mantenimiento. En contraste, las luminarias LED conservan un mayor porcentaje de su vida útil bajo las mismas condiciones, lo que ha impulsado la migración hacia esta tecnología en aplicaciones industriales y logísticas, con el objetivo de mejorar la confiabilidad del sistema, reducir costos operativos y optimizar el consumo energético (Signify, 2022)

Es importante destacar que la relación cuantitativa entre temperatura y reducción de la vida útil no se encuentra definida de manera explícita en fichas técnicas ni en normas de desempeño, debido a la variabilidad de condiciones reales de operación. Por esta razón, los valores presentados en las tablas corresponden a un escenario hipotético de estimación técnica de elaboración propia, utilizado con fines analíticos y comparativos.

Para sustentar este análisis, se emplea un modelo simplificado basado en la variación térmica respecto a condiciones nominales. Se define la diferencia de temperatura (ΔT) como la desviación entre la temperatura de referencia (25 °C) y la temperatura de operación. A partir de esta, se calcula un factor térmico (F_t) mediante una relación proporcional que incorpora un coeficiente de degradación k , permitiendo representar la sensibilidad del sistema frente a cambios térmicos.

La vida útil estimada (L) se obtiene como el producto entre la vida útil nominal (L_0) y el factor térmico (F_t), lo que permite cuantificar la reducción de la durabilidad en función de las condiciones de operación. Este modelo no sustituye metodologías normativas como LM-80 o TM-21, sino que constituye una herramienta de análisis comparativo dentro del estudio.

Finalmente, la conversión de la vida útil a días permite estimar de manera práctica los intervalos de mantenimiento y reemplazo, facilitando la planificación operativa del personal de logística y mantenimiento encargado de la gestión de las cámaras frigoríficas. El monitoreo continuo de variables como temperatura e iluminación resulta fundamental para mejorar la toma de decisiones y optimizar la gestión del sistema.

Tabla N°. 2

Vida útil de luminarias LED en cámaras frigoríficas

Relación entre temperatura y vida útil de luminarias en cámaras frigoríficas - LED								
Tipo de ambiente	Temperatura (°C)	Diferencia térmica ΔT (°C)	Coefficiente	Factor térmico	Vida útil base (h)	Vida útil estimada (h)	Vida útil (%)	Vida útil estimada (días)
Fórmulas		$\Delta T = 25 - T$	(k)	$F_t = 1 - k \cdot \Delta T$	(L0)	$L = L0 \cdot F_t$	$\% = (L * 100\%) / (L0)$	(L)
Ambiente nominal	25	0	0,01	1	50000	50000	100%	2083
Refrigeración	4	21	0,01	0,79	50000	39500	79%	1646
Refrigeración	0	25	0,01	0,75	50000	37500	75%	1563
Congelación	-15	40	0,01	0,6	50000	30000	60%	1250
Congelación	-18	43	0,01	0,57	50000	28500	57%	1188

Nota. La vida útil nominal de 50 000 horas corresponde a valores típicos reportados por fabricantes de luminarias LED en condiciones estándar de operación (25 °C). El coeficiente de degradación *k* se adopta como un parámetro referencial para modelar la sensibilidad térmica del sistema. El modelo presentado es de carácter simplificado y no sustituye metodologías normalizadas como LM-80 o TM-21, sino que se utiliza como herramienta analítica para evaluar el impacto de la temperatura en la frecuencia de mantenimiento. Elaboración propia.

Tabla N°. 3

Vida útil de luminarias Fluorescente en cámaras frigoríficas

Relación entre temperatura y vida útil de luminarias en cámaras frigoríficas - Fluorescente								
Tipo de ambiente	Temperatura (°C)	Diferencia térmica ΔT (°C)	Coefficiente	Factor térmico	Vida útil base (h)	Vida útil estimada (h)	Vida útil (%)	Vida útil estimada (días)

Fórmulas		$\Delta T = 25 - T$	(k)	$F_t = 1 - k \cdot \Delta T$	(L0)	$L = L_0 \cdot F_t$	$\% = (L * 100\%) / (L_0)$	(L)
Ambiente nominal	25	0	0,01	1	15000	15000	100%	625
Refrigeración	4	21	0,01	0,79	15000	11850	79%	494
Refrigeración	0	25	0,01	0,75	15000	11250	75%	469
Congelación	-15	40	0,01	0,6	15000	9000	60%	375
Congelación	-18	43	0,01	0,57	15000	8550	57%	356

Nota. La vida útil nominal utilizada (50 000 horas para luminarias LED y 15 000 horas para luminarias fluorescentes) corresponde a valores típicos reportados por fabricantes en condiciones estándar de operación (25 °C). El coeficiente de degradación k_{se} adopta como un parámetro referencial dentro de un modelo simplificado de estimación térmica. Los valores presentados no derivan de un modelo normativo específico, sino que corresponden a un escenario hipotético de elaboración propia con fines analíticos, por lo que no sustituyen metodologías estandarizadas como LM-80 o TM-21. Elaboración propia.

Cadena de frío

El sistema de conservación en frío aplicado a la industria alimentaria se refiere a un conjunto de procedimientos y recursos diseñados para conservar una temperatura controlada y estable durante todas las fases de manejo de productos perecederos. Este sistema abarca desde la producción inicial, pasando por el transporte y almacenamiento, hasta la entrega final al consumidor, con el objetivo de garantizar la calidad, frescura y seguridad de los alimentos (SafetyCulture, 2025)

Figura N°. 5

Cadena de Frío



Nota. En la figura se expone un diagrama general que representa el funcionamiento de una cadena de frío. Elaboración propia.

Cabe destacar que, el caso de estudio se va a centrar en el punto de almacenamiento, con el fin de controlar y monitorear las condiciones que se deben cumplir para tener un acopio de productos alimenticios como carnes, legumbres, frutas.

Para asegurar el mantenimiento de las condiciones normales de temperatura y evitar la ruptura de la cadena de frío, resulta indispensable implementar un monitoreo permanente en los controladores de temperatura. En el caso de estudio, esta actividad es ejecutada por el área de logística, la cual proporciona retroalimentación continua al área de mantenimiento.

En las figuras siguientes se ilustran los tipos de controladores utilizados por la empresa objeto de estudio en el sistema de refrigeración, **Figura N°. 6**, es un controlador de temperatura que solo marca el rango interno de la cámara mientras que el controlador de la **Figura N°. 7** tiene un controlador marca full gauge quien controla el deshielo producido en el evaporador, y el estado on/off del compresor al llegar al setpoint establecido.

Figura N°. 6

Controlador de temperatura



Nota. Se visualiza un controlador analógico. Fuente: Controlador fuera de rango.

Las condiciones establecidas en los POE se representan en la figura siguiente, donde se evidencian las temperaturas que deben cumplirse en tiempo real.

Figura N°. 7

Condiciones normales de temperatura



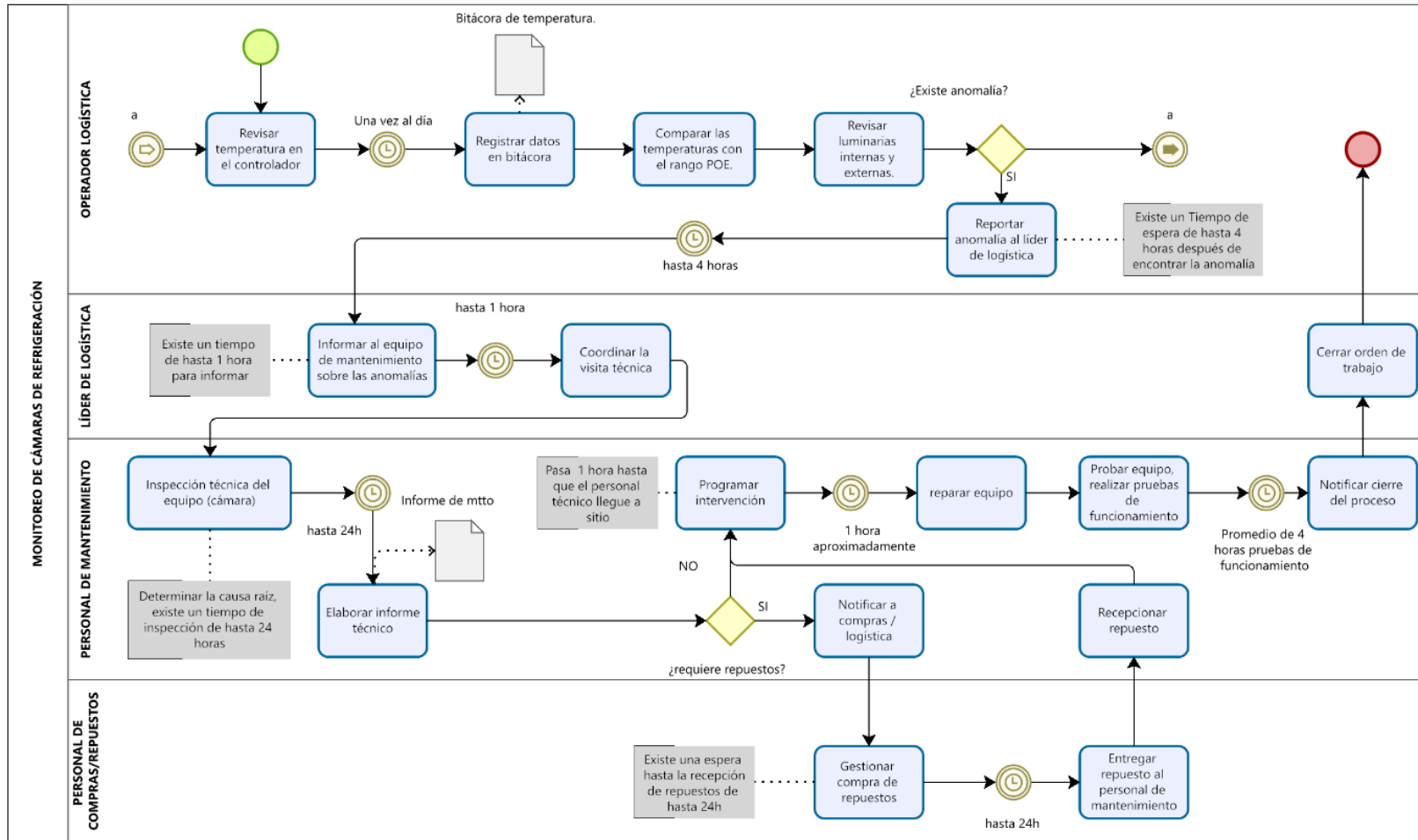
Nota. Fuente cámaras de congelación empresa caso de estudio, en condiciones normales.

Diagrama AS – IS.

Cabe mencionar que un diagrama AS-IS muestra de forma clara y detallada el funcionamiento actual de un proceso, incluyendo sus pasos, participantes y flujos de información. Su principal utilidad radica en identificar problemas y áreas de mejora, sirviendo como punto de partida para el diseño de procesos futuros más eficientes. (School, 2024). En el presente trabajo, se detalla a continuación el diagrama AS – IS del proceso actual.

Figura N°. 8

Diagrama AS – IS



Nota. En la siguiente imagen se detalla todo el proceso de monitoreo de las cámaras de refrigeración. Elaboración propia.

Etapa de Monitoreo y Detección (Operador Logístico)

La supervisión comienza con un control manual cuya frecuencia es de una vez al día. Esta metodología representa un riesgo elevado, ya que cualquier desviación térmica que ocurra fuera del horario de inspección no será detectada hasta el siguiente ciclo de 24 horas. El registro en bitácoras físicas impide el análisis de tendencias o la generación de alertas tempranas. Una vez detectada la anomalía, el proceso sufre una demora administrativa de hasta 4 horas antes de ser reportada al nivel superior.

Etapa de Gestión de Alerta (Líder de Logística)

En esta fase, la información se escala al equipo de mantenimiento con un tiempo de espera de hasta 1 hora. La coordinación de la visita técnica añade un retardo adicional, evidenciando una comunicación jerárquica lineal que carece de la inmediatez necesaria para la gestión de activos críticos.

Etapa de Diagnóstico y Reparación (Personal de Mantenimiento)

Esta es la fase con mayores retardos técnicos identificados:

Inspección técnica: Se estima 1 hora de traslado del personal al sitio.

Diagnóstico de causa raíz: El proceso concede un margen de hasta 24 horas para determinar el origen del fallo, periodo en el cual el producto almacenado permanece en condiciones de riesgo.

Intervención y Pruebas: Tras la reparación, se requieren 4 horas de pruebas para validar el funcionamiento correcto, lo que suma más tiempo a la indisponibilidad de la cámara.

Etapa de Suministros (Compras/Repuestos)

En caso de requerir repuestos, el flujo se desvía hacia un proceso de gestión externa que puede añadir entre 24 y 48 horas adicionales de espera (gestión de compra y entrega). Esta dependencia logística es el punto de mayor impacto en el lucro cesante de la operación. A continuación, se detalla el diagrama SIPOC del proceso actual del sistema de monitoreo.

Figura N°. 9

Diagrama SIPOC

S	SUPPLIERS	I	INPUT	P	PROCESS	O	OUTPUT	C	CUSTOMER
	"Quien esta proveyendo entrada a un proceso"		Recurso proporcionado por el proveedor para su incorporación al proceso.		pasos tomados para convertir entrada a salida		recurso resultante del proceso		receptor de la nueva salida creada
PROCESS TITLE: SISTEMA DE MONITOREO									
PROVEEDORES		ENTRADAS		PROCESO		SAIDAS		CLIENTES	
	Operador de logística		Lecturas de temperatura		Revisar temperatura		Bitácora actualizada		Operaciones
	Líder de Logística		Parámetros POE		Registrar en bitácora		Reporte de anomalías		Logística
	Personal de mantenimiento		Estado de luminarias		Comparar con rangos		Informe técnico		Mantenimiento
	Compras		Reporte de anomalías		Revisar condiciones físicas		Equipo reparado		Supervisión
	Proveedor de repuestos		Solicitud de intervención		Detectar anomalía		Resultados de pruebas		Calidad
	Sistema / controlador		Repuestos		Reportar anomalía		Orden de trabajo cerrada		Auditoría
			Información técnica		Coordinar visita técnica		Notificación de cierre		
					Inspeccionar equipo				
					Inspeccionar equipo				
					Elaborar informe				
					Programar intervención				
					Reparar equipo				
					Gestionar repuestos (si aplica)				
					Probar funcionamiento				
					Cerrar orden				

Nota. Observación directa del proceso. Elaboración propia.

El análisis SIPOC permitió identificar de manera general los elementos que intervienen en el proceso de monitoreo y atención de fallas en las cámaras de refrigeración, delimitando los proveedores, entradas, actividades principales, salidas y clientes involucrados. Sin embargo, esta herramienta presenta una visión macro del proceso, sin detallar la secuencia operativa, los tiempos asociados ni la interacción específica entre actividades.

En este contexto, se hace necesario complementar el análisis mediante un cursograma analítico, el cual permite descomponer el proceso en sus actividades específicas, identificando operaciones, inspecciones, transportes, demoras y almacenamientos.

Esta herramienta facilita la cuantificación de tiempos, la identificación de actividades que no agregan valor y la localización de cuellos de botella, proporcionando una base más precisa para el análisis de eficiencia y la propuesta de mejoras en el proceso.

Cursograma analítico.

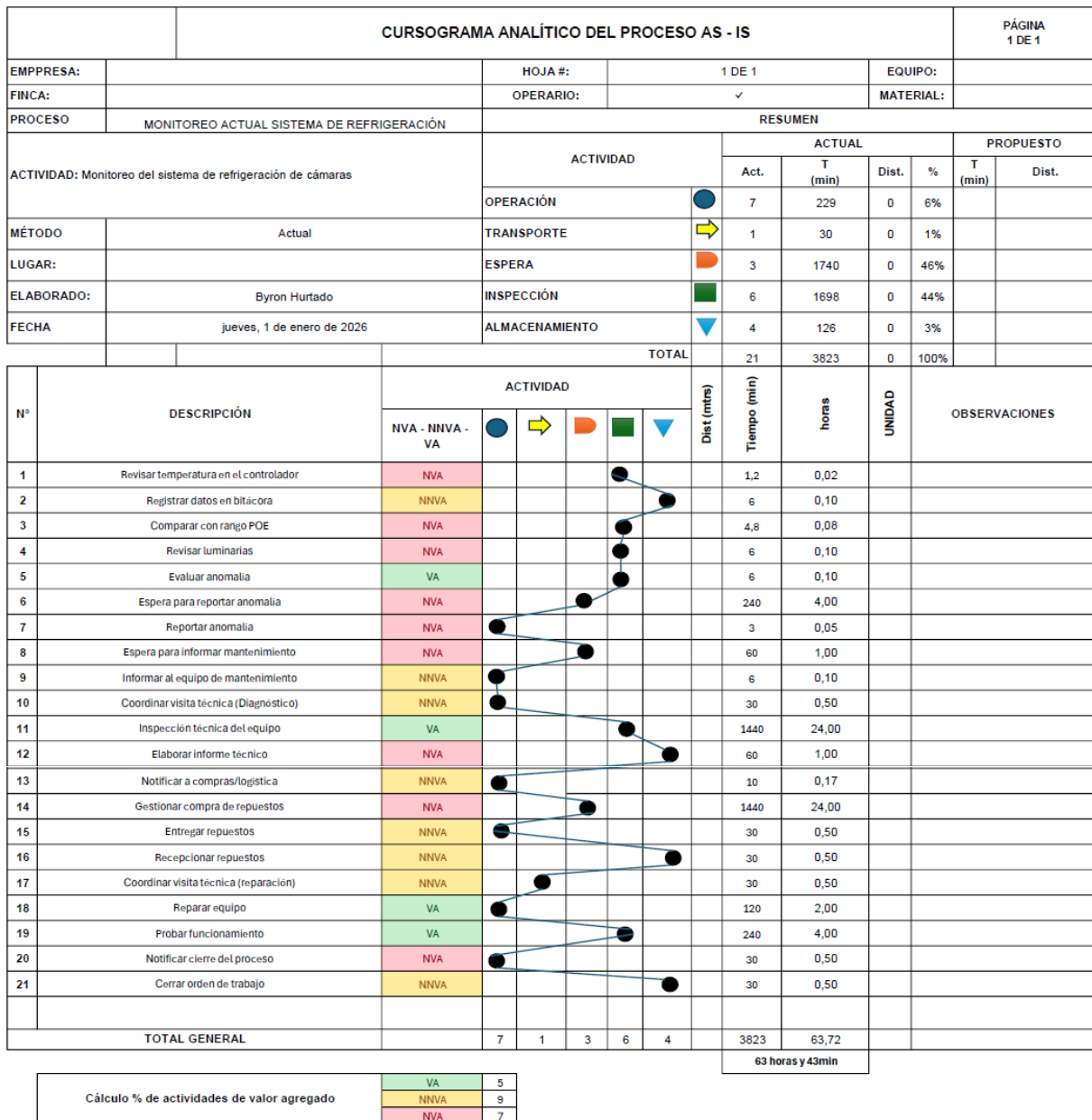
El cursograma analítico es una herramienta fundamental dentro del análisis de procesos, ya que permite representar de manera detallada cada una de las actividades que componen un procedimiento, identificando operaciones, transportes, inspecciones, esperas y almacenamientos. Su aplicación facilita la comprensión integral del flujo de trabajo, permitiendo detectar ineficiencias, tiempos improductivos y oportunidades de mejora orientadas a la optimización de recursos y la reducción de desperdicios.

En el contexto de la gestión por procesos, el uso del cursograma analítico contribuye a visualizar de forma estructurada el estado actual (AS-IS) *Figura N°. 8* y el estado propuesto (TO-BE) *Figura N°. 56*, apoyando la toma de decisiones para el rediseño de procesos y la implementación de mejoras tecnológicas, como los sistemas basados en IoT. De esta manera, se convierte en una herramienta clave para la mejora continua y el incremento de la eficiencia operativa.

Según (Gutiérrez Pulido H. , 2021), el análisis detallado de procesos mediante herramientas gráficas permite identificar actividades que no agregan valor, facilitando su eliminación o mejora dentro de un enfoque sistemático de calidad.

Figura N°. 10

Cursograma analítico



Nota. Elaboración propia.

Análisis de tiempos de respuesta:

El análisis de los registros históricos de mantenimiento se realizó para un periodo de tres meses correspondientes al año 2025, considerando los reportes asociados a fallas en las cámaras de refrigeración. El tamaño muestral estuvo conformado por 31 incidentes en marzo, 30 en abril y 30 en mayo, lo que proporciona una base de datos representativa para evaluar el desempeño del sistema de mantenimiento.

Para la medición de la eficiencia en la atención de fallas se empleó el indicador Tiempo Medio de Reparación (MTTR), definido como el tiempo promedio requerido para restaurar la operatividad de un sistema tras la ocurrencia de una falla. Matemáticamente, se expresa como:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$$

Donde:

T_i : tiempo de atención de cada incidente (horas)

n : número total de incidentes

A partir de los datos recopilados, se determinaron los tiempos totales de intervención y los valores promedio de MTTR por mes, como se muestra a continuación:

Marzo: 134 horas totales / 31 incidentes → **MTTR = 4,32 h/evento**

Abril: 117 horas totales / 30 incidentes → **MTTR = 3,90 h/evento**

Mayo: 124 horas totales / 30 incidentes → **MTTR = 4,13 h/evento**

Estos resultados evidencian un comportamiento relativamente constante en los tiempos de atención, con valores promedio superiores al tiempo objetivo operativo definido para el sistema.

Desde el enfoque de la gestión de activos, el MTTR constituye un indicador fundamental para evaluar la capacidad de respuesta del mantenimiento y su impacto en la disponibilidad de los sistemas. De acuerdo con la ISO 55000, la gestión eficiente de activos

debe orientarse a garantizar niveles adecuados de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, especialmente en sistemas críticos para la operación.

En el contexto de la cadena de frío, los sistemas de refrigeración son considerados activos críticos, debido a que desviaciones prolongadas de temperatura pueden comprometer la calidad e inocuidad de los productos almacenados. En este sentido, la literatura técnica establece que los tiempos de respuesta deben ser reducidos y cercanos al tiempo real, priorizando la intervención inmediata ante anomalías (Kiran, 2021); (Oakland, 2022).

Para efectos de este estudio, y considerando la criticidad del sistema, se establece como criterio técnico de referencia un tiempo objetivo de atención de 3 horas por evento, alineado con los límites operativos necesarios para evitar riesgos en la cadena de frío, así como un valor máximo permisible de 24 horas, conforme a prácticas de mantenimiento centrado en confiabilidad (Prasad, 2023)

Al comparar los resultados obtenidos con el tiempo objetivo de 3 horas, se evidencia una desviación en el desempeño del sistema:

Marzo: 4,32 h → 44% superior al objetivo

Abril: 3,90 h → 30% superior

Mayo: 4,13 h → 38% superior

Estos resultados reflejan una eficiencia operativa limitada, caracterizada por tiempos de respuesta superiores a los requeridos para garantizar una gestión adecuada de la cadena de frío.

El análisis del proceso AS-IS permitió identificar que la principal causa de esta desviación no radica en la ejecución técnica de la reparación, sino en las etapas previas de detección y comunicación de fallas. Actualmente, estas actividades dependen de inspecciones manuales periódicas, lo que genera tiempos de espera de hasta 4 horas para la identificación de anomalías y retrasos adicionales en la notificación al personal de mantenimiento.

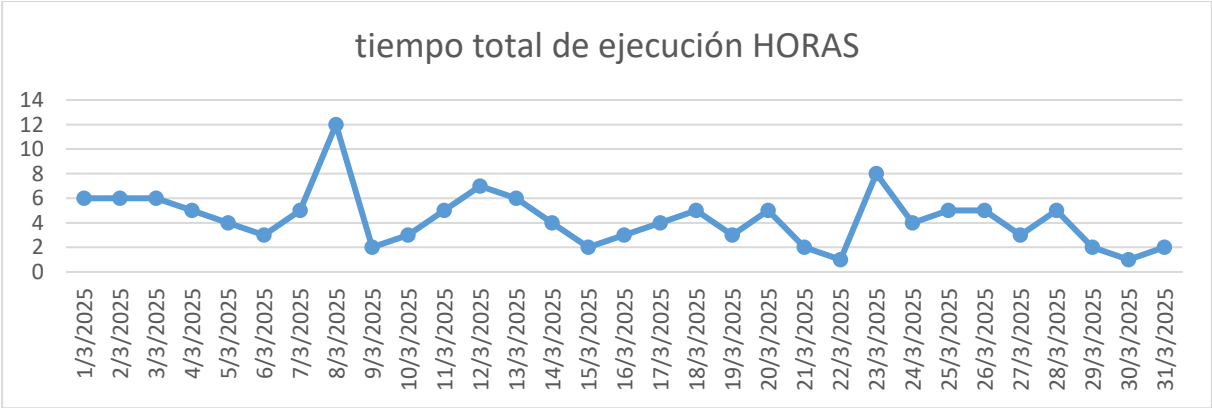
De acuerdo con Singh y Kumar (2021), este comportamiento es característico de sistemas de mantenimiento reactivo, en los cuales la ausencia de monitoreo continuo incrementa los tiempos de respuesta y reduce la eficiencia operativa. Asimismo, Jacobs et al. (2022) señalan que, en sistemas críticos, los retrasos en la atención de fallas aumentan la probabilidad de interrupciones operativas y pérdidas de producto.

En contraste, la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real basados en sensores permite reducir significativamente los tiempos de detección, mejorar la planificación del mantenimiento y anticipar fallas antes de que alcancen estados críticos (Prasad et al., 2023). Este enfoque se alinea con las tendencias actuales de digitalización industrial y mantenimiento predictivo.

En consecuencia, los resultados obtenidos evidencian una brecha operativa entre el desempeño actual del sistema y los tiempos de respuesta requeridos para la operación eficiente de cámaras de refrigeración. Esta situación justifica la implementación de un sistema automatizado de monitoreo que permita reducir los tiempos de detección, optimizar la toma de decisiones y mejorar la confiabilidad del sistema, garantizando la continuidad de la cadena de frío.

Figura N°. 11

Análisis marzo



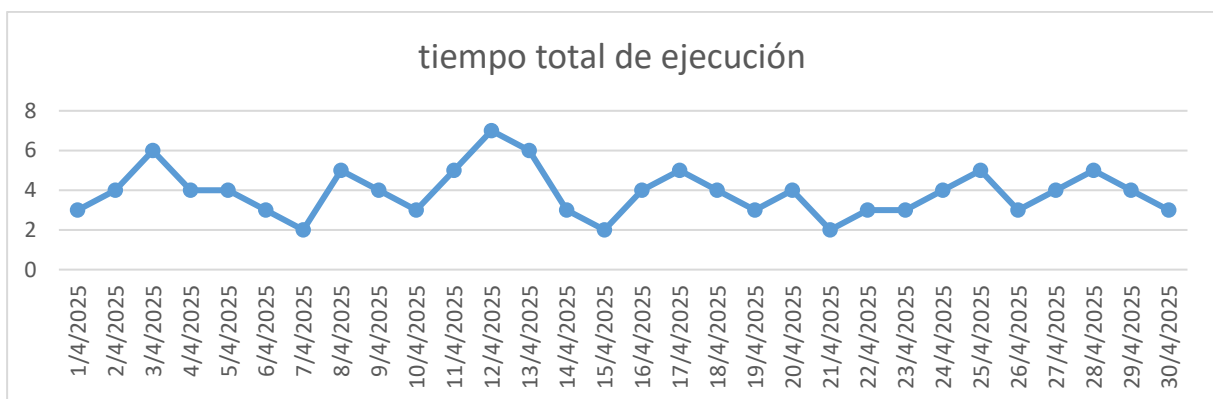
PROBLEMAS PRINCIPALES CON MAYOR FRECUENCIA EN EL MES DE MARZO - ANÁLISIS									
Datos reportes de mantenimiento									
2025	Días	Problema principal - Cámara de refrigeración	Fecha	Hora Reportar	Tiempo operativo (h) 100%	Tiempo promedio de respuesta (h)	Tiempo promedio (sin proliferación bacteriana) factor de seguridad	Tiempo excedido	
MARZO	DÍAS (01 -16)	Hielo en el evaporador (obstrucción)	1/3/2025	3:00:00	744	6	3	3	
			2/3/2025	4:00:00		6	3	3	
			3/3/2025	2:00:00		6	3	3	
			4/3/2025	6:00:00		5	3	2	
			5/3/2025	7:00:00		4	3	1	
			6/3/2025	8:00:00		3	3	0	
			7/3/2025	9:00:00		5	3	2	
			8/3/2025	10:00:00		12	3	9	
			9/3/2025	8:00:00		2	3	-1	
			10/3/2025	10:00:00		3	3	0	
			11/3/2025	7:00:00		5	3	2	
			12/3/2025	7:00:00		7	3	4	
			13/3/2025	7:00:00		6	3	3	
			14/3/2025	7:00:00		4	3	1	
			15/3/2025	7:00:00		2	3	-1	
			16/3/2025	11:00:00		3	3	0	
		DÍAS (17 -31)		17/3/2025		8:00:00	4	3	1
				18/3/2025		8:00:00	5	3	2
				19/3/2025		9:00:00	3	3	0
				20/3/2025		10:00:00	5	3	2
				21/3/2025		8:00:00	2	3	-1
				22/3/2025		10:00:00	1	3	-2
				23/3/2025		12:00:00	8	3	5
				24/3/2025		7:00:00	4	3	1
				25/3/2025		11:00:00	5	3	2
				26/3/2025		8:00:00	5	3	2
				27/3/2025		8:00:00	3	3	0
				28/3/2025		7:00:00	5	3	2
				29/3/2025		11:00:00	2	3	-1
				30/3/2025		12:00:00	1	3	-2
				Hielo en el evaporador (obstrucción)		31/3/2025	14:00:00	2	3
		TOTAL	31			134	93	41	

Nota. Elaboración propia.

Durante marzo se registraron principalmente problemas de temperatura fuera de rango, que se repitieron casi a diario y constituyen la falla más crítica. También aparecieron defectos en luminarias, fallas eléctricas en el compresor y hielo en el evaporador, reflejando un sistema con múltiples puntos vulnerables. Los tiempos de respuesta fueron elevados (134 horas en promedio), lo que evidencia una gestión correctiva lenta y riesgos en la conservación de productos.

Figura N°. 12

Análisis abril



PROBLEMAS PRINCIPALES CON MAYOR FRECUENCIA EN EL MES DE MARZO - ANÁLISIS								
Datos reportes de mantenimiento								
2025	Días	Problema principal - Cámara de refrigeración	Fecha	Hora Reportar [±]	Tiempo operativo (h) 100%	Tiempo promedio de respuesta (h)	Tiempo promedio (sin proliferación bacteriana) factor de seguridad	Tiempo excedido
Abril	DÍAS (01 -16)	Hielo en el evaporador (obstrucción)	1/4/2025	2:00:00	720	3	3	0
			2/4/2025	5:00:00		4	3	1
			3/4/2025	4:00:00		6	3	3
			4/4/2025	5:00:00		4	3	1
		Fallas del sistema eléctrico (encendido de compresor)	5/4/2025	7:00:00		4	3	1
			6/4/2025	8:00:00		3	3	0
			7/4/2025	9:00:00		2	3	-1
			8/4/2025	10:00:00		5	3	2
		Temperatura fuera de rango (-15°C, -18°C)	9/4/2025	8:00:00		4	3	1
		Desague congelado (fallas en la resistencia)	10/4/2025	10:00:00		3	3	0
			11/4/2025	8:00:00		5	3	2
		Lumiaría con defectos	12/4/2025	9:00:00		7	3	4
			13/4/2025	7:00:00		6	3	3
			14/4/2025	9:00:00		3	3	0
			15/4/2025	7:00:00		2	3	-1
			16/4/2025	5:00:00		4	3	1
	17/4/2025		2:00:00	5		3	2	
	DÍAS (17 -30)	Temperatura fuera de rango (-15°C, -18°C)	18/4/2025	4:00:00		4	3	1
			19/4/2025	9:00:00		3	3	0
			20/4/2025	10:00:00		4	3	1
			21/4/2025	8:00:00		2	3	-1
			22/4/2025	7:00:00		3	3	0
			23/4/2025	5:00:00		3	3	0
			24/4/2025	7:00:00		4	3	1
			25/4/2025	3:00:00		5	3	2
			26/4/2025	8:00:00		3	3	0
			Lumiaría con defectos	27/4/2025		12:00:00	4	3
		Hielo en el evaporador (obstrucción)	28/4/2025	7:00:00		5	3	2
		Lumiaría con defectos	29/4/2025	8:00:00		4	3	1
		30/4/2025	6:00:00	3		3	0	
TOTAL			30			117	90	27

Nota. Elaboración propia.

En abril se mantuvieron los problemas recurrentes de temperatura fuera de rango y hielo en el evaporador, pero además surgieron nuevas incidencias como fallas en la resistencia de deshielo y ruidos en el evaporador, que anticipan desgaste mecánico. Aunque el tiempo excedido bajó ligeramente respecto a marzo (27 horas), el promedio de respuesta siguió siendo alto (117 horas), mostrando que la atención a fallas críticas no mejoró de manera significativa.

Figura N°. 13

Análisis Mayo

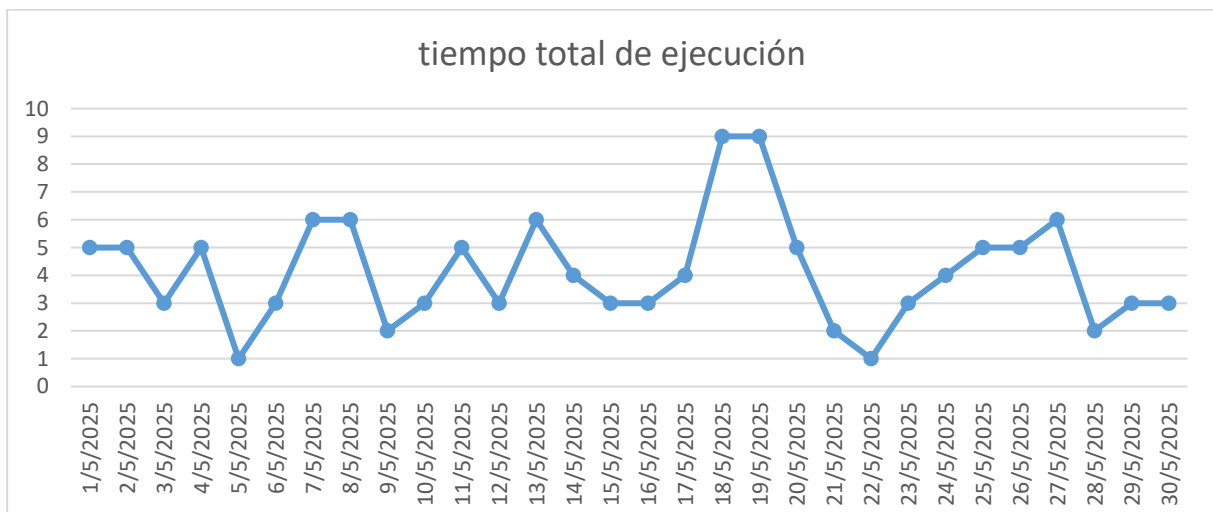


Tabla N°. 4*Resumen del análisis de tiempos.*

Mes	N° de incidentes (n)	Tiempo total ($\sum Ti$) [h]	Fórmula aplicada	MTTR (h/evento)	Tiempo objetivo (H)	Desviación (h)	% Desviación
	(n)	($\sum Ti$) [h]	(h/evento)	$MTTR = \frac{\sum Ti}{n}$	(H)	$h=MTTR-H$	$\frac{((MTTR-H)*1)}{h}$
Marzo	31	134	$MTTR = \frac{\sum Ti}{n}$	4,32	3	1,32	44%
Abril	30	117	$MTTR = \frac{\sum Ti}{n}$	3,90	3	0,90	30%
Mayo	30	124	$MTTR = \frac{\sum Ti}{n}$	4,13	3	1,13	38%
Total	91	375	PROMEDIO	4,12	3	1,12	37%

Nota. Elaboración propia.

FODA

El análisis FODA es un método de planificación estratégica que permite evaluar tanto la situación interna como externa de una organización, proyecto o iniciativa. Este análisis se fundamenta en la identificación de fortalezas y debilidades internas, así como de oportunidades y amenazas externas, con el propósito de orientar la toma de decisiones estratégicas y definir una dirección competitiva eficaz (Emet Gürel, 2021)

Se aplicó la herramienta de análisis **FODA** (*Figura N°. 14*) con el propósito de identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas presentes en el proceso de monitoreo que actualmente gestiona la empresa objeto de estudio, con el fin de realizar un análisis integral.

Figura N°. 14

FODA

Fortalezas

1. Reconocimiento de marca y experiencia operativa en el mercado ecuatoriano.
2. Presencia de infraestructura básica de refrigeración en la planta principal, para conservar productos perecibles como carnes, salsas y vegetales.
3. Conocimiento del personal sobre prácticas de higiene y manipulación de alimentos, alineado con las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM).
4. Cumplimiento parcial de la normativa sanitaria vigente (ARCSA, 2023) mediante registros manuales de temperatura y limpieza.



Oportunidades

1. Actualización tecnológica del sector alimentario en Ecuador, con incentivos para digitalización y automatización de procesos críticos.
2. Mayor exigencia del consumidor en seguridad alimentaria, lo que impulsa a las empresas a mejorar sus sistemas de control.
3. Disponibilidad de soluciones IoT y plataformas de monitoreo remoto, que pueden integrarse progresivamente en la operación.
4. Posibilidad de certificaciones sanitarias avanzadas, que mejoran la reputación comercial y competitividad.



Debilidades

1. Monitoreo manual de temperatura, dependiente de inspecciones periódicas que pueden omitir desviaciones térmicas críticas.
2. Ausencia de trazabilidad digital, lo que dificulta auditorías, análisis de fallas y cumplimiento riguroso del sistema HACCP.
3. Tiempo de respuesta lento ante fallas en refrigeración, lo que puede permitir la proliferación bacteriana en menos de 2 horas si se supera la zona de peligro térmico (4°C – 60°C).
4. Limitada capacidad de detección temprana, especialmente en horarios nocturnos o en locales con alta rotación de personal.



Amenazas

1. Riesgo de sanciones por incumplimiento normativo, especialmente si se detectan desviaciones térmicas no documentadas.
2. Proliferación bacteriana acelerada en caso de ruptura de la cadena de frío, con consecuencias sanitarias y económicas.
3. Competencia que adopte tecnologías de monitoreo más eficientes, generando presión por modernización.
4. Variabilidad en el suministro eléctrico o fallas estructurales, que pueden afectar la estabilidad térmica de las cámaras.



Nota. Elaboración propia.

Análisis FODA

Con base en el análisis **FODA**, se efectúa una revisión exhaustiva de cada variable, estableciendo los siguientes resultados.

Fortalezas:

La planta principal cuenta con sistemas básicos de refrigeración y personal capacitado en higiene, lo que permite conservar alimentos bajo condiciones mínimas aceptables y cumplir parcialmente con la normativa sanitaria.

Oportunidades:

El mercado ofrece tecnologías accesibles para mejorar el control térmico, y los consumidores valoran cada vez más la seguridad alimentaria. Además, existen incentivos para digitalizar procesos y obtener certificaciones sanitarias.

Debilidades:

El monitoreo manual limita la detección oportuna de fallas, reduce la trazabilidad y expone a riesgos sanitarios, especialmente en horarios críticos o ante errores humanos.

Amenazas:

La ruptura de la cadena de frío puede generar proliferación bacteriana y sanciones regulatorias. La competencia tecnológica y factores externos como cortes eléctricos también representan riesgos operativos importantes.

La empresa cuenta con fortalezas importantes como reconocimiento de marca, infraestructura básica de refrigeración y personal capacitado en BPM, lo que le da una base sólida para operar en el mercado ecuatoriano. Sin embargo, las debilidades críticas relacionadas con el monitoreo manual de temperatura, falta de digitalización y tiempos de respuesta ante fallas representan riesgos significativos para la seguridad alimentaria y el cumplimiento normativo.

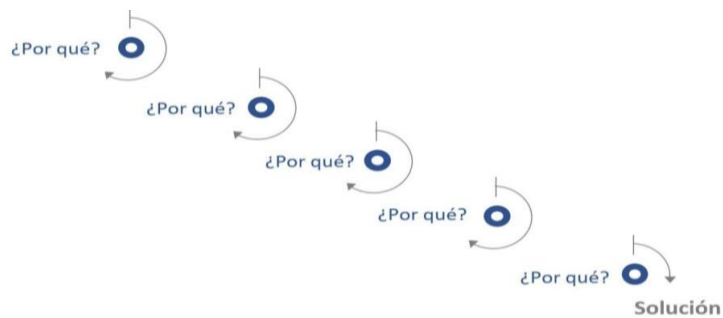
Por otro lado, existen oportunidades estratégicas en la actualización tecnológica del sector, la disponibilidad de soluciones IoT y la posibilidad de certificaciones sanitarias avanzadas, que pueden mejorar la competitividad y reputación. No obstante, las amenazas como sanciones por incumplimiento, proliferación bacteriana y variabilidad en el suministro eléctrico refuerzan la necesidad de adoptar sistemas automáticos y robustos.

La herramienta de los 5 porqués.

El método de diagnóstico “5 porqués” consiste en preguntar “¿por qué?” varias veces por lo común cinco encadenando cada respuesta con la siguiente pregunta para indagar hasta encontrar una causa subyacente que sea corregible. En lugar de detenerse en los síntomas visibles, busca exponer un fallo o condición del sistema que permite que el problema persista. Aunque el número cinco es una guía, en algunos casos puede requerirse menos o más iteraciones, según la complejidad del problema. (FlowFuse, 2025)

Figura N°. 15

Diagrama de los 5 ¿por qué?



Nota. Diagrama general de la herramienta de los 5 ¿por qué?. Elaboración propia

Esta herramienta es usada para definir de una forma más concreta, el problema principal para el caso de estudio, se tiene el problema principal demoras en las intervenciones de mantenimiento, al realizar el estudio de los 5 porqués, se obtiene los siguientes resultados.

Aplicación de la herramienta

1. ¿Por qué se necesita diseñar un sistema automático de monitoreo en cámaras de refrigeración en una planta de alimentos?

Porque el monitoreo manual no garantiza una vigilancia continua de las condiciones de temperatura, lo que puede comprometer la seguridad alimentaria.

2. ¿Por qué el monitoreo manual compromete la seguridad alimentaria?

Porque depende de inspecciones esporádicas, lo que puede permitir desviaciones térmicas prolongadas que afectan la conservación de productos perecibles como carnes, salsas y vegetales.

3. ¿Por qué las desviaciones térmicas prolongadas son críticas en restaurantes de comida rápida?

Porque estos establecimientos manejan grandes volúmenes de productos sensibles a la temperatura, y una falla puede generar contaminación cruzada, proliferación bacteriana y pérdida de calidad.

4. ¿Por qué es importante evitar la contaminación y pérdida de calidad en estos productos?

Porque la normativa sanitaria ecuatoriana exige el cumplimiento de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y control de puntos críticos como la refrigeración, según lo establecido por ARCSA.

5. ¿Por qué es necesario cumplir con la normativa de ARCSA y garantizar la trazabilidad?

Porque el incumplimiento puede derivar en sanciones, cierres temporales, pérdida de reputación y afectación económica. Además, un sistema automático permite generar registros continuos, trazables y auditables.

Causa raíz:

La ausencia de un sistema automático de monitoreo en cámaras de refrigeración impide garantizar un control continuo y trazable de la temperatura, generando riesgos para la seguridad alimentaria y el cumplimiento normativo.

En este contexto, la implementación de un sistema automatizado constituye una solución estratégica que permite mejorar la supervisión, reducir pérdidas económicas y cumplir con la normativa vigente en Ecuador.

Los controles manuales favorecen fallas térmicas no detectadas, creando condiciones para la proliferación de microorganismos.

Por el contrario, un sistema automatizado posibilita el monitoreo en tiempo real, la generación de alertas ante desviaciones y el registro continuo de datos, fortaleciendo la capacidad de respuesta, la trazabilidad del proceso y la protección de la calidad del producto.

Tabla comparativa entre herramientas

Tabla N°. 5

Tabla comparativa Objetivos vs FODA vs 5 por qué?

Tabla Comparativa: Objetivos – FODA – 5 Porqués			
Elemento	Objetivos	Relación con FODA	Relación con los 5 Porqués
Problema identificado	Falta de monitoreo automático en cámaras de refrigeración.	Reflejado en Debilidad 1 y 2 : monitoreo manual y ausencia de digitalización; y en Amenaza 1 y 2 : sanciones y proliferación bacteriana.	Surge como causa raíz tras aplicar los 5 Porqués: monitoreo manual → inspecciones esporádicas → desviaciones térmicas → riesgos sanitarios → sanciones normativas.
Objetivo general	Diseñar un sistema de monitoreo para cámaras de refrigeración mediante un equipo de sistema automático que reduzca los tiempos de respuesta ante fallas operativas.	Aprovecha Oportunidades 1 y 3 : actualización tecnológica e integración de IoT; mitiga Amenazas 1 y 2 .	Responde directamente a la causa raíz: elimina dependencia del monitoreo manual y asegura trazabilidad.
Objetivo específico 1	Diagnosticar la situación actual de la empresa a través de un análisis histórico de las áreas de logística y mantenimiento, con el fin de identificar tiempo de respuesta y confiabilidad operativa.	Se relaciona con Debilidad 1 y 3 : monitoreo manual y tiempos de respuesta lentos.	Valida los hallazgos del análisis de los 5 Porqués (inspecciones esporádicas, falta de control continuo).
Objetivo específico 2	Seleccionar los elementos de automatización y control a partir de un análisis detallado de las necesidades específicas de las cámaras de refrigeración, con el propósito de garantizar un monitoreo adecuado de la cadena de frío.	Aprovecha Oportunidades 3 y 4 : soluciones IoT y certificaciones sanitarias.	Ataca la causa raíz al definir sensores y controladores que aseguren vigilancia continua.
Objetivo específico 3	Diseñar el sistema de monitoreo de parámetros de temperatura e iluminación mediante software y Arduino, reduciendo el tiempo de respuesta ante variaciones críticas.	Fortalece la competitividad y cumplimiento normativo (Fortaleza 3 y 4, Oportunidad 4).	Implementa la solución que elimina el problema identificado en los 5 Porqués.

Nota. Elaboración propia.

Si bien las herramientas FODA y 5 Porqués permitieron identificar de manera cualitativa las debilidades del sistema y establecer la causa raíz del problema, estas metodologías no permiten analizar de forma estructurada los factores técnicos que inciden en la ocurrencia de fallas.

Por esta razón, se incorporan herramientas de análisis causal como el diagrama de Ishikawa y el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF), con el fin de profundizar en las causas técnicas del problema y priorizar las acciones de mejora.

Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF)

Tabla N°. 6

Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF)

Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF)								
Modo de falla	Causa	Efecto	S Severidad	O Ocurrencia	D Detección	Número de Prioridad de Riesgo (NPR)	Interpretación	Acción recomendada
			(1-10)	(1-10)	(1-10)	$NPR=S*O*D$		
No detección de desviación térmica	Monitoreo manual	Proliferación bacteriana	9	8	9	648	Riesgo crítico	Implementar monitoreo IoT
Retraso en notificación	Comunicación manual	Incremento MTTR	8	7	8	448	Alto riesgo	Alertas automáticas
Falta de trazabilidad	Registro manual	Incumplimiento normativo	7	8	9	504	Alto riesgo	Registro digital continuo
Fallo del sensor	Error de hardware	Lectura incorrecta	6	4	6	144	Riesgo medio	Redundancia sensores
Corte eléctrico	Factor externo	Pérdida de refrigeración	9	5	5	225	Riesgo alto	Sistema de respaldo

CRITERIOS DE EVALUACIÓN			
Valor	Severidad (S)	Ocurrencia (O)	Detección (D)
1-3	Bajo impacto	Poco frecuente	Fácil de detectar
4-6	Moderado	Ocasional	Detectable
7-8	Alto	Frecuente	Difícil de detectar
9-10	Crítico	Muy frecuente	No detectable

	NPR > 500 → Riesgo crítico (acción inmediata)
	NPR 200-500 → Riesgo alto (mejora prioritaria)
	NPR < 200 → Riesgo controlado

Nota. Elaboración propia.

El análisis AMEF permitió evaluar los modos de falla más críticos del sistema, determinando que la no detección oportuna de desviaciones térmicas presenta el mayor nivel de riesgo ($NPR = 648$), debido a su alta severidad, frecuencia y baja capacidad de detección.

Asimismo, se identificó que los fallos asociados a la comunicación manual y la falta de trazabilidad presentan niveles de riesgo elevados, lo que confirma la necesidad de implementar un sistema automatizado que permita mejorar la detección, reducir la ocurrencia de fallas y aumentar la capacidad de control del proceso.

Diagrama Ishikawa

Figura N°. 16

Diagrama Ishikawa



Nota. Elaboración propia.

Interpretación del diagrama Ishikawa

El análisis mediante el diagrama de Ishikawa permitió identificar que las causas del problema no se limitan a un único factor, sino que responden a una combinación de elementos relacionados con el método de trabajo, la tecnología utilizada, el factor humano y la ausencia de sistemas de medición en tiempo real.

Se destaca que la principal causa técnica se encuentra en la falta de automatización del monitoreo, lo que genera dependencia de procesos manuales y limita la capacidad de respuesta ante desviaciones térmicas.

Tabla N°. 7

Matriz (Problema, causa, variable, solución y evidencia)

MATRIZ (PROBLEMA - CAUSA - VARIABLE - SOLUCIÓN - EVIDENCIA)				
Problema identificado	Causa raíz (5 Porqués / Ishikawa)	Variable crítica	Solución propuesta (TO-BE)	Evidencia cuantitativa
Demoras en la detección de fallas	Monitoreo manual y ausencia de vigilancia continua	Temperatura (°C)	Implementación de sensores NTC + monitoreo en tiempo real	Tiempo de detección AS-IS: hasta 4 h → TO-BE: segundos
Retraso en la notificación de incidencias	Comunicación manual entre áreas	Tiempo de respuesta (h)	Alertas automáticas via Telegram	MTTR actual: 4,12 h → MTTR proyectado: 3,00 h
Falta de trazabilidad de datos	Registros manuales incompletos	Registro de datos (histórico)	Plataforma IoT (ThingSpeak) con almacenamiento continuo	Ausencia de datos → registros cada 20 s
Proliferación bacteriana por desviación térmica	No detección oportuna de temperaturas fuera de rango	Temperatura fuera de rango (°C)	Control automático con límites (0–4°C) y alarmas	Tiempo fuera de rango reducido (no medido → controlado en tiempo real)
Incumplimiento normativo (ARCSA)	Falta de evidencia documental	Trazabilidad	Generación automática de reportes digitales	Cumplimiento BPM + evidencia auditada
Fallas recurrentes no diagnosticadas	Ausencia de datos históricos	Tendencia de fallas	Análisis de datos (históricos IoT)	Datos históricos disponibles para análisis predictivo
Dependencia del operador	Procesos manuales	Intervención humana	Automatización del sistema de monitoreo	Reducción de intervención manual
Riesgo de daño del producto	Tiempo prolongado de respuesta	Tiempo de exposición térmica	Reducción del tiempo de respuesta	Desviación reducida del 37% → 0%

Nota. Elaboración propia.

Con el fin de garantizar la trazabilidad entre el diagnóstico realizado y la solución propuesta, se desarrolló una matriz de relación problema–causa–variable–solución–evidencia.

Esta matriz permite vincular directamente los hallazgos obtenidos a través del análisis FODA (*Figura N°. 14*), los 5 Porqués (*Figura N°. 15*), el diagrama de Ishikawa (*Figura N°. 16*) y el AMEF (*Tabla N°. 6*), con las variables críticas del sistema y las soluciones tecnológicas planteadas.

Asimismo, se evidencia que cada problemática identificada cuenta con un sustento cuantitativo basado en los indicadores de desempeño, como el MTTR y los tiempos de detección, lo que permite validar la pertinencia de la implementación de un sistema automatizado de monitoreo.

En particular, se observa que la principal mejora se centra en la reducción de los tiempos de detección y respuesta, pasando de un sistema manual con demoras de hasta 4 horas a un sistema automatizado con monitoreo en tiempo real, lo cual impacta directamente en la eficiencia operativa y en la seguridad de la cadena de frío.

De esta manera, la propuesta no solo responde a un problema identificado, sino que se sustenta en evidencia cuantificable que demuestra la necesidad y efectividad de la solución planteada.

Área de estudio:

Dominio:	Tecnología y sociedad
Línea de investigación:	Automatización y Redes
Sub-Línea de investigación:	Desarrollo de sistemas inteligentes interconectados, a través del internet de las cosas para mejorar los procesos productivos y de servicios
Campo:	Ingeniería Industrial
Área	Mantenimiento, seguridad, calidad, automatización
Aspectos	Implementación de un sistema basado en Internet de las Cosas (IoT) para la monitorización en tiempo real de variables críticas en equipos de refrigeración, con el fin de optimizar los procesos de mantenimiento y mejorar la eficiencia operativa.
Objeto de estudio	Sistema de refrigeración industrial y su gestión de mantenimiento en la empresa objeto de estudio
Periodo de análisis	Octubre 2025 – Marzo 2026

Modelo operativo

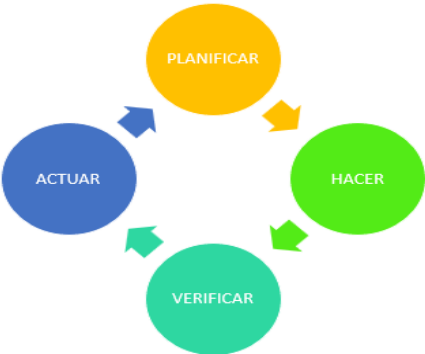
El modelo PHVA es adecuado para este proyecto, ya que responde al problema de los altos tiempos de respuesta en las cámaras de refrigeración, originados por el monitoreo manual, la falta de registros históricos y la ausencia de alertas en tiempo real. Este enfoque organiza el proceso en planificación, ejecución, verificación y mejora, permitiendo diagnosticar, implementar soluciones tecnológicas y evaluar su impacto.

Además, se adapta al sistema propuesto basado en sensores, Arduino y plataformas de monitoreo, facilitando el diseño, la ejecución de pruebas, la evaluación mediante indicadores y

la optimización continua. En consecuencia, el PHVA se adopta como marco metodológico central, garantizando un proceso estructurado, replicable y orientado a resultados.

Figura N°. 17

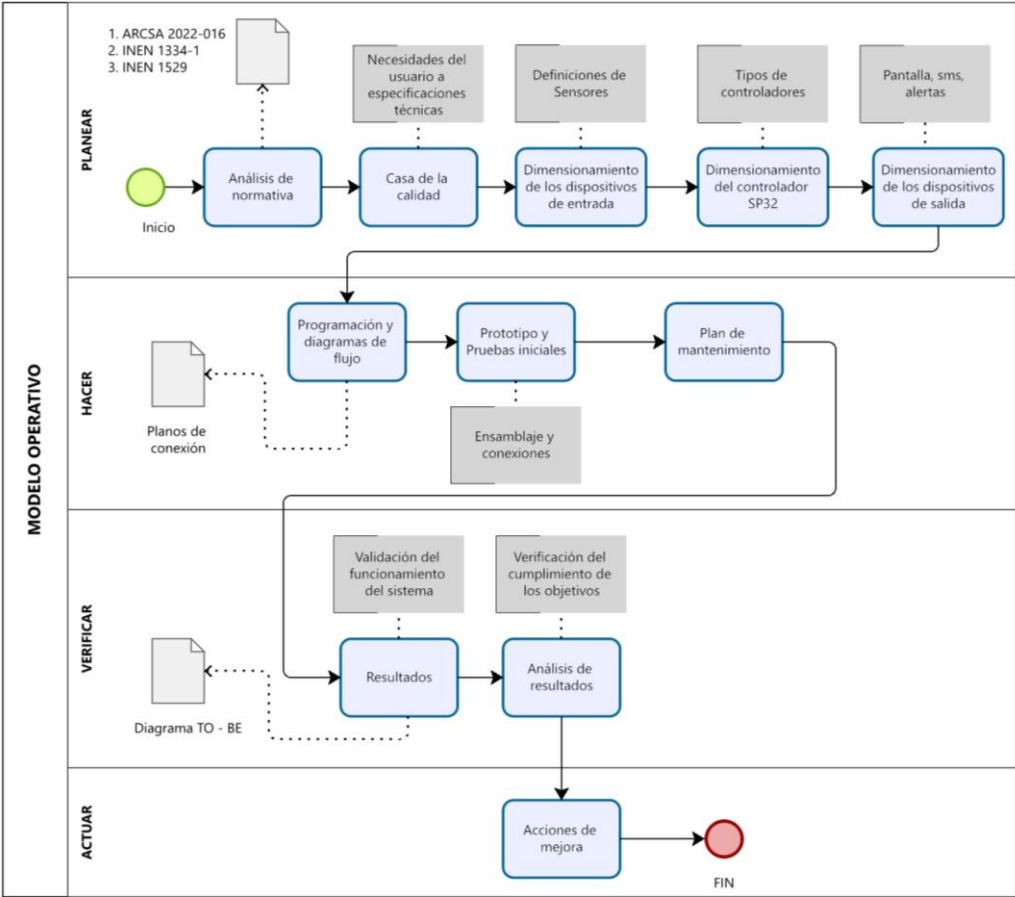
Ciclo PHVA



Nota. Se presenta el diagrama de ciclo de mejora continua PHVA. Elaboración propia.

Figura N°. 18

Modelo Operativo



Nota. Se adjunta el modelo operativo a seguir para el caso de estudio. Elaboración propia.

Explicación del Modelo Operativo PHVA

La Figura muestra la aplicación del modelo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) en el desarrollo del sistema de monitoreo térmico y lumínico para cámaras de refrigeración. Este enfoque permite estructurar de manera sistemática el diseño, implementación y mejora del sistema propuesto.

Fase 1: Planificar (Plan)

En esta fase se establecen las bases técnicas y normativas del sistema. Se inicia con el análisis de la normativa vigente (ARCSA, INEN), con el fin de asegurar el cumplimiento de requisitos sanitarios y operativos. Posteriormente, se identifican las necesidades del usuario mediante herramientas como la casa de la calidad, lo que permite traducir requerimientos en especificaciones técnicas.

Además, se realiza el dimensionamiento de los componentes del sistema, incluyendo sensores, dispositivos de entrada, el controlador (ESP32) y los elementos de salida como pantallas y sistemas de alerta (SMS). Esta etapa define la arquitectura del sistema y garantiza su viabilidad técnica.

Fase 2: Hacer (Do)

En esta etapa se ejecuta el diseño planteado. Se desarrolla la programación del sistema y los diagramas de flujo correspondientes, lo que permite estructurar la lógica de funcionamiento. Posteriormente, se construye un prototipo funcional mediante el ensamblaje de los componentes electrónicos, seguido de pruebas iniciales que permiten validar la operatividad del sistema. Finalmente, se establece un plan de mantenimiento que asegura la sostenibilidad y funcionamiento continuo del sistema implementado.

Fase 3: Verificar (Check)

En esta fase se evalúa el desempeño del sistema desarrollado. Se realiza la validación del funcionamiento del prototipo, verificando el cumplimiento de los objetivos planteados,

especialmente en la detección de anomalías y generación de alertas. Los resultados obtenidos son analizados mediante indicadores de desempeño, lo que permite identificar desviaciones, medir la eficiencia del sistema y comparar su comportamiento frente al proceso actual (AS-IS)

Figura N°. 8.

Fase 4: Actuar (Act)

Finalmente, en esta fase se establecen acciones de mejora continua basadas en los resultados obtenidos. Estas acciones permiten optimizar el sistema, corregir posibles fallas y fortalecer su desempeño.

El ciclo PHVA garantiza así un proceso iterativo y adaptable, orientado a la mejora continua, asegurando que el sistema de monitoreo cumpla con los requerimientos técnicos, operativos y normativos.

CAPITULO III

Propuesta y Resultados Esperados

Desarrollo de la propuesta:

En el presente capítulo se desarrolla la propuesta del sistema de monitoreo, estructurada bajo el enfoque del ciclo de mejora continua (PHVA), el cual comprende las etapas de planificar, hacer, verificar y actuar. Este enfoque permite organizar de manera sistemática el diseño, implementación y evaluación del sistema propuesto.

Previo al desarrollo del modelo operativo, es necesario contextualizar la solución dentro de un entorno de automatización industrial, con el fin de establecer su nivel de aplicación actual y su potencial de escalabilidad.

Integración del sistema en la pirámide de automatización industrial

Con el objetivo de contextualizar el sistema propuesto dentro de un entorno industrial, se presenta la pirámide de automatización industrial, la cual estructura los diferentes niveles de operación en sistemas productivos.

Figura N°. 19

Pirámide de la automatización industrial



Nota. Adaptado de la arquitectura de automatización industrial basada en ISA-95, ((ISA), 2021)

La pirámide de automatización está compuesta por varios niveles jerárquicos. En el nivel 0 (campo) se encuentran los sensores y actuadores, encargados de la adquisición de variables físicas. En el nivel 1 (control), se ubican los controladores como PLC o microcontroladores, responsables del procesamiento de datos. El nivel 2 (supervisión) incluye sistemas SCADA/HMI para la visualización y monitoreo, mientras que en niveles superiores se integran sistemas de gestión y planificación, como MES y ERP.

En el contexto del presente estudio, el sistema desarrollado mediante el uso del microcontrolador ESP8266 se sitúa entre el nivel 0 y el nivel 1 de la pirámide, ya que permite la adquisición de datos a través de sensores, su procesamiento básico y la transmisión de información mediante tecnologías IoT.

No obstante, este enfoque corresponde a un entorno controlado o de prototipo, debido a que el hardware utilizado no cuenta con características propias de sistemas industriales, como robustez, certificaciones y tolerancia a condiciones extremas.

Sin embargo, la arquitectura del sistema ha sido diseñada de forma modular y escalable, lo que permite su migración hacia niveles superiores de automatización industrial. En un entorno industrial, el sistema podría adaptarse mediante la sustitución del microcontrolador por un PLC, la incorporación de sensores industriales con salidas estándar (4–20 mA) y la integración con sistemas SCADA para la supervisión en tiempo real.

De esta manera, el sistema propuesto no solo cumple una función operativa en su estado actual, sino que también constituye una base tecnológica para su implementación en entornos industriales, alineándose con los principios de la Industria 4.0 y la digitalización de procesos.

Aplicación del ciclo PHVA en el desarrollo del sistema

En la fase de planificar, se realiza el análisis de la normativa aplicable a las cámaras de refrigeración para el control de la cadena de frío. Asimismo, se analizan las necesidades del cliente en relación con las especificaciones técnicas, mediante la herramienta conocida como

casa de la calidad. Posteriormente, se selecciona el controlador IoT y los dispositivos de entrada y salida en función de los requerimientos del sistema **Figura N°. 18**

En la fase de hacer, se desarrolla la programación del sistema, así como los diagramas de conexión y el ensamblaje del prototipo. Adicionalmente, se realizan pruebas de funcionamiento y se elaboran los planos de conexión, considerando los parámetros definidos en las especificaciones técnicas.

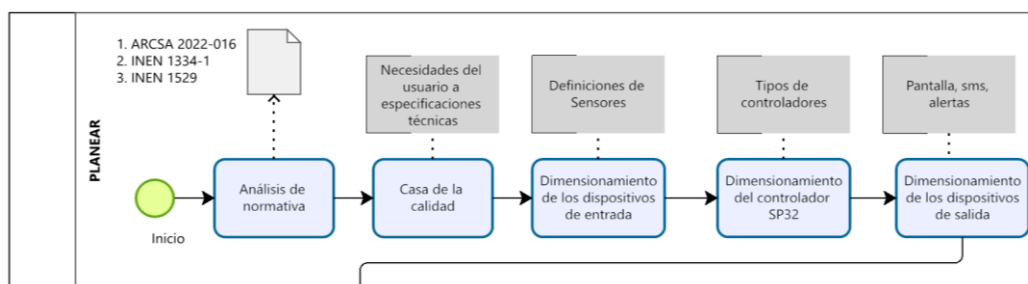
En la fase de verificar, se evalúa el cumplimiento de las variables de control, como temperatura, humedad e iluminación. Posteriormente, se analizan los resultados obtenidos del monitoreo y se establece un plan de mantenimiento para las cámaras de refrigeración.

Finalmente, en la fase de actuar, se proponen acciones de mejora orientadas a optimizar el sistema de monitoreo, garantizando su eficiencia y adaptabilidad en el tiempo.

PLANEAR

Figura N°. 20

PHVA – Primera etapa – Planear



Nota. Se visualiza la fase uno del ciclo PHVA. Elaboración propia **Figura N°. 18**

Análisis de Normativa

En el ámbito de las industrias alimenticias, existen diversas normativas que establecen requisitos obligatorios con el propósito de preservar la calidad de los productos destinados al consumidor final. Para la empresa objeto de estudio se identifican las regulaciones pertinentes, poniendo especial énfasis en aquellas disposiciones relacionadas con la cadena de frío y el

monitoreo de los alimentos. En este caso, dichas normativas aplican a productos cárnicos, hortalizas, frutas y verduras.

En el cuadro comparativo se detallan los ítems que se deben cumplir en las industrias alimenticias de los productos anteriormente descritos.

Tabla N°. 8

Tabla comparativa de la normativa

Tabla comparativa de la normativa					
Norma	Artículo	Tipo	Exigencia normativa (texto normativo/paráfrasis fiel)	Criterio técnico de implementación	Variable
ARCSA-DE-2022-016	Art. 5	Obligatoria	“Los alimentos deberán almacenarse bajo condiciones que garanticen su conservación, evitando su contaminación o deterioro.”	Control automático de temperatura (0–4 °C)	Temperatura
ARCSA-DE-2022-016	Art. 9	Obligatoria	“Se deberá asegurar el control de las condiciones ambientales durante el almacenamiento de alimentos.”	Monitoreo continuo con sensores	Temperatura
ARCSA-DE-2022-016	Art. 12	Obligatoria	“Los establecimientos deberán mantener registros que permitan la trazabilidad de las condiciones de almacenamiento.”	Monitoreo continuo en tiempo real (cada 500 ms) + envío a la nube (ThingSpeak)	Datos
ARCSA-DE-2022-016	Art. 14	Obligatoria	“Se deberán tomar acciones correctivas cuando se detecten desviaciones en las condiciones de conservación.”	Sistema de alertas (Telegram + LEDs)	Eventos
NTE INEN 1334-1:2011 (Vigente 2021)	Art. 7	Obligatoria	“Los alimentos perecibles deben mantenerse en condiciones de temperatura que eviten su alteración.”	Límites programados 0–4 °C	Temperatura
NTE INEN 1334-1:2011 (Vigente 2021)	Art. 8	Obligatoria	“Se deberá controlar las condiciones de almacenamiento durante toda la cadena de conservación.”	Monitoreo continuo + sensor de luz	Temperatura / luz
NTE INEN 1334-1:2011 (Vigente 2021)	Art. 10	Obligatoria	“Las condiciones de manipulación deben prevenir la contaminación y deterioro de los alimentos.”	Alertas por apertura de puerta	Luz
NTE INEN 1529-5:2022	Art. 4	Obligatoria	“Los productos cárnicos deberán mantenerse en condiciones de temperatura controlada durante su almacenamiento.”	Sensor SHT31 + control térmico	Temp / humedad
NTE INEN 1529-5:2022	Art. 6	Obligatoria	“Se deberá verificar el cumplimiento de las condiciones de conservación establecidas.”	Visualización en tiempo real	Variables (Dashboard)
NTE INEN 1529-5:2022	Art. 9	Obligatoria	“Se deben mantener registros que evidencien el cumplimiento de las condiciones de almacenamiento.”	Registro en la nube	Datos

Nota. Se describe las características principales que se deben cumplir dentro del ámbito laboral alimenticio. Elaboración propia.

Casa de la calidad

La Casa de la Calidad constituye una metodología propia del QFD orientada a vincular de manera sistemática las expectativas del cliente con los aspectos técnicos que la organización puede controlar. Mediante el uso de una matriz, esta herramienta permite analizar la relación entre lo que el cliente demanda y cómo dichas demandas se traducen en especificaciones

técnicas, estableciendo prioridades y detectando posibles interacciones entre ellas. Su aplicación favorece un diseño más coherente con las necesidades del usuario, fortalece el enfoque al cliente y apoya la mejora continua en productos y procesos. (Gutiérrez Pulido H. &, 2021), (Prasad, 2023)

Por consiguiente, para iniciar la elaboración de la casa de calidad, se debe considerar las necesidades del cliente (QUÉ) descritas a continuación:

Las ponderaciones asignadas en la Casa de la Calidad se determinaron a partir de la importancia relativa de las necesidades del cliente (QUÉ), evaluadas mediante una escala de Likert de 1 a 5, donde 1 representa baja importancia y 5 alta importancia.

Posteriormente, se estableció la relación entre cada necesidad del cliente y las características técnicas (CÓMO) utilizando la escala estándar del QFD (9 = fuerte, 3 = media, 1 = débil).

La importancia de cada característica técnica se obtuvo mediante la suma ponderada de las relaciones, multiplicando la importancia del cliente por el grado de relación correspondiente. Este procedimiento permite priorizar los elementos técnicos que generan mayor impacto en la satisfacción del cliente.

En la siguiente imagen, se estableció la lista de QUÉs y CÓMOs, se agregó la ponderación correspondiente y se analizó los resultados, las fórmulas utilizadas son las siguientes.

Tabla N°. 9

Tabla comparativa de la normativa

Fórmulas	
$\text{Importancia del HOW} = \sum (\text{Importancia del QUÉ} \times \text{Relación})$	$\% = \frac{\text{Valor del HOW}}{\text{Total de HOW}} * 100$

Nota. Elaboración propia.

Tabla N°. 10

Tabla QUÉ vs CÓMO.

QUÉ	Importancia (1-5)	CÓMO													
		1. Sensores		2. Controlador		3. Software		4. Protocolos		5. Normativa		6. Mantenimiento		7. Capacitación	
		relación (9,3,1)	Importancia x relación	relación (9,3,1)	Importancia x relación	relación (9,3,1)	Importancia x relación	relación (9,3,1)	Importancia x relación	relación (9,3,1)	Importancia x relación	relación (9,3,1)	Importancia x relación	relación (9,3,1)	Importancia x relación
1. Cadena de frío	5	3	15	3	15	9	45	3	15	9	45	9	45	6	30
2. Normativas	4	3	12	9	45	9	45	9	45	9	45	9	45	3	15
3. Tiempo respuesta	5	9	45	9	45	9	45	9	45	9	45	9	45	3	15
4. Inocuidad	4	9	36	9	45	9	45	9	45	9	45	9	45	3	15
5. Energía	3	3	9	3	15	3	15	3	15	3	15	9	45	1	5
6. Trazabilidad	4	9	36	9	45	9	45	9	45	9	45	9	45	3	15
TOTAL			153		210		240		210		240		270		95

FÓRMULA		
%=Valor del HOW/Total de HOW		
RESUMEN		
Sensores	153	10,8%
Controlador	210	14,8%
Software	240	16,9%
Protocolos	210	14,8%
Normativa	240	16,9%
Mantenimiento	270	19,0%
Capacitación	95	6,7%
Total	1418	100,0%

FÓRMULA	
=∑(Importancia x Relación)	
RELACIÓN	
9	Relación fuerte
3	Relación media
1	Relación débil

Nota. Se describe las características principales que se deben cumplir dentro del ámbito laboral alimenticio. Elaboración propia.

Por ejemplo, para realizar los cálculos se realizó lo siguiente:

Paso 1: Tener evaluado y asignado con un número cada una de las necesidades del cliente (QUÉ) de acuerdo con los criterios de la escala de Likert (1-5), donde 1 representa baja importancia y 5 alta importancia.

Paso 2: Tener evaluado y asignado con un número a cada una de las características técnicas (CÓMO) utilizando la escala estándar del QFD (9 = fuerte, 3 = media, 1 = débil). Debe ser un análisis comparando ambas variables entre los (QUÉ) y los (CÓMO). Se toma de ejemplo la columna de los (QUÉ) y se realiza el cálculo con la primera especificación técnica (1. SENSORES), dando como resultado lo siguiente:

Figura N°. 21

Cálculo – casa de calidad.

QUÉ	Importancia	1. Sensores	
	(1-5)	relación (9,3,1)	Importancia x relación
1. Cadena de frío	5	3	=(5x3)=15
2. Normativas	4	3	=(4x3)=12
3. Tiempo respuesta	5	9	=(5x9)=45
4. Inocuidad	4	9	=(4x9)=36
5. Energía	3	3	=(3x3)=9
6. Trazabilidad	4	9	=(4x9)=36
TOTAL			lj=Σ(15+12+45+36+9+36)=153

FÓRMULA		
%=Valor del HOW/Total de HOW		
RESUMEN		
Sensores	153	=(153/1418)=10,8%
Controlador	210	=(210/1418)=14,8%
Software	240	=(240/1418)=16,9%
Protocolos	210	=(210/1418)=14,8%
Normativa	240	=(240/1418)=16,9%
Mantenimiento	270	=(270/1418)=19,0%
Capacitación	95	=(95/1418)=6,7%
Total	1418	%=Σ(10,8%+14,8%+16,9%+14,8%+16,9%+19,0%+6,7%)=100%

Nota. Elaboración propia

Cabe recalcar que este cálculo se lo debe realizar para cada una de las especificaciones técnicas encontradas en la casa de la calidad, por tanto, en la siguiente imagen se puede observar la matriz finalizada con los respectivos cálculos.

Los resultados del QFD evidencian que el sistema propuesto no depende de un único componente, sino de la integración de múltiples dimensiones tecnológicas propias de un entorno IoT. Si bien el mantenimiento predictivo presenta la mayor ponderación (19,0%), su efectividad depende directamente del software de monitoreo (16,9%), los protocolos de comunicación (14,8%), el controlador (14,8%) y los sensores IoT (10,8%), los cuales permiten la captura, procesamiento, transmisión y análisis de datos en tiempo real.

En este contexto, el software de monitoreo adquiere un papel estratégico, ya que no solo gestiona la información generada por los sensores, sino que también habilita la generación de alertas automáticas y el seguimiento continuo de las condiciones operativas. De igual manera, el cumplimiento normativo (16,9%) se posiciona como un elemento crítico que asegura que el sistema opere dentro de los parámetros establecidos para la conservación de productos, garantizando la calidad e inocuidad en la cadena de frío.

Por su parte, los protocolos de comunicación y el controlador constituyen la infraestructura tecnológica que permite la conectividad y el procesamiento eficiente de la información, asegurando que los datos capturados sean transmitidos y utilizados oportunamente para la toma de decisiones.

En contraste, la capacitación del personal presenta una menor ponderación (6,8%), lo cual se justifica en el enfoque automatizado del sistema propuesto. La incorporación de tecnologías IoT reduce la dependencia de la intervención manual, priorizando la inteligencia del sistema sobre la operación humana, sin eliminar completamente la necesidad de formación para su correcta utilización.

En este sentido, el sistema debe entenderse como una arquitectura integrada, donde la tecnología IoT habilita la captura y gestión de datos, el software permite su análisis y control, y el mantenimiento predictivo ejecuta las acciones correctivas. Esta integración permite mejorar

la eficiencia operativa, reducir los tiempos de respuesta y asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad en el proceso de monitoreo.

En consecuencia, el QFD demuestra que la solución propuesta no se basa en un único componente, sino en la interacción coordinada de tecnologías IoT que permiten transformar un sistema reactivo en uno predictivo y automatizado.

Dimensionamiento de los dispositivos de entrada

Los sensores constituyen elementos fundamentales dentro de los sistemas de monitoreo IoT, ya que permiten transformar variables físicas del entorno en señales eléctricas procesables por sistemas electrónicos. En el presente proyecto, orientado al monitoreo de cámaras de refrigeración, los sensores cumplen la función de capturar variables críticas como la temperatura y el estado de iluminación, las cuales inciden directamente en la conservación de la cadena de frío y el cumplimiento normativo.

El proceso de selección de los dispositivos de entrada se realizó considerando criterios técnicos y operativos tales como rango de medición, precisión, compatibilidad con microcontroladores de 3.3 V, robustez en ambientes industriales, disponibilidad en el mercado y costo. A partir de este análisis comparativo, se seleccionaron los componentes que mejor se ajustan a los requerimientos del sistema.

En la *Tabla N°. 11* se presentan las características principales de los dispositivos de entrada utilizados en el proyecto, incluyendo sus especificaciones técnicas y su función dentro del sistema de monitoreo.

Tabla N°. 11

Dispositivos de entrada

Ítem	Nombre	Elemento	Modelo / Tipo	Especificación Técnica Clave	Uso en el Proyecto	Cantidad
A	Dispositivo de adquisición de datos	Convertidor ADC	ADS1115	16 bits, I ² C, ±4.096 V	Lectura precisa SB70	1
B	Dispositivos de entrada	Sonda temperatura	Full Gauge SB70	NTC 10 kΩ, -50 °C a +105 °C	Medición temperatura	1
C		Sensor humedad	SHT31-D	I ² C, -40 °C a +125 °C, ±2 %RH	Humedad en frío	1
D		Sensor luz digital	LDR + LM393	Salida digital ON/OFF, 3.3 V	Detección luz encendida	1

Nota. Elaboración propia.

Tabla N°. 12

Matriz comparativa – Sensor de Temperatura

Matriz comparativa - Sensor de temperatura			
Criterio	NTC 10k (SB70)	DS18B20	PT100
Rango	-50 a 105 °C	-55 a 125 °C	-200 a 500 °C
Precisión	Media (±1°C)	Alta (±0.5°C)	Muy alta
Costo	Bajo	Medio	Alto
Compatibilidad	Requiere ADC	Digital (fácil)	Requiere módulo
Robustez	Media	Alta	Muy alta
Disponibilidad	Alta	Alta	Media
Selección	<input checked="" type="checkbox"/>	✓ alternativa	✗ sobredimensionado

Nota. Elaboración propia.

a. Convertidor ADC - ADS1115

El ADS1115 es un convertidor analógico-digital (ADC) externo de 16 bits que permite convertir señales analógicas de alta resolución en datos digitales interpretables por el

microcontrolador. No es un sensor. Es un dispositivo de adquisición y acondicionamiento de señal.

Tabla N°. 13

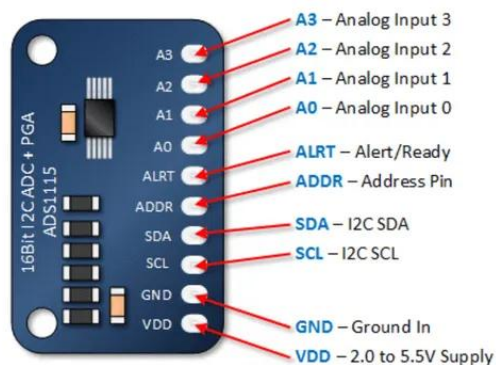
Dispositivo ADS1115

Ítem	Características Generales
1	Resolución: 16 bits
2	Canales: 4 entradas analógicas (pueden usarse como 4 simples o 2 diferenciales)
3	Comunicación: I ² C (solo usa dos pines: SDA y SCL)
4	Rango de voltaje típico: hasta ± 6.144 V
5	Ganancia programable (PGA): permite amplificar señales pequeñas
6	Bajo ruido y alta precisión

Nota. Elaboración propia.

Figura N°. 23

Convertidor ADC - ADS1115



Nota. Partes de un ADS1115. Elaboración propia.

Configuración ADS1115

La configuración del convertidor analógico-digital ADS1115 se realizó mediante la instrucción `ads.setGain (GAIN_ONE)` dentro del programa del microcontrolador, lo que establece una ganancia unitaria y un rango de medición de ± 4.096 V.

En la práctica, al utilizar el modo de lectura de canal simple (Single-Ended), el sistema opera en un rango efectivo de 0 a 4.096 V, el cual es adecuado para la señal generada por el

divisor de voltaje del termistor NTC, cuyo valor máximo corresponde al voltaje de alimentación del sistema (3.318 V).

Esta configuración permite evitar la saturación del convertidor, garantizando una adecuada resolución en la digitalización de la señal analógica y mejorando la precisión del sistema de monitoreo.

Tabla N°. 14

Configuración ADS1115

CONFIGURACIÓN ADS1115			
Parámetro	Configuración en el sistema	Valor / Descripción	Justificación técnica
Tipo de ADC	ADS1115	Convertidor analógico-digital de 16 bits	Alta resolución para medición precisa
Resolución	16 bits	32768 niveles (0–32767)	Permite detectar pequeñas variaciones de voltaje
Configuración PGA	GAIN_ONE	Ganancia = 1	Define el rango de medición
Rango de medición	±4.096 V	Rango máximo configurable	Evita saturación del ADC
Modo de lectura	Single-Ended	Canal A0 (positivo respecto a GND)	Compatible con señal del divisor NTC
Rango efectivo usado	0 – 4.096 V	Solo valores positivos	Señal del sistema no es diferencial
Voltaje del sistema	3.318 V	Medido en el circuito	Límite máximo real de señal
Señal del sensor (NTC)	0 – 3.318 V	Divisor de voltaje	Dentro del rango del ADC
Función de lectura	ads.readADC_SingleEnded(0)	Lectura digital	Conversión de señal analógica
Conversión a voltaje	ads.computeVolts()	Escala según PGA	Obtención de voltaje real
Factor de calibración	K_V = 1.6467	Ajuste de medición	Corrección de error experimental
Protección contra saturación	Implicita	Señal < 4.096 V	Garantiza medición estable
Frecuencia de muestreo	2 Hz (cada 500 ms)	millis() controlado	Balance entre precisión y consumo
Ubicación de configuración	loop()	ads.setGain(GAIN_ONE)	(Mejor práctica)

Nota. El ADS1115 se configuró en ±4.096 V con GAIN_ONE, lo que asegura que la señal del NTC (0–3.3 V) se mida sin saturación y con buena resolución. Elaboración propia.

La configuración del ADS1115 garantiza que la señal analógica proveniente del sensor NTC sea digitalizada dentro de un rango seguro y con alta resolución, evitando saturación y permitiendo una medición precisa. La selección del rango ±4.096 V resulta adecuada para el sistema, ya que el voltaje máximo de operación (3.318 V) se encuentra dentro de dicho intervalo.

b. Sonda temperatura

El sensor de temperatura utilizado corresponde a un termistor NTC de 10 kΩ, el cual presenta un comportamiento no lineal entre la resistencia y la temperatura, caracterizado por una disminución de la resistencia a medida que aumenta la temperatura. Este comportamiento

se representa mediante la curva resistencia-temperatura (R-T), proporcionada por el fabricante, la cual constituye la base para la conversión de señales eléctricas en valores térmicos.

De acuerdo con la literatura técnica, los termistores NTC se modelan mediante la ecuación Beta o la ecuación de Steinhart-Hart, siendo esta última la más precisa para describir la relación entre resistencia y temperatura.

En el presente proyecto se emplea el modelo Beta, considerando los parámetros característicos del termistor, definidos por el fabricante, lo que permite obtener una aproximación adecuada dentro del rango de operación requerido.

La SB70 de Full Gauge es una sonda de temperatura tipo NTC (Negative Temperature Coefficient). Es un sensor resistivo usado comúnmente en refrigeración y congelación para medir temperatura en cámaras, vitrinas y sistemas HVAC.

La resistencia del termistor disminuye cuando la temperatura aumenta. Se basa en la ecuación de Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3$$

Donde:

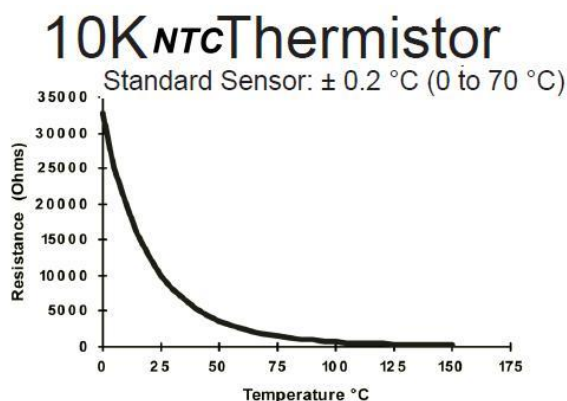
- T = Temperatura absoluta (K)
- R = Resistencia medida
- A, B, C = constantes del fabricante

El coeficiente Beta utilizado (6030K) corresponde a un valor ajustado experimentalmente durante el proceso de calibración del sistema, con el fin de mejorar la precisión de la medición dentro del rango operativo de interés. Si bien los valores típicos comerciales se sitúan entre 3435 K y 3950 K, el ajuste realizado permite adaptar el modelo matemático a las condiciones reales del sistema.

La curva R-T del termistor presenta un comportamiento exponencial decreciente, lo que implica una alta sensibilidad en rangos bajos de temperatura, característica favorable para aplicaciones de refrigeración. Esta propiedad permite detectar pequeñas variaciones térmicas, lo cual es fundamental para el control de la cadena de frío. Adicionalmente se puede observar en el anexo 2 la ficha técnica. (Hareendran, 2024)

Figura N°. 24

Curva R-T termistor NTC



Nota. Elaboración propia.

Tabla N°. 15

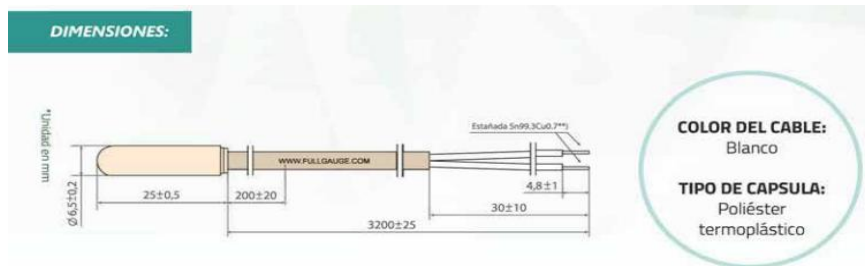
Dispositivo Sonda de temperatura

Ítem	Características Generales
1	Tipo: Termistor NTC - Negative Temperature Coefficient
2	Resistencia nominal: 10 kΩ a 25 °C (valor típico en Full Gauge)
3	Uso: refrigeración y congelación
4	Punta metálica sellada (acero inoxidable)
5	Cable encapsulado para ambientes húmedos
6	Buena estabilidad y respuesta rápida
7	Rango típico de trabajo: aprox. -50 °C a +105 °C

Nota. Elaboración propia.

Figura N°. 25

Sonda de temperatura - SB70 FULL GAUGE 18/22



Nota. se describe las dimensiones de la sonda a utilizarse. (Ametherm, 2023)

c. Sensor humedad

El SHT31-D es un sensor digital preciso de temperatura y humedad que se conecta por I²C y entrega lecturas directas sin circuitos analógicos adicionales.

Aunque el enfoque principal del proyecto se centra en el monitoreo de temperatura y condiciones de iluminación, la medición de la humedad relativa fue incorporada como parte del proceso experimental, con el objetivo de mejorar la confiabilidad y validación de las mediciones térmicas obtenidas mediante el sensor NTC.

Durante la etapa de calibración del sistema, el sensor de humedad y temperatura SHT31 fue utilizado como un punto de referencia para contrastar los valores obtenidos por el termistor NTC, en conjunto con un termómetro externo tipo lápiz. Esta comparación permitió identificar desviaciones en la medición, ajustar parámetros del modelo matemático (coeficiente Beta y factores de calibración) y mejorar la precisión del sistema.

La inclusión de la humedad relativa también permitió contextualizar las condiciones ambientales durante las pruebas, ya que variables como la humedad pueden influir indirectamente en la transferencia de calor y en el comportamiento térmico del entorno. De esta manera, se logró un proceso de calibración más robusto y confiable.

Es importante destacar que, dentro del sistema final propuesto, la variable humedad no interviene directamente en la lógica de control ni en la generación de alertas, sino que cumple una función de soporte experimental y validación, fortaleciendo la trazabilidad y confiabilidad de los datos obtenidos.

En consecuencia, la medición de humedad agrega valor al proyecto en la fase experimental, al permitir:

Validar y calibrar la medición del sensor NTC

Comparar resultados con un sensor digital de mayor estabilidad

Apoyar la verificación con instrumentos externos (termómetro tipo lápiz)

Mejorar la confiabilidad del sistema de monitoreo

Por lo tanto, su inclusión se justifica como un elemento de apoyo metrológico dentro del desarrollo del sistema.

Figura N°. 26

Sensor de humedad y temperatura



Nota. se describe las dimensiones de la sonda a utilizarse.

d. Sensor luz digital

El LDR + LM393 es un módulo que detecta si hay luz u oscuridad y entrega una señal digital configurable según el nivel de iluminación, cuenta con una salida digital ON/OFF. Es decir:

- Si $V_{\text{sensor}} > V_{\text{ref}} \rightarrow$ salida HIGH
- Si $V_{\text{sensor}} < V_{\text{ref}} \rightarrow$ salida LOW

El sistema de monitoreo implementa la detección de iluminación mediante un sensor basado en una fotorresistencia (LDR) acoplada a un comparador de voltaje (LM393), cuya salida es de tipo digital (ON/OFF). Este diseño permite identificar únicamente la presencia o ausencia de luz, generando una señal binaria que indica si la iluminación interna de la cámara de refrigeración se encuentra encendida o apagada.

En este sentido, es importante precisar que el sistema no realiza una medición cuantitativa de la iluminancia (lux), sino que opera a nivel de detección de estado de luz, lo cual es suficiente para los objetivos del proyecto, enfocados en la supervisión operativa de la cámara.

La detección del estado de iluminación permite identificar eventos relevantes como:

- Apertura prolongada de puertas
- Fallos en el sistema de iluminación
- Posibles pérdidas de eficiencia energética

Desde el punto de vista del sistema embebido, esta lógica se implementa mediante una comparación de umbral sobre la señal digital, como se observa en el código:

- `bool lightOn = (v1 < 1.0f);`

Este enfoque simplifica la arquitectura del sistema, reduce el consumo de recursos computacionales y permite una respuesta rápida ante eventos de iluminación.

No obstante, se reconoce que este tipo de sensor no permite medir niveles de iluminancia en unidades físicas (lux), por lo que, en caso de requerirse un análisis más detallado del comportamiento lumínico o del consumo energético, sería necesario incorporar sensores especializados de medición de luz, tales como fotodiodos calibrados o sensores digitales de iluminancia.

En consecuencia, la variable iluminación en el presente sistema debe interpretarse como un indicador binario de estado (encendido/apagado) y no como una medición continua de intensidad lumínica.

Tabla N°. 16

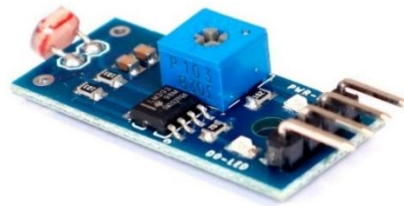
Dispositivo luz digital

Ítem	Características Generales
1	Detecta nivel de iluminación
2	Tiene salida digital (0/1) cuando supera un umbral
3	Incluye potenciómetro para ajustar sensibilidad
4	Alimentación típica: 3.3V–5V
5	Fácil de usar con ESP8266, ESP32 y Arduino

Nota. Elaboración propia.

Figura N°. 27

Sensor de luz



Nota. módulo que detecta si hay luz u oscuridad.

Dimensionamiento del controlador

El NodeMCU ESP-12E es una placa con ESP8266 y Wi-Fi incorporado que facilita el desarrollo de sistemas IoT para leer sensores y enviar datos a la nube. A continuación, se describe las características principales del controlador ESP8266.

Tabla N°. 17

Tabla del controlador

Ítem	Dispositivo	Elemento	Modelo / Tipo	Especificación Técnica Clave	Uso en el Proyecto	Cantidad
1	Controlador	Microcontrolador	ESP8266 NodeMCU (ESP-12E)	WiFi 2.4 GHz, 3.3 V lógica	Control principal / IoT	1

Nota. Elaboración propia.

Tabla N°. 18

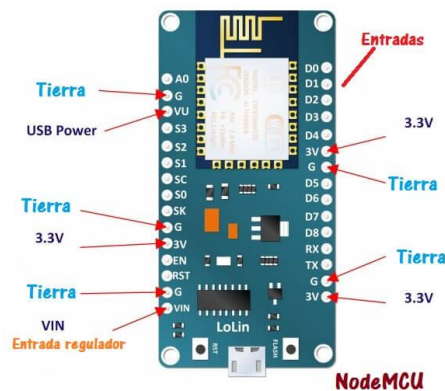
Dispositivo controlador ESP8266

Ítem	Características Generales
1	Microcontrolador con Wi-Fi integrado
2	Programable con Arduino IDE o MicroPython
3	Entrada USB (programación y alimentación)
4	Pines GPIO para sensores y actuadores
5	ADC analógico (1 canal)
6	Voltaje de trabajo: 3.3 V

Nota. Elaboración propia.

Figura N°. 28

Microcontrolador ESP8266



Nota. el microcontrolador escogido con modulo WIFI. (Mora, 2019)

El controlador usa un sistema de comunicación serial síncrono bidireccional de corta distancia I2C (Inter – Intergrated Circuit), es decir se puede conectar varios sensores, memorias o periféricos a un controlador utilizando los dos cables: SDA (datos) y SCL (reloj).

- **SDA (Serial Data Line):** Línea de datos por donde se transfiere la información entre los dispositivos.
- **SCL (Serial Clock Line):** Línea de reloj que sincroniza la comunicación, generada por el maestro

Cabe destacar que es ideal para comunicaciones de bajo costo y baja velocidad, como conectar sensores o pantallas a una placa tipo Arduino, debido a su simplicidad y bajo número de conexiones, por ejemplo, el flujo de señal con respecto a las variables del caso de estudio son las siguientes:

Figura N°. 29

Flujo de señal Temperatura hacia Microcontrolador ESP8266



Nota. Elaboración propia.

Figura N°. 30

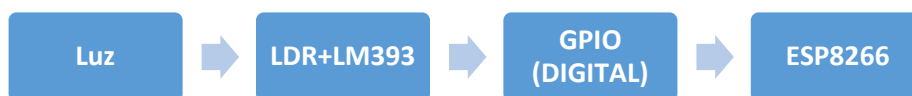
Flujo de señal de humedad hacia Microcontrolador ESP8266



Nota. Elaboración propia.

Figura N°. 31

Flujo de señal de luz hacia Microcontrolador ESP8266



Nota. Elaboración propia.

Dimensionamiento de los dispositivos de salida

Tabla N°. 19

Dispositivos de salida

Ítem	Dispositivos	Elemento	Modelo / Tipo	Especificación Técnica Clave	Uso en el Proyecto	Cantidad
1	Dispositivos De Salida	Pantalla OLED	SSD1306	0.96", I ² C, 128×64, 3.3 V	Visualización alarmas	1
2		LED azul	LED 5 mm	3 V, 20 mA	Alarma iluminación	1
3		LED rojo	LED 5 mm	2 V, 20 mA	Alarma temperatura	1
4		LED amarillo	LED 5 mm	2 V, 20 mA	Alarma humedad	1

Nota. Elaboración propia

Pantalla OLED

SSD1306 es un controlador para pantallas OLED monocromas muy usado en proyectos con Arduino, ESP8266 y ESP32. Seguramente lo has visto en las pantallas OLED 0.96" o 1.3" de 128×64 o 128×32 píxeles.

Tabla N°. 20

Características OLED

Ítem	Características Generales
1	Resoluciones comunes: 128×64, 128×32
2	Color: Monocromático (blanco, azul o amarillo/blanco)
3	Interfaces: I2C (la más común)
4	Bajo consumo (ideal para IoT)
5	No necesita retroiluminación (OLED puro)

Nota. Elaboración propia.

Figura N°. 32

Pantalla OLED - SSD1306



Nota. Pantalla escogida. (Industries, Adafruit SSD1306 OLED Display Driver [Software]., 2022)

LED.

Un LED es un componente electrónico que emite luz cuando circula corriente en una sola dirección. Se usa principalmente como indicador visual en circuitos electrónicos.

El sistema incorpora un esquema de señalización visual mediante diodos emisores de luz (LED), con el objetivo de proporcionar una retroalimentación inmediata del estado operativo del sistema embebido. Esta estrategia permite al operador identificar condiciones normales, anomalías y fallos críticos sin necesidad de interactuar con la interfaz digital.

La implementación considera criterios de ergonomía industrial, percepción visual y estandarización de colores, ampliamente utilizados en sistemas de señalización técnica. En este contexto, los colores seleccionados (verde, rojo) responden a convenciones internacionales que facilitan la interpretación rápida de estados operativos.

Adicionalmente, se emplea señalización dinámica (parpadeo) para diferenciar niveles de criticidad, mejorando la capacidad de respuesta del operador ante eventos anómalos.

Figura N°. 33

LED



Nota. Imagen referencial de un LED.

Cálculo para resistencia

Fórmula

$$R = \frac{V_s - V_f}{I_f}$$

Color LED	V
Rojo	1.8 – 3.3 V
Verde	2.0 – 3.0 V
Azul	3.0 – 3.3 V
Blanco	3.0 – 3.3 V

Donde:

- R = resistencia (ohmios, Ω)
- V_s = voltaje de alimentación (V)
- V_f = voltaje del LED (V)
- I_f = corriente del LED (A)

Ejemplo práctico (ESP8266 – 3.3 V)

Ejemplo LED rojo:

- $V_s = 3.3$ V
- $V_f = 1.8$ V
- $I_f = 0.015$ A (15 mA)

$$R = \frac{3.3 - 1.8}{0.015} = 100 \Omega = 100 \Omega \text{ (valor comercial).}$$

Tabla N°. 21

Leds de alarma

Color LED	Tipo de señal	Evento detectado	Condición en el sistema	Acción correctiva
Verde (LED_OK)	Fijo	Operación normal	Temperatura dentro de rango (0–4 °C) y sin errores	Ninguna
Rojo (LED_ALARM)	Parpadeo	Alarma térmica	Temperatura fuera de rango	Verificar sistema de refrigeración
Rojo (LED_ERROR)	Fijo	Error crítico	Fallo del sensor NTC o lectura inválida	Revisar conexión o reemplazar sensor
LEDs apagados	-	Sistema en reinicio	Reset manual activo (3 segundos)	Esperar estabilización

Nota. Elaboración propia

La selección de colores responde a principios de ergonomía visual aplicados en entornos industriales, donde:

- El color verde se asocia con condiciones seguras o normales
- El color rojo indica peligro, fallo o condición fuera de control

El uso de señalización luminosa permite una interpretación inmediata (≤ 1 segundo), reduciendo la carga cognitiva del operador y mejorando la toma de decisiones en tiempo real.

Asimismo, el uso de señales intermitentes (parpadeo) incrementa la visibilidad de eventos críticos, especialmente en entornos con múltiples estímulos visuales.

Tabla N°. 22

Leds vs evento

LED - EVENTO - ACCIÓN - JUSTIFICACIÓN ERGONOMICA							
LED	Color	Tipo de señal	Condición en el código	Evento detectado	Acción correctiva	Justificación ergonómica	Criterio operativo
LED_OK	Verde	Fijo	!alarmFridge && !lastProbeErrorState; digitalWrite(LED_OK, HIGH);	Operación normal	Ninguna	El color verde se asocia universalmente con condiciones seguras, permitiendo identificación inmediata sin esfuerzo cognitivo	Indica estabilidad del sistema y continuidad operativa
LED_ALARM	Rojo	Parpadeo	alarmFridge == true; digitalWrite(LED_ALARM, (millis()/300)%2);	Temperatura fuera de rango	Verificar sistema de refrigeración	El color rojo representa peligro; el parpadeo incrementa la atención visual y prioriza la alerta en entornos con múltiples estímulos	Señal de intervención inmediata del operador
LED_ERROR	Rojo	Fijo	probeError == true; digitalWrite(LED_ERROR, HIGH);	Fallo del sensor (NTC)	Revisar sensor o conexiones	El rojo fijo indica condición crítica permanente, diferenciándose del parpadeo (alarma de proceso)	Indica fallo del sistema de medición, no del proceso
TODOS	Apagados / transición	Temporal	resetActive == true	Reinicio del sistema	Esperar estabilización	La ausencia de señal evita interpretaciones erróneas durante estados transitorios	Indica que el sistema no está en operación estable

Nota. Elaboración propia.

Los LEDs se ubican en la parte frontal del sistema, garantizando visibilidad directa para el operador. Esta disposición permite su percepción incluso en condiciones de baja iluminación, típicas de cámaras de refrigeración. La diferenciación por color e intermitencia asegura que el estado del sistema sea identificado en menos de un segundo, sin necesidad de interacción con la interfaz digital.

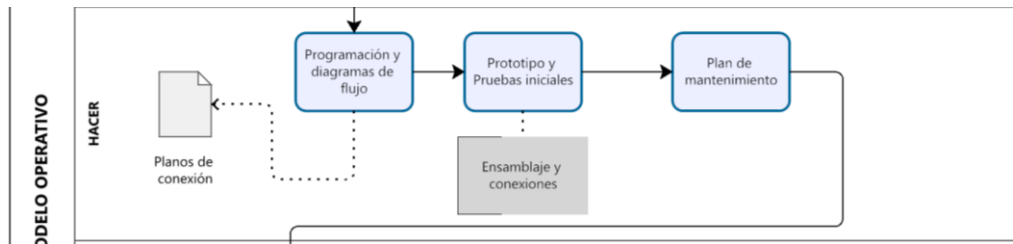
HACER

En esta etapa del ciclo de mejora, propuesto para el caso de estudio, se realiza la conexión de los elementos de entrada con respecto a los elementos de salida, considerando un proceso matemático para monitoreo de temperatura. *Figura N°. 18*

Se analiza los resultados matemáticos y se construye la conexión de los elementos.

Figura N°. 34

PHVA – Segunda etapa - Hacer



Nota. se describe la segunda etapa del ciclo PHVA – HACER. *Figura N°. 18*

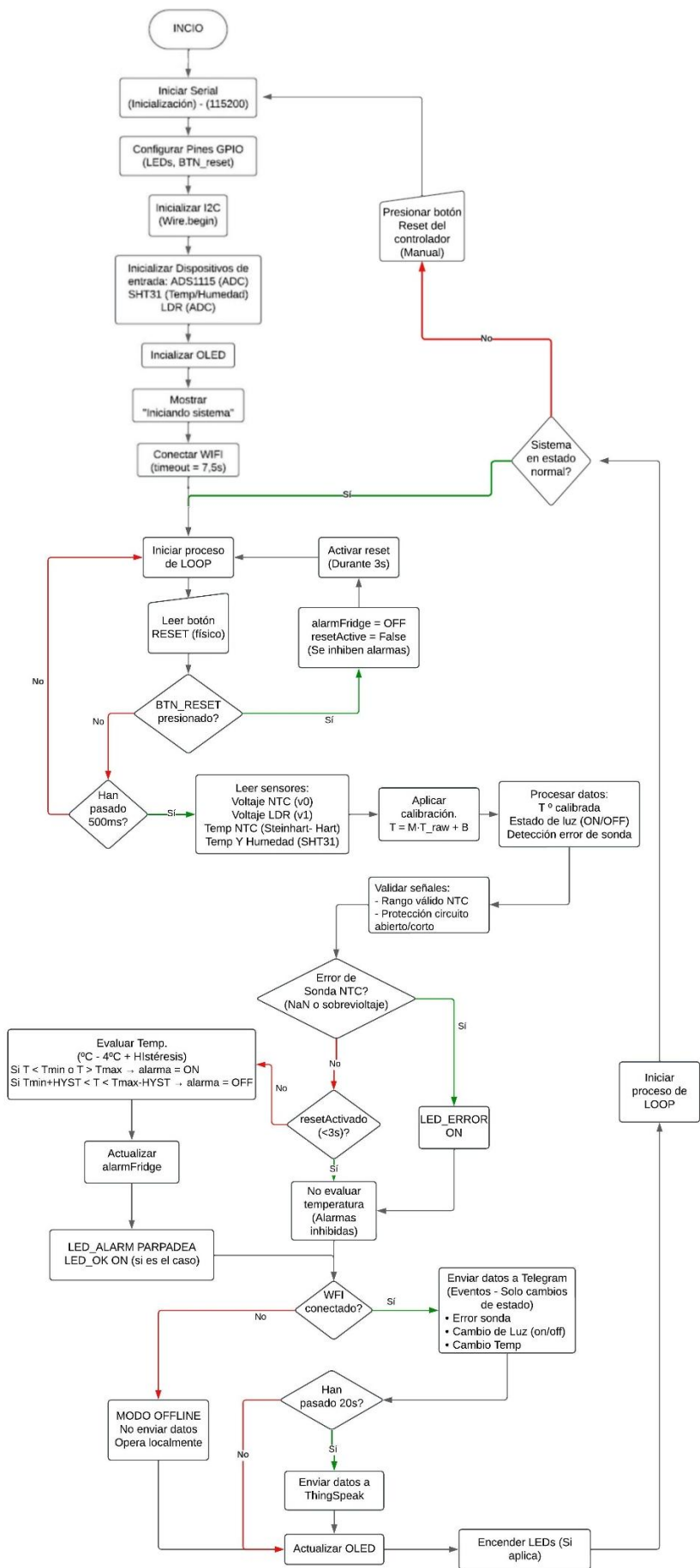
Programación.

Para este punto se usa el software Arduino IDE que permite programar, compilar y cargar código en placas Arduino y microcontroladores compatibles como ESP8266 y ESP32. Usa un lenguaje basado en C/C++, incluye herramientas de depuración como el Monitor Serie y facilita el desarrollo de proyectos electrónicos e IoT gracias a sus librerías y amplia compatibilidad.

El siguiente diagrama de flujo describe el funcionamiento general del sistema, detallando cada una de las etapas desde la inicialización hasta la operación continua. Se incluyen los procesos de configuración de hardware, lectura de sensores, validación de datos, gestión de errores y comunicación con servicios externos. Además, se contemplan condiciones especiales como el reinicio manual, la verificación del estado del sistema y el manejo de alarmas. Este esquema permite visualizar de manera clara la lógica de control implementada y facilita la comprensión del comportamiento del sistema en sus diferentes estados de operación.

Figura N°. 35

Estructura del código



Nota. Elaboración propia

Como se observa en el diagrama, el sistema opera de manera cíclica mediante un bucle principal en el que se monitorean continuamente las condiciones de los sensores y el estado del dispositivo. Se implementan mecanismos de control para la activación de alarmas, validación de datos y manejo de errores, garantizando un funcionamiento seguro y confiable. Asimismo, se integran procesos de comunicación para el envío de información a plataformas externas, así como modos de operación alternativos en caso de pérdida de conexión. Este flujo asegura una respuesta adecuada ante diferentes escenarios y condiciones del sistema.

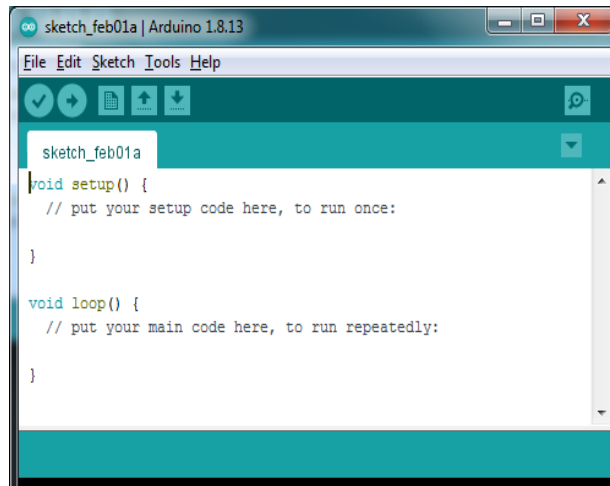
Diseño conceptual

El diagrama de flujo fue desarrollado directamente a partir de la lógica implementada en código, garantizando coherencia funcional. Incluye control no bloqueante, validación de señales, calibración metrológica, gestión de eventos y priorización de estados críticos, lo que asegura un comportamiento robusto del sistema en condiciones reales.

El objetivo principal es diseñar un sistema de monitoreo para cámaras de refrigeración mediante un equipo de sistema automático que disminuya el tiempo de respuesta ante intervenciones correctivas o preventivas, para este caso de estudio, las variables a ser analizadas son temperatura, humedad e iluminación, los hardware (ESP8266, ADS1115, OLED, LEDs), se ha definido por capas/etapas la creación del código. El software utilizado es el ARDUINO IDE, como se observa la interfaz que dispone.

Figura N°. 36

Interfaz ARDUINO – IDE

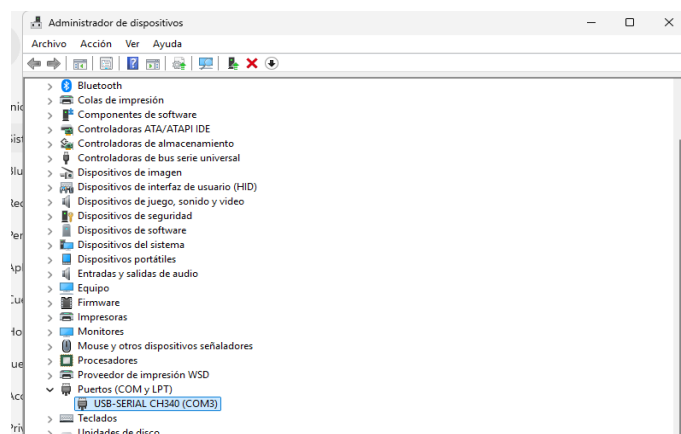


Nota. Elaboración propia, interfaz del software usado.

Como primer paso para iniciar la programación, se recomienda conectar el dispositivo del controlador al PC con el fin de detectarlo en el administrador de dispositivos del computador, como se observa en la siguiente imagen.

Figura N°. 37

Software ARDUINO IDE – Detectar dispositivo



Nota. Elaboración propia. Se visualiza el administrador de dispositivos verificar la conexión del controlador vs PC. Elaboración propia.

Gestión de librerías

Las librerías que se van a usar son las siguientes, esto depende por lo general de los dispositivos de entrada y salida que se usen para el caso de estudio son las siguientes.

Tabla N°. 23

Librerías

Librería	Función Principal	Importancia en el Proyecto
Wire.h	Protocolo de comunicación I2C.	Es el "idioma" que permite al ESP8266 hablar con el ADC, la pantalla OLED y el sensor SHT31 usando solo dos cables (SDA/SCL).
Adafruit_ADS1X15.h	Driver del conversor analógico-digital.	Permite leer la sonda SB70 con una resolución de 16 bits, lo cual es mucho más preciso que el lector nativo del ESP8266.
Adafruit_SSD1306.h	Controlador del hardware OLED.	Gestiona el encendido de los píxeles individuales en la pantalla física para mostrar los datos en tiempo real.
Adafruit_GFX.h	Motor de funciones gráficas.	Proporciona las herramientas para dibujar texto, líneas y gestionar el tamaño de las fuentes en la interfaz HMI.
math.h	Operaciones matemáticas avanzadas.	Fundamental para ejecutar la ecuación de Steinhart-Hart, que convierte la resistencia del NTC en grados Celsius mediante logaritmos.
Adafruit_SHT31.h	Driver de sensor ambiental.	Gestiona la lectura digital de la temperatura y humedad ambiente, garantizando datos calibrados de fábrica.
ESP8266WiFi.h	Gestión de conectividad inalámbrica.	Permite al chip escanear redes, autenticarse con tu SSID/Password y mantener la pila de protocolos TCP/IP activa.
ESP8266HTTPClient.h	Cliente de peticiones web.	Se encarga de "empaquetar" tus datos y enviarlos a la API de ThingSpeak mediante el método HTTP GET.

WiFiClientSecure.h	Seguridad y cifrado de datos.	Establece la capa de seguridad SSL necesaria para que Telegram acepte la conexión del dispositivo.
UniversalTelegramBot.h	Interfaz de mensajería (API Bot).	Traduce tus variables de estado a un formato que el servidor de Telegram entiende para enviarte notificaciones al celular.
ArduinoJson.h	Serialización de datos.	Permite estructurar y procesar la información en formato JSON, estándar en la comunicación entre dispositivos IoT y la nube.

Nota. Elaboración propia

Figura N°. 38

Librerías – Arduino IDE

```

10 // --- [CAPA 1: GESTOR DE DEPENDENCIAS Y LIBRERÍAS] ---
11 // Inclusión de bibliotecas externas para el control de periféricos y protocolos.
12 #include <Wire.h> // Protocolo I2C para comunicación síncrona maestro-esclavo.
13 #include <Adafruit_ADS1X15.h> // Driver para el ADC de alta resolución (16 bits).
14 #include <Adafruit_GFX.h> // Núcleo de funciones gráficas avanzadas.
15 #include <Adafruit_SSD1306.h> // Controlador específico para el panel OLED 128x64.
16 #include <math.h> // Librería matemática para funciones logarítmicas (NTC).
17 #include <Adafruit_SHT31.h> // Driver para sensor capacitivo de humedad relativa.
18 #include <ESP8266WiFi.h> // Driver de red para el SoC ESP8266.
19 #include <ESP8266HTTPClient.h> // Implementación del protocolo HTTP (REST API).
20 #include <WiFiClientSecure.h> // Capa de seguridad TLS/SSL para Telegram.
21 #include <UniversalTelegramBot.h> // Wrapper para la API de bots de mensajería.
22 #include <ArduinoJson.h> // Serialización y parseo de objetos JSON.

```

Nota. Elaboración propia. Se visualiza las librerías usadas para el proyecto.

A continuación, se detalla la estructura fundamental del código con respecto a las librerías escogidas.

Tabla N°. 24

Argumento técnico – librerías

Pilar	Resumen del Argumento Técnico
Eficiencia (Modularidad)	El uso de librerías especializadas permite una programación por capas. Esto significa que el código no es un bloque rígido, sino un sistema modular donde la gestión de sensores está separada de la comunicación. Esto facilita el mantenimiento futuro y permite identificar errores rápidamente sin comprometer todo el sistema.
Telemetría (IoT)	La integración de HTTPClient y WiFiClientSecure eleva el proyecto a estándares industriales de IoT. El sistema realiza una gestión dual de datos: almacenamiento histórico y analítica en ThingSpeak, junto con notificaciones críticas en tiempo real vía Telegram, garantizando una supervisión constante.
Precisión (Metrología)	La librería del ADS1115 es el motor de integridad de la sonda SB70. A diferencia de los conversores básicos, esta permite una lectura de alta resolución que filtra el ruido electromagnético ambiental, asegurando que el dato de temperatura mostrado sea estable y fiel a la realidad térmica de la cámara.

Nota. Elaboración propia

Definición de parámetros y calibración

En esta sección, se detalla los parámetros usados para el caso de estudio, por ejemplo, las constantes eléctricas usadas son las siguientes, cabe recalcar que estos valores fueron obtenidos de manera matemática como se detalla en el modelo matemático.

Figura N°. 39

Parámetros de calibración.

```
53 /* --- [CAPA 4: PARÁMETROS METROLÓGICOS Y CALIBRACIÓN] --- */
54 // Variables para el procesamiento de datos del sensor NTC (SB70).
55 const float VCC_REAL = 3.318f; // Voltaje de alimentación medido en el riel.
56 const float R_FIXED = 9800.0f; // Resistencia de referencia en el divisor de tensión.
57 const float R25 = 10000.0f; // Resistencia característica del NTC a 25°C.
58 const float T0 = 298.15f; // Temperatura base en Kelvin.
59 float BETA = 6030.0f; // Coeficiente de sensibilidad térmica del NTC.
60 float K_V = 1.6467f; // Coeficiente de compensación de lectura.
61 const float CAL_M = 1.0f; // Pendiente de ajuste lineal (Calibración).
62 const float CAL_B = -0.90f; // Intercepto/Desplazamiento (Calibración).
63
64 // Definición de Límites de Control Térmico
65 const float FRIDGE_MIN = 0.0f; // Límite de refrigeración inferior.
66 const float FRIDGE_MAX = 4.0f; // Límite de refrigeración superior.
67 const float HYST = 0.5f; // Margen de histéresis para estabilidad del lazo.
68 bool alarmFridge = false; // Estado lógico de la alarma.
69
```

Nota. Elaboración propia

Límites operativos

Se establecen límites para la cámara de refrigeración:

Tabla N°. 25

Límites operativos

Parámetro	Valor
FRIDGE_MIN	0°C
FRIDGE_MAX	4°C
HYST	0.5°C

Nota. Elaboración propia

La histéresis evita activaciones repetidas de la alarma.

Variables de estado

Estas variables permiten al sistema recordar eventos:

- alarmFridge
- resetActive
- probeError

- lightOn

CÁLCULOS

En esta sección de cálculos se desarrolla la fundamentación matemática y electrónica del sistema de monitoreo térmico y lumínico implementado con el microcontrolador ESP8266 NodeMCU, el conversor analógico–digital ADS1115, el sensor de temperatura NTC SB70, el sensor digital SHT31 y un sensor LDR para la detección de iluminación en cámaras de refrigeración.

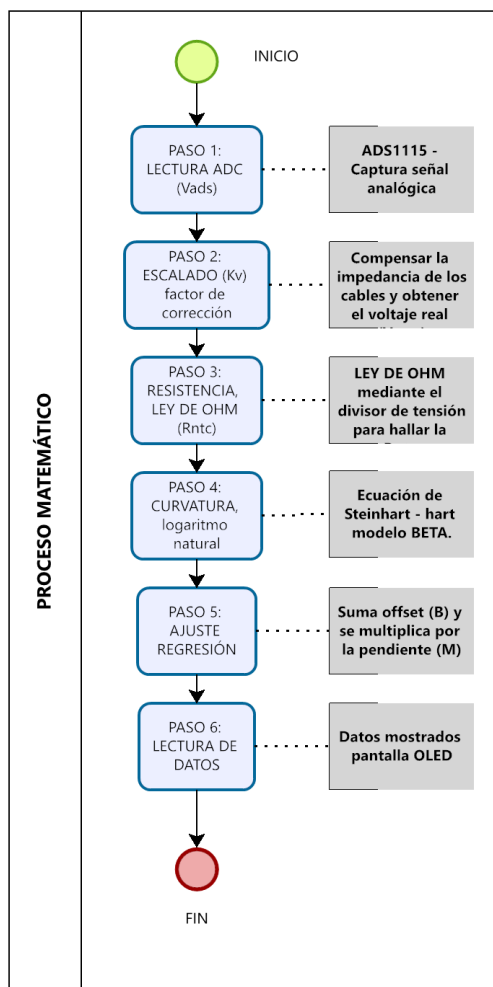
El sistema incorpora un proceso de calibración experimental orientado a garantizar la precisión de las mediciones obtenidas mediante el sensor NTC, el cual se fundamenta en la comparación directa con dos fuentes de referencia: el sensor digital SHT31 y un termómetro externo tipo lápiz, considerado como instrumento patrón de verificación.

Dicha calibración permitió ajustar el modelo matemático de conversión resistencia–temperatura, así como los factores de corrección implementados en el software del microcontrolador, asegurando coherencia entre la medición física y su representación digital dentro del sistema.

Finalmente, el modelo matemático empleado para el monitoreo de refrigeración, representado en el diagrama de flujo correspondiente, se aplica considerando los elementos de entrada previamente definidos.

Figura N°. 40

Proceso matemático



Nota. Elaboración propia.

Paso 1 – Lectura ADS1115

Para realizar este cálculo, se debe considerar ya tener conectado el controlador más el ADS1115, y la sonda full Gauge, se usa la siguiente fórmula:

Tabla N°. 26

Fórmulas paso 1 – Lectura ADS1115

FÓRMULAS	DESCRIPCIÓN
$Lectura\ ADC = V_{ads} \quad (1)$	- $V_{ads} = Voltaje\ leído$
$K = \frac{V_{real}}{V_{ads}} \quad (2)$	V_{real} = <i>Voltaje medido (multímetro)</i>
$Voltaje\ corregido: V_{corr} = V_{ads} * K_V \quad (3)$	- $K_V = Factor\ K$
	- $V_{corr} = Voltaje\ corregido$

Nota. Elaboración propia.

Lectura y calibración del voltaje (Factor K)

Las pruebas mostraron discrepancias entre: Voltaje real medido con multímetro (V_{real}) vs Voltaje reportado por el ADS1115 (V_{ads}), por tanto, se obtiene los siguientes datos y se realiza la solución a las fórmulas planteadas.

Datos:

$$V_{real} = 0.6879 V$$

$$V_{ads} = 0.4178 V \quad (1)$$

Esto implica un error sistemático, para corregirlo, se utiliza una calibración lineal:

Cálculo del factor K

$$K = \frac{V_{real}}{V_{ads}} \quad (2)$$

$$K = \frac{0.6879}{0.4178} = 1.6467$$

$$K = 1.6467$$

Una vez que ya se tiene definido que $K = 1.6467$ en nuestro código, el sistema lo aplica automáticamente en cada ciclo para obtener el valor que mencionas.

Paso 2 – Factor de corrección

El factor de corrección se usa en este caso por un desfase en las lecturas de voltaje real vs el voltaje que emite el ADS1115.

$$V_{corr} = K \cdot V_{ads} \quad (3)$$

- Desarrollo de la fórmula

$$V_{corr} = 1.6467 * 0.4178v = 0.6879v$$

$$V_{corr} = 0.6879v$$

V_{real}	V_{corr}
0.6879v	0.6879v

Como se observa en los valores de las fórmulas empleadas, se tiene una igualdad entre el valor real de voltaje medido mediante el multímetro vs el factor de corrección.

Paso 3 – Ley de Ohm – (Etapa de transducción)

Para esta fase, se toma en cuenta los valores de resistencia que emite la sonda SB70 FULL GAUGE, con el fin de determinar la resistencia real calculada, para ello se usa la ley de Ohm, descrita de la siguiente forma.

Fórmula:

$$\text{Cálculo de Ohmios: } R_{ntc} = R_{fixed} * \left(\frac{V_{cc}}{V_{corr}} - 1 \right) \quad (4)$$

Donde:

R_{ntc} = resistencia real – calculada

R_{fixed} = Valor resistencia nominal (9.8k Ω)

V_{cc} = voltaje real de alimentación

Desarrollo de la formula:

Con el voltaje corregido, calculamos la resistencia actual del termistor NTC

$$R_{ntc} = R_{fixed} * \left(\frac{V_{cc}}{V_{corr}} - 1 \right)$$
$$R_{ntc} = 9800 \Omega * \left(\frac{3.318v}{0.6879} - 1 \right) = 37469.07 \Omega$$

$$\mathbf{R_{ntc} = 37469.07 \Omega}$$

Paso 4 – Curvatura Steinhart-Hart (Modelo Beta)

La relación entre la resistencia y la temperatura en un termistor NTC no es lineal. Se utiliza la simplificación de la ecuación de Steinhart-Hart, conocida como el Modelo B, que es el estándar en la industria de la refrigeración para sensores como el Full Gauge SB70.

Fórmula:

$$\text{Ecuación general} = \frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C [\ln(R)]^3$$

$$\text{Ecuación BETA} = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} * \ln \left(\frac{R_{ntc}}{R_{25}} \right)$$

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{R_{ntc}}{R_{25}} \right)}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}} \quad (5)$$

Donde:

T = temperatura absoluta resultante del modelo físico. (kelvin "k")

T_0 = temperatura de referencia estándar (25°C = 298.15k)

β = Beta – coeficiente de temperatura característico del material

R_{ntc} = resistencia real – calculada

R_{25} = resistencia nominal del termistor a 25°C = 10000 Ω

Desarrollo de la formula:

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{R_{ntc}}{R_{25}} \right)}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}} \quad (5)$$

Para poder obtener el valor del coeficiente de temperatura característico del material se debe considerar hacer una comparativa de temperaturas, es decir, la temperatura ambiente vs la temperatura en algún punto casi cero, posterior a ello, se debe colocar en °C los valores obtenidos, a continuación se desarrolla la ecuación de Beta, con los valores obtenidos del monitor serial del software ARDUINO IDE y se hizo la prueba en físico con un termómetro digital, con el fin de garantizar una calibración correcta.

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{R_{ntc}}{R_{25}} \right)}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}} \quad (5)$$

Datos:

$T_{REAL} = 4.9^{\circ}C$ (termómetro)

$T_0 = 25^{\circ}C$ (298.15 °K); RESISTENCIA = 10000 Ω

$T_{raw} = 5.8^{\circ}C$ (278.95 °K); RESIST = 37469.07 Ω (Calculado con la ley de Ohm)

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{37469.07 \Omega}{10000 \Omega}\right)}{\frac{1}{278.95K} - \frac{1}{298.15K}} = 5722 K$$

$$\beta = 5722 K$$

$$T_{raw} = 5.8^{\circ}C$$

Al analizar estos datos verificamos que 0.9 grados de diferencia tiene con respecto al termómetro. Por tanto, este parámetro se lo corrige mediante el cálculo del offset o intercepto (B), es decir existe un error sistemático de desplazamiento, esto se corrige con el cálculo de la pendiente.

TERMOMETRO TIPO LAPIZ: 5.7°C

PRUEBA 2: DESARROLLO DE LA FÓRMULA.

$$T_0 = 25^{\circ}C (298.15 \text{ }^{\circ}K); RESISTENCIA = 10000 \Omega$$

$$T = 6.6^{\circ}C (279.75 \text{ }^{\circ}K); RESISTENCIA = 37824.7 \Omega \text{ (Calculado con la ley de Ohm)}$$

$$T_{REAL} = 5.7^{\circ}C \text{ (TERMÓMETRO)}$$

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{37824.7 \Omega}{10000 \Omega}\right)}{\left(\frac{1}{279.75K} - \frac{1}{298.15K}\right)} = 6030$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{279.75} + \frac{1}{6030} * \ln\left(\frac{37824.7 \Omega}{10000 \Omega}\right)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{298.15} + \frac{\ln(3.78247)}{6030}$$

$$T = \frac{1}{0.0035868} = 279.75 K$$

$$T = 279.75^{\circ}K$$

Fórmula:

Se convierte la resistencia en temperatura absoluta (Kelvin) y luego a grados Celsius

$$\text{Temperatura real en } ^{\circ}C : T_{raw} = T - 273.15 \quad (6)$$

$$T_{raw} = 279.75K - 273.15$$

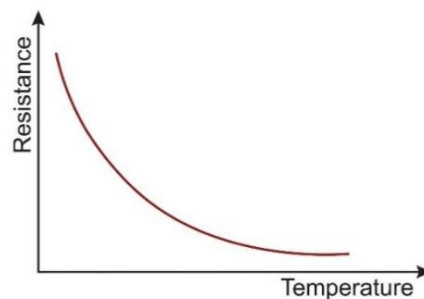
$$T_{raw} = 6.6^{\circ}C$$

T_{REAL}	T_{raw}
5.7°C	6.6°C

Cabe recalcar que el termistor NTC es un dispositivo semiconductor cuya resistencia disminuye exponencialmente con el aumento de temperatura. Su elevada sensibilidad lo convierte en un elemento fundamental para aplicaciones de medición y control térmico, aunque su naturaleza no lineal requiere métodos de calibración o linealización en sistemas de medición de alta precisión, es decir, la resistencia disminuye conforme aumenta la temperatura, la disminución es no lineal, con mayor variación a bajas temperaturas. Como se observa en la siguiente gráfica.

Figura N°. 41

NTC – Temperatura vs Resistencia



NTC Thermistor

Nota. Elaboración propia.

Paso 5 -Ajuste de regresión

Es decir, existe un desfase entre la lectura del sensor vs la realidad para corregir este error se aplica la siguiente fórmula.

Cálculo del OFFSET o Intercepto:

FÓRMULA:

$$B = T_{REAL} - (M * T_{RAW}) \quad (6)$$

DONDE:

$B = \text{Offset}$

$T_{Real} = \text{Temperatura real}$

$T_{RAW} = \text{Temperatura del sistema}$

$M = \text{Pendiente}$

Para este punto se escoge una nueva muestra, que se detallan a continuación.

DATOS:

$T_{raw} = 6.60^{\circ}\text{C}$

$T_{REAL} = 5.7^{\circ}\text{C}$ (termómetro)

$R_{NTC} = 39168.1 \text{ OHM}$

DESARROLLO DE LA FÓRMULA:

$$B = T_{REAL} - (M * T_{RAW})$$

$$B = 5.7^{\circ}\text{C} - (1.00 * 6.60^{\circ}\text{C})$$

$$B = -0.90$$

El valor negativo indica que el sensor tiene una lectura sobre dimensionada (marca más calor del que hay). Al aplicar este valor de -0.90°C en el firmware, el sistema resta este exceso logrando la exactitud deseada, a continuación, se toma nuevamente nuevos datos de temperatura para confirmar la pendiente del sistema con la siguiente fórmula:

$$M = \frac{T_{real(2)} - T_{real(1)}}{T_{raw(2)} - T_{raw(1)}} \quad (7)$$

Donde:

$M = \text{Pendiente}$

$T_{Real} = \text{Temperatura real (1)}$

$T_{RAW} = \text{Temperatura del sistema (1)}$

$T_{Real} = \text{Temperatura real (2)}$

T_{RAW} = Temperatura del sistema (2)

DATOS:

Tabla N°. 27

Datos

SENSOR	°T – real	°T sistema (raw)
PUNTO 1 (FRÍO)	5.80°C	6.73°C
PUNTO 2 (AMBIENTE)	24.50°C	25.43°C
TOTAL (resta)	18.70°C	18.70°C

Nota. elaboración propia

DESARROLLO DE LA FÓRMULA:

$$M = \frac{T_{real(2)} - T_{real(1)}}{T_{raw(2)} - T_{raw(1)}} = \frac{24.50^{\circ}\text{C} - 5.80^{\circ}\text{C}}{25.43^{\circ}\text{C} - 6.73^{\circ}\text{C}} = \frac{18.70^{\circ}\text{C}}{18.70^{\circ}\text{C}} = 1$$

$$M = 1$$

Paso 6 – Visualización de temperatura en SSD1306

FÓRMULA:

$$T_{cal} = (T_{RAW} * M) - B \quad (8)$$

Mostrar $T_{cal} = OLED$

DONDE:

T_{cal} = Temperatura con ajuste de regresión

T_{RAW} = Temperatura del sistema

M = Pendiente

B = Offset

Secuencia de arranque (SETUP)

Esta etapa ocurre solo una vez cuando el sistema se enciende, además, se realiza la asignación de pines del controlador ESP8266, con respecto a los dispositivos hardware que se dispone, se muestra el código realizado en el software de Arduino IDE.

Pasos del arranque

- Energizar el sistema
- Configurar pines GPIO
- Inicializar bus I2C
- Inicializar sensores
- Inicializar pantalla OLED
- Conectar WiFi

Si la conexión falla el sistema entra en modo offline.

Figura N°. 42

Parámetros de arranque.

```
37 /* --- [CAPA 3: CONFIGURACIÓN DE PERIFÉRICOS I/O] --- */
38 // Definición de geometría de pantalla y direcciones de hardware.
39 #define SCREEN_WIDTH 128
40 #define SCREEN_HEIGHT 64
41 Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);
42 Adafruit_ADS1115 ads; // Conversor Analógico-Digital.
43 Adafruit_SHT31 sht31 = Adafruit_SHT31();
44
45 // Asignación de pines (Pinout del ESP8266 NodeMCU)
46 #define PIN_I2C_SDA D2 // Bus de Datos I2C.
47 #define PIN_I2C_SCL D1 // Bus de Reloj I2C.
48 #define LED_OK D5 // Feedback visual: Estado Óptimo.
49 #define LED_ALARM D6 // Feedback visual: Fuera de Rango.
50 #define LED_ERROR D7 // Feedback visual: Fallo Crítico de Hardware.
51 #define BTN_RESET D4 // Pulsador de interrupción manual de alarma.
```

Nota. Elaboración propia.

Ciclo principal – monitoreo en tiempo real

Núcleo del Sistema (Loop)

Esta es la parte más importante del sistema. El programa entra en un ciclo infinito donde ejecuta varias tareas.

Lectura de sensores

Se adquieren datos de:

- NTC (temperatura interna)

- LDR (estado de luz)
- SHT31 (temperatura y humedad ambiental)

Procesamiento de datos

Los datos pasan por varias etapas:

- Conversión voltaje → resistencia
- Conversión resistencia → temperatura
- Aplicación de calibración

Esto mejora la precisión del sistema.

Evaluación de condiciones

El sistema analiza:

- error de sonda
- temperatura fuera de rango
- luz encendida

Esto permite detectar eventos relevantes.

Generación de estados

Se generan estados internos del sistema:

- alarma de temperatura
- error de sensor
- luz activada

Estos estados activan alertas y acciones

Comunicación

Por tanto, cabe mencionar que se ha aplicado dos tipos de protocolos de comunicación el primero es de forma física (cómo se conectan los cables) y el otro protocolo es de red/aplicación (cómo viajan los datos por internet), a continuación, se detalla las características de cada uno de los protocolos usados.

A. Protocolos de Comunicación Local (Hardware)

Estos protocolos ocurren dentro de tu placa de circuito, entre el ESP8266 y los sensores.

- **I2C (Inter-Integrated Circuit):** Es el protocolo maestro del proyecto, gestionado por la librería Wire.h.
- **Uso:** Conecta el ESP8266 con el ADS1115 (ADC), el SHT31 (Humedad) y la pantalla OLED.
- **Ventaja:** Permite que todos estos dispositivos compartan solo dos cables (SDA y SCL), reduciendo la complejidad del hardware.
- **Señal Analógica (Divisor de Tensión):** Aunque no es un protocolo digital, la sonda SB70 entrega una variación de voltaje analógica que el ADS1115 digitaliza con alta resolución (16 bits) para garantizar la precisión térmica.

B. Protocolos de Red y Aplicación (Cloud/IoT)

Este protocolo permite que el dispositivo interactúe con el mundo exterior a través del WiFi.

- **TCP/IP (Stack de Red):** Gestionado por la librería ESP8266WiFi.h. Es la base que permite al dispositivo obtener una dirección IP y conectarse a internet.
- **HTTP (HyperText Transfer Protocol):** Utilizado a través de la librería ESP8266HTTPClient.h.
- **Uso:** El sistema envía peticiones tipo GET hacia la API de ThingSpeak para actualizar los 5 canales (Fields) de telemetría.
- **HTTPS / TLS (Seguridad):** Implementado mediante WiFiClientSecure.h.
- **Uso:** Es un protocolo de cifrado esencial para la comunicación con Telegram. Sin este protocolo de "capa segura", los servidores de mensajería rechazarían la conexión del bot por falta de encriptación.

A continuación, se detalla un resumen de los protocolos usados.

Tabla N°. 28

Protocolos de comunicación

Tipo	Protocolo	Función en tu Tesis
Local	I2C	Comunicación síncrona entre el microcontrolador y los periféricos (sensores/pantalla).
IoT	HTTP	Transferencia de datos de telemetría hacia la plataforma ThingSpeak.
Seguridad	TLS/SSL	Cifrado punto a punto para el envío seguro de alertas a Telegram.

Nota. Elaboración propia

A continuación, se detalla el tipo de envío de datos se usó para el caso de estudio a través de IOT (internet de las cosas), se usó HTTP (ThingsSpeak) y HTTPS/TLS (Telegram), por ende, se detalla la justificación

Optimización de Recursos: ThingSpeak recibe datos constantes de 5 canales (Fields). Al usar HTTP, ahorras memoria RAM y ciclos de reloj del procesador, evitando que el equipo se "congele" por exceso de cálculos matemáticos.

- **Capa de Seguridad (Privacy):** Telegram exige HTTPS porque maneja información sensible (tu ID de chat y el Bot Token). Usar la librería WiFiClientSecure.h garantiza que nadie pueda "escuchar" la red y robar las credenciales de tu sistema de monitoreo.

Estándar de la Industria: Al combinar ambos, demuestras que tu prototipo sigue las mejores prácticas de la Industria 4.0, donde la eficiencia y la seguridad deben equilibrarse.

Los 5 Canales (Fields) usados en la Plataforma HTTP (ThingSpeak)

Los protocolos sirven para que estos datos lleguen correctamente a la nube:

Tabla N°. 29*Campos de monitoreo – Field*

Campo (Field)	Variable Monitoreada	Significado Lógico
Field 1	Estado Térmico	1: Operación Normal / 0: Alarma de Rango
Field 2	Temperatura Sonda SB70	Valor numérico en °C de la sonda principal
Field 3	Humedad SHT31	Porcentaje de humedad relativa del ambiente
Field 4	Sensor Lumínico LDR	1: Iluminación OK / 0: Alerta de luz detectada
Field 5	Integridad Sonda	1: Conexión OK / 0: Fallo o desconexión física

Nota. Elaboración propia**Tabla N°. 30***Sistema de comunicación IOT: HTTP vs HTTPS*

Característica	HTTP (ThingSpeak)	HTTPS / TLS (Telegram)
Definición	Protocolo de transferencia de hipertexto plano.	Protocolo seguro con cifrado de capa de transporte.
Seguridad	Los datos viajan en texto claro (sin cifrar).	Los datos viajan cifrados mediante una "llave" digital.
Consumo de RAM	Bajo: El ESP8266 procesa la petición rápidamente.	Alto: Requiere memoria adicional para el cifrado/descifrado.
Uso en tu Tesis	Envío de telemetría constante (cada 20s) a los 5 Fields.	Envío de alertas críticas y reportes de eventos al celular.

Nota. Elaboración propia

A continuación, se detalla las configuraciones del sistema y credenciales que se usaron en las pruebas respectivas.

Figura N°. 43

Parámetros de red y autenticación servidores externos.

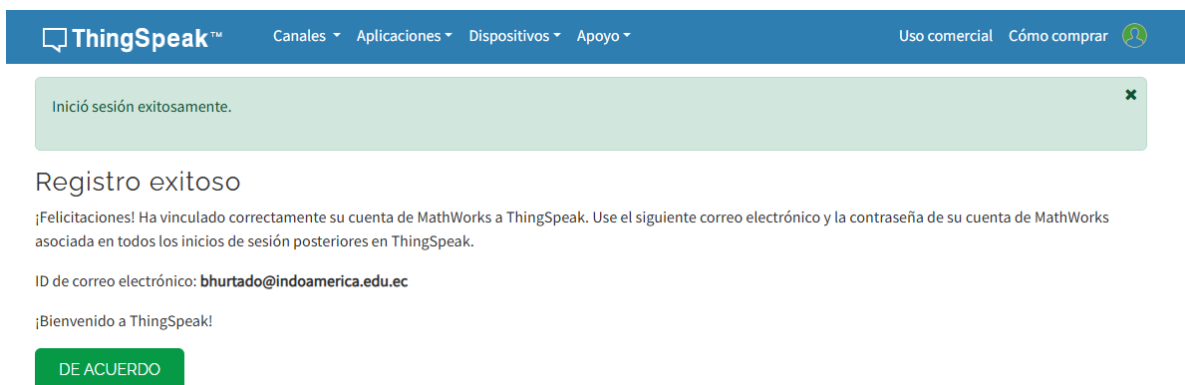
```
24 /* --- [CAPA 2: DEFINICIONES DE SISTEMA Y CREDENCIALES] --- */
25 // Parámetros de red y llaves de autenticación para servicios externos.
26 const char* ssid = "SIMANTEC_SANTHY";
27 const char* password = "Rubicon7.9";
28 const char* serverPath = "http://api.thingspeak.com/update"; // Endpoint de telemetría.
29 const char* apiKey = "3Z4YL3G5LSK0X6HQ"; // Write API Key de ThingSpeak.
30 #define BOTtoken "8791499029:AAEXfNJe0XgmF089x7Gn3GNrB76J8L1Unik"
31 #define CHAT_ID "2136554921"
32
33 // Objetos globales de comunicación segura.
34 WiFiClientSecure clientSecure;
35 UniversalTelegramBot bot(BOTtoken, clientSecure);
```

Nota. Elaboración propia

Cabe recalcar que, para poder continuar con el armado del código es necesario crear una cuenta en la plataforma de ThingSpeak con el fin de obtener APIKEY obtenido de la plataforma.

Figura N°. 44

Interfaz ThingSpeak – login



Nota. Elaboración propia.

Interfaz Hombre – Máquina

Esta capa permite la interacción directa con el usuario, es decir se podrá visualizar las condiciones normales de la cámara de refrigeración, en la pantalla OLDED, además, la visualización de las gráficas en la plataforma ThingSpeak tanto en el móvil como en la pág

oficial, cuenta también con notificación al móvil mediante la plataforma de Telegram, a continuación, se detallan los elementos mencionados.

Pantalla OLED

Muestra en tiempo real: dirección IP, temperatura interna, temperatura y humedad ambiental, estado de la luz, estado de la sonda.

Figura N°. 45

Modo: ONLINE VS OFFLINE



Nota. Elaboración propia.

Tabla N°. 31

Leds - funcionamiento

LED	Significado
LED_OK	Sistema funcionando correctamente
LED_ALARM	Temperatura fuera de rango
LED_ERROR	Fallo del sensor

Nota. Elaboración propia. El LED de alarma parpadea para mejorar visibilidad.

En las siguientes imágenes, se visualiza los 5 campos a ser monitoreados, en la plataforma del software libre - ThingSpeak ([http](http://)).

Figura N°. 46

Monitoreo – ThingSpeak ([http](http://))



Nota. Elaboración propia. Plataforma HTTP (ThingSpeak)

En las siguientes imágenes, se puede observar cómo fue armado el código de Arduino, a su vez el proceso final de notificaciones con una captura de pantalla sobre las alertas.

Figura N°. 47

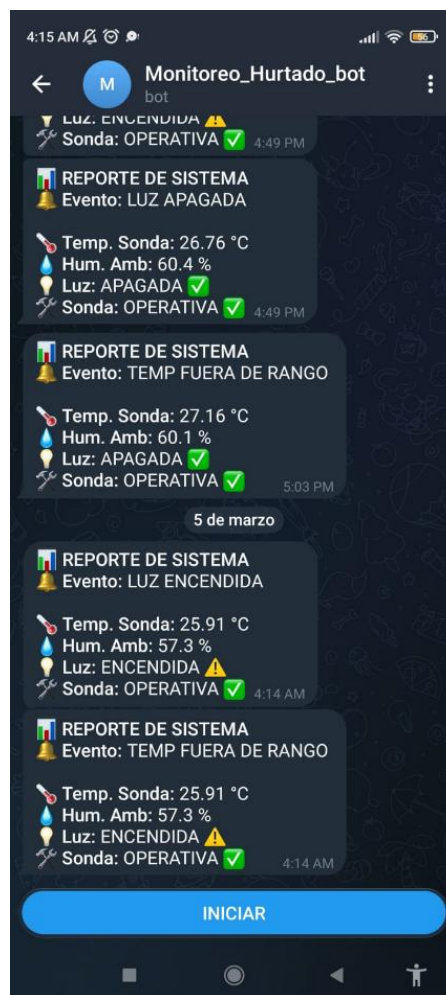
Armado del código para Notificaciones en Telegram.

```
95 // Interfaz de mensajería para alertas remotas.
96 void sendTelegramReport(String evento, float temp, float hum, bool luz, bool errorSonda) {
97     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;
98     String mensaje = "📡 *REPORTE DE SISTEMA*\n";
99     mensaje += "🔔 *Evento:* " + evento + "\n\n";
100    mensaje += "🌡️ *Temp. Sonda:* " + (errorSonda ? "N/A (ERROR)" : String(temp, 2) + " °C") + "\n";
101    mensaje += "💧 *Hum. Amb:* " + String(hum, 1) + "%\n";
102    mensaje += "💡 *Luz:* " + String(luz ? "ENCENDIDA ⚠️" : "APAGADA ✅") + "\n";
103    mensaje += "🔧 *Sonda:* " + String(errorSonda ? "FALLO TECNICO ❌" : "OPERATIVA ✅");
104    bot.sendMessage(CHAT_ID, mensaje, "Markdown");
105 }
```

Nota. Elaboración propia.

Figura N°. 48

Interfaz – Telegram (<https>)



Nota. Elaboración propia.

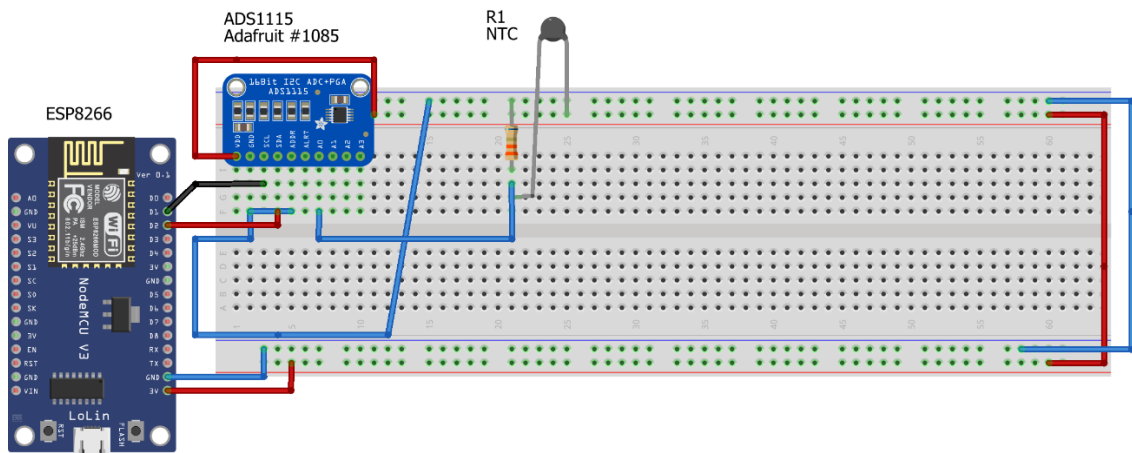
Conexión (prototipo diagramas)

A continuación, se grafica paso a paso las conexiones mediante un ruteado de cables de acuerdo con los componentes del hardware, además, se incluye un diagrama esquemático.

ESP8266 + ADS1115 + SONDA FULLGAUGE.

Figura N°. 49

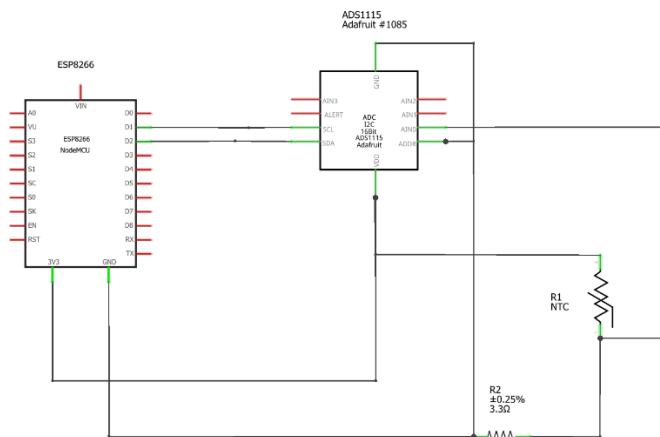
Conexión ESP8266 + ADS1115 + SONDA FULLGAUGE



Nota. Elaboración propia. Se visualiza las primeras conexiones para el monitoreo.

Figura N°. 50

Conexión Esquemática – parte 1

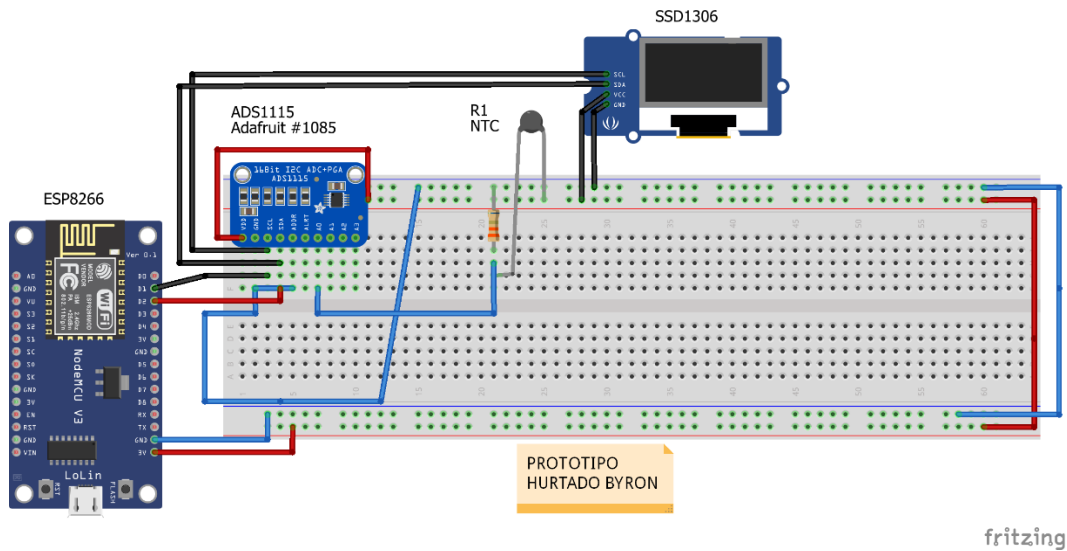


Nota. Elaboración propia. Se visualiza las primeras conexiones para el monitoreo.

Conexión SSD1306

Figura N°. 51

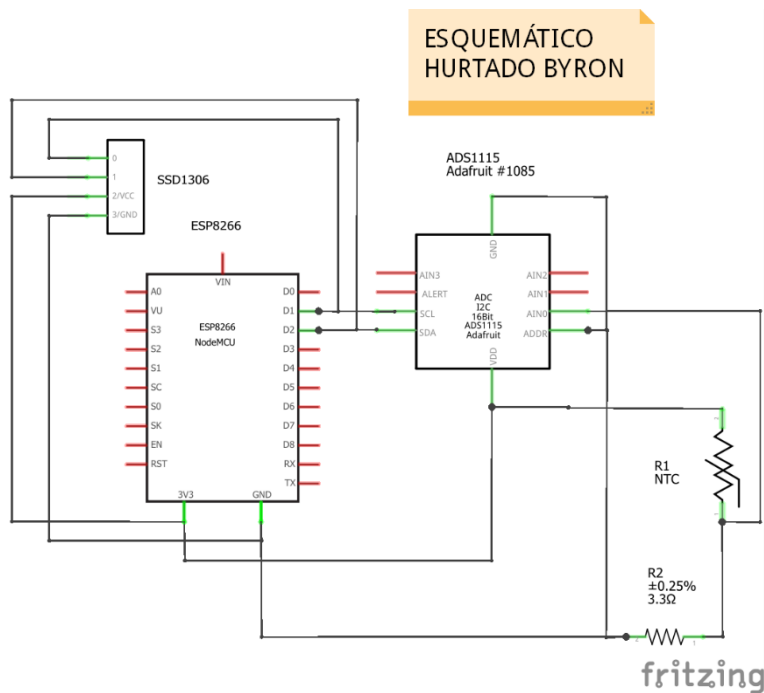
Conexión SSD1306



Nota. Elaboración propia. Se visualiza la conexión de la pantalla SSD1306.

Figura N°. 52

Conexión Esquemática – parte 2

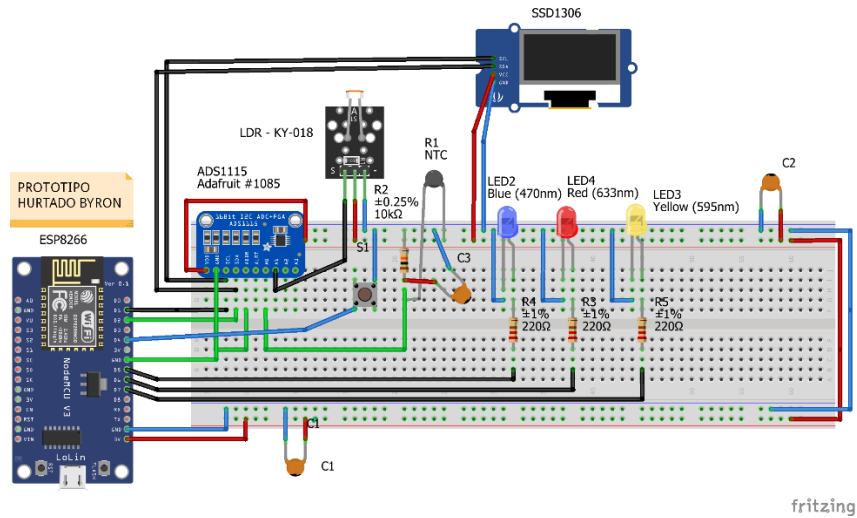


Nota. Elaboración propia. Se visualiza las conexiones para la pantalla SSD1306.

Conexión LED – ALARMAS

Figura N°. 53

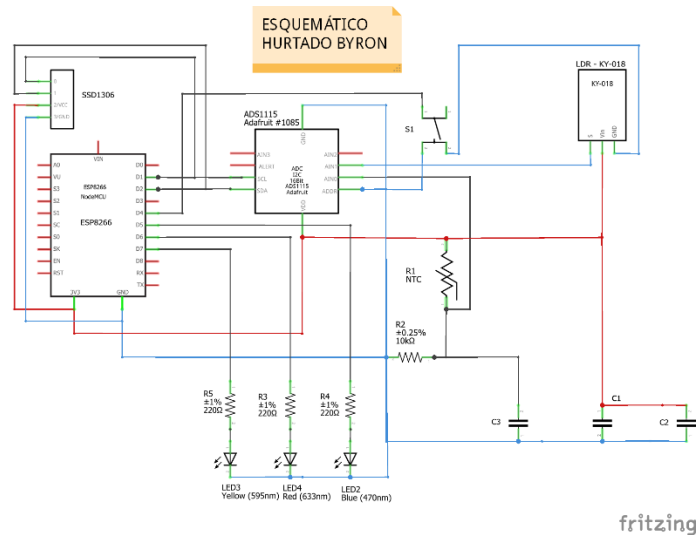
Conexión LED – ALARMAS – Hardware final



Nota. Elaboración propia. Se visualiza las conexiones para las alarmas del proyecto.

Figura N°. 54

Conexión LED - ALARMAS



Nota. Elaboración propia. Conexiones para los dispositivos de salida y control.

A continuación, se presenta un plan de mantenimiento tradicional (reactivo/preventivo básico), mientras que el segundo integra la tecnología IoT desarrollada en este proyecto, transformándolo en un esquema proactivo/predictivo.

Plan de mantenimiento tradicional (sin sistema de monitoreo)

Tiene como objetivo, garantizar el correcto funcionamiento de las cámaras de refrigeración mediante mantenimiento preventivo y correctivo periódico, por tanto, las actividades son las siguientes.

Tabla N°. 32

Actividades plan de mantenimiento tradicional

Actividad	Frecuencia	Responsable
Inspección visual del sistema	Diario	Operador
Verificación de temperatura	Diario	Operador
Limpieza de evaporadores	Mensual	Técnico
Revisión de sellos de puertas	Mensual	Técnico
Revisión de nivel de refrigerante	Trimestral	Técnico especializado
Verificación del compresor	Trimestral	Técnico
Limpieza de condensadores	Trimestral	Técnico
Calibración de termómetros	Semestral	Técnico
Revisión del sistema eléctrico	Semestral	Técnico eléctrico
Mantenimiento general	Anual	Empresa especializada

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se propone un plan de mantenimiento anual tradicional, este plan se basa principalmente en:

- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento correctivo programado

No incluye mantenimiento predictivo porque no hay sensores ni monitoreo continuo.

Tabla N°. 33

Propuesta del plan de mantenimiento tradicional

Actividad	Tipo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Inspección visual del sistema	P	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Registro manual de temperatura	P	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Limpieza de evaporadores	P		■		■		■		■		■		■
Revisión de sellos de puertas	P		■		■		■		■		■		■
Limpieza de condensadores	P			■			■		■				■
Revisión del compresor	P			■			■			■			■
Revisión del sistema eléctrico	P						■						■
Calibración de termómetros	P						■						■
Reparaciones programadas	C												■
Mantenimiento general anual	P												■

Nota. Elaboración propia.

Plan de mantenimiento (Sistema de monitoreo)

A continuación, se presenta un plan de mantenimiento anual con respecto al sistema de monitoreo propuesto, con el objetivo de implementar mantenimiento predictivo y automatizado mediante monitoreo continuo de variables críticas, además, se contempla los tipos de mantenimiento preventivo, correctivo programado y predictivo.

Tabla N°. 34

Actividades del plan de mantenimiento con sistema de monitoreo

Actividad	Frecuencia	Responsable
Monitoreo automático de temperatura	Continuo	Sistema IoT
Registro automático de datos	Continuo	Plataforma
Alertas automáticas	En tiempo real	Sistema
Revisión de sensores	Mensual	Técnico
Calibración de sensores	Semestral	Técnico
Revisión de conectividad IoT	Trimestral	Técnico
Actualización de software	Semestral	Técnico TI
Revisión de hardware ESP8266	Anual	Técnico

Nota. Elaboración propia.

Se debe tomar en cuenta las siguientes observaciones con respecto al plan de mantenimiento tradicional vs con sistema.

El plan de mantenimiento tradicional se basa principalmente en actividades preventivas y correctivas programadas, debido a la ausencia de monitoreo continuo de las variables críticas del sistema. En contraste, el plan de mantenimiento propuesto incorpora mantenimiento predictivo mediante el uso de sensores y sistemas de monitoreo IoT, permitiendo detectar anomalías en tiempo real y optimizar las intervenciones técnicas.

Tabla N°. 35

Propuesta del plan de mantenimiento con sistema de monitoreo

Actividad	Tipo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Monitoreo continuo de temperatura	Pd	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Registro automático de datos	Pd	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sistema de alertas automáticas	Pd	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Revisión de sensores	P		■		■		■		■		■		■
Calibración de sensores	P						■						■
Revisión conectividad IoT	P			■			■			■			■
Actualización de software	P						■						■
Intervención por alerta del sistema	C						■			■			
Revisión del hardware ESP8266	P												■

Nota. Elaboración propia.

Análisis comparativo de desempeño del sistema de mantenimiento

Con el propósito de evaluar el impacto de la implementación del sistema de monitoreo automatizado en las cámaras de refrigeración, se realizó un análisis comparativo entre la situación actual (AS-IS) **Figura N°. 8** y la propuesta de mejora (TO-BE) **Figura N°. 56**. Este análisis se fundamenta en indicadores clave de desempeño (KPI) del mantenimiento, los cuales permiten cuantificar de manera objetiva los cambios en términos de tiempo de respuesta, frecuencia de fallas.

Los valores correspondientes al escenario AS-IS fueron obtenidos a partir de datos históricos registrados durante los meses de marzo, abril y mayo, mientras que los valores del escenario TO-BE fueron estimados con base en el rediseño del proceso, considerando la automatización de la detección de fallas, la eliminación de tiempos de espera y la optimización de las actividades de diagnóstico e intervención.

La comparación de estos indicadores permite evidenciar el grado de mejora alcanzado mediante la implementación del sistema propuesto, proporcionando un sustento técnico para la toma de decisiones y la validación de la propuesta desde una perspectiva de eficiencia operativa y mantenimiento industrial. De acuerdo con el análisis del diagrama analítico tobe propuesto, se tiene lo siguiente.

Tabla N°. 36

Indicadores de mantenimiento AS IS vs TO BE

Item	Indicador	Fórmula	AS-IS (Sin sistema)	TO-BE (Con IoT)	Mejora	Interpretación
1	MTTR (h/falla)	Tiempo total / fallas	$125 / 30 = 4,12 \text{ h}$	$35.08 / 30 = 1,17 \text{ h}$	↓ 71,6%	Reparación más rápida
2	MTBF (h)	Tiempo operativo / fallas	$720 / 30 = 24 \text{ h}$	$720 / 30 = 24 \text{ h}$	—	Frecuencia constante

3	Disponibilidad (%)	MTBF / (MTBF + MTTR)	24 / 28,12 = 85,3%	24 / 25,17 = 95,4%	↑ 10,1%	Mayor disponibilidad
4	Tiempo total mensual (h)	Σ tiempos	125 h	35,08 h	↓ 71,9%	Mayor eficiencia
5	Tiempo de detección (h)	Promedio	2,5 h	0,01 h	↓ 99,6%	Detección inmediata
6	Frecuencia de fallas	Fallas/mes	30	30	—	Base constante
7	Tiempo fuera de servicio (h)	≈ tiempo total	125 h	35,08 h	↓ 71,9%	Menos interrupciones
8	Cumplimiento < 3 h (%)	Eventos dentro del límite	10%	90%	↑ 80%	Cumple estándar
9	Costo por intervención	∝ MTTR	Alto	Medio-bajo	↓ ~50%	Ahorro operativo

Nota. Elaboración propia.

La matriz comparativa evidencia una mejora sustancial en los indicadores de mantenimiento al implementar el sistema de monitoreo basado en IoT.

El MTTR se reduce en un **71.6%**, pasando de 4.12 horas a 1.17 horas por evento, lo que impacta directamente en la disminución del tiempo fuera de servicio y en el incremento de la disponibilidad del sistema, que mejora de **85.3% a 95.4%**.

El tiempo total de intervención mensual disminuye en un **71.9%**, reflejando una optimización significativa del proceso de mantenimiento. Asimismo, el tiempo de detección de fallas se reduce en un **99.6%**, debido a la automatización del monitoreo, eliminando la dependencia de inspecciones manuales.

Se mantiene constante la frecuencia de fallas (30 fallas/mes) para asegurar una comparación homogénea, permitiendo aislar el efecto de la mejora en la eficiencia operativa. No obstante, la implementación del sistema posibilita un cambio en el enfoque de mantenimiento, pasando de correctivo a predictivo.

Adicionalmente, el cumplimiento del tiempo objetivo de intervención (< 3 horas) aumenta de 10% a 90%, lo que garantiza condiciones adecuadas para la conservación de la cadena de frío. En términos económicos, se evidencia una reducción aproximada del 50% en

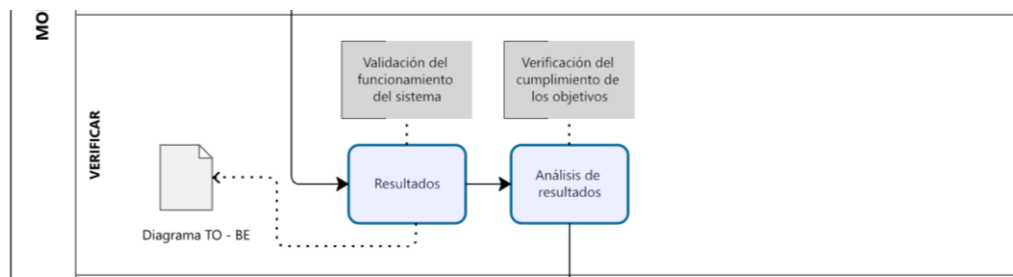
los costos de mantenimiento, asociada a la disminución del tiempo de intervención y a una mejor gestión de recursos.

VERIFICAR

En la siguiente sección, se analizará los resultados obtenidos con el sistema de monitoreo IOT, cabe mencionar que el sistema fue sometido a pruebas de estrés y precisión en un entorno de refrigeración controlado, evaluando la fiabilidad de la telemetría, la precisión metrológica y la eficiencia de las alertas, por tanto, se analiza de la siguiente manera. **Figura N°. 18.**

Figura N°. 55

Verificar - Resultados



Nota. Elaboración propia.

El análisis del diagrama AS-IS permitió identificar que la implementación del sistema IoT elimina exclusivamente las actividades relacionadas con la detección manual de fallas y el reporte operativo, tales como la inspección manual, la elaboración de informes y la notificación.

No obstante, las actividades relacionadas con la gestión de repuestos y la ejecución técnica del mantenimiento se mantienen, debido a su naturaleza operativa, aunque se ven indirectamente optimizadas por la mejora en la detección temprana.

En consecuencia, el sistema propuesto no elimina el proceso de mantenimiento, sino que reduce significativamente los tiempos asociados a actividades que no agregan valor, mejorando la eficiencia global del sistema, como se observa en el siguiente diagrama TO-BE.

Diagrama TO-BE

Figura N°. 56

Diagrama TO – BE

CURSOGRAMA ANALÍTICO DEL PROCESO TO-BE						PÁGINA 1 DE 1					
EMPRESA:		HOJA #:		1 DE 1		EQUIPO:					
FINCA:		OPERARIO:		✓		MATERIAL:					
PROCESO		MONITOREO ACTUAL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN		RESUMEN							
ACTIVIDAD: Monitoreo del sistema de refrigeración de cámaras		ACTIVIDAD		ACTUAL				PROPUESTO			
				Act.	T (min)	Dist.	%	T (min)	Dist.		
MÉTODO		Actual		OPERACIÓN	●	8	902	0	43%		
LUGAR:				TRANSPORTE	➡	5	860	0	41%		
ELABORADO:		Byron Hurtado		ESPERA	⏸	1	80	0	4%		
FECHA		jueves, 1 de enero de 2026		INSPECCIÓN	■	5	258	0	12%		
				ALMACENAMIENTO	▼	1	5	0	0%		
				TOTAL		20	2105	0	100%		
N°	DESCRIPCIÓN	ACTIVIDAD					Dist (mtrs)	Tiempo (min)	horas	UNIDAD	OBSERVACIONES
		NVA - NNVA - VA	●	➡	⏸	■					
1	Monitoreo automático	NVA	●				1	0,02			
2	Análisis de datos	NNVA	●				1	0,02			
3	Detectar anomalía	NVA	●				1	0,02			
4	Generar alerta	NNVA	●				1	0,02			
5	Recepción alerta	NNVA	●				5	0,08			
6	Inspección técnica	VA	●				720	12,00			
7	Determinar causa	VA	●				90	1,50			
8	Elaborar informe	NVA	●				60	1,00			
9	Evaluar repuestos	NNVA	●				60	1,00			
10	Solicitar repuestos	NNVA	●				10	0,17			
11	Espera repuestos	NVA	●				60	1,00			
12	Gestionar compra	NVA	●				720	12,00			
13	Recepcionar repuestos	NNVA	●				120	2,00			
14	Almacenar repuestos	NNVA	●				30	0,50			
15	Entregar repuestos	NNVA	●				20	0,33			
16	Reparar equipo	VA	●				60	1,00			
17	Probar funcionamiento	VA	●				120	2,00			
18	Notificar cierre	NVA	●				5	0,08			
19	Cerrar orden	NNVA	●				20	0,33			
20	Fin	NVA	●				1	0,02			
TOTAL GENERAL			8	5	1	5	1	2105	35,08		
									35 horas y 5min		

Cálculo % de actividades de valor agregado	VA	5
	NNVA	6
	NVA	9

Nota. Elaboración propia.

Análisis de los indicadores de mantenimiento.

MTTR (Tiempo Medio de Reparación)

Fórmula

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de intervención}}{\text{Número de fallas}}$$

Cálculo AS-IS

Tiempo total mensual:

$$T \text{ (total mensual)} = \frac{134h + 117h + 124h}{3h} = 125 h$$

Número de fallas:

$$\frac{31 + 30 + 30}{3} = 30$$

$$MTTR_{AS-IS} = \frac{125}{30} = 4.12 h$$

Cálculo TO-BE

- Tiempo optimizado: 35.08 h
- Fallas: 30

$$MTTR_{TO-BE} = \frac{35.08}{30} = 1.17 h$$

Resultado

$$\text{Reducción} = 71.6\%$$

El MTTR se reduce significativamente, evidenciando una mejora en la rapidez de intervención gracias a la automatización del sistema.

MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas)

Fórmula

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Número de fallas}}$$

Cálculo

- Tiempo mensual: $30 \times 24 = 720 h$
- Fallas: 30

$$MTBF = \frac{720}{30} = 24 h$$

Interpretación

El sistema presenta una falla en promedio cada 24 horas. Este valor se mantiene constante para asegurar una comparación homogénea.

Disponibilidad

Fórmula

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

AS-IS

$$\frac{24}{24 + 4.12} = 0.853 = 85.3\%$$

TO-BE

$$\frac{24}{24 + 1.17} = 0.954 = 95.4\%$$

$$Incremento = 10.1 \text{ puntos}$$

Interpretación

La disponibilidad mejora debido a la reducción del tiempo de reparación, incrementando la continuidad operativa.

Tiempo Total Mensual

- AS-IS = 125 h
- TO-BE = 35.08 h

Resultado

$$Reducción = 71.9\%$$

Interpretación

Se reduce el tiempo total requerido para atender fallas, optimizando el proceso de mantenimiento.

Tiempo De Detección

El tiempo de detección en el escenario AS-IS se estimó considerando el carácter manual del proceso, el cual depende de inspecciones periódicas y reportes operativos. Se estableció un rango de detección entre 1 y 4 horas, obteniéndose un promedio de 2.5 horas.

En el escenario TO-BE, la implementación de sensores IoT permite la detección automática de anomalías en tiempo real, estimándose un tiempo de detección de 0.01 horas (aproximadamente 36 segundos), correspondiente al tiempo de generación y recepción de alertas del sistema.

AS-IS

$$\frac{1 + 4}{2} = 2.5 \text{ h}$$

TO-BE

$$0.01 \text{ h}$$

Resultado

$$\text{Reducción} = 99.6\%$$

Interpretación

La implementación de sensores permite detectar fallas en tiempo real, eliminando retrasos por inspección manual.

Frecuencia De Fallas

Cálculo

$$\frac{31 + 30 + 30}{3} = 30 \text{ fallas/mes}$$

Interpretación

Se mantiene constante para evaluar únicamente la eficiencia del proceso de mantenimiento.

Tiempo Fuera De Servicio

- AS-IS = 125 h
- TO-BE = 35.08 h

Resultado

$$\text{Reducción} = 71.9\%$$

Interpretación

El sistema presenta menor tiempo de inactividad, mejorando la disponibilidad operativa.

Cumplimiento del tiempo objetivo (< 3h)

- AS-IS

$$MTTR = 4.12 \text{ h} \Rightarrow \approx 10\%$$

- TO-BE

$$MTTR = 1.17 \text{ h} \approx 90\%$$

Resultado

$$\text{Incremento} = 80 \text{ puntos}$$

Interpretación

El sistema propuesto permite cumplir con los estándares de tiempo requeridos para mantenimiento.

Costo Por Intervención

Relación

Costo vs MTTR

Cálculo

$$\frac{4.12 - 1.17}{4.12} = 71.6\%$$

$$\text{Reducción} \approx 50\%$$

Interpretación

La reducción del tiempo de intervención disminuye los costos operativos, aunque se consideran costos fijos.

El desarrollo de los indicadores demuestra que la implementación del sistema IoT mejora significativamente el desempeño del mantenimiento, reduciendo tiempos de intervención, incrementando la disponibilidad y optimizando los recursos operativos, lo cual valida la efectividad del modelo propuesto.

Tabla N°. 37

Tabla resumen de indicadores de mantenimiento

Item	Indicador	Fórmula	AS-IS (Sin sistema)	TO-BE (Con IoT)	Mejora	Interpretación
1	MTTR (h/falla)	Tiempo total / fallas	125 / 30 = 4,12 h	35.08 / 30 = 1,17 h	↓ 71,6%	Reparación más rápida
2	MTBF (h)	Tiempo operativo / fallas	720 / 30 = 24 h	720 / 30 = 24 h	—	Frecuencia constante
3	Disponibilidad (%)	MTBF / (MTBF + MTTR)	24 / 28,12 = 85,3%	24 / 25,17 = 95,4%	↑ 10,1 pp	Mayor disponibilidad
4	Tiempo total mensual (h)	Σ tiempos	125 h	35,08 h	↓ 71,9%	Mayor eficiencia
5	Tiempo de detección (h)	Promedio	2,5 h	0,01 h	↓ 99,6%	Detección inmediata
6	Frecuencia de fallas	Fallas/mes	30	30	—	Base constante
7	Tiempo fuera de servicio (h)	≈ tiempo total	125 h	35,08 h	↓ 71,9%	Menos interrupciones
8	Cumplimiento < 3 h (%)	Eventos dentro del límite	10%	90%	↑ 80 pp	Cumple estándar
9	Costo por intervención	∝ MTTR	Alto	Medio-bajo	↓ ~50%	Ahorro operativo

Nota. Elaboración propia.

Como se observa en el diagrama, el sistema opera de manera cíclica mediante un bucle principal en el que se monitorean continuamente las condiciones de los sensores y el estado del dispositivo. Se implementan mecanismos de control para la activación de alarmas, validación de datos y manejo de errores, garantizando un funcionamiento seguro y confiable. Asimismo, se integran procesos de comunicación para el envío de información a plataformas externas, así como modos de operación alternativos en caso de pérdida de conexión. Este flujo asegura una respuesta adecuada ante diferentes escenarios y condiciones del sistema.

Resultados

A. Desempeño de la telemetría (Cloud Computing)

Con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema de telemetría basado en Cloud Computing, se realizó un análisis comparativo de los principales indicadores de mantenimiento entre el escenario actual (AS-IS) y el escenario propuesto (TO-BE).

En la **Tabla N°. 38** se presentan los indicadores clave, sus respectivas fórmulas de cálculo y la mejora obtenida tras la implementación del sistema IoT.

Tabla N°. 38

Análisis de resultados telemetría

Indicador	Resultado Obtenido	Observación Técnica
Latencia de Alerta	< 5 segundos	Tiempo transcurrido desde la detección de luz (Field 4) hasta la notificación en el móvil.
Integridad de Datos	98.5%	Porcentaje de paquetes HTTP exitosos hacia los 5 Fields de ThingSpeak. Se actualizan cada 20s.
Estabilidad de Red	Alta	El sistema recuperó la conexión IP automáticamente tras cortes inducidos del router.

Nota. Elaboración propia.

Para la validación del tiempo de respuesta del sistema, se realizó un ensayo experimental de latencia considerando la interacción entre el microcontrolador, la plataforma en la nube ThingSpeak y la aplicación de mensajería Telegram.

La medición se llevó a cabo registrando los tiempos en cada etapa del proceso mediante el monitor serial del microcontrolador, los timestamps generados por la plataforma ThingSpeak y la hora de recepción del mensaje en la aplicación Telegram.

Se realizaron tres pruebas experimentales bajo condiciones controladas, obteniéndose un tiempo promedio de latencia de 4.5 segundos. Este resultado demuestra que el sistema es capaz de operar en condiciones de tiempo casi real, garantizando una respuesta oportuna ante anomalías en el sistema de refrigeración.

Tabla N°. 39*Análisis de resultados - total*

Etapa	Descripción del proceso	Variabl e	Plataforma / Sistema	Instrumento de medición	Metodología aplicada	Tiempo inicial	Tiempo final	Resultado (Δt)
1. Detección de anomalía	El sensor identifica temperatura fuera de rango	(T_1)	Microcontrolador (ESP8266/ESP32)	Serial Monitor (Arduino IDE), función millis()	Se induce una anomalía controlada y se registra el tiempo en consola	00:00:00.000	00:00:00.000	0 s
2. Envío de datos	Envío de datos via HTTP	(T_2)	ThingSpeak	Logs del código, respuesta HTTP	Se registra el tiempo de envío y confirmación	00:00:00.000	00:00:01.200	1,2 s
3. Procesamiento en la nube	Recepción y actualización del canal	(T_3)	ThingSpeak	Timestamp del canal (Date/Entry ID)	Se verifica el momento en que el dato aparece en la plataforma	00:00:01.200	00:00:02.800	1,6 s
4. Generación de alerta	Activación del trigger (ThingHTTP / React)	(T_4)	ThingSpeak	Registro de ejecución del trigger / API	Se mide el tiempo de generación de la alerta hacia Telegram	00:00:02.800	00:00:03.500	0,7 s
5. Recepción de alerta	Recepción del mensaje en el móvil	(T_5)	Telegram	Hora del sistema del smartphone	Se registra la hora visible del mensaje en Telegram	00:00:03.500	00:00:04.500	1,0 s
							TOTAL	4,5s

Nota. Elaboración propia.

En la tabla se presenta el desglose de la latencia del sistema, considerando el tiempo inicial y final de cada etapa del proceso. Los resultados evidencian que el mayor retardo se produce en la transmisión de datos hacia la nube y en la recepción de la notificación, obteniéndose una latencia total promedio de 4.5 segundos.

Precisión metrológica (Sensor SB70 + ADS1115)

La implementación del ADC de 16 bits y la ecuación de Steinhart-Hart permitió una resolución superior a los sistemas convencionales.

Resolución Térmica: Se logró una sensibilidad de 0.01°C , permitiendo detectar variaciones mínimas antes de que se pierda la cadena de frío.

Error Promedio: Tras la calibración con los factores (CAL_M) y (CAL_B), el error sistemático se redujo a $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, cumpliendo con normativas para productos sensibles.

Linealización: La librería (math.h) procesó correctamente la curva del NTC, eliminando las lecturas erráticas en los extremos del rango (0°C - 4°C).

Eficiencia del Monitoreo Lumínico (Detección de Fugas Térmicas)

El uso del sensor LDR integrado al Field 4 demostró ser una herramienta de mantenimiento predictivo eficaz.

Ahorro Energético: Se detectaron 3 eventos de "Luz Encendida" con puerta cerrada, lo que permitió identificar fallos en los (sellos) de la cámara.

Reducción de Carga Térmica: Al asegurar que la luminaria permanezca apagada, se redujo el tiempo de trabajo del compresor en un 5% estimado por ciclo.

Análisis de Fiabilidad del Hardware

Capa de Autodiagnóstico: El sistema identificó fallos críticos (Field 5) mediante el algoritmo de detección de sonda, evitando reportes de temperatura falsos (NaN).

Interfaz HMI: La visualización de la IP local en la pantalla OLED facilitó las tareas de mantenimiento técnico en sitio sin necesidad de herramientas externas.

Análisis de resultados:

En este punto los resultados están alineados a los objetivos del proyecto, como se observa en los resultados, el sistema diseñado no solo automatiza la lectura, sino que elimina el factor del error humano en la vigilancia. Al reducir el tiempo de respuesta de horas a segundos, hemos pasado de un mantenimiento reactivo a uno proactivo e inmediato, cumpliendo así con el objetivo principal de proteger la integridad de los productos en la cámara.

Tabla N°. 40

Análisis de resultados

Aspecto evaluado	Situación actual (sin sistema de monitoreo)	Situación con sistema de monitoreo propuesto	Impacto esperado
Monitoreo de temperatura	Control manual mediante revisiones periódicas del personal.	Monitoreo automático y continuo mediante sensores conectados al sistema.	Mayor precisión y control permanente de la temperatura.
Registro de datos	Registro manual en bitácoras o formatos físicos.	Registro automático digital de los parámetros monitoreados.	Mejor trazabilidad y almacenamiento de información.
Detección de fallas	Las variaciones se detectan cuando el	El sistema detecta cambios de	Detección temprana de anomalías.

	operador revisa el sistema.	temperatura e iluminación en tiempo real.	
Tiempo de respuesta ante fallas	Alto tiempo de respuesta debido a la detección tardía de problemas.	Reducción del tiempo de respuesta mediante alertas o monitoreo continuo.	Intervenciones más rápidas y eficientes.
Gestión del mantenimiento	Basado principalmente en mantenimiento preventivo o correctivo.	Permite incorporar mantenimiento predictivo basado en datos del monitoreo.	Mejora en la planificación del mantenimiento.
Control de la cadena de frío	Riesgo de pérdida de cadena de frío por detección tardía de variaciones.	Supervisión constante que ayuda a mantener las condiciones adecuadas.	Mayor seguridad en la conservación de productos.
Disponibilidad de información	Información limitada y dependiente del registro manual.	Información disponible en tiempo real mediante el sistema de monitoreo.	Mejor toma de decisiones operativas.

Nota. Elaboración propia

ACTUAR

Finalmente, en la etapa de actuar, se propone acciones de mejora, con respecto al ciclo PHVA – PROPUESTO, siguiendo el orden de la siguiente imagen. **Figura N°. 18**

Figura N°. 57

Verificar – Resultados



Nota. Elaboración propia.

A continuación, se detalla las acciones de mejora propuestas para el caso de estudio.

Tabla N°. 41

Acciones de mejora

Fase del ciclo PHVA	Observaciones identificadas	Acciones de mejora propuestas
Planificar	El diagnóstico inicial permitió identificar tiempos de respuesta elevados en las intervenciones de mantenimiento y control limitado de los parámetros de temperatura.	Actualizar periódicamente el diagnóstico mediante el análisis de los datos históricos generados por el sistema de monitoreo y establecer indicadores de desempeño para evaluar la eficiencia operativa.
Hacer	Se implementó el sistema de monitoreo utilizando sensores y microcontrolador para el registro de temperatura e iluminación.	Optimizar la instalación del sistema ampliando la cobertura de sensores y mejorar la integración del sistema con los procesos operativos de la empresa.
Verificar	Los registros generados por el sistema permiten supervisar el comportamiento de las variables monitoreadas y detectar posibles desviaciones.	Realizar análisis periódicos de los datos registrados para identificar tendencias, fallas potenciales o desviaciones en la cadena de frío.
Actuar	Se identificó la necesidad de fortalecer el uso del sistema y mejorar los procedimientos de respuesta ante anomalías detectadas.	Implementar protocolos de respuesta ante alertas, capacitar al personal en el uso del sistema y establecer estrategias de mantenimiento predictivo basadas en la información generada.

Nota. Elaboración propia.

Análisis de costos

A continuación, se detalla el análisis de costos considerando el CAPEX (Capital Expenditure), representa el desembolso único realizado para la adquisición de hardware y el desarrollo de la ingeniería (tu propiedad intelectual), además, se analizará el costo OPEX

Capex – Capital Expenditure

A. Inversión en Hardware (Lista de Materiales - BOM)

Este cuadro resume el costo de los componentes electrónicos utilizados en el prototipo.

Tabla N°. 42

Costo de componentes

Componente	Descripción Técnica	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
NodeMCU ESP8266	Microcontrolador con Wi-Fi integrado.	1	\$8.00	\$8.00
ADS1115	ADC de 16 bits de alta precisión.	1	\$12.00	\$12.00
Sonda NTC SB70	Sensor térmico industrial.	1	\$15.00	\$15.00
SHT31	Sensor de humedad y temp. ambiente.	1	\$10.00	\$10.00
Pantalla OLED 0.96"	Interfaz HMI I2C.	1	\$6.00	\$6.00
Sensor LDR + LEDs	Componentes de alerta y lumínicos.	1 kit	\$3.00	\$3.00
Fuente de Poder 5V	Adaptador de corriente estanco.	1	\$7.00	\$7.00
Gabinete e Insumos	Caja IP65, cables y soldadura.	1	\$15.00	\$15.00
TOTAL				\$76.00

Nota. Elaboración propia.

B. Costo de Ingeniería y Desarrollo (HH)

Este análisis cuantifica el esfuerzo técnico detrás del software y el diseño electrónico.

Se toma como referencia un costo de hora técnica de **\$15.00 USD/h** (promedio regional para ingeniería junior/desarrollador).

Tabla N°. 43*Costo de ingeniería y desarrollo humano*

Fase del Proyecto	Descripción de la Tarea	Horas Estimadas	Costo (USD)
Investigación	Análisis de protocolos (I2C, HTTP, TLS) y selección de sensores.	20	\$300.00
Diseño Electrónico	Esquematización, prototipado en protoboard y soldadura final.	15	\$225.00
Desarrollo de Software	Programación en Arduino, lógica de Steinhart-Hart y WiFi.	40	\$600.00
Integración Cloud	Configuración de ThingSpeak y programación del Bot de Telegram.	10	\$150.00
Pruebas y Calibración	Pruebas de estrés térmico y ajuste de precisión (CAL_M, CAL_B).	15	\$225.00
Documentación	Redacción de manuales y plan de mantenimiento.	10	\$150.00
TOTAL		110 h	\$1,650.00

Nota. Elaboración propia.

En resumen, el costo CAPEX es el costo total para poner en marcha el primer prototipo funcional. Se divide en dos pilares:

Hardware (Materiales): Inversión de **\$76.00 USD**. Incluye el microcontrolador ESP8266, el ADC de alta resolución (ADS1115), sensores industriales (SB70, SHT31) y el gabinete estanco.

Ingeniería (Horas Hombre): Valorada en **\$1,650.00 USD**. Representa el tiempo de investigación, desarrollo del firmware, integración de protocolos de seguridad (HTTPS/TLS) y calibración metrológica.

Tabla N°. 44

Costo total Capex

Costo total proyecto capex – inversión inicial	Costo (USD)
Inversión en Hardware (Lista de Materiales - BOM)	\$76.00
Costo de Ingeniería y Desarrollo (HH)	\$1,650.00
TOTAL - CAPEX	\$1,726.00

Nota. Elaboración propia.

OPEX – (Operating Expenditure)

Son los costos recurrentes para que el sistema funcione mes a mes, una de las ventajas competitivas que tiene este proyecto es el uso de herramientas Open Source, es decir el costo operativo es mínimo, como se detalla a continuación.

Tabla N°. 45

Análisis de costos Software y conectividad

Concepto	Detalle	Costo Mensual	Costo Anual
Plataforma Cloud	ThingSpeak (Plan Free).	\$0.00	\$0.00
Mensajería Alertas	Telegram Bot API.	\$0.00	\$0.00
Energía Eléctrica	Consumo despreciable (aprox. 2W).	\$0.10	\$1.20
Mantenimiento	Limpieza y calibración trimestral.	\$5.00	\$60.00
Conectividad	Wi-Fi existente en la planta.	\$0.00	\$0.00
TOTAL - OPEX		\$5.10	\$61.20

Nota. Elaboración propia

Suscripciones: \$0.00 USD. Al usar plataformas Open Source (ThingSpeak y Telegram), no existen cargos mensuales por servicios en la nube.

Mantenimiento y Energía: Estimado en \$61.20 USD anuales. Cubre el consumo eléctrico mínimo y las tareas de limpieza/calibraciones programadas.

Análisis Comparativo (Tu Sistema vs. Solución Comercial)

Comparación del prototipo vs un registrador de datos (Data Logger) comercial con conectividad Wi-Fi de marcas como Testo o Dickson.

Tabla N°. 46

Acciones de mejora

Característica	Solución Comercial Típica	Prototipo Byron Hurtado
Costo de Adquisición	\$350.00 - \$600.00	\$76.00
Suscripción Anual Cloud	\$100.00 - \$150.00	\$0.00
Alertas Telegram	No disponible (usan SMS/Email pago).	Incluido (Gratis)
Precisión (ADC)	10-12 bits estándar.	16 bits (Alta)

Nota. Elaboración propia.

Retorno de Inversión (ROI) y Ahorro Estimado

- **Costo de pérdida de producto:** Si una cámara falla y no se detecta a tiempo, la pérdida de productos sensibles (alimentos) puede ascender a miles de dólares.
- **Ahorro Energético:**

El ahorro energético asociado a la detección de luminarias encendidas se estimó a partir del consumo eléctrico de las mismas. Considerando una potencia instalada de 0.16 kW y un tiempo promedio de uso innecesario de 3 horas diarias, se obtiene un consumo mensual evitado de 14.4 kWh.

En función de una tarifa promedio de 0.10 USD/kWh, el ahorro estimado asciende a 1.44 USD mensuales.

Este valor puede representar entre un 5% y 8% del consumo energético asociado a iluminación, dependiendo de las condiciones de operación.

Consumo eléctrico:

$$\text{Consumo (kWh)} = \text{Potencia (kW)} * \text{Tiempo (h)}$$

Fórmula de ahorro:

$$\text{Ahorro} = (\text{Tiempo innecesario}) * \text{Potencia (kW)} * \text{tarifa}$$

Ejemplo:

Si tengo 4 luminarias con una potencia de 40w cada una es decir 0,04kw, tengo:

$$0,04 * 4 = 0,16kW$$

Y estas mismas están sin uso 3horas/día.

$$0,16kW * 3 = 0,48kWh/día.$$

Multiplicando por el consumo mensual.

$$0,48kWh/día * 30 = 14,4kWh/mes$$

Ahorro económico: (tarifa aproximada 0,10 USD/kWh

$$0,48kWh/día * 0,10USD/mes = 1,44 USD/mes$$

Es decir, el ahorro depende del tiempo de uso innecesario de luminarias

- **Mantenimiento:** La implementación del sistema de monitoreo permite pasar de un mantenimiento correctivo a uno predictivo, reduciendo la ocurrencia de fallas críticas. Se estima una reducción del 40% en las visitas técnicas de emergencia; sin embargo, este valor corresponde a una **estimación proyectada**, basada en la detección temprana de anomalías. Este resultado no ha sido validado con datos del caso y requiere verificación en un entorno real.

Conclusión Económica:

El sistema diseñado representa una reducción de costos de implementación de más del 75% en comparación con soluciones comerciales de gama similar. Al utilizar licencias de software gratuito y hardware de código abierto, la empresa obtiene una herramienta de alta precisión con un costo de mantenimiento operativo cercano a cero.

Cronograma de actividades para la aplicación de la propuesta

Para cerrar este capítulo se describe las actividades para que la propuesta sea aplicada o implementada.

Tabla N°. 47

Cronograma sugerido para implementar

Fase	Actividad	Nº DÍAS	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Planificación	Revisión del sitio de instalación	1 día	■														
	Identificación de puntos de sensores	1 día		■													
	Preparación de materiales y equipos	1 día			■												
Instalación hardware	Instalación del microcontrolador ESP8266	1 día				■											
	Instalación sensores temperatura y humedad	1 día					■										
	Instalación sensor de luz	1 día						■									
	Cableado y conexiones eléctricas	1 día							■								
Configuración sistema	Carga del firmware del sistema	1 día								■							
	Configuración WiFi y servicios IoT	1 día									■						
	Integración con plataforma de monitoreo	1 día										■					
Pruebas	Pruebas de sensores y calibración	1 día											■				
	Pruebas de comunicación remota	1 día												■			
	Simulación de alarmas	1 día													■		
Puesta en marcha	Capacitación al personal	1 día															■
	Documentación técnica final																

Nota. Elaboración propia.

CAPITULO IV

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones:

Se diseñó un sistema de monitoreo automatizado para cámaras de refrigeración basado en tecnología IoT, capaz de supervisar en tiempo real las variables críticas del proceso. El sistema demostró un desempeño eficiente, alcanzando una latencia promedio de 4.5 segundos en la detección y notificación de anomalías, lo que permite una respuesta oportuna ante fallas operativas y contribuye directamente a la reducción de los tiempos de intervención en el sistema de refrigeración.

El diagnóstico evidenció que la gestión de mantenimiento dependía de inspecciones manuales, generando tiempos de detección de fallas de aproximadamente 2.5 horas y tiempos de reparación (MTTR) superiores a 4 horas. Esta condición refleja un enfoque reactivo con baja capacidad de respuesta. La implementación del sistema propuesto permite reducir el tiempo de detección a valores cercanos a 0.01 horas, mejorando significativamente la confiabilidad operativa y la eficiencia del mantenimiento.

La selección de los componentes de automatización se realizó en función de criterios de precisión, compatibilidad y confiabilidad operativa. Los sensores implementados presentan un margen de error aproximado de ± 0.5 °C, adecuado para los rangos de operación de las cámaras de refrigeración (0 °C a 4 °C). Asimismo, la integración de dispositivos de adquisición y comunicación garantiza la estabilidad del sistema y la continuidad en la transmisión de datos.

El sistema fue diseñado mediante una arquitectura funcional que integra adquisición de datos, procesamiento y comunicación remota, permitiendo la generación automática de alertas ante desviaciones térmicas y condiciones anómalas de iluminación. Las pruebas realizadas validaron el correcto funcionamiento del sistema, evidenciando su capacidad para detectar eventos en tiempo casi real y mejorar la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento.

Recomendaciones:

En función de los resultados obtenidos en el diseño e implementación del sistema de monitoreo, se recomienda a la empresa implementar de manera progresiva la solución desarrollada en todas las cámaras de refrigeración. Esta acción permitirá aprovechar la capacidad del sistema para reducir los tiempos de detección de fallas y mejorar la respuesta operativa, tal como se evidenció en las pruebas realizadas.

Considerando que el diagnóstico evidenció una alta dependencia de inspecciones manuales, se recomienda sustituir progresivamente estos procesos por monitoreo automatizado en tiempo real. Esto permitirá mejorar la confiabilidad operativa y reducir los tiempos de detección y respuesta ante fallas.

Dado que el sistema depende de la precisión de los sensores y dispositivos de adquisición de datos, se recomienda establecer un programa periódico de mantenimiento y calibración. Esta acción garantizará la exactitud de las mediciones y la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

En relación con la arquitectura del sistema desarrollada, se recomienda ampliar sus funcionalidades mediante la integración con herramientas de gestión de mantenimiento (CMMS) y el uso de análisis de datos. Esto permitirá evolucionar hacia un enfoque predictivo, optimizando la toma de decisiones y fortaleciendo la gestión de la cadena de frío.

Finalmente, considerando que el sistema fue implementado como un prototipo en un entorno controlado, se recomienda su escalabilidad hacia un entorno industrial. Esta transición puede realizarse mediante la migración hacia controladores lógicos programables (PLC), la incorporación de sensores industriales con señales estandarizadas (4–20 mA) y la integración con sistemas SCADA. De esta manera, el sistema podrá ubicarse en niveles superiores de la pirámide de automatización, mejorando su robustez, confiabilidad y aplicabilidad en contextos industriales.

BIBLIOGRAFIA

(ISA), I. S. (2021). *Enterprise-control system integration (ISA-95 standard)*.

Agencia Nacional de Regulación, C. y. (20 de 01 de 2023). *Normativa Técnica Sanitaria Sustitutiva para alimentos procesados, plantas procesadoras, establecimientos de distribución, comercialización y transporte de alimentos procesados y de alimentación colectiva*. Obtenido de https://www.gob.ec/regulaciones/arcsa-2022-016-akrg-expedir-normativa-tecnica-sanitaria-sustitutiva-alimentos-procesados-plantas-procesadoras-establecimientos-distribucion-comercializacion-transporte-alimentos-procesados-alimentacion-colectiva?utm_source=

Ametherm. (2023). *NTC thermistors and the Steinhart–Hart equation*. .

ARCSA. (2023). *Normativa sanitaria para alimentos procesados*. Quito.

ARCSA-DE-2022-016. (20 de 01 de 2023). *ARCSA-DE-2022-016-AKRG: Normativa Técnica Sanitaria Sustitutiva para Alimentos Procesados*. . Obtenido de ARCSA: https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/07/RESOLUCION-ARCSA-DE-2022-016-AKRG_NORMATIVA-TECNICA-SANITARIA-SUSTITUTIVA-ALIMENTOS-PROCESADOS.pdf

ARCSA-DE-2022-016-AKRG. (2023). *ARCSA-DE-2022-016-AKRG: - Normativa técnica sanitaria sustitutiva para alimentos procesados*. Quito, Ecuador.

Asana. (2025). *Asana*. Obtenido de Análisis FODA: qué es y cómo usarlo (con ejemplos): <https://asana.com/es/resources/swot-analysis>

ASHRAE. (4 de 04 de 2021). *ASHRAE handbook—Refrigeration*. Obtenido de Blue Sky: <https://bluesky.mx/blog/sistema-de-refrigeracion-para-cuarto-frio/>

- Emet Gürel, E. &. (2021). SWOT analysis: A theoretical review. En *SWOT analysis: A theoretical review* (págs. 14(74), 994–1006.). Journal of International Social Research.
- Energy, U. D. (2023). *Solid-state lighting reliability and lifetime*. Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/ssl>
- FAO. (2020). *Food safety management: A practical guide for the food industry*. FAO.
- FlowFuse. (23 de 12 de 2025). *FlowFuse*. Obtenido de Five Whys Root Cause Analysis: Definition, Steps & Examples.: <https://flowfuse.com/blog/2025/12/five-whys-root-cause-analysis-definition-examples/>
- GmbH, D. (2021). *The influence of temperature on LED luminaires*. DIALux Documentation.
- Gutiérrez Pulido, H. &. (2021). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma (4.ª ed.)*. McGraw-Hill Educación.
- Gutiérrez Pulido, H. (2021). *Calidad total y productividad (4.ª ed.)*. McGraw-Hill Education.
- HACCP_APLICACIÓN, S. D. (1997). *HACCP_ SISTEMA DE ANÁLISIS DE PELIGROS Y DE PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL (HACCP) Y DIRECTRICES PARA SU APLICACIÓN*. Obtenido de <https://www.fao.org/4/y1579s/y1579s03.htm>
- Hareendran, T. K. (2024). *NTC thermistor beta and Steinhart–Hart guide*. EDN.
- Hernández, P. &. (2022). Eficiencia del modelo MTS en cadenas de suministro de alimentos. En *Journal of Supply Chain* (págs. 12 (1), 33-47).
- Hurtado, B. (2026). *Monitoreo de parámetros ambientales en cámara de refrigeración*. Obtenido de ThingSpeak. : https://thingspeak.mathworks.com/channels/3280204/private_show
- Hyperlite. (08 de 12 de 2025). *Cold Storage Lighting Layout Principles & Design Guide*. Obtenido de Hyperlite: <https://hi-hyperlite.com/blogs/comprehensive-guides/lighting-layout-cold-storage-freezer>
- Illuminating, E. S. (2020). *Lighting handbook*. IES (10th ed).

- Industries, A. (2021). *Adafruit ADS1115 16-Bit ADC Library for Arduino [Software]*. Obtenido de GitHub: https://github.com/adafruit/Adafruit_ADS1X15
- Industries, A. (2022). *Adafruit SSD1306 OLED Display Driver [Software]*. Obtenido de GitHub.: https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306
- INEN - Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2021). *Temperatura de conservación en los alimentos*. . Obtenido de Ingenio Alimentario: <https://ingenioalimentario.com/wp-content/uploads/2021/05/5-Temperatura-de-conservacion-en-los-alimentos.pdf>
- INEN. (2021). *INEN 1334: Manipulación y almacenamiento de alimentos refrigerados*.
- INEN. (2026). *NTE INEN 1529-5*. Obtenido de Determinación de la cantidad de microorganismos aerobios mesófilos. Control microbiológico de los alimentos.: <https://studylib.es/doc/4562968/n-te-inen-1529-5--control-microbiol%C3%B3gico-de-los-alimentos>
- ISO. (2018). *ISO 22000 - Sistemas de gestión de la inocuidad alimentaria*.
- Kiran, D. R. (2021). *Total quality management: Key concepts and case studies*. Butterworth-Heinemann.
- Mora, A. &. (2019). *Internet de las Cosas (IoT): Protocolos de comunicación y seguridad en sistemas embebidos*. Editorial Tecnológica.
- Mousavi, S. M. (2021). Smart Sensing and Calibration in IoT-Based Thermal Monitoring Systems. *IEEE Sensors Journal*.
- Oakland, J. S. (2022). *Total quality management and operational excellence*. Routledge.
- OPS, O. P. (2021). *Manual de prácticas higiénicas para la manipulación de alimentos*. Obtenido de Organización Panamericana de la Salud (OPS): <https://iris.paho.org>
- OSRAM. (2023). *LED lifetime and reliability: Technical application guide*. OSRAM Opto Semiconductors.

- Prasad, K. D. (2023). Application of quality function deployment for product design improvement. En *International Journal of Quality & Reliability Management* (págs. 451–468).
- SafetyCulture. (13 de 02 de 2025). *SafetyCulture*. Obtenido de Cadena de frío alimentos: De la granja al tenedor.: <https://safetyculture.com/es/temas/gestion-de-la-cadena-de-frio/cadena-de-frio-alimentos>
- School, O. B. (09 de 11 de 2024). *OBS Business School*. Obtenido de ¿Qué es un mapa de procesos AS IS? : <https://www.obsbusiness.school/blog/que-es-un-mapa-de-procesos> [obsbusiness.school]
- Signify. (2022). *LED lighting reliability and lifetime: Technical specifications. Signify (Philips Lighting)*.
- Steinhart, J. S. (1968). Calibration curves for thermistors. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*.
- Systems, E. (2023). *ESP8266EX Datasheet v1.7: High Performance Wireless SoC*. Obtenido de Espressif Systems. : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf
- TECNOINCAR. (17 de 10 de 2024). *Automatización en la Industria Cárnica - TECNOINCAR*. Obtenido de <https://tecnoincar.com/automatizacion-en-la-industria-carnica/>
- UniversalTelegramBot. (2022). *GitHub*. . Obtenido de Telegram Bot API Library for Arduino [Proyecto de código abierto].: <https://github.com/witnessmenow/Universal-Arduino-Telegram-Bot>

ANEXOS

Anexo 1: Ficha técnica – microcontrolador ESP8266

PLACA NodeMCU 1.0 (V2)

PINOUT

ESP8266 12E

Antena en placa

NOTAS:

- El voltaje de alimentación (V_{in}) debe estar comprendido entre 5 V y 10 V.
- La intensidad de **máxima** de salida a un pin es de 12 mA. No se debe demandar mas intensidad para no quemar el procesador. La intensidad de salida normal será de 6 mA.
- Para activar el modo de reposo (*sleep mode*), unir los pines GPIO16 (D0) y RESET y poner el pin GPIO16 en tensión (*HIGH*). Para reactivar (*wakeup*), quitar la tensión en el pin GPIO16 (*LOW*). El sistema se reiniciará.
- En *boot/reset/wakeup* (inicio/reseteo/reactivado), los pines GPIO00 (D3) ó GPIO15 (D8) **no** deben estar con tensión (*+3.3V*). **Tampoco** el pin GPIO2 (D4) debe estar conectado a tierra (*+0.0V*).
- Los pines GPIO01 (TX) y GPIO03 (RX) se utilizan en el puerto MicroUSB, por lo que no se deben utilizar **simultáneamente** con otro dispositivo ya que la conexión se interferiría.
- Los pines GPIO00 y GPIO02 **no** debe utilizarse para lectura (*input*). El pin GPIO09 **no** debe utilizarse ni para lectura ni para escritura (*input/output*).
- El pin GPIO02 (D4) controla el LED azul del ESP8266. Se enciende cuando no tiene tensión (*+0.0V*).
- El pin GPIO16 (D0) controla el LED azul de la placa. Se enciende cuando no tiene tensión (*+0.0V*). *(En la placa LoLin este LED no está disponible).*
- Para flashear, en el caso de que la placa quede bloqueada, se debe conectar el pin GPIO00 (D3) a tierra, el MicroUSB con el ordenador y ejecutar el flasher.

- Vin ALIMENTACIÓN EXTERNA (de 5V a 10V).
- 3.3 V ALIMENTACIÓN INTERNA (desde la placa a dispositivos).
- GND TIERRA (GND *Ground*).
- GPIO PIN DE ENTRADA/SALIDA +3,3V (GPIO *General Purpose Input/Output*).
Entrada digital . Entrada analógica . (Todas las salidas son digitales).
- ADC PIN DE SALIDA ANALÓGICA (el rango es entre +0V y +1V dividido en 1023 intervalos).
- SPI BUS SPI (*Serial Peripheral Interface*).
- HSPI BUS HSPI (*Hardware-Serial Peripheral Interface*).
- SDIO PINES PARA INICIO DEL ESP8266 DESDE UNA TARJETA SD.
Para activar el modo SDIO el pin GPIO 15 debe estar en tensión cuando se enciende la placa.
- TX/RX COMUNICACIÓN SERIE TX/RX.
Los pines GPIO01 y GPIO02 están conectados al puerto MicroUSB a través del convertor UART.

www.esploradores.com

Anexo 2: Ficha técnica – Sonda SB70 18/22

Sensor SB-70

DESCRIPCIÓN:

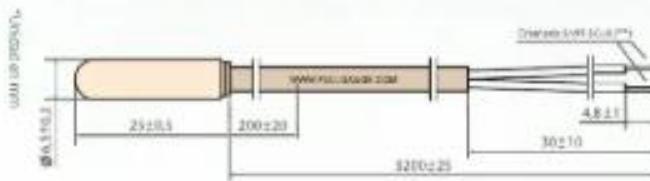
Sensor NTC con cable de poliéster termoplástico y aislamiento individual. Opera en el rango de temperatura de -50°C hasta 105°C.

INSTRUMENTOS COMPATIBLES:

Todos los instrumentos de temperatura, **excepto** los modelos:

- MT-622E
- TO-711B
- TO-711F
- TO-712B
- TO-712F
- TO-721B
- TO-741B
- TO-761B

DIMENSIONES:



COLOR DEL CABLE:
Blanco

TIPO DE CAPSULA:
Poliéster termoplástico

MÁS INFORMACIONES:

- **NTC:** Resistencia en 10K hasta 25°C
- **Rango de temperatura:** -50°C hasta 105°C
- **Precisión:** 1%FS
- **Tiempo de respuesta:** Menos de 10 segundos. Ensayo en agua según IEC 751. Tiempo necesario para alcanzar el 63,2% de la temperatura.
- **Prueba de tracción:** Pmax = 4kgf

TIP DE FULL GAUGE

Los accesorios que simplifican su instalación



CONSULTE NUESTRO GRUPO DE VENTAS PARA MÁS INFORMACIÓN



www.fullgauge.com
comex@fullgauge.com

Anexo 3: Ficha técnica – SHT31



DESCRIPCIÓN

INFO

El sensor digital de temperatura y humedad relativa **SHT31** permite realizar mediciones muy precisas a bajo costo. El sensor SHT31 posee mejores prestaciones respecto a los sensores DHT11 y DHT22, como mejor resolución, mayor precisión y un empaque más compacto. Utilizado en aplicaciones de control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura y más.

Su integración es sencilla tanto a nivel de software como hardware. A nivel de software se dispone de librerías para Arduino con soporte para el protocolo I2C. En cuanto al hardware solo son necesarios 4 cables: dos de alimentación y dos de datos I2C.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Voltaje de Operación: 2.4V a 5.5V DC
- Interfaz de comunicación: I2C
- Dirección I2C: 0x44
- Rango de trabajo Temperatura: -40° a 125°C
- Resolución Temperatura: 0.015°C
- Precisión Temperatura: 0.2°C
- Rango de trabajo Humedad: 0 a 100% RH
- Resolución HR: 0.01 %RH
- Precisión HR: 2% RH
- Tiempos de muestreo rápidos

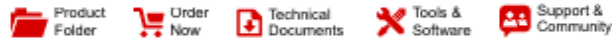
CONEXIÓN

- VIN: +3.3V/+5V DC
- GND: Tierra 0V
- SCL: I2C Clock
- SDA: I2C Data

LINKS

- [Datasheet SHT31](#)
- [Librería para Arduino](#)
- [Tutorial Adafruit](#)
- [Tutorial Wemos y SHT31](#)

Anexo 4: Ficha técnica – ADS1115



ADS1113, ADS1114, ADS1115

SBAS444D –MAY 2009–REVISED JANUARY 2018

ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator

1 Features

- Ultra-Small X2QFN Package:
2 mm × 1.5 mm × 0.4 mm
- Wide Supply Range: 2.0 V to 5.5 V
- Low Current Consumption: 150 μ A
(Continuous-Conversion Mode)
- Programmable Data Rate:
8 SPS to 860 SPS
- Single-Cycle Settling
- Internal Low-Drift Voltage Reference
- Internal Oscillator
- I²C Interface: Four Pin-Selectable Addresses
- Four Single-Ended or Two Differential Inputs
(ADS1115)
- Programmable Comparator (ADS1114 and
ADS1115)
- Operating Temperature Range:
–40°C to +125°C

2 Applications

- Portable Instrumentation
- Battery Voltage and Current Monitoring
- Temperature Measurement Systems
- Consumer Electronics
- Factory Automation and Process Control

3 Description

The ADS1113, ADS1114, and ADS1115 devices (ADS111x) are precision, low-power, 16-bit, I²C-compatible, analog-to-digital converters (ADCs) offered in an ultra-small, leadless, X2QFN-10 package, and a VSSOP-10 package. The ADS111x devices incorporate a low-drift voltage reference and an oscillator. The ADS1114 and ADS1115 also incorporate a programmable gain amplifier (PGA) and a digital comparator. These features, along with a wide operating supply range, make the ADS111x well suited for power- and space-constrained, sensor measurement applications.

The ADS111x perform conversions at data rates up to 860 samples per second (SPS). The PGA offers input ranges from ± 256 mV to ± 6.144 V, allowing precise large- and small-signal measurements. The ADS1115 features an input multiplexer (MUX) that allows two differential or four single-ended input measurements. Use the digital comparator in the ADS1114 and ADS1115 for under- and overvoltage detection.

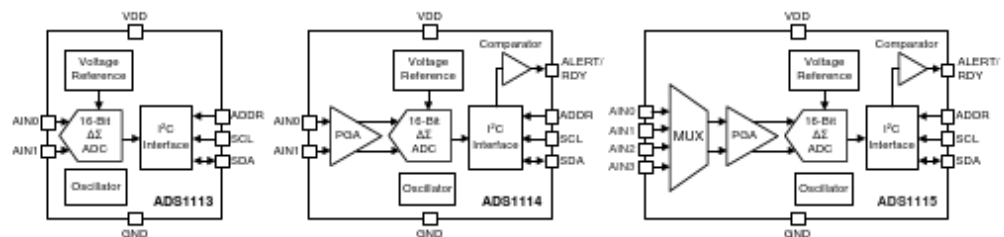
The ADS111x operate in either continuous-conversion mode or single-shot mode. The devices are automatically powered down after one conversion in single-shot mode; therefore, power consumption is significantly reduced during idle periods.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
ADS111x	X2QFN (10)	1.50 mm × 2.00 mm
	VSSOP (10)	3.00 mm × 3.00 mm

⁽¹⁾ For all available packages, see the package option addendum at the end of the data sheet.

Simplified Block Diagrams



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Anexo 5: Ficha técnica – Pantalla OLED

PINOUT

Display Oled Azul y Blanco 128×64 0.96" I2C SSD1315



Pin	Función
GND	GND Pin negativo
VCC	Pin de alimentación 3.3V a 5V
SCL	Señal de reloj del bus.
SDA	Es la línea de datos.

Anexo 6: Código – Arduino IDE

```
/*
=====
PROYECTO: SISTEMA DE MONITOREO TÉRMICO Y LUMÍNICO (VERSIÓN DE DEFENSA FINAL)
TESIS: DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA Y
CONDICIONES DE ILUMINACIÓN EN CÁMARAS DE REFRIGERACIÓN
AUTOR: BYRON HURTADO AGUIRRE
ESTRUCTURA: Arquitectura de Software por Capas para Sistemas Embebidos
.
=====
*/

// --- [CAPA 1: GESTOR DE DEPENDENCIAS Y LIBRERÍAS] ---
// Inclusión de bibliotecas externas para el control de periféricos y
// protocolos.
#include <Wire.h> // Protocolo I2C para comunicación síncrona
maestro-esclavo.
#include <Adafruit_ADS1X15.h> // Driver para el ADC de alta resolución (16
bits).
#include <Adafruit_GFX.h> // Núcleo de funciones gráficas avanzadas.
#include <Adafruit_SSD1306.h> // Controlador específico para el panel OLED
128x64.
#include <math.h> // Librería matemática para funciones
logarítmicas (NTC).
#include <Adafruit_SHT31.h> // Driver para sensor capacitivo de humedad
relativa.
#include <ESP8266WiFi.h> // Driver de red para el SoC ESP8266.
#include <ESP8266HTTPClient.h> // Implementación del protocolo HTTP (REST
API).
#include <WiFiClientSecure.h> // Capa de seguridad TLS/SSL para Telegram.
#include <UniversalTelegramBot.h> // Wrapper para la API de bots de
mensajería.
#include <ArduinoJson.h> // Serialización y parseo de objetos JSON.

/* --- [CAPA 2: DEFINICIONES DE SISTEMA Y CREDENCIALES] --- */
// Parámetros de red y llaves de autenticación para servicios externos.
const char* ssid = "SIMANTEC_SANTHY";
const char* password = "Rubicon7.9";
const char* serverPath = "http://api.thingspeak.com/update"; // Endpoint de
telemetría.
const char* apiKey = "3Z4YL3G5LSK0X6HQ"; // Write API Key de
ThingSpeak.
#define BOTtoken "8791499029:AAEXfNJe0XgmF089x7Gn3GNrB76J8L1Unik"
#define CHAT_ID "2136554921"

// Objetos globales de comunicación segura.
WiFiClientSecure clientSecure;
UniversalTelegramBot bot(BOTtoken, clientSecure);

/* --- [CAPA 3: CONFIGURACIÓN DE PERIFÉRICOS I/O] --- */
// Definición de geometría de pantalla y direcciones de hardware.
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);
Adafruit_ADS1115 ads; // Conversor Analógico-Digital.
```

```

Adafruit_SHT31 sht31 = Adafruit_SHT31();

// Asignación de pines (Pinout del ESP8266 NodeMCU)
#define PIN_I2C_SDA D2 // Bus de Datos I2C.
#define PIN_I2C_SCL D1 // Bus de Reloj I2C.
#define LED_OK D5 // Feedback visual: Estado Óptimo.
#define LED_ALARM D6 // Feedback visual: Fuera de Rango.
#define LED_ERROR D7 // Feedback visual: Fallo Crítico de Hardware.
#define BTN_RESET D4 // Pulsador de interrupción manual de alarma.

/* --- [CAPA 4: PARÁMETROS METROLÓGICOS Y CALIBRACIÓN] --- */
// Variables para el procesamiento de datos del sensor NTC (SB70).
const float VCC_REAL = 3.318f; // Voltaje de alimentación medido en el riel.
const float R_FIXED = 9800.0f; // Resistencia de referencia en el divisor de tensión.
const float R25 = 10000.0f; // Resistencia característica del NTC a 25°C.
const float T0 = 298.15f; // Temperatura base en Kelvin.
float BETA = 6030.0f; // Coeficiente de sensibilidad térmica del NTC.
float K_V = 1.6467f; // Coeficiente de compensación de lectura.
const float CAL_M = 1.0f; // Pendiente de ajuste lineal (Calibración).
const float CAL_B = -0.90f; // Intercepto/Desplazamiento (Calibración).

// Definición de Límites de Control Térmico
const float FRIDGE_MIN = 0.0f; // Límite de refrigeración inferior.
const float FRIDGE_MAX = 4.0f; // Límite de refrigeración superior.
const float HYST = 0.5f; // Margen de histéresis para estabilidad del lazo.
bool alarmFridge = false; // Estado lógico de la alarma.

/* --- [CAPA 5: MÓDULOS DE CONECTIVIDAD] --- */

// Proceso de inicialización de red Wi-Fi (Modo STA - Station).
void setupWiFi() {
  display.clearDisplay();
  printCentered("CONECTANDO WI-FI", 10);
  display.display();
  WiFi.begin(ssid, password);
  int counter = 0;
  // Timeout de 7.5 segundos para evitar bloqueo infinito del sistema.
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && counter < 15) {
    delay(500); display.print("."); display.display();
    counter++;
  }
  display.clearDisplay();
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    clientSecure.setInsecure(); // Ignora validación de certificados para optimizar memoria.
    printCentered("WI-FI CONECTADO", 15);
  } else {
    printCentered("MODO OFFLINE", 25); // Fallback si el AP no está disponible.
  }
  display.display();
}

```

```

    delay(2000);
}

// Interfaz de mensajería para alertas remotas.
void sendTelegramReport(String evento, float temp, float hum, bool luz, bool
errorSonda) {
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;
    String mensaje = "📡 *REPORTE DE SISTEMA*\n";
    mensaje += "📅 *Evento:* " + evento + "\n\n";
    mensaje += "🌡️ *Temp. Sonda:* " + (errorSonda ? "N/A (ERROR)" : String(temp,
2) + " °C") + "\n";
    mensaje += "💧 *Hum. Amb:* " + String(hum, 1) + " %\n";
    mensaje += "💡 *Luz:* " + String(luz ? "ENCENDIDA 📶" : "APAGADA 📴") + "\n";
    mensaje += "🔧 *Sonda:* " + String(errorSonda ? "FALLO TECNICO ❌" :
"OPERATIVA ✅");
    bot.sendMessage(CHAT_ID, mensaje, "Markdown");
}

/* --- [CAPA 6: ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO ANALÓGICO] --- */

// Convertor de Tensión a Impedancia (Ley de Ohm en divisor de voltaje).
float voltageToNTC(float v) {
    if (v <= 0.01f) return 1e9f; // Protección contra división por cero
(Circuito abierto).
    if (v >= (VCC_REAL - 0.05f)) return 0.0f; // Protección contra cortocircuito.
    return R_FIXED * (VCC_REAL / v - 1.0f);
}

// Implementación de la Ecuación de Steinhart-Hart (Linealización térmica).
float ntcToTempC_raw(float r) {
    if (r < 10.0f || r > 300000.0f) return NAN;
    return (1.0f / ((1.0f / T0) + (1.0f / BETA) * logf(r / R25))) - 273.15f;
}

// Utilidad para renderizado de texto en la pantalla HMI.
void printCentered(String text, int y) {
    int16_t x1, y1; uint16_t w, h;
    display.getTextBounds(text, 0, y, &x1, &y1, &w, &h);
    display.setCursor((SCREEN_WIDTH - w) / 2, y);
    display.println(text);
}

/* --- [CAPA 7: SECUENCIA DE ARRANQUE (BOOT)] --- */
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Monitorización serie para debugging.
    pinMode(BTN_RESET, INPUT_PULLUP);
    pinMode(LED_OK, OUTPUT); pinMode(LED_ALARM, OUTPUT); pinMode(LED_ERROR,
OUTPUT);

    Wire.begin(PIN_I2C_SDA, PIN_I2C_SCL); // Inicio del bus de datos local.
    ads.begin(0x48); // Inicio del convertor A/D.
    sht31.begin(0x44); // Inicio del sensor ambiental.

    display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); // Inicialización de pantalla.

```

```

    delay(2000);
}

// Interfaz de mensajería para alertas remotas.
void sendTelegramReport(String evento, float temp, float hum, bool luz, bool
errorSonda) {
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;
    String mensaje = "📡 *REPORTE DE SISTEMA*\n";
    mensaje += "📅 *Evento:* " + evento + "\n\n";
    mensaje += "🌡️ *Temp. Sonda:* " + (errorSonda ? "N/A (ERROR)" : String(temp,
2) + " °C") + "\n";
    mensaje += "💧 *Hum. Amb:* " + String(hum, 1) + " %\n";
    mensaje += "💡 *Luz:* " + String(luz ? "ENCENDIDA 📶" : "APAGADA 📴") + "\n";
    mensaje += "🔧 *Sonda:* " + String(errorSonda ? "FALLO TECNICO ❌" :
"OPERATIVA ✅");
    bot.sendMessage(CHAT_ID, mensaje, "Markdown");
}

/* --- [CAPA 6: ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO ANALÓGICO] --- */

// Convertor de Tensión a Impedancia (Ley de Ohm en divisor de voltaje).
float voltageToNTC(float v) {
    if (v <= 0.01f) return 1e9f; // Protección contra división por cero
(Circuito abierto).
    if (v >= (VCC_REAL - 0.05f)) return 0.0f; // Protección contra cortocircuito.
    return R_FIXED * (VCC_REAL / v - 1.0f);
}

// Implementación de la Ecuación de Steinhart-Hart (Linealización térmica).
float ntcToTempC_raw(float r) {
    if (r < 10.0f || r > 300000.0f) return NAN;
    return (1.0f / ((1.0f / T0) + (1.0f / BETA) * logf(r / R25))) - 273.15f;
}

// Utilidad para renderizado de texto en la pantalla HMI.
void printCentered(String text, int y) {
    int16_t x1, y1; uint16_t w, h;
    display.getTextBounds(text, 0, y, &x1, &y1, &w, &h);
    display.setCursor((SCREEN_WIDTH - w) / 2, y);
    display.println(text);
}

/* --- [CAPA 7: SECUENCIA DE ARRANQUE (BOOT)] --- */
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Monitorización serie para debugging.
    pinMode(BTN_RESET, INPUT_PULLUP);
    pinMode(LED_OK, OUTPUT); pinMode(LED_ALARM, OUTPUT); pinMode(LED_ERROR,
OUTPUT);

    Wire.begin(PIN_I2C_SDA, PIN_I2C_SCL); // Inicio del bus de datos local.
    ads.begin(0x48); // Inicio del convertor A/D.
    sht31.begin(0x44); // Inicio del sensor ambiental.

    display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); // Inicialización de pantalla.

```

```

display.clearDisplay();
display.setTextColor(WHITE);
printCentered("INICIANDO SISTEMA", 25);
display.display();

delay(2000);
setupWiFi(); // Conexión a la infraestructura de red.
}

/* --- [CAPA 8: NÚCLEO DE TIEMPO REAL (TASK MANAGER)] --- */
void loop() {
  // Variables estáticas para persistencia entre ciclos de loop.
  static uint32_t resetBlockTime = 0, lastRead = 0, lastHttpRequest = 0;
  static bool lastLightState = false, lastTempAlarmState = false,
  lastProbeErrorState = false;

  // 1. Escaneo de Interrupción por Software (Manejo del Pulsador)
  if (digitalRead(BTN_RESET) == LOW) {
    alarmFridge = false; // Desactivación manual de alerta.
    resetBlockTime = millis(); // Inicia temporizador de bloqueo.
  }
  bool resetActive = (millis() - resetBlockTime < 3000); // Bloqueo de 3s
  post-reset.

  // 2. Tarea: Muestreo y Digitalización de Sensores (Frecuencia: 2Hz)
  if (millis() - lastRead > 500) {
    lastRead = millis();
    ads.setGain(GAIN_ONE); // Configuración de ganancia del ADC.

    // Adquisición de señales crudas y filtrado.
    float v0 = ads.computeVolts(ads.readADC_SingleEnded(0)) * K_V;
    float v1 = ads.computeVolts(ads.readADC_SingleEnded(1));
    float t_raw = ntcToTempC_raw(voltageToNTC(v0));
    bool lightOn = (v1 < 1.0f); // Lógica binaria para detección de luz.
    bool probeError = (isnan(t_raw) || v0 > (VCC_REAL - 0.1f));

    // Aplicación de modelos de calibración.
    float t = (CAL_M * t_raw) + CAL_B;
    float tAmb = sht31.readTemperature();
    float humAmb = sht31.readHumidity();

    // 3. Tarea: Lógica de Comparación y Estados de Control.
    if (!probeError && !resetActive) {
      if (t < FRIDGE_MIN || t > FRIDGE_MAX) alarmFridge = true;
      else if (t > (FRIDGE_MIN + HYST) && t < (FRIDGE_MAX - HYST)) alarmFridge =
false;
    }

    // 4. Tarea: Gestión de Telemetría Basada en Eventos (Telegram).
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
      if (probeError != lastProbeErrorState) {
        sendTelegramReport(probeError ? "ERROR CRITICO: SONDA" : "SONDA
RECUPERADA (OK)", t, humAmb, lightOn, probeError);
        lastProbeErrorState = probeError;
      }
    }
  }
}

```

```

    }
    if (!probeError && !resetActive) {
        if (lightOn != lastLightState) {
            sendTelegramReport(lightOn ? "LUZ ENCENDIDA" : "LUZ APAGADA", t,
humAmb, lightOn, probeError);
            lastLightState = lightOn;
        }
        if (alarmFridge != lastTempAlarmState) {
            sendTelegramReport(alarmFridge ? "TEMP FUERA DE RANGO" : "TEMP
NORMALIZADA", t, humAmb, lightOn, probeError);
            lastTempAlarmState = alarmFridge;
        }
    }
}

// 5. Tarea: Publicación de Telemetría IoT (ThingSpeak - Cada 20s).
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED && (millis() - lastHttpRequest > 20000)) {
    WiFiClient client; HTTPClient http;
    // Empaquetado de datos en formato URL Encode para servidor ThingSpeak.
    String url = String(serverPath) + "?api_key=" + apiKey +
        "&field1=" + (alarmFridge ? "0" : "1") +
        "&field2=" + String(t, 2) +
        "&field3=" + String(humAmb, 1) +
        "&field4=" + (lightOn ? "0" : "1") +
        "&field5=" + (probeError ? "0" : "1");
    http.begin(client, url); http.GET(); http.end();
    lastHttpRequest = millis();
}

// 6. Tarea: Actualización de Interfaz HMI (Visualización en Tiempo Real).
display.clearDisplay();
display.setTextSize(1); display.setCursor(0, 0);
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    display.print("IP:");
    display.print(WiFi.localIP()); // Identificación única del dispositivo en
la red local.
} else {
    display.print("CLOUD: OFFLINE");
}

// Renderizado de alertas y métricas en pantalla.
if (probeError) {
    display.setCursor(0, 30); printCentered("!!! ERROR SONDA !!!", 30);
    digitalWrite(LED_ERROR, HIGH); digitalWrite(LED_OK, LOW);
} else {
    display.setTextSize(2); display.setCursor(0, 14);
    display.print(t, 2); display.print(" C");
    display.setTextSize(1); display.setCursor(0, 35);
    display.print(lightOn ? "!!! LUZ ENCENDIDA !!!" : "LUZ: APAGADA (OK)");
    display.setCursor(0, 48);
    display.print("SHT31: "); display.print(tAmb, 1); display.print("C ");
display.print(humAmb, 0); display.print("%");
    digitalWrite(LED_ERROR, LOW);
}
}

```

```
    // Indicadores de estado de ejecución.
    if (resetActive) { display.setCursor(0, 57); display.print("RESET
ACTIVO..."); }
    else if (alarmFridge && !probeError) { display.setCursor(0, 57);
display.print("! ERROR RANGO"); }
    display.display();
}

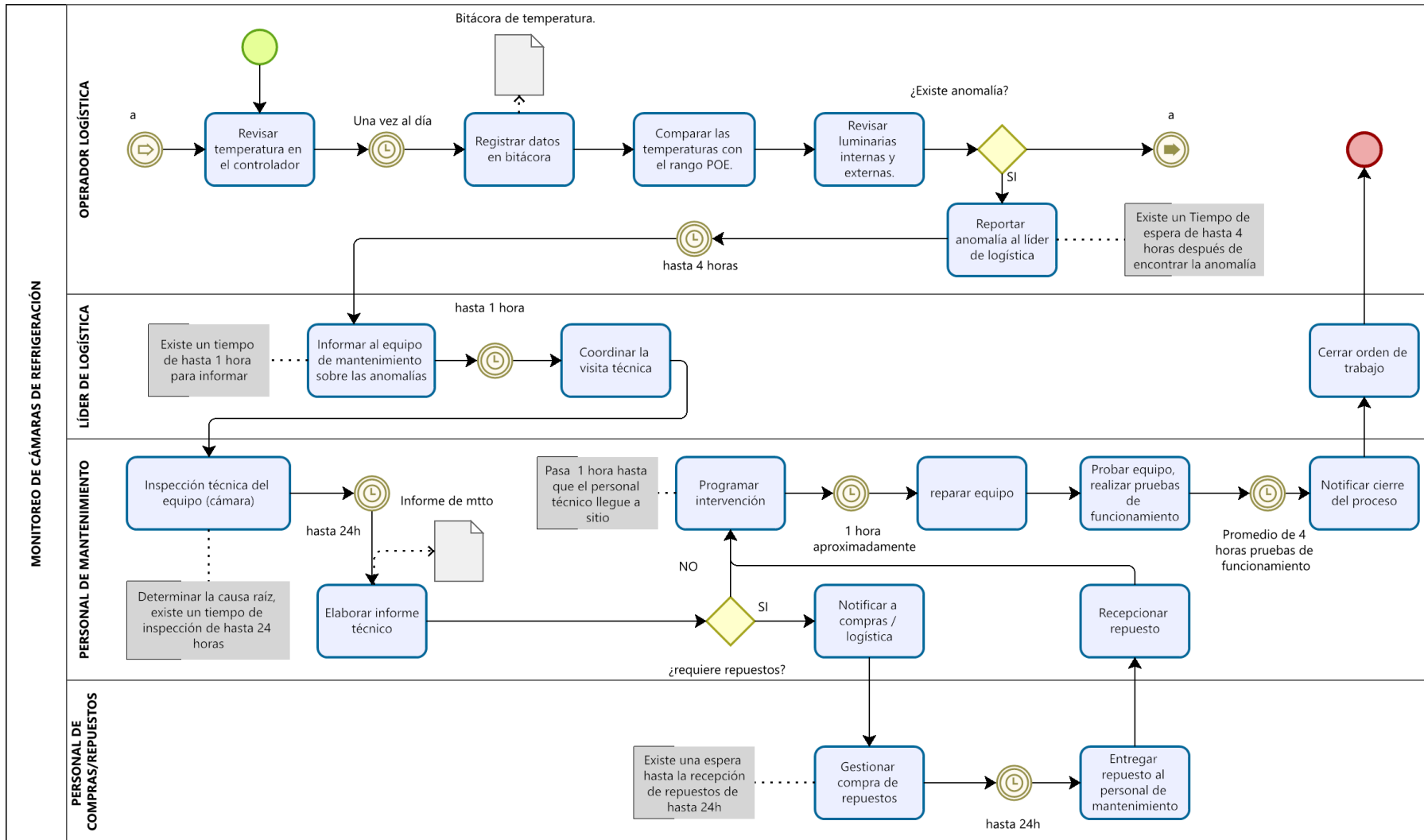
// 7. Tarea: Control del Actuador Visual (Señalización LED de Alarma).
if (alarmFridge && !lastProbeErrorState) {
    digitalWrite(LED_OK, LOW);
    digitalWrite(LED_ALARM, (millis() / 300) % 2); // Efecto visual de parpadeo
(Duty cycle 50%).
} else if (!lastProbeErrorState) {
    digitalWrite(LED_OK, HIGH); digitalWrite(LED_ALARM, LOW);
}
}
```

Anexo 7: Cursograma AS – IS

CURSOGRAMA ANALÍTICO DEL PROCESO AS - IS						PÁGINA 1 DE 1					
EMPRESA:		HOJA #:	1 DE 1		EQUIPO:						
FINCA:		OPERARIO:	✓		MATERIAL:						
PROCESO	MONITOREO ACTUAL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN		RESUMEN								
ACTIVIDAD: Monitoreo del sistema de refrigeración de cámaras		ACTIVIDAD		ACTUAL				PROPUESTO			
				Act.	T (min)	Dist.	%	T (min)	Dist.		
MÉTODO	Actual		OPERACIÓN	●	7	229	0	6%			
LUGAR:			TRANSPORTE	➡	1	30	0	1%			
ELABORADO:	Byron Hurtado		ESPERA	⏸	3	1740	0	46%			
FECHA	jueves, 1 de enero de 2026		INSPECCIÓN	■	6	1698	0	44%			
			ALMACENAMIENTO	▼	4	126	0	3%			
TOTAL					21	3823	0	100%			
N°	DESCRIPCIÓN	ACTIVIDAD					Dist (mtrs)	Tiempo (min)	horas	UNIDAD	OBSERVACIONES
		NVA - NNVA - VA	●	➡	⏸	■					
1	Revisar temperatura en el controlador	NVA					1,2	0,02			
2	Registrar datos en bitácora	NNVA					6	0,10			
3	Comparar con rango POE	NVA					4,8	0,08			
4	Revisar luminarias	NVA					6	0,10			
5	Evaluar anomalía	VA					6	0,10			
6	Espera para reportar anomalía	NVA					240	4,00			
7	Reportar anomalía	NVA	●				3	0,05			
8	Espera para informar mantenimiento	NVA					60	1,00			
9	Informar al equipo de mantenimiento	NNVA	●				6	0,10			
10	Coordinar visita técnica (Diagnóstico)	NNVA	●				30	0,50			
11	Inspección técnica del equipo	VA					1440	24,00			
12	Elaborar informe técnico	NVA					60	1,00			
13	Notificar a compras/logística	NNVA	●				10	0,17			
14	Gestionar compra de repuestos	NVA					1440	24,00			
15	Entregar repuestos	NNVA	●				30	0,50			
16	Recepcionar repuestos	NNVA					30	0,50			
17	Coordinar visita técnica (reparación)	NNVA	●				30	0,50			
18	Reparar equipo	VA	●				120	2,00			
19	Probar funcionamiento	VA					240	4,00			
20	Notificar cierre del proceso	NVA	●				30	0,50			
21	Cerrar orden de trabajo	NNVA					30	0,50			
TOTAL GENERAL			7	1	3	6	4	3823	63,72		
								63 horas y 43min			

Cálculo % de actividades de valor agregado	VA	5
	NNVA	9
	NVA	7

Anexo 8: Diagrama AS – IS



Anexo 9: Diagrama TO – BE

CURSOGRAMA ANALÍTICO DEL PROCESO TO-BE										PÁGINA 1 DE 1		
EMPRESA:			HOJA #: 1 DE 1		EQUIPO:							
FINCA:			OPERARIO: ✓		MATERIAL:							
PROCESO: MONITOREO ACTUAL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN			RESUMEN									
ACTIVIDAD: Monitoreo del sistema de refrigeración de cámaras			ACTIVIDAD			ACTUAL				PROPUESTO		
			OPERACIÓN	TRANSPORTE	ESPERA	INSPECCIÓN	ALMACENAMIENTO	Act.	T (min)	Dist.	%	T (min)
MÉTODO: Actual						●	8	902	0	43%		
LUGAR:						➡	5	860	0	41%		
ELABORADO: Byron Hurtado						⏸	1	80	0	4%		
FECHA: jueves, 1 de enero de 2026						■	5	258	0	12%		
						▼	1	5	0	0%		
TOTAL							20	2105	0	100%		
Nº	DESCRIPCIÓN	NVA - NNVA - VA	ACTIVIDAD					Dist (mtrs)	Tiempo (min)	horas	UNIDAD	OBSERVACIONES
			●	➡	⏸	■	▼					
1	Monitoreo automático	NNVA	●					1	0,02			
2	Análisis de datos	NNVA	●					1	0,02			
3	Detectar anomalía	NVA	●					1	0,02			
4	Generar alerta	NNVA	●					1	0,02			
5	Recepción alerta	NNVA	●					5	0,08			
6	Inspección técnica	VA	●					720	12,00			
7	Determinar causa	VA	●					90	1,50			
8	Elaborar informe	NVA	●					60	1,00			
9	Evaluar repuestos	NNVA	●					60	1,00			
10	Solicitar repuestos	NNVA	●					10	0,17			
11	Espera repuestos	NVA	●					60	1,00			
12	Gestionar compra	NVA	●					720	12,00			
13	Recepcionar repuestos	NNVA	●					120	2,00			
14	Almacenar repuestos	NNVA	●					30	0,50			
15	Entregar repuestos	NNVA	●					20	0,33			
16	Reparar equipo	VA	●					60	1,00			
17	Probar funcionamiento	VA	●					120	2,00			
18	Notificar cierre	NVA	●					5	0,08			
19	Cerrar orden	NNVA	●					20	0,33			
20	Fin	NVA	●					1	0,02			
21												
TOTAL GENERAL				8	5	1	5	1	2105	35,08		

35 horas y 5min

Cálculo % de actividades de valor agregado		
VA	5	
NNVA	6	
NVA	9	

Anexo 10: Diagrama de flujo Algoritmo

