

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188
JUNIO 2026

Nro.
13
EDICIÓN
DIGITAL

INDEXADA AL DIALNET



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia García Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Ing. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rector
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición impresa N°13 Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Sanabria Camacho
Ing. Mario Zenteno Benitez PhD.
Ing. Oswaldo Terán Modragón PhD.
Ing. Mónica Lino Humerez PhD.
Ing. Franz Zenteno Benitez PhD.

Diseño Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM Latinoamericana

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<http://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Dirección:
Av. Mcal. Santa Cruz, Plaza Del Obelisco.
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería.
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 13
JUNIO - 2026**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.	Rectora
Dr. Tito V. Estevez Martini	Vicerrector
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco	Decano Facultad de Ingeniería
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina	ViceDecano. Facultad de Ingeniería
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco	Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 13 - Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho
Ing. Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Ing. Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
Ing. Paula Mónica Lino Humerez Ph.D.
Ing. Franz Zenteno Benítez Ph.D.

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

Frente a la volatilidad social y económica actual, la 13ª edición de la Revista Científica INDUSTRIAL 4.0 demuestra cómo la ingeniería industrial actúa como un flujo sinérgico que transfiere innovación integral a las organizaciones. Este ecosistema unificado inicia en la transformación digital, donde el Control basado en eventos para la eficiencia energética optimiza el flujo de datos industriales en procesos complejos. Dicha eficiencia se traslada al ámbito de la salud con el Monitoreo inteligente mediante IoT en Farmacéutica, asegurando estricta trazabilidad térmica regulatoria, y se acopla a las decisiones comerciales y de inventarios con el Pronóstico de la demanda mediante el modelo Prophet, reduciendo drásticamente la incertidumbre logística.



Esta resiliencia operativa converge directamente con la sustentabilidad y el aprovechamiento de recursos. La autonomía energética industrial se impulsa con el Generador asíncrono en generación distribuida, mientras que el modelo de Inventario de Gases de Efecto Invernadero aplicado en la Facultad de Ingeniería de la UMSA audita consumos para viabilizar la reducción de costos operativos, mismo que puede ser replicado en cualquier tipo de organización. Asimismo, la Modelación matemática de los niveles de presión sonora vehicular redefine el diseño de centros logísticos urbanos. En ingeniería de procesos y economía circular, el modelado térmico de Liofilización del Copoazú y de la Liofilización del Mango añade alto valor comercial a recursos amazónicos con bajo consumo energético, sincronizándose con el uso estratégico de Chamota en pastas cerámicas estructurales para reducir costos de materias primas en la construcción.

Finalmente, se abarcan temas de la gobernanza del entorno donde se consolidan estos analizando la Dinámica de exportaciones no tradicionales, los riesgos del Ciclo inmobiliario y las estructuras para Emprendimientos industriales. Para garantizar la

confiabilidad operativa en planta, el estudio contra el P-hacking previene decisiones erróneas por falsos positivos en el control de calidad. Este despliegue de valor es articulado y sostenido por el talento humano validado por la Acreditación ARCU-SUR en la Carrera de Ingeniería Industrial de la UMSA. Así, esta edición reafirma que la frontera científica no es un esfuerzo aislado, sino un engranaje integrado de alta eficiencia y productividad que potencia la sostenibilidad socioeconómica de las organizaciones, empresas, actores normativos a nivel local y regional.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

<https://doi.org/10.53287/bbwo5071pf25c>

INDUSTRIA 4.0 EN FARMACÉUTICA: MONITOREO INTELIGENTE DE TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIANTE IoT

Ing. Rodrigo Cristhian Huanca Tarqui

N° ORCID: 0009-0007-3352-8222

rodrigoonek@gmail.com

Teléfono: 73019598

Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) – Carrera de Ingeniería Industrial

RESUMEN

El presente artículo describe el diseño, implementación y evaluación de un sistema de monitoreo inteligente de temperatura y humedad aplicado a ambientes productivos en la industria farmacéutica boliviana, específicamente en Laboratorios Farmacéuticos LAFAR. Se empleó el microcontrolador ESP32 integrado con el sensor DHT11 para la captación de variables ambientales en tiempo real, transmitiendo los datos mediante el protocolo MQTT hacia la plataforma IoT ThingsBoard, donde se procesan, visualizan y se generan alarmas automáticas ante desviaciones de los parámetros establecidos por las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM). El sistema fue desplegado en cuatro áreas de producción de una empresa farmacéutica (PREPARADO 1, TABLETEADO II, ENCAPSULADO I y BLISTEADO III), reemplazando el registro manual que implicaba hasta 40–60 minutos por turno por área, además de ser propenso a la pérdida y manipulación de datos. Los resultados demuestran que la solución IoT propuesta garantiza trazabilidad completa, disponibilidad continua de datos (24/7) y alertas en tiempo real, contribuyendo al cumplimiento normativo con las Normas BPM establecidas por la AGEMED y a la digitalización de la industria farmacéutica bajo los principios de la Industria 4.0.

Palabras Clave: IoT, ThingsBoard, temperatura, humedad, BPM, Industria 4.0, monitoreo en tiempo real.

ABSTRACT

This article describes the design, implementation, and evaluation of an intelligent temperature and humidity monitoring system applied to production environments in the Bolivian pharmaceutical industry, specifically at LAFAR Pharmaceutical Laboratories. An ESP32 microcontroller integrated with a DHT11 sensor was used to capture environmental variables in real time, transmitting data via the MQTT protocol to the ThingsBoard IoT platform, where data are processed, visualized, and automatic alerts are triggered when parameters established by Good Manufacturing Practices (GMP) are exceeded. The system was deployed across four production areas (PREPARADO 1, TABLETEADO II, ENCAPSULADO I, and BLISTEADO III), replacing manual recording that consumed up to 40–60 minutes per shift per area and was prone to data loss and manipulation. Results demonstrate that the proposed IoT solution ensures full traceability, continuous data availability (24/7), and real-time alerts, contributing to regulatory compliance with AGEMED-established GMP standards and the digitalization of the pharmaceutical industry under Industry 4.0 principles.

Keywords: IoT, ThingsBoard, temperature, humidity, GMP, Industry 4.0, real-time monitoring.

1. INTRODUCCIÓN.

La cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0, ha transformado los paradigmas productivos en numerosos sectores, integrando tecnologías digitales como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial, el big data y la computación en la nube en los procesos manufactureros. En la industria farmacéutica, esta transformación cobra especial relevancia dado que los productos medicinales requieren condiciones ambientales estrictamente controladas para garantizar su eficacia, seguridad y calidad.

En Bolivia, el marco regulatorio farmacéutico se sustenta en la Ley N° 1737 del Medicamento (1996), reglamentada mediante el Decreto Supremo N° 25235 (1998), que establece que los laboratorios industriales farmacéuticos deben cumplir con las Normas de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) de la Organización Mundial

de la Salud (OMS). La Agencia Estatal de Medicamentos y Tecnologías en Salud (AGEMED), creada mediante Decreto Supremo N° 2905 de 2016, es la entidad competente responsable de regular, auditar e inspeccionar el cumplimiento de estas normas en todos los laboratorios del país. Conforme al Artículo 29° del D.S. N° 25235, las Normas BPM de la OMS se declaran aplicables con preferencia sobre las normas ISO 9000 en el territorio boliviano.

Las Normas BPM, aprobadas mediante Resolución Ministerial N° 0296 de fecha 18 de junio de 1997, y complementadas por la Guía de Inspección de BPM para la Industria Farmacéutica (RM N° 0972 de 2005), establecen que las áreas de producción farmacéutica deben mantenerse bajo condiciones de temperatura y humedad relativa definidas, las cuales deben ser monitoreadas, registradas y trazables.

El incumplimiento de estos parámetros puede comprometer la estabilidad de los productos intermedios y terminados, lo que representa un riesgo directo para la salud pública y expone al laboratorio a sanciones regulatorias por parte de AGEMED, incluyendo la suspensión del Certificado BPM.

Sin embargo, en numerosos laboratorios farmacéuticos bolivianos, incluyendo Laboratorios LAFAR, el control de estas variables ambientales se realiza mediante registros manuales en papel, utilizando higrómetros convencionales. Este método presenta múltiples deficiencias: registros infrecuentes (cada 40 a 60 minutos por turno), alta probabilidad de pérdida o extravío de documentos, posibilidad de manipulación del dato, ausencia de alertas ante desviaciones y limitada trazabilidad histórica.

Frente a esta problemática, el presente trabajo propone e implementa un sistema de monitoreo inteligente basado en IoT, utilizando el microcontrolador ESP32 con el sensor DHT11 y la plataforma en la nube ThingsBoard. El objetivo es automatizar el registro de temperatura y humedad en las áreas productivas de LAFAR, garantizando datos en tiempo real, alertas automáticas y cumplimiento normativo BPM exigido por AGEMED.

La relevancia de esta propuesta reside en que constituye una solución de bajo costo, escalable y replicable para laboratorios farmacéuticos de pequeña y mediana escala en Bolivia, alineada con los principios de la Industria 4.0 y la transformación digital del sector salud.

2. DESARROLLO

2.1. Marco normativo boliviano y diagnóstico inicial

Laboratorios Farmacéuticos LAFAR es una empresa boliviana dedicada a la fabricación de medicamentos sólidos orales (tabletas, cápsulas, blisteados). Sus áreas de producción operan bajo los requerimientos BPM que exigen el control continuo de temperatura (entre 15 °C y 25 °C) y humedad relativa (entre 40% y 60% HR) en las zonas de manufactura.

El marco normativo aplicable en Bolivia que sustenta los requerimientos de monitoreo ambiental en la industria farmacéutica comprende:

- a) **Ley N° 1737 del Medicamento (1996):** Establece que los laboratorios industriales farmacéuticos deben cumplir con las BPM y estar sujetos a inspecciones y auditorías técnicas periódicas por parte de la autoridad competente.
- b) **Decreto Supremo N° 25235 (1998):** En su Artículo 29° declara aplicables para Bolivia las Normas BPM de la OMS. Los Artículos 37° y 38° establecen la obligatoriedad de inspección anual de los laboratorios por parte del Ministerio de Salud como requisito de reinscripción.
- c) **RM N° 0296/1997 – Normas BPM de Medicamentos:** Norma que regula las condiciones de manufactura, incluyendo los parámetros ambientales de temperatura y humedad en áreas de producción.
- d) **RM N° 0972/2005 – Guía de Inspección de BPM, Industria Farmacéutica:** Define los criterios técnicos de inspección, incluidos los sistemas de monitoreo y registro de condiciones ambientales.
- e) **Decreto Supremo N° 2905/2016 – Creación de AGEMED:** La Agencia Estatal de Medicamentos y Tecnologías en Salud es la entidad regulatoria responsable de emitir los Certificados BPM y BPA, realizar auditorías periódicas y sancionar el incumplimiento normativo.

El diagnóstico previo a la implementación, evidenció las siguientes problemáticas en el sistema de registro manual vigente en LAFAR:

- Un operador dedica entre 40 y 60 minutos por turno al registro de temperatura y humedad en todas las secciones productivas, debiendo suspender sus tareas principales para efectuar el monitoreo.
- Los registros en papel son susceptibles a pérdida, deterioro o extravío, habiéndose presentado casos documentados de datos faltantes durante auditorías internas.
- No existe ningún sistema de alerta que notifique al personal cuando los valores de temperatura o humedad se aproximan o superan los límites establecidos, lo que implica riesgo de productos fabricados fuera de especificación.
- Los datos históricos son de difícil acceso y análisis, limitando la capacidad de toma de decisiones basada en tendencias, situación incompatible con los requisitos de trazabilidad de AGEMED.
- La manipulación involuntaria o intencional del registro representa un riesgo para la integridad del dato y el cumplimiento regulatorio, aspecto crítico en las auditorías BPM.

Tabla 1: Comparación entre el sistema de registro manual y el sistema IoT propuesto

Criterio	Registro Manual	Sistema IoT (ESP32 + DHT11 + ThingsBoard)
Frecuencia de registro	Cada 1 hora por operador	Cada 2 segundos (continuo)
Riesgo de pérdida de datos	Alto (papel, olvido, deterioro)	Bajo (almacenamiento en nube)
Posibilidad de manipulación	Alta (registro manual)	Baja (datos automáticos)
Alertas en tiempo real	No disponible	Sí, mediante alarmas ThingsBoard
Costo de personal	Alto (tiempo dedicado)	Reducido (automatizado)
Trazabilidad histórica	Difícil y limitada	Completa y accesible
Cumplimiento normativo BPM (AGEMED)	Parcial	Total (registro con timestamp)

Fuente: Elaboración propia

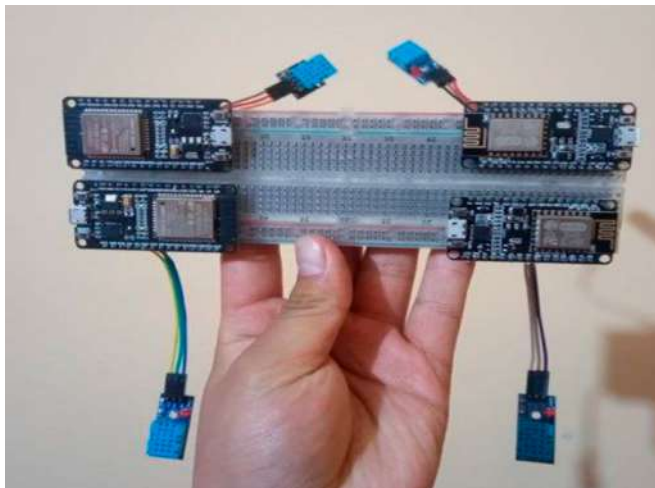
2.2 Arquitectura del sistema IoT

El sistema IoT diseñado e implementado se estructura en tres capas principales, siguiendo la arquitectura clásica de Internet de las Cosas:

- a) Capa de percepción: conformada por el sensor DHT11 integrado al microcontrolador ESP32, encargado de capturar las variables físicas de temperatura y humedad del entorno.
- b) Capa de red y transmisión: el ESP32 se conecta a la red WiFi local del laboratorio y transmite los datos mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) al servidor ThingsBoard en la nube. MQTT es un protocolo ligero de publicación/suscripción, especialmente diseñado para dispositivos IoT con recursos limitados.
- c) Capa de aplicación: ThingsBoard recibe, almacena y procesa los datos, permitiendo la visualización en tiempo real mediante dashboards interactivos, el registro histórico con timestamps automáticos y la configuración de alertas ante desviaciones de parámetros.

La Figura 1 muestra los dispositivos ESP32+DHT11 ensamblados para las cuatro áreas de producción de LAFAR.

Figura 1. Dispositivos ESP32+DHT11 ensamblados para las 4 áreas de producción de LAFAR



2.3 Componentes de hardware

2.3.1 Sensor DHT11

El DHT11 es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de bajo costo y alta disponibilidad. Utiliza un elemento resistivo para medir la humedad y un termistor NTC para la temperatura, comunicándose a través de una interfaz serial de un solo hilo (1-wire). Sus principales características se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Especificaciones técnicas del sensor DHT11

Parámetro	Valor / Especificación
Tipo de sensor	Digital capacitivo/resistivo
Rango de temperatura	0 °C a 50 °C
Precisión de temperatura	±2 °C
Rango de humedad relativa	20% HR a 90% HR
Precisión de humedad	±5% HR
Voltaje de operación	3.3 V – 5 V DC
Frecuencia de muestreo	1 muestra por segundo
Interfaz de comunicación	Digital (1-wire)
Pin de datos	GPIO 4 del ESP32

Fuente: Datasheet DHT11 – Aosong Electronics

2.3.2 Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de la empresa Espressif Systems, ampliamente utilizado en aplicaciones IoT por su integración nativa de WiFi y Bluetooth, su alto rendimiento de procesamiento y su bajo consumo energético. Las especificaciones técnicas relevantes para este proyecto se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Especificaciones técnicas del microcontrolador ESP32

Parámetro	Valor / Especificación
Procesador	Xtensa LX6 dual-core, 240 MHz
Memoria RAM	520 KB SRAM
Memoria Flash	4 MB (típico)
Conectividad WiFi	802.11 b/g/n (2.4 GHz)
Conectividad Bluetooth	BT 4.2 / BLE
Pines GPIO	34 programables
Voltaje de operación	3.3 V (alimentación 5 V vía USB)
Protocolo de comunicación	MQTT (Puerto 1883)
Plataforma de destino	ThingsBoard

Fuente: Espressif Systems – ESP32 Datasheet

2.4 Plataforma IoT: ThingsBoard

ThingsBoard es una plataforma IoT de código abierto orientada a aplicaciones industriales y educativas, que permite la recepción, almacenamiento, visualización y análisis de datos provenientes de dispositivos conectados. Para este proyecto se utilizaron las siguientes funcionalidades de ThingsBoard:

- Registro de 4 dispositivos (uno por área de producción): PREPARADO 1, TABLETEADO II, ENCAPSULADO I y BLISTEADO III, todos bajo el perfil “onek”.
- Dashboard interactivo con widgets tipo velocímetro (gauge) para visualización en tiempo real de temperatura y humedad, y gráficos de rango (range chart) para el historial.
- Timeseries table que registra automáticamente cada lectura con su timestamp, garantizando la trazabilidad exigida por BPM y las auditorías de AGEMED.
- Sistema de alertas configurables que notifica al responsable de calidad cuando la temperatura o humedad supera los límites establecidos.
- Acceso remoto desde cualquier dispositivo con conexión a internet, incluyendo smartphones y tablets.

La Figura 2 muestra el panel de gestión de dispositivos en ThingsBoard con las cuatro áreas registradas en LAFAR.

Figura 2. Panel de dispositivos en ThingsBoard con las 4 áreas registradas en LAFAR

The screenshot shows the 'Devices' management interface in ThingsBoard. It includes a 'Device Filter' button and a table with columns: Created time, Name, Device profile, Label, State, Customer, Public, and Is gateway. All four devices listed are in an 'Inactive' state.

☐	Created time ↓	Name	Device profile	Label	State	Customer	Public	Is gateway
☐	2025-01-08 21:32:50	BLISTEADO III	onek	MAC	Inactive	Public	☒	☐
☐	2025-01-08 21:32:09	ENCAPSULADO I	onek	CAP 8	Inactive	Public	☒	☐
☐	2025-01-08 20:25:29	TABLETEADO II	onek	Master	Inactive	Public	☒	☐
☐	2024-12-16 22:28:42	PREPARADO I	onek	Granulit	Inactive	Public	☒	☐

2.5 Áreas de producción monitoreadas

Tabla 4. Áreas de producción monitoreadas en Laboratorios LAFAR

Área / Sección	Temp. Requerida (°C)	Dispositivo Asignado
PREPARADO 1	15 °C – 25 °C	ESP32 #1 – Granulit
TABLETEADO II	15 °C – 25 °C	ESP32 #2 – Master
ENCAPSULADO I	15 °C – 25 °C	ESP32 #3 – CAP B
BLISTEADO III	15 °C – 25 °C	ESP32 #4 – MAC

Fuente: Elaboración propia – Laboratorios LAFAR (2025)

2.6 Implementación del firmware en ESP32

El firmware del ESP32 fue desarrollado en el entorno Arduino IDE utilizando el lenguaje C++. El código implementa la conexión WiFi, la lectura del sensor DHT11 y el envío de datos mediante el protocolo MQTT hacia el servidor ThingsBoard. A continuación se presenta la estructura principal del programa:

```
// — LIBRERÍAS UTILIZADAS —
#include <WiFi.h>           // Conexión WiFi
#include <PubSubClient.h>    // Protocolo MQTT
#include <DHT.h>             // Librería sensor DHT11

// — CONFIGURACIÓN —
#define WIFI_SSID           "RED_LABORATORIO"
#define WIFI_PASSWORD       "PASSWORD_SEGURA"
#define TOKEN                "TOKEN_THINGSBOARD"
#define THINGSBOARD_SERVER  "demo.thingsboard.io"
#define DHTPIN 4             // GPIO 4 del ESP32
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

// — SETUP —
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    dht.begin();
    conectarWiFi();
    client.setServer(THINGSBOARD_SERVER, 1883);
}

// — LOOP PRINCIPAL —
void loop() {
    if (!client.connected()) reconnect();
    client.loop();
    float temperatura = dht.readTemperature();
    float humedad      = dht.readHumidity();
    if (isnan(temperatura) || isnan(humedad)) {
        Serial.println("Error leyendo DHT11"); return;
    }
    // — PAYLOAD JSON —
    String payload = "{\"temperatura\":\"" + String(temperatura)
        + "\",\"humedad\":\"" + String(humedad) + "\"}";
    client.publish("v1/devices/me/telemetry", payload.c_str());
    delay(2000); // Transmisión cada 2 segundos
}
```

El diagrama de flujo del firmware contempla tres etapas secuenciales: (1) inicialización del sistema (WiFi, MQTT, sensor), (2) lectura periódica de temperatura y humedad, y (3) validación y transmisión de los datos a ThingsBoard. En caso de lectura inválida (valor NaN), el sistema emite una alerta en el puerto serie y reintenta la lectura en el siguiente ciclo de 2 segundos.

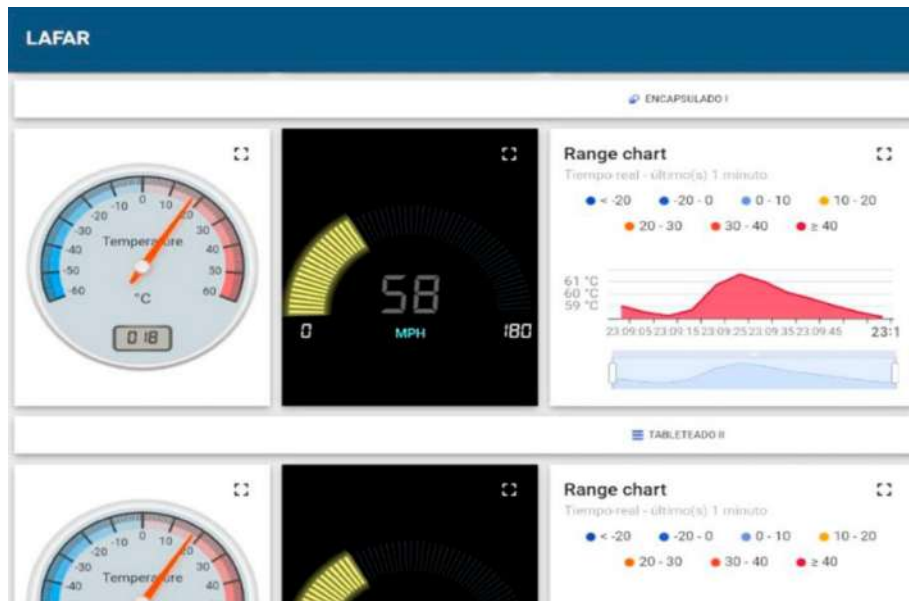
3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Funcionamiento del sistema de telemetría

El sistema demostró operar correctamente de manera continua, enviando lecturas de temperatura y humedad cada 2 segundos desde cada uno de los 4 dispositivos ESP32 hacia la plataforma ThingsBoard. La tabla de series temporales (Timeseries table) registró automáticamente cada dato con su timestamp correspondiente, cumpliendo con el requisito de trazabilidad documental exigido por las BPM y verificable ante inspecciones de AGEMED.

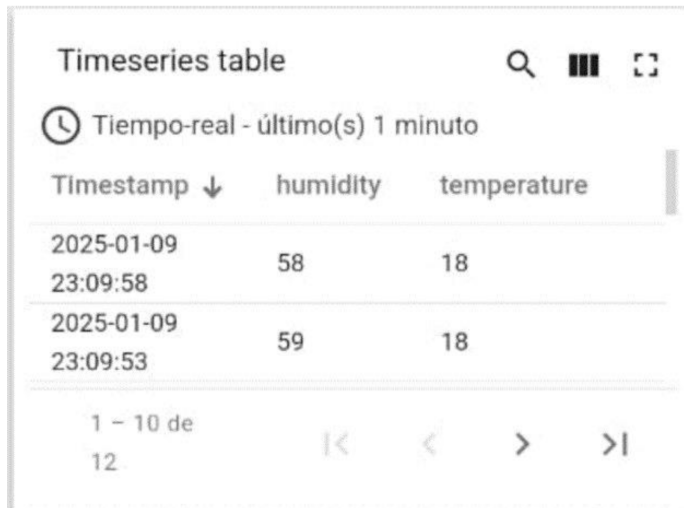
Durante las pruebas iniciales realizadas en el área de ENCAPSULADO I, se registraron valores de temperatura de 18 °C y humedad relativa de 58-59% HR, dentro de los parámetros admisibles para esa área. El sistema ThingsBoard almacenó estos datos con timestamps del 2025-01-09, confirmando el correcto funcionamiento de la telemetría MQTT. La Figura 3 muestra el dashboard interactivo con gauges de temperatura y humedad en tiempo real para dos áreas simultáneas.

Figura 3. Dashboard interactivo en ThingsBoard con gauges de temperatura y humedad en tiempo real (panel LAFAR)



La Figura 4 presenta la tabla de series temporales con los registros automáticos de temperatura y humedad con timestamps, evidenciando la trazabilidad continua del sistema.

Figura 4. Timeseries table en ThingsBoard con registro automático de temperatura (18 °C) y humedad (58-59% HR) con timestamps



The screenshot shows a 'Timeseries table' in ThingsBoard. It has a search icon, a menu icon, and a full-screen icon in the top right. Below the title is a clock icon and the text 'Tiempo-real - último(s) 1 minuto'. The table has three columns: 'Timestamp ↓', 'humidity', and 'temperature'. The data rows show two entries for 2025-01-09 at 23:09:58 and 23:09:53, with humidity values of 58 and 59, and temperature values of 18. At the bottom, it shows '1 - 10 de 12' and navigation arrows.

Timestamp ↓	humidity	temperature
2025-01-09 23:09:58	58	18
2025-01-09 23:09:53	59	18

3.2 Visualización en dashboard

El dashboard configurado en ThingsBoard bajo el nombre “LAFAR” integró para cada área: un gauge de temperatura (°C), un speedometer de humedad relativa (%), y un range chart que categoriza los valores por rangos de color, permitiendo identificar visualmente de forma inmediata si los parámetros se encuentran dentro o fuera de especificación BPM.

La visualización en tiempo real permitió al supervisor de área monitorear simultáneamente las condiciones de las 4 secciones productivas desde un único panel, accesible también desde dispositivos móviles, eliminando la necesidad de recorridos físicos para el registro de datos. Este acceso remoto resulta especialmente valioso durante turnos nocturnos o en situaciones de contingencia.

3.3 Impacto en la operación y cumplimiento BPM-AGEMED

La implementación del sistema IoT generó impactos medibles y positivos en la operación de LAFAR, resumidos en la Tabla 5. Desde el punto de vista del cumplimiento normativo, el sistema fortalece la posición de LAFAR ante las auditorías periódicas

de AGEMED al proveer registros completos, automáticos e íntegros con timestamp para todas las áreas productivas, eliminando las observaciones recurrentes por datos faltantes o ilegibles en los registros manuales.

Tabla 5. Comparación de indicadores operacionales antes y después de la implementación

Indicador	Antes del sistema	Después del sistema
Tiempo de registro por área	40–60 min/turno	0 min (automático)
Pérdida de registros	Frecuente	Eliminada
Disponibilidad de datos históricos	Limitada (papel)	100% (nube)
Alertas ante desviaciones	No existían	Inmediatas (ThingsBoard)
Confiablez del dato	Baja (manual)	Alta (sensor digital)
Cobertura de monitoreo	Parcial y discontinua	Continua 24/7
Trazabilidad para AGEMED	Parcial	Completa con timestamp
Cumplimiento BPM	Parcial	Reforzado

Fuente: Elaboración propia – Laboratorios LAFAR (2025)

3.4 Sistema de alertas

ThingsBoard permitió configurar alertas automáticas que se activan cuando los valores de temperatura o humedad superan los umbrales definidos por BPM. Estas alertas pueden enviarse por correo electrónico, SMS o notificación push, permitiendo al responsable de calidad tomar acciones correctivas de forma inmediata, antes de que las condiciones fuera de especificación puedan afectar la calidad del producto en proceso. Esta funcionalidad representa una mejora cualitativa sustancial respecto al sistema manual, donde la detección de desviaciones dependía exclusivamente de la presencia física del operador y de la frecuencia de sus rondas de registro.

En el contexto normativo boliviano, contar con evidencia documentada de la detección temprana de desviaciones y las acciones correctivas implementadas es un requisito clave valorado en las auditorías BPM de AGEMED.

3.5 Escalabilidad y costo de implementación

Uno de los aspectos más relevantes de la solución propuesta es su accesibilidad económica. El costo unitario de cada nodo de monitoreo (ESP32 + DHT11) es

inferior a USD 15, mientras que la plataforma ThingsBoard ofrece una versión de comunidad gratuita y de código abierto apta para instalaciones industriales. Esto hace que la solución sea perfectamente replicable en otros laboratorios farmacéuticos bolivianos de pequeña y mediana escala que deban cumplir con los requerimientos de AGEMED.

El sistema también es escalable, permitiendo agregar nuevos nodos de sensores para monitorear variables adicionales (presión diferencial, partículas en aire, CO₂) mediante la misma arquitectura ESP32-MQTT-ThingsBoard, sin requerir modificaciones sustanciales en la infraestructura existente.

4. CONCLUSIONES

El sistema IoT de monitoreo inteligente de temperatura y humedad implementado en Laboratorios Farmacéuticos LAFAR demostró ser una solución técnica viable, eficiente y de bajo costo para la digitalización del control ambiental en ambientes productivos farmacéuticos, alineada con los principios de la Industria 4.0 y los requerimientos normativos de la AGEMED Bolivia.

La integración del microcontrolador ESP32 con el sensor DHT11 y la plataforma ThingsBoard permitió reemplazar exitosamente el sistema de registro manual, eliminando sus principales deficiencias: pérdida de datos, falta de alertas en tiempo real, elevado tiempo operativo de registro y limitada trazabilidad. Los datos se almacenan automáticamente con timestamp en la nube, cumpliendo con los requisitos de integridad documental de las BPM establecidas por la OMS y adoptadas por Bolivia mediante la Ley N° 1737 y el D.S. N° 25235, bajo supervisión de AGEMED.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación del sistema IoT generó un ahorro de 40 a 60 minutos por turno en actividades de registro, eliminó la pérdida de registros históricos y habilitó el monitoreo continuo 24/7 de las cuatro áreas productivas con acceso remoto desde cualquier dispositivo.

El sistema de alertas configurado en ThingsBoard representa una mejora cualitativa fundamental, ya que permite la detección y respuesta temprana ante desviaciones de parámetros, reduciendo el riesgo de productos fabricados fuera de las condiciones BPM establecidas y fortaleciendo la posición del laboratorio ante las auditorías periódicas de AGEMED.

Se recomienda extender la implementación a otras áreas de producción de LAFAR y a otros laboratorios farmacéuticos bolivianos, así como explorar la integración con sensores de mayor precisión (DHT22, SHT31) para aplicaciones que requieran mayor exactitud en la medición de humedad. Asimismo, se recomienda la incorporación de variables adicionales como presión diferencial de aire para áreas clasificadas, y la evaluación de soluciones de backup de conectividad para garantizar la continuidad del monitoreo ante cortes de red.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Ing. Andrea Bravo, Jefe de planificación, por su apertura, respaldo institucional y colaboración en la implementación del presente proyecto. Asimismo, se agradece a la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Industrial, por promover la investigación aplicada en el ámbito de la Industria 4.0 y la transformación digital.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aosong Electronics Co., Ltd. (2023). DHT11 – Technical Data Sheet: Humidity and Temperature Sensor. Guangzhou: Aosong Electronics. Recuperado de <https://www.aosong.com/en/products-21.html>
- Espressif Systems. (2023). ESP32 Series Datasheet (v4.5). Shanghai: Espressif Systems. Recuperado de https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
- MQTT.org. (2019). MQTT Version 5.0 Specification. OASIS Standard. Recuperado de <https://mqtt.org/mqtt-specification/>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2014). WHO Technical Report Series No. 986 – Good Manufacturing Practices for Pharmaceutical Products: Main Principles. Ginebra: WHO.
- Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum.

- ThingsBoard Inc. (2024). ThingsBoard Documentation: MQTT API for IoT Data Transmission. Recuperado de <https://thingsboard.io/docs/reference/mqtt-api/>
- Wortmann, F., & Flüchter, K. (2015). Internet of Things: Technology and value added. Business & Information Systems Engineering, 57(3), 221–224. <https://doi.org/10.1007/s12599-015-0383-3>



Estado Plurinacional de Bolivia
Ministerio de Educación
Yach'a Kamani
Yachay Kanachiq
Morosboerendat'heero Arakuarupi

N° 000011

**COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS - CNACU**

En sujeción y al amparo de la Ley de Educación N° 070
"Avelino Siñani - Elizardo Pérez" del 20 de diciembre de 2010



CERTIFICA

Que la carrera de

**INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

de la

**UNIVERSIDAD MAYOR
DE SAN ANDRÉS**

con sede académica en la ciudad de La Paz, cumple con los criterios definidos para la

ACREDITACIÓN

del Sistema ARCU-SUR
del SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR

La Comisión Nacional de Acreditación de la Carreras Universitarias (CNACU), en uso de sus atribuciones conferidas por la Ley de la Educación N° 070 "Avelino Siñani - Elizardo Pérez", reconoce la calidad académica universitaria con alcance regional en el MERCOSUR por un periodo de (6) seis años, a partir de la fecha de su emisión.

La Paz, marzo de 2026.


MARÍA YVONNE PACHECO ANGULO
PRESIDENTA
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


DIEGO CAMACHO VELAZCO ARAMAYO
VICEPRESIDENTE
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


FREDDY MENDOZA ESPINOZA
VOCALES CELB
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


JUAN MARCELO SANZURI LIMA
SECRETARIO GENERAL
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


GUSTAVO SACRO ORTEGA ZELADA
VOCALES ANEP
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
NUEVAMENTE ACREDITADA AL SISTEMA ARCU - SUR
DEL SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR**



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

© TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS
LA PAZ - BOLIVIA
JUNIO / 2026