

Miguel Ángel Zayas Barbán [Aut: 4to]



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática**

TRABAJO DE DIPLOMA

Título

Diseño e implementación de un sistema basado en IoT para la supervisión de las variables medioambientales en la Colección de Arte y Arqueología "Francisco Prat Puig"

Autor

Miguel Ángel Zayas Barbán

Tutor

M.Sc. Angel Antonio Ravelo Batista

Noviembre, 2022

Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad de Oriente como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución para los fines que estime convenientes, tanto de forma parcial como total, y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Nombre y firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Nombre y firma del autor

Nombre y firma del Tutor

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Carrera

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Departamento

Fecha

Dedico este trabajo a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí.

A mis padres, hermana y familia en general.

A mi prometida.

A mi tutor.

A mis amigos y a mis compañeros de estudio.

Agradecimientos

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

BLE - Bluetooth Low Energy

EEPROM - Electrical Erasable Programmable Read Only Memory.

GPIO - General Purpose Input Output

HR - Humedad Relativa

HTTP - Hypertext Transfer Protocol

IoT - Internet de las Cosas o Internet of Things

Lx - Luxer (unidad de medida de la Iluminancia)

MQTT - Message Queing Telemetry Transport

M2M - Machine To Machine

PIR - Passive Infrared Sensor

PPB - Partículas Por Billón

PPM - Partículas Por Millón

RFID - Radio Frequency Identification

SN - Sensor Network (Rede de Sensores)

Wifi - Protocolo de Transmisión de Datos de Forma Inalámbrica

Índice de figuras

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1.1 | Exposición permanente | 9 |
| Figura 1.2 | Sala Memorial | 10 |
| Figura 1.3 | Ubicación piezas | 10 |
| Figura 1.4 | Comparación arquitecturas | 11 |
| Figura 1.5 | Modelos de arquitecturas IoT basados en capas | 13 |
| Figura 1.6 | Diagrama funcional de captura de datos | 16 |
| Figura 1.7 | ESP-12F basado en ESP8266 | 19 |
| | | |
| Figura 2.1 | Sensor DHT22 | 32 |
| Figura 2.2 | Dimensiones sensor DHT22 | 33 |
| Figura 2.3 | Sensor MH-Z19C | 33 |
| Figura 2.4 | Sensor piezoeléctrico M0168 | 34 |
| Figura 2.5 | Sensor SDS011 | 35 |
| Figura 2.6 | Sensor LDR | 36 |
| Figura 2.7 | Sensor LDR | 36 |
| Figura 2.8 | Sensor BH1750 | 37 |
| Figura 2.9 | Acondicionamiento sensor BH1750 | 37 |
| Figura 2.10 | Configuración de pines | 39 |
| Figura 2.11 | Acondicionamiento | 39 |
| Figura 2.12 | Correlación de valores medioambientales | 40 |

Índice de tablas

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabla 1.1 | Numeración autores | 7 |
| Tabla 1.2 | IoT en los museos internacionales | 7 |
| Tabla 1.3 | Referencias figura 1.5 | 12 |
| Tabla 1.4 | Capas de IoT | 13 |
| Tabla 1.5 | Correlación de los nodos | 22 |
| Tabla 1.6 | Variables microclimáticas recomendadas | 25 |
| Tabla 2.1 | Relación sensores | 32 |

Resumen

El presente Trabajo de Diploma trata el proceso de diseño e instalación de un sistema de monitoreo y visualización de las variables para el control del estado de conservación de las piezas pertenecientes a la Colección de Arte y Arqueología de Francisco Prat Puig ubicada en la Oficina del Historiador de la provincia de Santiago de Cuba. Se tratan generalidades sobre la aplicación del IoT en museos a nivel internacional y en Cuba. Se realiza una caracterización de los sensores a emplear para el control, así como el montaje de un sistema de seguridad. En concordancia con las características del lugar se efectúa el montaje de dicho sistema facilitando el control del estado de las piezas y propiciándole a los especialistas del centro los datos necesarios para la toma de decisiones ante futuros eventos de. Este sistema puede ser empleado en posteriores proyectos relacionados con la supervisión de objetos, facilitando la visualización del estado de los mismos y la alerta temprana en caso de posibles afectaciones.

Palabras Claves:

Abstract

This Diploma Work deals with the design and installation process of a monitoring and visualization system of the variables for the control of the state of conservation of the pieces belonging to the Prat Puig sample located in the Office of the Historian of the province of Santiago de Cuba. Generalities about the application of the IoT in museums at an international level and in Cuba are discussed. A characterization of the sensors to be used for control is carried out, as well as the assembly of a security system.

In accordance with the characteristics of the place, the assembly of said system is carried out, facilitating the control of the state of the pieces and providing the center's specialists with the necessary data for decision-making in the face of future events. This system can be used in subsequent projects related to the supervision of objects, facilitating the visualization of their status and early warning in the event of possible effects.

Key-Words: Internet of Things, Management of Cultural Heritage

Índice general

| | |
|--|----------|
| Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas | I |
| Índice de figuras | II |
| Índice de tablas | III |
| Resumen | IV |
| Abstract | V |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1 Análisis Teórico de la Aplicación del Internet de las Cosas en los Museos | 5 |
| Introducción | 5 |
| 1.1 Internet de las Cosas | 5 |
| 1.1.1 IoT en los museos internacionales | 6 |
| 1.1.2 Internet de las Cosas en Cuba | 8 |
| 1.2 Colección de Arte y Arqueología Francisco Prat Puig | 8 |
| 1.3 Arquitectura IoT y sus principales capas | 11 |
| 1.3.1 Propuesta de la Arquitectura IoT del Sistema | 15 |
| 1.3.2 Capa de Percepción | 16 |
| 1.3.2.1 Sensores | 16 |
| 1.3.2.2 Microcontroladores | 18 |
| 1.3.2.3 Nodos | 21 |
| 1.3.3 Capa de Transporte | 22 |
| 1.3.3.1 Protocolo MQTT | 22 |
| 1.3.3.2 Protocolo HTTP | 23 |
| 1.3.3.3 Protocolo TCP/IP | 23 |
| 1.4 Variables microclimáticas recomendadas | 24 |
| 1.5 Condiciones que favorecen el ataque de las especies xilófagas | 26 |
| 1.5.1 Humedad | 26 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1.5.2 | Temperatura | 27 |
| 1.6 | Principales afectaciones | 27 |
| | Conclusiones | 30 |
| 2 | Diseño e Implementación del sistema basado en IoT | 31 |
| | Introducción | 31 |
| 2.1 | Descripción del sistema | 31 |
| 2.2 | Sensores | 31 |
| 2.2.1 | Sensor de temperatura DHT22 | 32 |
| 2.2.2 | Sensor de CO2 SGP30 | 33 |
| 2.2.3 | Sensor de vibración M0168 | 34 |
| 2.2.4 | Sensor de calidad de aire | 35 |
| 2.2.5 | Sensor LDR | 36 |
| 2.2.6 | Sensor de luz BH1750 | 36 |
| 2.2.7 | Alimentación | 38 |
| 2.3 | Condiciones medioambientales... | 40 |
| | Conclusiones | 40 |
| | CONCLUSIONES GENERALES | 41 |
| | Recomendaciones | 42 |
| | Anexos | 50 |

Introducción

El IoT se trata de un concepto que se basa en la interconexión de los objetos con su entorno. Los objetos de esta nueva generación incorporan la capacidad de adquirir datos, comunicarse entre sí y activar comportamientos reactivos a las condiciones cambiantes del contexto [1]. Este concepto pretende reflejar la profunda transformación y el radical cambio de paradigmas que está experimentando nuestra forma de vivir en hogares, ciudades y entornos de trabajo.

Nos encontramos ante un salto tecnológico que afecta directamente a cómo la humanidad se enfrenta a los retos. En definitiva, el IoT revolucionará la concepción que posee el ser humano acerca de su mundo y la forma de interaccionar con él [2].

Las nuevas tecnologías que caracterizan el empleo del Internet de las Cosas permiten realizar entornos inteligentes reales capaces de proporcionar servicios avanzados a los usuarios. El objetivo es hacer que las cosas se comuniquen entre sí, establezcan comportamientos de acuerdo a patrones pre-fijados y, por consiguiente, sean más inteligentes e independientes.

Recientemente, estos entornos inteligentes también se están explotando para renovar el interés de los usuarios por el patrimonio cultural, al garantizar experiencias culturales interactivas reales. Dentro de las instituciones de patrimonio cultural, las tecnologías en red tienen un enorme potencial para mejorar los esfuerzos de conservación, el aumento del acceso a los conocimientos contextuales y para reinventar la interacción de las personas con las obras culturales.

La Universidad de Oriente cuenta con tres colecciones como parte de su patrimonio cultural. Dos de ellas se encuentran en la sede Antonio Maceo; la primera, con carácter arqueológico, situada en la planta baja de la Facultad de Ciencias Sociales. Mientras que la segunda, el museo de Historia Natural Dr. Theodoro Ramsden de la Torre, se localiza en la tercera planta de la Facultad de Derecho. Estas no están abiertas directamente al público debido a su ubicación en aulas, siendo así empleados como medios de enseñanza.

La tercera de estas colecciones, la Francisco Prat Puig, ubicada en la Oficina del Historiador de la Ciudad de Santiago de Cuba, contiene piezas de interés histórico y cultural. A diferencia de las muestras anteriores ésta posee características de museo y se encuentra emplazada en un lugar con acceso al público. Allí se destacan colecciones de numismáti-

ca, artes plásticas, cerámica, condecoraciones del propio Prat que le fueron otorgadas por su amplia trayectoria docente, y objetos personales entre otras; estas fueron donadas por Prat a la Casa de Altos Estudios oriental.

Las entrevistas con los especialistas y los recorridos que se hicieron por el museo suministraron datos de importancia dando a conocer que el estado de conservación de las piezas se encuentra en un grado de deterioro notable a causa de la influencia de la temperatura, la humedad, el CO₂, las vibraciones, el salitre, la iluminación, el polvo, entre otros; estos inciden directamente en el deterioro gradual de las obras.

Con la aplicación del Internet de las Cosas en estas salas expositivas es posible reducir la incidencia de estos factores. La tecnología permitirá a los responsables del museo tener una visión más precisa y completa de lo que ocurre, brindando la posibilidad de evaluar en tiempo real el estado de cada área para la toma de decisiones ante alertas por eventos de deterioro.

El análisis de la situación descrita permite identificar como **problema de investigación** la necesidad de un sistema de supervisión para conocer en tiempo real el estado de los parámetros ambientales presentes en la Colección de Arte y Arqueología “Francisco Prat Puig” ubicada en la Oficina del Historiador de la provincia de Santiago de Cuba, imposibilitando la labor de conservación de los especialistas del centro y como **objeto de la investigación**: sistema basado en IoT para la supervisión de los parámetros ambientales presentes en la Colección de Arte y Arqueología “Francisco Prat Puig” teniendo en cuenta como **objetivo** diseñar e implementar un sistema de IoT que permita la supervisión en tiempo real de las variables medioambientales existentes en la Colección Prat. Como **campo de acción** los sistemas de supervisión basados en IoT para la conservación de las piezas en los museos.

Se plantea como **hipótesis**, que si logramos diseñar e implementar un sistema de supervisión de las piezas de arte en la Colección Prat, de tal manera que se muestren en tiempo real, el estado de conservación de los objetos, posibles afectaciones y los momentos más adecuados para efectuar una restauración, estaríamos extendiendo la vigencia de las piezas y mejorando las condiciones de trabajo de los especialistas que allí laboran.

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se realizarán las siguientes **tareas de investigación**:

1. Analizar la trascendencia del Internet de las Cosas en los museos internacionales y en los museos de Cuba.
2. Analizar las arquitecturas de los sistemas IoT.
3. Proponer una arquitectura IoT para el sistema.
4. Caracterizar los diferentes sensores y microcontrolador a emplear acorde a las variables presentes.
5. Desarrollar el firmware de la aplicación.
6. Implementación del sistema de supervisión y monitoreo basado en IoT.

Estas tareas se desarrollan teniendo como base los siguientes **métodos y técnicas**:

1. Análisis de documentos. Para realizar la consulta de bibliografía de diferentes autores que trabajan la temática de la aplicación del IoT en los museos.
2. Método histórico-lógico. Para realizar un análisis histórico sobre la evolución y los avances del IoT.
3. Método de análisis-síntesis. Para analizar las diferentes fuentes sobre museos inteligentes con base en el Internet de las Cosas y sintetizar las vías más exentas a utilizar para cumplir los objetivos propuestos.
4. Técnicas empíricas. Montaje de pruebas de concepto para la obtención de variables medioambientales en la muestra tales como:
 - Temperatura
 - Humedad relativa
 - CO2
 - Vibraciones
 - Intensidad luminosa
 - Polución

Empleando una técnica de muestreo no probabilístico en el que los estudios arrojan resultados concretos basados en las experiencias.

El **aporte de esta investigación** consiste en el montaje de un sistema de supervisión empleando tecnologías basadas en el Internet de las Cosas en museos. Esta propuesta sirve como base documental actualizada y novedosa permitiendo su implementación en cualquier instalación con características similares, en especial en los museos de la ciudad de Santiago de Cuba.

Estructura del trabajo

El presente trabajo investigativo está compuesto por una introducción general, dos capítulos con sus introducciones y conclusiones parciales, conclusiones generales, recomendaciones, apéndices y bibliografías.

En el capítulo 1 se abordan los antecedentes de la aplicación del Internet de las Cosas en los museos a nivel internacional así como la situación del IoT en los museos de nuestro País, análisis de las arquitecturas de IoT y sus principales capas, la proposición de una para el proyecto y la caracterización de sus capas, así como el análisis de las variables microclimáticas recomendadas por los autores y las principales afectaciones, además del estudio de las condiciones medioambientales factibles para la aparición de insectos y su prevención.

En el capítulo 2 se trata lo relacionado al diseño y la implementación del Sistema de Supervisión y Monitoreo de las piezas de arte en el museo de la muestra pertenecientes a la Colección de Arte y Arqueología Francisco Prat Puig, se analiza la selección de la instrumentación en base al ahorro de energía y de recursos, creando las condiciones mínimas indispensables para el montaje del proyecto de automatización ajustado a las características de instalación seleccionadas.

Capítulo 1

Análisis Teórico de la Aplicación del Internet de las Cosas en los Museos

Introducción

En este capítulo se analiza el estado del arte del Internet de las Cosas y su aplicación en los museos a nivel internacional y nacional, así como la caracterización de la Colección de Arte y Arqueología Francisco Prat Puig teniendo en cuenta su estado en cuanto a la conservación de las piezas allí presentes. También se abordan las arquitecturas propuestas para IoT y la estipulación de una para el presente proyecto analizándola por partes. Además se hace el análisis de las condiciones que favorecen el ataque de insectos xilófagos en las estructuras y en las obras pertenecientes a la colección, así como los daños ocasionados por la variación de los valores de las variables microclimáticas tomando como referencias los recomendados por los autores.

1.1. Internet de las Cosas

El Internet de las Cosas describe objetos físicos (o grupos de estos) con sensores, capacidad de procesamiento, software y otras tecnologías que se conectan e intercambian datos con otros dispositivos y sistemas a través de internet u otras redes de comunicación.

Este campo ha evolucionado gracias a la convergencia de múltiples tecnologías, como la informática ubicua, los sensores, los sistemas integrados cada vez más potentes y el aprendizaje automático [3].

Los campos tradicionales de los sistemas embebidos, las redes de sensores inalámbricos, los sistemas de control y la automatización (incluida la domótica y la inmótica) hacen posible, de forma independiente y colectiva, el Internet de las cosas [4].

El IoT como arquitectura emergente basada en la Internet global presta la posibilidad de intercambio de bienes y servicios entre redes de la cadena de suministro y que tiene un impacto importante en la seguridad y privacidad de los actores involucrados [5].

1.1.1. IoT en los museos internacionales

En el grupo de las bibliografías consultadas existen diversos ejemplos del empleo del IoT en los museos.

En el caso del Conjunto Monumental de San Domenico Maggiore, ubicado en Nápoles (Italia), dentro del mismo se han transformado más de 270 esculturas en obras de arte parlantes. Equipado con un tablero de sensores, cada objeto puede proponerse automáticamente a los visitantes, compartiendo su historia en diferentes modalidades e idiomas, lo que permite un proceso de disfrute novedoso durante una experiencia cultural. [6].

En la Universidad de El Cairo, Egipto, desarrollaron un sistema para la conservación de las piezas en los museos, un sistema que no solo mide los atributos del entorno, sino que también mantiene la seguridad de los artefactos al detectar cualquier prueba de contacto o movimiento. También controla la intensidad de la luz en función de la ocupación de la sección del museo. Una característica diferenciadora del sistema es el diseño de energía ultrabaja de su nodo sensor que conduce a una larga vida útil de hasta 50 días. [7].

Estos son solo dos de los ejemplos. La tabla 1.2 muestra una relación de otros autores que emplean el IoT en los museos. Pero antes, para poder comprender la tabla 1.2 debemos definir una primera tabla en la que se le otorga a cada autor un número de manera tal que se entienda quien es cada autor. Por lo que se define la tabla 1.1:

Tabla 1.1: Numeración autores

| Autor | Numeración Asociada |
|--|---------------------|
| Maksimovic y Cosovic [8] | 1 |
| Shah y Mishra [9] | 2 |
| Marshall [10] | 3 |
| Ghosh, Roy, y Saha [11] | 4 |
| Rao, Sharma, y Narayan [12] | 5 |
| Alletto y cols. [13] | 6 |
| Alsuhly y Khattab [14] | 7 |
| Spachos y Plataniotis [15] | 8 |
| Lopez-Martínez, Iglesias, y Carrera [16] | 9 |

Tabla 1.2: IoT en los museos internacionales

| Manifestación | Mediciones | Tecnología |
|---------------------|---|---|
| Temperatura | (1,2,7) Temperatura °C | (1) RPI, Sensores, Cloud SVM (Árboles de Decisiones), (2) IoT-WSMP, (7) RPI, ESP32, Node-Red. |
| Humedad | (1,2,7) Humedad % | (1) RPI, Sensores, Cloud SVM (Árboles de Decisiones), (2) IoT-WSMP, (7) RPI, ESP32, Node-Red. |
| Intensidad luminosa | (2,7) Lumens | (2) IoT-WSMP, (7) RPI, ESP32, Sensores. |
| Vibraciones | (1) Estabilidad del Edificio (Hz) | (1) RPI, Sensores, Cloud SVM (Árboles de Decisiones). |
| Humo | (1) CO ₂ ppm | (1) RPI, Sensores, Cloud SVM (Árboles de Decisiones). |
| Polución | (1) Polvo | (1) RPI, Sensores, Cloud SVM (Árboles de Decisiones). |
| Xilófagos | (1) Plagas de madera | (1) RPI, Sensores, Cloud SVM (Árboles de Decisiones). |
| Personas | (7) Aceleración, Toque. (8) Geolocalización. (3) Movimiento (9) Propuestas de juegos en el museo | (1) PIR, (4) IA, (5) RPI, ESP32, Sensores. |

Como se puede observar en la tabla 1.2 el mayor número de autores analizados centran su atención en el usuario que accede al museo en aras de brindarle una propuesta agradable en su visita.

1.1.2. Internet de las Cosas en Cuba

En el contexto cubano, hasta el momento solo se tiene referencia de un artículo científico publicado en Cuba por Mengana de la Fe [17] en el Museo Emilio Bacardí de la Ciudad de Santiago de Cuba con el uso de la RA, sin integración con otras tecnologías, pero se demuestra el interés de insertar esta dentro del pueblo cubano ya que hay referencias de proyectos enfocados a la educación y a los videojuegos en noticias o eventos organizados por instituciones cubanas. Por su parte el uso del IoT se evidencia en el turismo tal como lo analiza Franco [18] y Cordova y cols. [19], en la protección del medio ambiente de Morales [20] y para el control de acceso de personal no autorizado por parte de Cruz y cols. [21].

Otros de los ejemplos de la aplicación del IoT en nuestro país lo constituyen el sistema IoT para el control del nivel de tanques de agua de La Habana [22], en el cual se brinda una solución desarrollada sobre Arduinos utilizando transporte de telemetría de mensajes en cola (MQTT, Message Queing Telemetry Transport) como protocolo de comunicación máquina-máquina (M2M) a través de un servidor Mosquitto. Tal es el caso también de la alternativa *Open Source* en la implementación de un sistema IoT para la medición de la calidad del aire con el empleo de tarjetas de desarrollo Arduino, ESP8266 y de sensores destinados a la captura de la concentración de CO₂ y gases generales, así como densidad de polvo [23].

Aun cuando existan más ejemplos del empleo del Internet de las Cosas en Cuba, no se ha encontrado evidencia de su aplicación en los museos cubanos, de ahí el aporte novedoso de este proyecto.

1.2. Colección de Arte y Arqueología Francisco Prat Puig

Como parte de las entrevistas con los especialistas y los recorridos en la colección se identificaron aspectos a destacar tales como:

- Presenta daños causados por la incidencia de las variables ambientales o ataques

biológicos de xilófagos en los bienes patrimoniales que se encuentran en exposición o en el almacén. Principalmente para aquellos confeccionados con materiales como son: el papel, cuero, tela y madera.

- Imposibilidad de conocer o controlar el estado de conservación de los elementos patrimoniales en tiempo real.
- No existe ningún tipo de tecnología implementada en la colección para los especialistas ni hacia el público visitante.
- Insuficiente control ambiental, seguridad y prevención de posibles daños en el futuro de la colección.

En síntesis, se puede afirmar que la gestión de la colección de Artes y Arqueología Francisco Prat Puig carece de una intervención tecnológica que favorezca la calidad en la toma de decisiones para su conservación preventiva.

La colección Francisco Prat Puig está distribuida de tal modo que las piezas están ubicadas en tres salas. Enumerándolas: sala 1, sala 2 y sala 3.

La sala 1 (figura 1.1) está caracterizada por la presencia de varios objetos distribuidos en vitrinas, sobre mesas, colgados, en estantes empotrados en la pared, o en pedestales. Se observan piezas de cerámica, marfil, metal, piedra, madera, entre otros materiales, así como colecciones de numismática.



Figura 1.1: Exposición permanente

En la sala 2 solamente se encuentran pinturas pertenecientes a la colección, estas poseen también condiciones de deterioro notables por el efecto de la humedad y del nivel de luz dentro del local.

Dentro de la sala 3 (figura 1.2) se localizan también varios objetos ubicados en pedestales mostrando colecciones de medallas y objetos personales del mismo Prat Puig y, además, vitrinas donde se hallan, principalmente, objetos de cerámica como platos, jarrones y cántaros.



Figura 1.2: Sala Memorial

En el gráfico que se muestra a continuación se relaciona el valor cuantitativo de las principales formas en las que se exponen las piezas dentro de estas salas pertenecientes a la colección.



Figura 1.3: Ubicación piezas

Fuente: Elaboración propia

Según la figura 1.3, varios objetos están dispuestos dentro de vitrinas donde, al encontrarse protegido por paredes de cristal, se genera un microclima¹, por lo que la condición ambiental en estas es diferente a la condición ambiental de la sala, de ahí la necesidad de incorporar nodos de tal manera que se tomen los datos dentro de estas vitrinas y, además, un nodo para la sala en general.

1.3. Arquitectura IoT y sus principales capas

No existe una única definición universalmente adoptada, estándar, de Arquitectura de IoT; diferentes propuestas han surgido durante su desarrollo. Se abarcan tecnologías de comunicación, dispositivos de cómputo, sensores y actuadores [24].

La arquitectura de IoT es principalmente desarrollada por capas, dígase, la arquitectura de 3 capas, la arquitectura de 5 capas, la arquitectura de Nube, la arquitectura de niebla y la arquitectura de computación de Borde, solo por mencionar algunas [25].



Figura 1.4: Comparación arquitecturas

Fuente: [26]

En la figura 1.4 se desarrolla una comparación entre las arquitecturas de 3 capas, 5 capas y la arquitectura niebla.

Según Ciberseguridad [27], la mayoría de estas arquitecturas de IoT se basan en fundamentos básicos:

- Dispositivos más inteligentes en una forma diferente.

¹microclima: según el diccionario Oxford, es el conjunto de las condiciones climáticas particulares de un lugar determinado, resultado de una modificación más o menos acusada y puntual del clima de la zona en que se encuentra influido por diferentes factores ecológicos y medioambientales.

- Red y puerta de enlace que permite que los dispositivos formen parte del IoT.
- Middleware que incluye espacios de almacenamiento de datos y avances en las capacidades de predicción.
- Aplicaciones de usuario final.

Existen varias arquitecturas, marcos de referencia o modelos conceptuales para IoT propuestos por organizaciones, comunidad académica y el sector empresarial. Las propuestas de arquitecturas pueden variar de autor en autor, en dependencia de la estructura del sistema IoT propuesto. Dichas arquitecturas son desarrolladas por capas en las que se agrupan los objetos, dispositivos, sensores, actuadores, entre otros. [28] [27].

En la figura 1.5 se representa una comparativa de algunos modelos basados en capas. Para propiciar una mejor comprensión de la figura 1.5 se desarrolló la tabla 1.3 donde se muestra la relación de los autores referidos a las capas del IoT.

Tabla 1.3: Referencias figura 1.5

| No. de Capas | Referencias |
|----------------------|----------------------------------|
| 3 capas | [29] [30] [31] [32] [33] [34] |
| 4 capas | [29] [35] [30] [33] [32] |
| 5 capas | [36] [29] [30] [33] [32] |
| Basado en SOA | [37] [38] [36] [31] |
| Basado en Middleware | [36] |
| 6 capas | [33] |

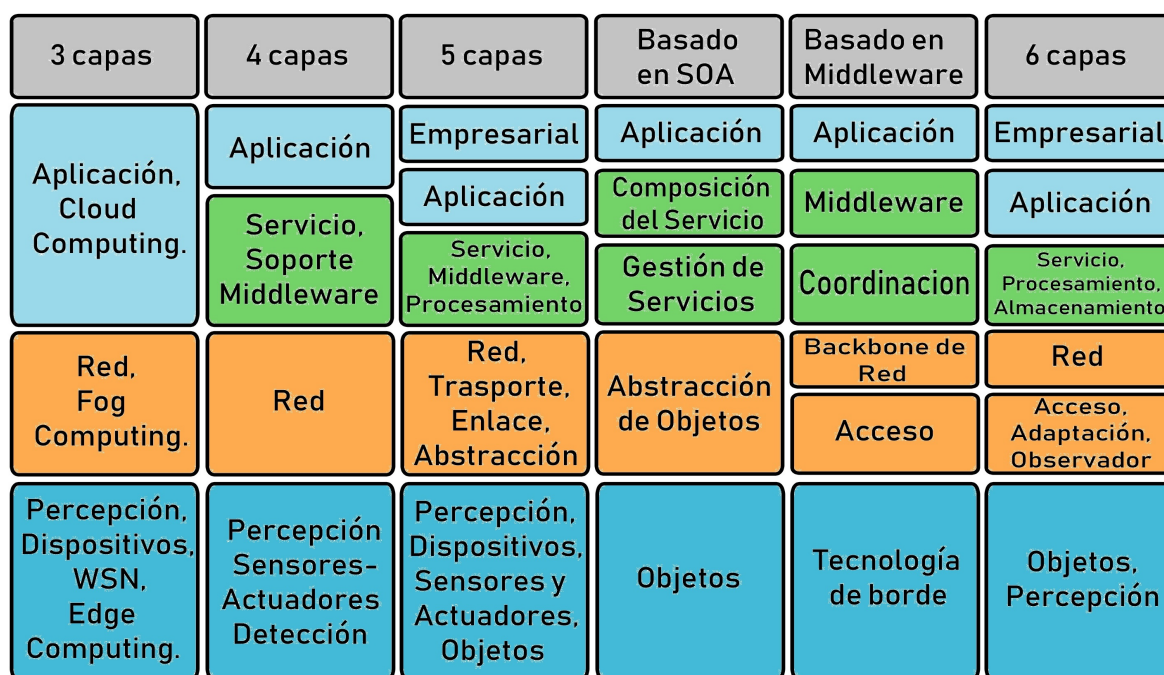


Figura 1.5: Modelos de arquitecturas IoT basados en capas

Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista de Ciberseguridad [27] existen capas fundamentales dentro de la estructura de IoT. En la tabla 1.4 se detallan estas capas:

Tabla 1.4: Capas de IoT

Fuente: [27]

| Capas | Descripción |
|----------------------------------|--|
| Capa de percepción | Administra dispositivos inteligentes en todo el sistema. |
| Capa de conectividad/ transporte | Permite transferir datos desde la nube a los dispositivos y viceversa, diferentes aspectos de las puertas de enlace y las redes. |
| Capa de procesamiento | Controla y administra los niveles de IoT para optimizar los datos en todo el sistema. |
| Capa de aplicación | Ayuda en los procedimientos de análisis, control de dispositivos e informes a los usuarios finales. |
| Capa empresarial | Deriva información y análisis de toma de decisiones a partir de datos. |
| Capa de seguridad | Cubre todos los aspectos de protección de toda la arquitectura de IoT. |
| Capa de borde | Funciona en un bode o cerca de la recopilación de información del dispositivo. |

No obstante, según B. Mazon y A. Pan Olivo [28], dentro de las capas más importantes del IoT podemos encontrar:

- *La capa de percepción* (Objetos/ Dispositivos/ SensorActuador/ WSN/ Edge Computing/ Sensado), digitaliza y transfiere datos a la capa de red, a través de canales seguros. Se localizan los objetos físicos, dispositivos sensores y actuadores utilizados para recopilar información del contexto. [36].
- *La capa de acceso* (Adaptación/ Observador), comprueba la información que recibe de la capa de percepción, si está protegida o no contra intrusos y virus. Si hay algún ataque, no pasa los datos a la siguiente capa. También verifica la identidad y autenticación de los objetos. [36] [29].
- *La capa de Red* (Abstracción de Objetos/ Transporte/ Fog computing), transporta y transmite los datos, recopilados de la capa de percepción, hacia la cloud. Se localizan componentes de red (switch, router, Gateway, etc.), medios de comunicación y protocolos. También es responsable de aspectos de seguridad y el control de ataques. [36] [29].
- *La Capa Aplicación / Cloud Computing (CC)* en modelos de más de tres capas, puede dividirse en:
 - *Capa de procesamiento y almacenamiento, Soporte, o Middleware.* Permite a los programadores de aplicaciones IoT trabajar con objetos heterogéneos sin tener en cuenta una plataforma de hardware específica. Se encarga de integrar, almacenar, procesar y analizar datos, tomar decisiones y ofrecer servicios de protocolos de conexión de red. [36].
 - *La capa de aplicación,* define los servicios y funciones que proporciona la aplicación IoT implementada (hogar inteligente, ciudad inteligente, salud inteligente, etc.) a los clientes. Los servicios pueden variar para cada aplicación y dependen de la información que se recopila de los sensores. También se consideran aspectos de seguridad. [36] [29].
 - *La capa empresarial,* tiene la responsabilidad de administrar y controlar el comportamiento de las aplicaciones, modelos de negocios y ganancias de IoT. También tiene la capacidad de determinar cómo se puede crear, almacenar y cambiar la información. Administra la privacidad del usuario y evita vulnerabilidades. [36] [29].

1.3.1. Propuesta de la Arquitectura IoT del Sistema

En base de los esquemas de arquitecturas propuestas, definimos el uso de la arquitectura del proyecto la cual se cimienta en la estructura de cuatro capas, considerando las diferentes capas que la componen:

- **Capa de Percepción:** Contiene todos los Nodos que se ubicarán en cada vitrina de la colección con sus sensores interconectados según sea la necesidad de cada vitrina y permitirán obtener los valores de las variables ambientales.
- **Capa de Transporte:** En esta capa se presenta el tipo de tecnología que se requiere utilizar para la transmisión de los datos recopilados por los sensores de los nodos con el concentrador principal que se encuentra en la Capa de Procesamiento, la comunicación entre ellos se realiza por Wifi y como protocolo de comunicación se pretende utilizar MQTT para mantener los valores actualizados constantemente.
- **Capa de Procesamiento:** Aquí se encuentra el concentrador principal con un servidor MQTT instalado, y con la Capa de Transporte se comunica con cada Nodo con sus sensores y contiene una base de datos local para almacenar todos los datos recopilados. Este concentrador a su vez envía estos datos de manera automática utilizando la conexión de Internet que se encuentra en el museo a una plataforma web de patrimonio universitario que se encuentra disponible en los servidores de la Universidad de Oriente y fue implementada por los autores Morejón y cols.[39] utilizando una API en proceso de desarrollo. De igual forma en esta capa se podrán aplicar algoritmos de multicriterio que permitan analizar los datos y brindarles a los especialistas diferentes acciones.
- **Capa de Visualización:** En esta capa se encuentra la representación de todos los datos recopilados en la plataforma universitaria a los directivos o especialistas de la colección por navegadores web, sin embargo aunque esta es una alternativa de obtener esos datos, la principal novedad de esta investigación es la integración del IoT con la RA por lo que los especialistas que se encuentren dentro del museo podrán acceder a la información utilizando una aplicación móvil que se propone y utiliza la tecnología de RA para mostrar alertas y la información ambiental para cada vitrina o

bien patrimonial, de igual forma desde la aplicación se podrá interactuar con la ficha técnica de cada elemento patrimonial para enviarlo a conservación o restauración.

El alcance de este trabajo va dirigido a la explicación detallada de la Capa de Percepción, enfocándose en las características del microcontrolador y sensores a emplear según la necesidad, así como la Capa de Transporte donde se hace un análisis de los métodos y protocolos de comunicación empleados en el sistema.

1.3.2. Capa de Percepción

Las SN (Sensor Network: Rede de Sensores) incluyen múltiples dispositivos (motes o nodos) equipados con transductores, actuadores y sensores que interactúan según la aplicación IoT [40]. Una SN puede estar formada por cientos o miles de nodos que se comunican entre sí y transmiten datos a otros dispositivos como el Gateway y a través de este se envían a un sistema distribuido o centralizado para su almacenamiento y procesamiento [40] [41].

La sucesión de sensores, en conjunto con el microcontrolador conforman la capa de percepción (figura 1.6).

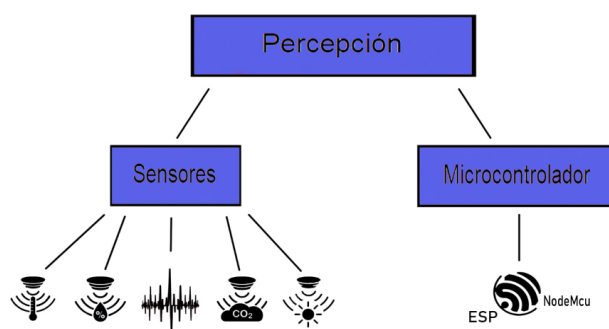


Figura 1.6: Diagrama funcional de captura de datos

Fuente: Elaboración propia

1.3.2.1 Sensores

Los sensores convierten estímulos físicos en señales eléctricas analógicas o digitales y según la señal se clasifican en acústicos, eléctricos, magnéticos, ópticos, térmicos y mecánicos [40]. También, se encargan de monitorear las características físicas, químicas o ambientales como: temperatura, humedad, movimiento, velocidad del viento, dirección del viento, nivel de Ph, electro conductividad, nivel de luz, entre otras [41].

Las señales eléctricas producidas por los sensores son proporcionales a los parámetros físicos que se monitorean y sus señales eléctricas deben ser optimizadas para el rango de entrada de los sistemas de adquisición [42].

Características técnicas de un sensor

- Rango de medida: dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.
- Precisión: es el error de medida máximo esperado.
- Offset o desviación de cero: valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el offset. (down)
- Linealidad o correlación lineal.
- Sensibilidad de un sensor: suponiendo que es de entrada a salida y la variación de la magnitud de entrada.
- Resolución: mínima variación de la magnitud de entrada que puede detectarse a la salida.
- Rapidez de respuesta: puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada.
- Derivas: son otras magnitudes, aparte de la medida como magnitud de entrada, que influyen en la variable de salida. Por ejemplo, pueden ser condiciones ambientales, como la humedad, la temperatura u otras como el envejecimiento (oxidación, desgaste, etc.) del sensor.
- Repetitividad: error esperado al repetir varias veces la misma medida.

Tomado de: M.A.García y cols.[43]

1.3.2.2 Microcontroladores

Un microcontrolador (MCU) es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida.

Características generales de los microcontroladores

Los microcontroladores están diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular. Por eso el tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependerán de la aplicación.

En este caso la aplicación que se le dará al microcontrolador será como hardware de adquisición de datos.

Un microcontrolador típico tendrá un generador de reloj integrado y una pequeña cantidad de memoria de acceso aleatorio y/o ROM/EPROM/EEPROM/flash, con lo que para hacerlo funcionar todo lo que se necesita son unos pocos programas de control y un cristal de sincronización. Los microcontroladores disponen generalmente también de una gran variedad de dispositivos de entrada/salida, como convertidor analógico digital, temporizadores, UART y buses de interfaz serie especializados, como I2C y CAN.

La memoria RAM está destinada al almacenamiento de información temporal que será utilizada por el procesador para realizar cálculos u otro tipo de operaciones lógicas. En la memoria RAM se almacenan también los registros de trabajo y configuración del procesador y los distintos periféricos del microcontrolador.

El tipo de memoria utilizada en las memorias RAM de los microcontroladores es SRAM. EEPROM (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory) y es el sustituto natural de las memorias EPROM, la diferencia fundamental es que pueden ser borradas eléctricamente, por lo que la ventanilla de cristal de cuarzo y los encapsulados cerámicos no son necesarios.

Módulo ESP-12F

El módulo WiFi ESP-12F (figura 1.7) fue desarrollado por Ai-Thinker Technology. El procesador central ESP8266 integra el micro MCU de 32 bits de potencia ultrabaja Tensilica L106 líder en la industria en un paquete pequeño con modo Lite de 16 bits, velocidad de reloj admite 80 MHz y 160 MHz, admite RTOS e integra Wi-Fi MAC /BB/RF/PA/LNA.



Figura 1.7: ESP-12F basado en ESP8266

El módulo WiFi ESP-12F es compatible con el protocolo estándar IEEE802.11 b/g/n, una pila completa de protocolos TCP/IP. Los usuarios pueden usar este módulo para agregar capacidades de red a los dispositivos existentes o para construir controladores de red separados.

El ESP8266 es una solución de red Wi-Fi completa y autónoma que puede funcionar de forma independiente o como un esclavo que se ejecuta en otras MCU anfitrionas. El ESP8266 es capaz de arrancar directamente desde una memoria flash externa cuando está alimentado por una aplicación y es el único procesador de aplicaciones en el dispositivo. El caché incorporado ayuda a mejorar el rendimiento del sistema y reduce los requisitos de memoria.

En otro caso, el ESP8266 se encarga del acceso inalámbrico a Internet. Cuando se trata de la tarea del adaptador WiFi, se puede agregar a cualquier diseño basado en un microcontrolador. La conexión es simple y fácil, solo por interfaz SPI/SDIO o puerto I2C/UART. Las potentes capacidades de almacenamiento y procesamiento en chip del ESP8266 le permiten integrar sensores y otros dispositivos específicos de la aplicación a través del puerto GPIO, lo que minimiza los recursos del sistema durante un desarrollo y una operación iniciales mínimos.

Tomado de: Ai-Thinker[44].

Características

- Modelo: ESP-12F
- Paquete: SMD22
- Dimensiones: 24mm x 16mm x 3mm (± 0.2)mm
- SPI Flash: 32Mbit
- Interfaz de comunicación: UART, GPIO, ADC y PWM
- Seguridad: WEP/WPA-PSK/WPA2-PSK
- Modos de funcionamiento: AP, STA y STA
- Puertos IO: 9
- Puertos ADC: 1
- I/O voltaje tolerancia: 3.6V Max
- Incorpora led de prueba en el pin GPIO2
- Velocidad de Baudios configurable: Soporta de 300 hasta 4608000 bps, por defecto 115200 bps
- Antena: Incluida en el PCB
- Rango de frecuencia: 2412 2484 MHz
- Poder de transmisión: 802.11 b / g / n
 - b: 16 ± 2 dBm (@11Mbps)
 - g: 14 ± 2 dBm (@54Mbps)
 - n: 13 ± 2 dBm (@HT20, MCS7)
- Voltaje de funcionamiento: desde 3.0V hasta 3.6V
- Voltaje de operación típico: 3.3V

- Corriente:
 - Transmisión continua: Promedio 2mA y Pico: 500ma
 - Suspensión del módem: 20mA
 - Sueño ligero: 2mA
 - Sueño profundo: 0.02mA
- Temperatura de operación -40°C y 85°C

La principal ventaja de escoger este microcontrolador ESP-12F es por la disponibilidad de wifi sin necesidad de incorporar otros accesorios, además de las pequeñas dimensiones que posee, ideal para el desarrollo de proyectos o prototipos domóticos o de automatización en poco espacio.

1.3.2.3 Nodos

Los nodos que recopilarán los datos de cada vitrina estarán compuestos por el microcontrolador y los sensores encargados de tomar los valores medioambientales presentes teniendo en cuenta el material de las piezas expuestas dentro de cada una de las vitrinas. Estos nodos estarán ubicados también en las salas en aras de tomar datos de la habitación y relacionarlos con los obtenidos de las vitrinas.

En base a esto, la tabla 1.5 relaciona la variable a medir según la ubicación del nodo.

Las variables ambientales a medir van estrechamente relacionadas con los sensores; estos sensores también fueron elegidos principalmente por su alto rango de mediciones ya que permiten diversos valores mínimos y máximos permitiendo a su vez detectar cualquier inconveniente que pueda ser corregido mediante software sin necesidad de realizar calibraciones constantes en los laboratorios y se mantenga el sistema en invariable funcionamiento.

En el caso del microcontrolador lo que propone Alsuhly y cols.[14] es utilizar como nodo un ESP32, un microcontrolador basado en el chip ESP8266 con bastante potencia para poder procesar la información de cada sensor de manera rápida, la conexión de este puede ser vía inalámbrica o por bluetooth al concentrador principal. En este caso se usará un NodeMCU, el cual es similar al ESP32 pero no contiene la interfaz bluetooth, esto permite abaratar más los costos de instalación ya que se necesitarán varios para cada vitrina de la colección.

Tabla 1.5: Correlación de los nodos

Fuente: Elaboración propia

| Nodo | Ubicación | Material objetos | Variable a medir |
|------|-----------------|---|--|
| 1 | General Sala 1 | porcelana, barro, marfil | temperatura, humedad, polución, luminosidad, CO2, vibraciones, salitre, xilófagos |
| 2 | Vitrinas Sala 1 | bronce, barro, arcilla, piedra | temperatura, humedad, luminosidad, vibraciones. |
| 3 | | colección numismática | |
| 4 | | cerámica, madera, barro, bronce | |
| 5 | | madera, bronce, plata, cerámica, porcelana, cuero | |
| 6 | | barro, cerámica, plata | |
| 7 | | bronce, marfil, madera | |
| 8 | | porcelana, barro policromado | |
| 9 | General Sala 2 | tela, madera | temperatura, humedad, polución, luminosidad, CO2, salitre, xilófagos. |
| 10 | General Sala 3 | metal, plástico, tela, cuero, madera | temperatura, humedad, polución, luminosidad, CO2, vibraciones, salitre, xilófagos. |
| 11 | Vitrinas Sala 3 | cerámica (barro), piedra | temperatura, humedad, luminosidad, vibraciones. |
| 12 | | | |
| 13 | | | |
| 14 | | | |

1.3.3. Capa de Transporte

Esta es la capa responsable del traslado de la data a través de los demás componentes del sistema estableciendo la comunicación necesaria desde la toma de valores ambientales hasta su análisis y muestreo. Según [28], la capa de transporte es la que se encarga de transportar y transmitir los datos, recopilados de la capa de percepción, hacia la cloud. Se localizan componentes de red (switch, router, Gateway, etc.), medios de comunicación y protocolos. También es responsable de aspectos de seguridad y el control de ataques. Los datos se promueven a través de protocolos MQTT, HTTP y TCP/IP.

1.3.3.1 Protocolo MQTT

MQTT son las siglas MQ Telemetry Transport, aunque en primer lugar fue conocido como Message Queing Telemetry Transport. Es un protocolo de comunicación M2M (machine-to-machine) de tipo message queere. Está basado en la pila TCP/IP como base para la

comunicación. En el caso de MQTT cada conexión se mantiene abierta y se “reutiliza” en cada comunicación. Es una diferencia, por ejemplo, a una petición HTTP 1.0 donde cada transmisión se realiza a través de conexión. MQTT fue creado por el Dr. Andy Stanford-Clark de IBM y Arlen Nipper de Arcom (ahora Eurotech) en 1999 como un mecanismo para conectar dispositivos empleados en la industria petrolera. Aunque inicialmente era un formato propietario, en 2010 fue liberado y pasó a ser un estándar en 2014 según la OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards). [45]

1.3.3.2 Protocolo HTTP

HTTP de sus siglas en inglés: “Hypertext Transfer Protocol”, es el nombre de un protocolo el cual nos permite realizar una petición de datos y recursos, como pueden ser documentos HTML. Es la base de cualquier intercambio de datos en la Web, y un protocolo de estructura cliente-servidor, esto quiere decir que una petición de datos es iniciada por el elemento que recibirá los datos (el cliente), normalmente un navegador Web. Así, una página Web completa resulta de la unión de distintos sub-documentos recibidos, por ejemplo: un documento que especifique el estilo de maquetación de la página Web (CSS), el texto, las imágenes, videos, scripts, etcétera.

1.3.3.3 Protocolo TCP/IP

La definición de TCP/IP es la identificación del grupo de protocolos de red que hacen posible la transferencia de datos en redes, entre equipos informáticos e internet. Las siglas TCP/IP hacen referencia a este grupo de protocolos:

- TCP: Es el Protocolo de Control de Trasmisión que permite establecer una conexión y el intercambio de datos entre dos anfitriones. Este protocolo proporciona un transporte fiable de datos.
- IP o protocolo de internet, utiliza direcciones series de cuatro octetos con formato de punto decimal (por ejemplo 75.4.160.25). Este protocolo lleva los datos a otras máquinas de la red.

El modelo TCP/IP permite un intercambio de datos fiable dentro de una red, definiendo los pasos a seguir desde que se envían los datos (en paquetes) hasta que son recibidos.

Para lograrlo utiliza un sistema de capas con jerarquías (se construye una capa a continuación de la anterior) que se comunican únicamente con su capa superior (a la que envía resultados) y su capa inferior (a la que solicita servicios) [46].

1.4. Variables microclimáticas recomendadas

En los museos tanto universitarios como los que no poseen este tipo de característica, se requiere de un control ambiental del mismo que permita mantener el estado de conservación de los bienes patrimoniales que allí se exponen.

En la bibliografía consultada se utiliza el concepto de conservación preventiva, la cual la define Bachman [47] como un pilar básico de la gestión museológica y de la cual de ella depende el mantenimiento de las colecciones de forma adecuada, viable y sostenible en el tiempo, además de que permite la durabilidad de los elementos patrimoniales y reduce las intervenciones de los especialistas tal como lo comenta Merrit y cols. [48]. Las condiciones microclimáticas más importantes a tener en cuenta según Thomson [49] y Márquez [50] son la temperatura, la humedad relativa, la iluminación, las vibraciones, el CO₂, la polución y el biodeterioro.

La temperatura será tomada en grados Celcios (°C), la humedad en %HR, el CO₂ será analizado en ppm (partículas por millón), la iluminación en Luxers (Lx), la polución en micro-gramos por metros cúbicos (ug/m³) y las vibraciones en dB.

Estos valores deben encontrarse en rangos determinados como se muestra en la siguiente tabla 1.6 según los autores Buys & cols., Heras & cols., Koob & cols., Álvaro y Márquez.

Estos valores son definidos específicamente por el tipo de clima del país, y Cuba por ser un país cálido y húmedo en algunas regiones como es la ciudad de Santiago de Cuba donde se encuentra la colección objeto de estudio de este trabajo, es importante realizar una valoración de los valores adecuados de estas variables ambientales por parte de los especialistas que puedan ser definidos en la propuesta y permitan mantener la colección en buen estado de conservación. Vale destacar que los especialistas del Centro Prat Puig han manifestado que no tienen referencia que ninguna métrica o metodología por la cual se rigen para la toma de decisiones con respecto a las variables ambientales recomendadas para la conservación de los bienes culturales de la colección.

Tabla 1.6: Variables microclimáticas recomendadas

| Variables | Valores Recomendados | Material | Autor |
|-------------|----------------------|--|--|
| Temperatura | 18 - 25°C | Vidrio y Cerámicos | Buys y cols. [51] Heras y cols. [52] Koob y cols. [53] |
| | 18 - 22°C | Papel, Tela, Metal y Piedra | Álvaro [54] |
| | 18 - 22°C | Madera, Pinturas. | Márquez [50] Arévalo [55] |
| Humedad | 40 - 65 %HR | Vidrio y Cerámicos | Buys y cols. [51] Heras y cols. [52] Koob y cols. [53] |
| | 40 - 60 %HR | Tela, Tapices, Grabados, Papel. | Arévalo [55] |
| | 45 - 65 %HR | Madera, Papel, Tela | Márquez [50] |
| | 30 - 50 %HR | Papel, Tela, Metal y Piedra | Álvaro [54] |
| CO2 | 400 - 800ppm | Papel y Tela | Márquez [50] Calvo [56] |
| Iluminación | 300Lx | Piedra, Metal, Cerámica, Vidrio. | Márquez [50] |
| | 150Lx | Pinturas al temple, al óleo, sobre lienzo, Madera, Marfil. | |
| | 50Lx | Papel, Tejidos, Tapices, Pielles. | |
| | 50 - 250Lx | Vidrio y Cerámicos | Buys y cols. [51] Heras y cols. [52] Koob y cols. [53] |
| Polución | 20-100 ug/m3 | Pinturas, Textiles, Cueros, Metales. | Tapol [57] |
| Vibraciones | 70 - 75dB | Objetos en pedestales y vitrinas | William y cols. [58] |

1.5. Condiciones que favorecen el ataque de las especies xilófagas

Como se analizaba en el epígrafe 1.4 el biodeterioro también constituye otro de los factores que afectan las obras de arte. Estos agentes biológicos están formados por microorganismos (bacterias) y organismos vivos como los vertebrados (aves, roedores), insectos (escarabajos, hormigas, avispas, abejas), insectos xilófagos (termitas y carcomas), moluscos (polas y gusanos de barco) crustáceos (limnorias), hongos, líquenes, algas y el propio hombre [50].

En el caso del control de la aparición de los xilófagos, como daño de origen biótico, no se encontró ningún sensor para medir el posible ataque, por lo que para anunciar la presencia de este tipo de anomalía se analizarán los restantes sensores y por correlación de datos será posible tenerlo en cuenta también.

Por esto se realiza el análisis de las condiciones óptimas para la aparición de los mismos influyendo en la intensidad o severidad del ataque de estos insectos. Entre estos se pueden mencionar humedad, temperatura, entre otros [59].

1.5.1. Humedad

El contenido de agua de la madera constituye uno de los factores más importantes que favorecen el ataque de las especies xilófagas. Maderas con un contenido de humedad sobre el 15 % favorece las infestaciones de coleópteros xilófagos, acortando significativamente sus ciclos de vida lo que aumenta sus poblaciones y la posibilidad de reinfestaciones [59], esto relacionado a que la acumulación de humedad se acentúa en construcciones con escasa ventilación, la que se debe incrementar en espacios interiores.

Según Araquistain y col. [60] y Rodríguez y col. [61], el porcentaje de humedad óptimo para que crezcan los xilófagos está entre el 25 y el 55 % mientras que Kisternaya [62] plantea que, el rango de humedad idónea puede estar entre el 35 y el 50 %. Tomando estos porcentajes de humedad idóneos para la aparición de los xilófagos, se establece como valor máximo de humedad un 20 %.

1.5.2. Temperatura

La temperatura es otro de los factores que contribuye a la aparición de los xilófagos. Según Vázquez y cols. [63], en un experimento sobre las condiciones necesarias para la cría de plaga, parásitos y xilófagos, plantea que si estos valores de temperatura oscilan entre los 23°C y los 30°C se crean las condiciones para el surgimiento y reproducción de especies xilófagas.

Por otra parte Flores y Pérez [64], en un estudio sobre los hongos xilófagos plantean que el rango de temperatura idónea para la reproducción de estos xilófagos se encuentra entre los 20°C y los 30°C, existiendo también el caso de que aún con 38°C exista la posibilidad de reproducción en algunas especies, así como Avalos Díaz y cols. [65] que en una de sus publicaciones se define que la temperatura idónea para el surgimiento de colonias xilófagas es de 27°C +- 1.

1.6. Principales afectaciones

¿Qué ocurre si los valores microclimáticos no se encuentran en el rango de lo recomendado?

A continuación se analiza por variable microclimática la afectación que trae consigo esta variación según autores.

Temperatura

Según Márquez [50] una temperatura elevada favorece la velocidad de los procesos químicos, con esto un aumento de 10°C duplica la velocidad de los procesos reproductores del moho y favorece el desarrollo del biodeterioro en presencia de altas HR (plagas), además de que provoca la evaporación del agua de composición de los materiales dando lugar a la sequedad y deshidratación de los mismos, que originan su degradación.

Mientras que Álvaro [54] plantea que una temperatura contraindicada (demasiado alta, demasiado baja o fluctuaciones) provoca alteraciones de los colores y desintegración progresiva de los materiales orgánicos, especialmente si son químicamente inestables como el papel ácido, fotografías en colores, entre otros, así como el agrietamiento de pinturas y otros polímeros a causa de la frialdad.

En el caso de Gómez [66] plantea que la temperatura es un factor de envejecimiento del óleo. Actúa de modo semejante y en combinación con la luz, y produce cambios de

humedad relativa al aumentar o disminuir la temperatura ambiental.

Humedad

La humedad excesiva constante superior al 75 % puede provocar: debilitación de adhesivos, pudrimiento de colas, aumento del tamaño de los materiales (madera, papel, tela, etc.), manchas (papel, tela, vitela, etc.), corrimiento de tintas, enmohecimiento de cueros, aumento de la corrosión de los diferentes metales, adherencia de hojas de papel, ablandamiento de materias, aparición de sales, opacidad de vidrios, entre otras. Al igual que la sequedad excesiva constante inferior al 35 % puede producir: fragilidad y desecación de los componentes de las obras, deterioro en maderas y marqueterías por contracción, tensión de las telas, reducción dimensional de materiales, entre otras.[50]

Del mismo modo que el cambio brusco en estos niveles de humedad puede provocar:

- Alteración de los colores y desintegración gradual de materiales orgánicos, especialmente de aquellos químicamente inestables como el papel ácido.
- Aparición de moho en materiales orgánicos e inorgánicos; corrosión en metales y encogimiento en textiles.
- Procesos de hidratación o deshidratación de ciertos minerales y corrosión de los metales que contengan sales.
- Procesos de contracción, dilatación, compresión y agrietamiento de los materiales orgánicos en función del efecto de las fuerzas.

Tomado de Álvaro [54].

Así mismo Gómez [66] plantea que si la humedad relativa se incrementa y el agua se condensa en la superficie de los objetos, los materiales sensibles a la humedad aumentan de volumen. Entre estos materiales se hallan los tejidos, el papel y la madera. Cuando la humedad relativa desciende, estos objetos se contraen. Los fenómenos de contracción y dilatación producen grietas y deformaciones.

CO₂

Según Calvo [56] el CO₂ combinado con agua produce el ácido carbónico, que afecta a los materiales orgánicos y produce corrosión en los materiales pétreos y el vidrio.

Las reacciones de fotooxidación son inevitables y hacen que las capas pictóricas pierdan sus propiedades.[66]

Iluminación

La iluminación es un importante factor de deterioro ya que tanto la luz visible como las radiaciones UV activan la formación de radicales libres en los enlaces múltiples de las cadenas insaturadas de los aceites secantes que aglutinan la pintura al óleo.[66]

Según Márquez [50] en el papel la luz provoca decoloración, cambio de color (tono amarillo) y rotura de enlaces químicos, dando lugar a su envejecimiento prematuro, que lo vuelve quebradizo, produciendo el debilitamiento de su estructura, también las pinturas a la acuarela se ven afectadas por la decoloración de la materia pictórica y los efectos de la luz sobre el papel y en los tejidos, la luz produce rotura y debilitamiento de la materia por fragmentación de sus enlaces químicos.

Polución

En el caso de los efectos negativos de la polución sobre los metales, y más concretamente el plomo, la plata y el bronce, provocando pérdida de brillo, picaduras, manchas, cambios de color, eflorescencias, entre otras. De la misma manera que las pinturas y los papeles amarillean y se debilitan, los textiles pierden resistencia mecánica, los colorantes cambian de tonalidad, las gomas se cuarteán y los cueros cobran un aspecto polvoriento.[57]

Vibraciones

Según Sánchez [67] las vibraciones producen efectos acumulativos que traen consigo la degeneración, el envejecimiento y fatiga de los componentes, esto uniéndose a la edad en el caso de las pinturas.

Por otra parte, Ortiz [68] plantea que las vibraciones bruscas generan fisuras o la aparición de pequeñas grietas que dañan la capa pictórica de los cuadros llegando a pulverizarse, al igual que el daño en los soportes de los mismos.

Xilófagos

Como parte de los daños ocasionados por las especies xilófagas se encuentran los planteados por Ortiz [68], el cual plantea que estos afectan directamente la estructura de los lienzos debilitando el entramado de los hilos que componen la tela trayendo consigo el deterioro total casi irreparable en caso de no tratarse a tiempo.

Por otro lado Romero y cols. [69] afirma que el ataque de los insectos xilófagos trae consigo daños al soporte lignario de las obras de arte ocasionando daños de diferente índole, desde pequeños orificios de salida de los xilófagos hasta zonas puntuales donde la madera se convierte en un material completamente disgregado.

Conclusiones parciales

Como parte del análisis desarrollado en este capítulo:

- Se habló de la variedad de aplicaciones del Internet de las Cosas y de su relación con la conservación del patrimonio cultural. La descripción de las arquitecturas del IoT brindó la posibilidad de proponer la arquitectura del sistema que se desea implementar.
- Como parte del análisis de este sistema se explicó el concepto de sensor, de aquí se concluye que estos serán la unidad básica de adquisición de la información para nuestra arquitectura.
- Se explicó el concepto de microcontrolador, fundamentando que se selecciona ESP-12F sobre las demás plataformas por las características expuestas durante el desarrollo.
- Se establecieron valores mínimos y máximos a modo de evitar la aparición del especies xilófagas en la colección objeto de estudio.
- Se analizaron las principales formas en las que se manifiestan los daños en distintos materiales ocasionados por valores microclimáticos fuera del rango de lo recomendado.

Capítulo 2

Diseño e Implementación del sistema basado en IoT

Introducción

En este capítulo se analizarán los pasos seguidos para la implementación del sistema: se realiza la descripción del proceso a monitorear o planta, los sensores que incorpora...

2.1. Descripción del sistema

El sistema de supervisión se implementa sobre una prueba de concepto desarrollada para dar fe de la certeza en cuanto al análisis teórico desarrollado en todo el capítulo primero.

2.2. Sensores

La secuencia de sensores pertenecientes al sistema es selecta, puesto que se tomaron los sensores teniendo en cuenta varios factores:

- Variable a medir
- Rango de operación
- Precisión
- Voltaje de alimentación

- Corriente de alimentación
- Precio

Resumiendo en la siguiente tabla los sensores a emplear según la variable a medir.

Tabla 2.1: Relación sensores

| No. | Variable | Sensor |
|-----|---------------------|------------|
| 1 | Temperatura | DHT22 |
| 2 | Humedad | DHT22 |
| 3 | CO2 | SGP30 |
| 4 | Vibración | TZT-LM393 |
| 5 | Calidad de Aire | ZP07-MP503 |
| 6 | Intensidad luminosa | BH1750 |

2.2.1. Sensor de temperatura DHT22

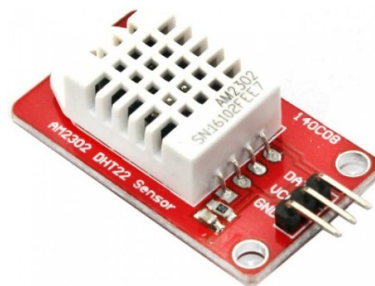


Figura 2.1: Sensor DHT22

Fuente: Datasheet fabricante

El DHT22 (AM2302) es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de buen rendimiento y de bajo costo. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica).

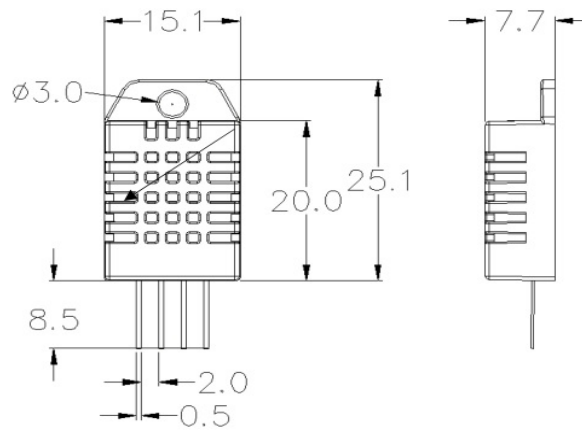


Figura 2.2: Dimensiones sensor DHT22

Fuente: Datasheet fabricante

2.2.2. Sensor de CO2 SGP30

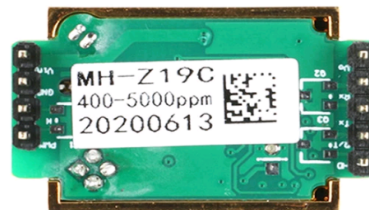


Figura 2.3: Sensor MH-Z19C

El sensor de gas de dióxido de carbono MH-Z19C es un pequeño sensor inteligente de uso general que utiliza el principio del infrarrojo no disperso (NDIR) para detectar la presencia de CO2 en el aire.

Otros datos

- Señal de salida: UART(TTL)
- Tiempo de precalentamiento: 60 segundos
- Temperatura de operación: De -10 a 50°C
- Humedad de operación: De 0 - 95 por ciento RH

- Dimensiones: aprox. 39 x 20 x 9 mm
- Tipo de conector: JST ZH de 7 pines

2.2.3. Sensor de vibración M0168



Figura 2.4: Sensor piezoeléctrico M0168

En este sensor piezoeléctrico cuando el choque de la cerámica con la lámina metálica genera una señal eléctrica, esta señal analógica es la recibida por los pines analógicos de microcontroladores.

Especificaciones Técnicas

- Voltaje de trabajo: 3.3V o 5V
- Corriente de trabajo: 1mA
- Rango de temperatura de funcionamiento: -10 +70
- Interfaz Tipo: salida analógica
- Tamaño del artículo: 30mm x 23mm

2.2.4. Sensor de calidad de aire



Figura 2.5: Sensor SDS011

Se basa en el principio de dispersión láser: se puede inducir la dispersión de la luz cuando las partículas atraviesan el área de detección. La luz dispersa se transforma en señales eléctricas, después estas señales serán amplificadas y procesadas. El número y el diámetro de las partículas se pueden obtener mediante análisis porque la forma de onda tiene ciertas relaciones con el diámetro de las partículas.

Otros datos

- Corriente del sueño: 2mA
- Frecuencia de muestreo serie: 1 segundo
- Resolución diámetro de partículas: $\leq 0.3\mu\text{m}$
- Rango de temperatura: -20 a 50°C
- Tamaño físico: 71mm x 70mm x 23mm

2.2.5. Sensor LDR



Figura 2.6: Sensor LDR

Una fotorresistencia es un componente electrónico cuya resistencia disminuye con el aumento de la intensidad de la luz incidente. Puede también ser llamado fotorresistor, fotoconductor, célula fotoeléctrica o resistor dependiente de la luz, cuyas siglas, LDR, se originan de su nombre en inglés light-dependent resistor.

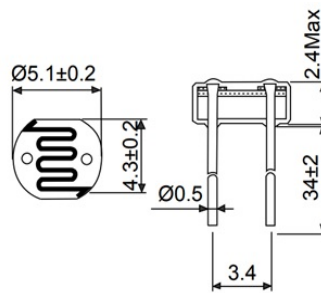


Figura 2.7: Sensor LDR

Fuente: Datasheet fabricante

2.2.6. Sensor de luz BH1750

El Módulo BH1750 es un sensor de iluminación digital para medición de flujo luminoso (iluminancia) de la empresa Rohm Semiconductor. Componente que posee dentro de su arquitectura interna, un convertor análogo digital (ADC) de 16 bits con una salida digital de formato I2C, que facilita la integración con microcontroladores o sistemas embebidos diversos. Este módulo entrega la intensidad luminosa directamente en unidades de Lux que es equivalente a Lumen/m².

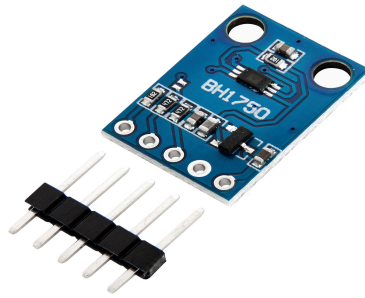


Figura 2.8: Sensor BH1750

Otros datos

- Interfaz Digital: I2C
- Frecuencia máxima de transmisión: 400kHz
- Temperatura de operación: Desde -40°C hasta 85°C

Para su correcto funcionamiento, este sensor debe ir acompañado de una serie de componentes electrónicos para su acondicionamiento. En la figura 2.9 se puede observar el acondicionamiento brindado por el fabricante.

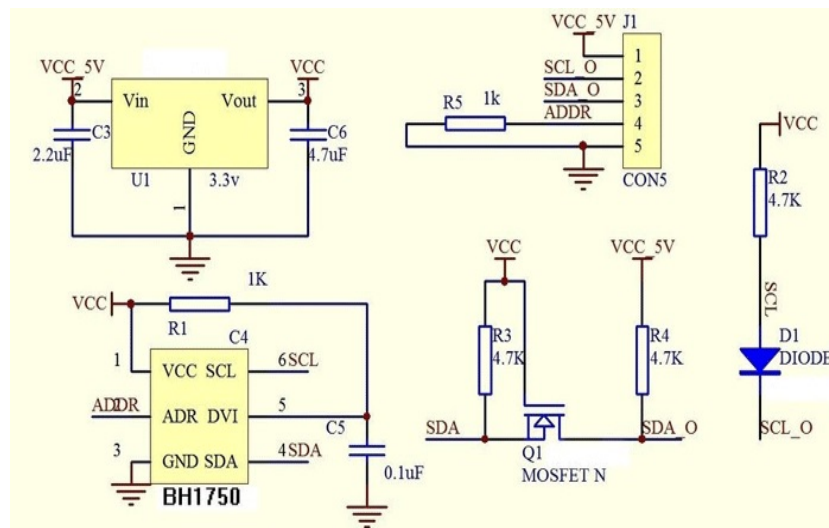


Figura 2.9: Acondicionamiento sensor BH1750

Fuente: Datasheet fabricante

2.2.7. Alimentación

Regulador LDO RT9013.

El RT9013 es un regulador LDO de 500 mA de alto rendimiento que ofrece PSRR extremadamente alto y caída ultrabaja. Ideal para aplicaciones inalámbricas y de RF portátiles con requisitos exigentes de rendimiento y espacio.

La corriente de reposo RT9013 es tan baja como 25uA, lo que prolonga aún más la vida útil de la batería. El RT9013 también funciona con condensadores cerámicos de baja ESR, lo que reduce la cantidad de espacio de placa necesario para las aplicaciones de energía, lo que es fundamental en los dispositivos inalámbricos de mano.

El RT9013 consume 0.7uA típicos en modo de apagado y tiene un tiempo de encendido rápido de menos de 40us. Las otras características incluyen voltaje de caída ultrabajo, alta precisión de salida, protección de limitación de corriente y alta relación de rechazo de ondulación. Disponible en el paquete SC-82, SOT-23-5, SC-70-5 y WDFN-6L 2x2.

Características

- Amplios rangos de voltaje de operación: 2.2V a 5.5V
- Caída baja: 250mV a 500mA
- Ruido ultrabajo para aplicaciones de RF
- Respuesta ultrarrápida en transitorios de línea/carga
- Protección de limitación de corriente
- Protección de apagado térmico
- Tasa de rechazo de fuente de alimentación alta
- A la salida solo se requiere 1 uF de condensador para la estabilidad
- Entrada de apagado controlado por lógica TTL

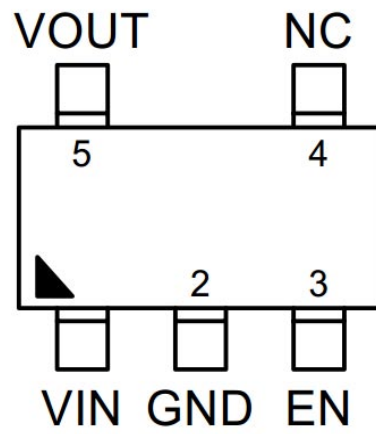


Figura 2.10: Configuración de pines

Fuente: Datasheet fabricante

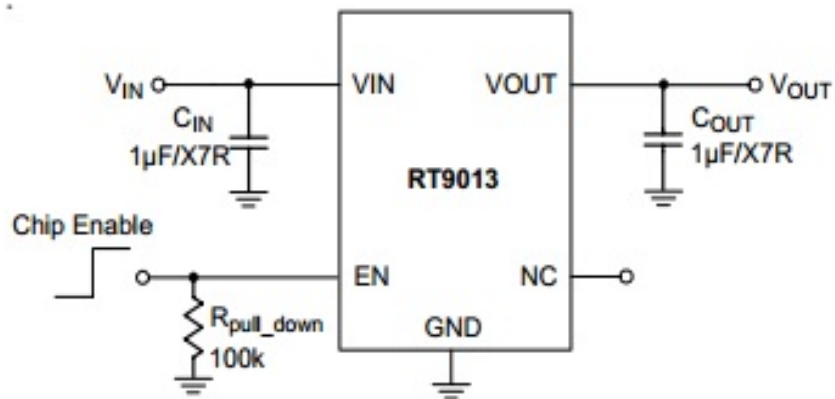


Figura 2.11: Acondicionamiento

Fuente: Datasheet fabricante

2.3. Condiciones medioambientales...

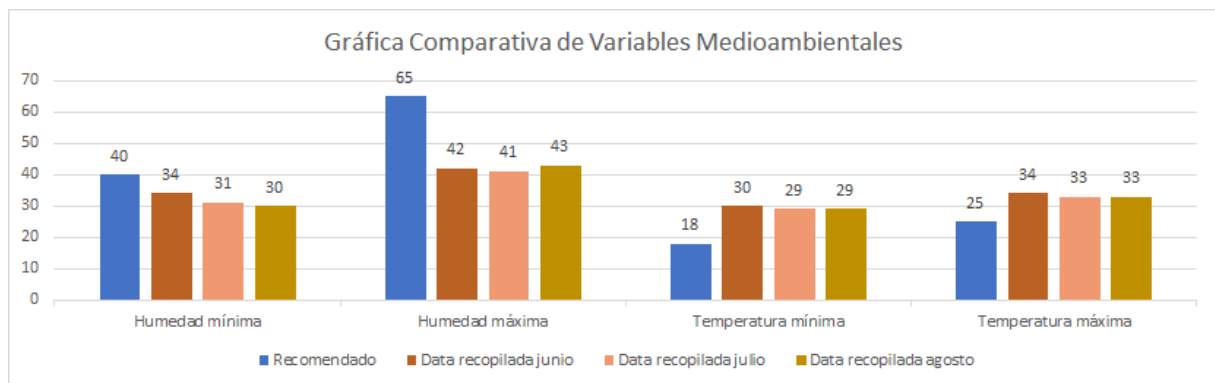


Figura 2.12: Correlación de valores medioambientales

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

- [1] C. M. . C. G. Quiroga E., Jaramillo S., “Propuesta de una arquitectura para agricultura de precisión soportada en iot,” *Revista RISTI*, no. 24, pp. 39–56, 2017.
- [2] P. Diezma, “Internet of things: la revolución definitiva del arte, el ocio y la cultura en el siglo xxi,” *Anuario AC/E*, vol. 4, pp. 79–95, 2017.
- [3] J. C. J. Hu, H. Niu and cols., “Fault-tolerant cooperative navigation of networked uav swarms for wildfire surveillance,” *Aerospace Science and Technology*, 2022.
- [4] B. L. y. F. A. J. Hu, “Robust formation control for networked robotic systems using negative imaginary dynamics,” *Automatica*, 2022.
- [5] R. H. Weber, “Internet of things-new security and privacy challenges,” *Computer law and security review*, vol. 1, no. 26, 2010.
- [6] A. Chianese, F. Piccialli, and J. E. Jung, “The internet of cultural things: Towards a smart cultural heritage,” in *2016 12th International Conference on Signal-Image Technology Internet-Based Systems (SITIS)*, 2016, pp. 493–496.
- [7] A. Al-Habal and A. Khattab, “Ultra-low power layered iot platform for museum content conservation,” in *2019 31st International Conference on Microelectronics (ICM)*, 2019, pp. 86–89.
- [8] M. M. y M. Cosovic, “Preservation of cultural heritage sites using iot,” *18th International symposium infoteh-jahorina (infoteh)*, pp. 1–4, 2019.
- [9] J. S. y B. Mishra, “Customized iot enabled wireless sensing and monitoring platform for preservation of artwork in heritage buildings.” *International conference on wireless communications, signal processing and networking (wispnet)*, pp. 361–366, 2016.

- [10] M. T. Marshall, "Interacting with heritage: On the use and potential of iot within the cultural heritage sector," *Fifth international conference on internet of things: Systems, management and security*, pp. 15–22, 2018.
- [11] A. R. y. S. S. S. Ghosh, "A low cost virtual guide for next generation smart museums." *International conference on recent trends on electronics, information, communication and technology (rteict)*, pp. 845–849, 2021.
- [12] y. C. S. N. A. S. Rao, A. V. Sharma, "A context aware system for an iot-based smart museum." *2nd International multidisciplinary conference on computer and energy science (splitech)*, pp. 1–5, 2017.
- [13] S. A. y cols., "An indoor location-aware system for an iot-based smart museum." *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 244–253, 2015.
- [14] G. A. y A. Khattab, "An iot monitoring and control platform for museum content conservation." *International conference on computer and applications (icca)*, pp. 196–201, 2018.
- [15] P. S. y K. N. Plataniotis, "Ble beacons for indoor positioning at an interactive iot-based smart museum." *IEEE Systems Journal*, vol. 3, no. 14, pp. 3483–3493, 2020.
- [16] C. A. I. y. A. C. A. Lopez-Martínez, "Gamified smart objects for museums based on automatically generated quizzes exploiting linked data." *16th international conference on intelligent environments (ie)*, pp. 132–139, 2020.
- [17] G. A. M. de la Fe y D. López-Ramos, "Realidad aumentada, una herramienta para la gestión de los valores patrimoniales. augmented reality, a tool for the management of heritage values," *Santiago*, no. 149, pp. 213–222, Jun. 2019.
- [18] G. E. Franco, "Sistema de gestión de alarmas para scada aplicado a la domótica de un hotel [alarm management system for scada applied to domotic in a hotel]," *Ventana Informática*, no. 23, Dec. 2010.
- [19] A. V. A. C. y. A. L. A. N. A. S. Córdova, "Sistema de monitorización de consumo de energía eléctrica en el hotel nacional de cuba," *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 11, no. 3, pp. 22–32, Sep. 2020.

- [20] N. P. P. y. L. G. M. D. V. Morales, "Bases para implementación de iot en la uci, orientada a la protección del medio ambiente," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 13, no. 5, pp. 41–54, Feb. 2020.
- [21] D. S. D. B. R. y. I. G. G. J. I. P. D. Cruz, "Sistema iot de control de acceso inteligente basado en arduino y servicios web," *Tono, Revista Técnica de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A*, vol. 14, no. 1, pp. 49–60, Jul. 2018.
- [22] R. P. Herrera, N. E. P. Jones, and M. d. I. Á. R. Santana, "Sistema iot para el control del nivel de tanques en aguas de la habana," *Revista Cubana de Transformación Digital*, vol. 1, no. 1, pp. 38–52, 2020.
- [23] A. Ochoa Duarte, L. D. Cangrejo Aljure, and T. Delgado, "Alternativa open source en la implementación de un sistema iot para la medición de la calidad del aire." *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 12, no. 1, pp. 189–204, 2018.
- [24] R. J. . o. Cera J., Martínez L., "Apoyo al estado del arte del internet de las cosas en salud," *Revista I+D en TIC*, vol. 6, no. 1, pp. 14–25, 2015.
- [25] X. X. . o. L. Hou, S. Zhao, "Internet of things cloud: Architecture and implementation," *IEEE Communications Magazine*, no. 54, 2016.
- [26] L. García, "Cuáles son las arquitecturas y componentes de una red iot," 2020.
- [27] Ciberseguridad, "Capas de iot que debes conocer," *Noticias de ciberseguridad, ciberataques, vulnerabilidades informáticas*, 2022.
- [28] A. P. O. B. Mazon, "Internet ofthings: State-of-the-art, computing paradigms and reference architectures," *IEEE Latin America Transactions*, vol. Vol. 20, no. No.1, 2022.
- [29] K. B. . K. B.-S. Burhan M., Rehman R., "Iot elements, layered architectures and security issues: A comprehensive survey," *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2796, 2018.
- [30] B. S. H. . O. Omoniwa B., Javed M. A., "Fog/edge computing-based iot (feciot): Architecture, applications, and research issues," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 4118–4149, 2019.

- [31] K. W. . D. K. A., “A-z survey of internet of things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 163, 2020.
- [32] H. R. . O. Yadegaridehkordi E., Attarbashi Z. S., “A survey on trend and classification of internet of things reviews,” *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [33] M. H. . M. M. T., “Iot architectural styles: A systematic mapping study,” in *Software Architecture*, vol. 11048, no. Cuesta C. E., Garlan D., and Pérez J., Cham Eds.: Springer International Publishing, pp. 68–85, 2018.
- [34] P. A. . O. Berru J., Mazon Olivo B., “Scada system based on iot for intelligent control of banana crop irrigation,” *Appl. Technol. ICAT 2019 Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 1193, pp. 243–256, 2020.
- [35] S. V. . O. Hassija V., Chamola V., “A survey on iot security: Application areas, security threats, and solution architectures,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [36] A. M. . A. M. Guizani M., Mohammadi M., “Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications,” *IEEE Commun. Surv. Tutor*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [37] I. A. . M. G. Atzori L., “The internet of things: A survey,” *Comput. Netw.*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [38] P. V. . P. A. Botta A., De Donato W., “Integration of cloud computing and internet of things: A survey,” *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 56, pp. 684–700, 2016.
- [39] y. L. J. A. S. Morejon Labrada, C. Ramírez Martín, “Plataforma web para la gestión del patrimonio cultural de la región oriental de cuba.” in *II Convencion Internacional de Ciencia y Conciencia, Universidad de Oriente, Cuba*, 2021.
- [40] B. M.-O. y. C. E. D. Hernández, “‘internet de las cosas (iot)’,” in *Análisis de Datos Agropecuarios*, no. 1st ed., pp. 74–100, 2018.
- [41] I. L. y K. Lee, “‘the internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises’,” *Bus. Horiz.*, vol. vol. 58, no. 4, pp. 431–440, Jul. 2015.

- [42] N. Instruments, "Data acquisition (daq) fundamentals application note 007," *Austin, Texas, USA: National Instruments Editorial*, vol. 7, 1999.
- [43] M. A. G. y cols., "Instrumentacion electronica," *Madrid: Thomson Editores Spain*, 2004.
- [44] Ai-Thinker, *ESP-12F Datasheet, Versión 1*, 2018.
- [45] . K. J. Quincozes S., Emilio T., "Mqtt protocol: fundamentals, tools and future directions," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 09, 2019.
- [46] M. Fernández Barcell, "Protocolo tcp/ip," 2014.
- [47] K. Bachmann, *Conservation concerns: a guide for collectors and curators*. Smithsonian Institution, 1992.
- [48] J. Merritt and J. A. Reilly, *Preventive Conservation for Historic House Museums*. Rowman & Littlefield, 2010, google-Books-ID: sTaZ69GEOkIC.
- [49] G. Thomson, *The museum environment*. Routledge, 2018.
- [50] M. d. C. B. Márquez, "Agentes de deterioro medioambientales: planificar la conservación de las obras de arte," *Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales*, no. 11, pp. 54–74, 2016.
- [51] S. Buys and V. Oakley, *Conservation and restoration of ceramics*. Routledge, 2014.
- [52] M. García Heras and M. Á. Villegas Broncano, "Innovación y gestión de la conservación preventiva en museos: un ejemplo con colecciones de vidrio y materiales cerámicos," 2015.
- [53] S. P. Koob, "Conservation and restoration of glass," 2005.
- [54] M. Recio Álvaro, "La conservación preventiva en exposiciones temporales: zì lái colectivo," 2020.
- [55] E. P. Arévalo León, "Degradación del arte colonial religioso por mala iluminación de la Iglesia de San Sebastián de la ciudad de Cuenca," 2018, publisher: Universidad Católica de Cuenca.

- [56] A. M. Calvo Manuel, *Conservación y restauración de pintura sobre lienzo*, 2002.
- [57] B. d. Tapol, "Cómo afrontar la polución en los museos. Algunas pistas y precisiones sobre las investigaciones en curso," *Butlletí del Museu Nacional d'Art de Catalunya*, 2001, vol. 5, pp. 183-190, 2001, publisher: Museu Nacional d'Art de Catalunya.
- [58] W. Wei, N. Krumperman, and N. Delissen, "Design of a vibration damping system for sculpture pedestals: an integral object-based approach," in *ICOM-CC 16th Triennial Meeting Lisbon Preprints*. ICOM Paris, 2011.
- [59] R. Ripa, P. Luppichini, J. Krecek, M. Lenz, J. W. Creffield *et al.*, "Termitas y otros insectos xilófagos en chile: especies, biología y manejo." 2004.
- [60] O. M. Ivan Araquistain, Jose Miguel Abascal, "Wireless sensor network technology for monitoring moisture content of wood," *Tecnalia Research and Innovation*, no. nº 5 20730, 2017.
- [61] S. Rodríguez, J. Vivas, A. Vega, and V. Baño, "Código: 1.7 metodología para la inspección, evaluación y diagnóstico mediante técnicas no destructivas del estado estructural de puentes de madera en España," 2014.
- [62] V. K. Margarita Kisternaya, "Wood science approach for the preservation of historic timber structures," *Russian Academy of Sciences*, 2015.
- [63] P. M. Vázquez, R. P. Otero, F. R. Fernández, and C. S. Corral, "Avetianella longoi sisco-ro, parásito de huevos de phoracantha semipunctata f.: Primera cita de su presencia en España y bases para la puesta en práctica del control biológico del xilófago," *Boletín de sanidad vegetal. Plagas*, vol. 25, no. 4, pp. 515–522, 1999.
- [64] V. R. G. Flores and A. Y. Pérez, "Durabilidad natural de diez maderas de madre de dios a la acción de tres hongos xilófagos," *Revista Forestal del Perú*, vol. 14, no. 1, 1987.
- [65] A. G. Avalos Díaz and J. E. Aviles Sandi, "Influencia de dos hongos xilófagos sobre la durabilidad natural de diez especies maderables de Ucayali, Perú," *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 8, no. 3, pp. 425–438, 2020, publisher: Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca.

- [66] M. V. Gómez Carretero, “Efectos del ácido nítrico en la variación del color de pigmentos de uso común en obras de arte pictóricas,” *Proyecto de investigación*., 2015.
- [67] E. S. Sánchez, “Pintura sobre tabla y escultura policromada: problemática de las obras con soporte de madera durante el proceso de renovación del Museo Arqueológico Nacional,” *Boletín del Museo Arqueológico Nacional*, vol. 33, pp. 173–185, 2015.
- [68] A. S. Ortiz, *Restauración de obras de arte: pintura de caballete*. Ediciones AKAL, 2012, vol. 11.
- [69] G. Ferreras Romero, R. Magdaleno Granja, and G. Morón, “Virgen con el niño, san sebastián y san roque, obra de bernardino luini: investigación e intervención,” *PH: Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 80, 72-89., 2011, publisher: Junta de Andalucía: Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.

Anexos