Luis David Salazar Gómez

Modelo estadístico de la confiabilidad de la conectividad WiFi para el Internet de las Cosas basado en ESP8266

2021


Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**Modelo estadístico de la confiabilidad de la conectividad WiFi para el Internet de las Cosas basado en ESP8266**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta
Ing. Luis David Salazar Gómez

Dirigido por:
Dr. Eric Leonado Huerta Manzanilla

Santiago de Querétaro, 07 de diciembre de 2021

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Modelo estadístico de la confiabilidad de la conectividad WiFi para el Internet de las Cosas basado en ESP8266

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería de Calidad y Productividad

**Presenta**

Luis David Salazar Gómez

**Dirigido por:**

Eric Leonardo Huerta Manzanilla

SINODALES

Mtro. Eric Leonardo Huerta Manzanilla

Presidente

Mtro. Javier García Pérez

Secretario

Mtro. José Agustín Martínez Rodríguez

Vocal

Mtro. Genaro Spíndola Barrón

Suplente

Mtro. Edwin Geovanny Vergara Ayala

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro. México

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (diciembre 2021)

Dirección General de Bibliotecas UAQ

**DEDICATORIAS**

*A mi padre, gracias por tanto.*

Dirección General de Bibliotecas UAQ

**AGRADECIMIENTOS**

Especial agradecimiento a mi director de tesis, Eric Leonardo Huerta Manzanilla, por su guía, confianza y ejemplo de un profesionista motivado y comprometido con la mejora continua para generar un impacto positivo en la sociedad. De igual manera, agradezco mucho a mis colegas que siempre fueron una motivación y apoyo incondicional durante todo el programa.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado en forma de beca de manutención para poder realizar mis estudios de posgrado.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## ÍNDICE GENERAL



Dirección General de Bibliotecas UAQ

## ÍNDICE DE TABLAS



Dirección General de Bibliotecas UAQ

## ÍNDICE DE FIGURAS



Dirección General de Bibliotecas UAQ

Dirección General de Bibliotecas UAQ

RESUMEN

La tendencia en los últimos años del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés *Internet of Things*) indica una acelerada incorporación de esta tecnología a los distintos ámbitos del desarrollo industrial, económico y social de cualquier país. Esto llevará a que existan procesos de IoT de naturaleza crítica, como el monitoreo de pacientes de un hospital o la evaluación de la seguridad de un lugar o proceso. Gracias a su bajo costo y fácil implementación, el módulo ESP8266 ha facilitado el desarrollo exponencial de IoT para diferentes áreas a nivel global. Sin embargo, estos sistemas se encuentran aún en etapa temprana de desarrollo y existen pocos estudios de la confiabilidad del dispositivo. En este trabajo de investigación, se presenta un estudio de la confiabilidad en la conectividad WiFi del módulo ESP8266. Para lograr el objetivo, se desarrolló un sistema de comunicación entre un punto de acceso y un dispositivo móvil, ambos basados en el módulo ESP8266. En primer lugar, se evaluó la variación de intensidad de señal entre distintos dispositivos con diferente modo de configuración, así como también se verificó la estabilidad de la misma en busca de causas especiales de variación. Posteriormente, se realizaron pruebas del modo de falla para encontrar una función de densidad que se ajuste al comportamiento del dispositivo móvil cuando pierde la conexión WiFi. Los resultados mostraron que el dispositivo puede garantizar una alta confiabilidad de conexión desde 0 hasta 105 metros en un espacio abierto, con un límite de alcance de hasta 135 metros. Se pretende que los resultados sirvan como base para mejorar la planeación de cualquier sistema IoT basado en ESP8266, así como especificar la garantía del propio producto.

**Palabras clave:** Confiabilidad, Internet de las Cosas, ESP8266, WiFi

Dirección General de Bibliotecas UAO

**ABSTRACT**

In recent years, the Internet of Things has shown an accelerated incorporation into different areas. This will lead to critical IoT systems, such as monitoring patients in a hospital or smart security solutions. Thanks to its low cost and easy implementation, the ESP8266 module has facilitated the exponential development of different IoT systems for different areas. However, these systems are still in an early stage and the studies of the reliability of the ESP8266 are not available yet. In this research work, a study of the reliability of the ESP8266 module WiFi connectivity is presented. A communication system was developed using an ESP8266 as an access point and other as a mobile device. First, the variation of the signal intensity between different devices with different configuration mode was evaluated. After that, the statistical stability of the system was evaluated in search of special causes of variation. Subsequently, failure mode tests were performed to find a density function that adjusts the performance of the mobile device when it loses the network connection. The results showed high connection reliability from 0 to 105 meters in an open space, with a range up to 135 meters. The results are intended to serve as a basis for improving the planning of any ESP8266-based IoT system, as well as the module design itself.

(**Keywords** reliability, IoT, ESP8266, RSSI, WiFi)

Direccion General de Bibliotecas UAO

# I. Introducción

## 1.1 Confiabilidad en la industria

Hace 10,000 años el hombre comenzó a producir las primeras herramientas formadas por más de una pieza. Durante un largo periodo de tiempo, cada hombre elaboraba sus propias herramientas bajo sus propias consideraciones. No fue sino hasta el año 1787 cuando tuvimos la primera real introducción del concepto de "partes intercambiables", y junto con esto, el hombre empezó a estudiar las técnicas de producción masiva. Al día de hoy, la industria de manufactura se encuentra en una intensa competencia global, donde la presión por reducir tiempos de producción y la demanda de productos de calidad presentan nuevos retos para satisfacer las expectativas de los clientes. Sin embargo, no es suficiente con que un producto cumpla con especificaciones de diseño evaluados durante el proceso de producción, este debe ser confiable en el sentido de que su desempeño sea correcto una vez se encuentre en posesión del cliente final. Es entonces que, la *confiabilidad,* se describe como una característica de la calidad que evalúa el rendimiento de los productos, los cuales deben operar sin fallas durante un tiempo especificado y en un rango y condiciones de operación mínimos (William Q. Meeker, 2003).

## 1.2 Internet de las Cosas y el módulo ESP8266

El concepto del Internet de las Cosas, IoT por sus siglas en inglés *Internet of Things,* fue mencionado por primera vez en 1999 en la presentación de un proyecto industrial para Procter & Gamble (P&G). El entonces autor del proyecto, Kevin Ashton, declara que aprovechó el nuevo y caliente concepto del Internet para atraer la atención de los ejecutivos hacia su idea de implementar la identificación por radio frecuencia (RFID) en la cadena de suministro de P&G (Ashton, 2009). Para el año 2010, el IoT deja de ser un mero concepto para volverse una realidad al existir más dispositivos conectados al Internet que personas en el mundo, la tasa de dispositivos conectados por persona en ese momento era de 1.84; equivalente a 12.5 mil millones de dispositivos (Evans, 2011). En un reporte realizado por la empresa consultora Business Insider, se estima que para el 2027 habrá más de 41

Dirección General de Bibliotecas UAQ

mil millones de dispositivos conectados a Internet en un mercado global con crecimiento anual de 2.4 trillones de dólares (Business Insider, 2020).

El IoT persigue el objetivo de transformar a la sociedad humana para que sea inteligente, conveniente, y eficiente con enormes beneficios económicos y ambientales. Para asegurar esta revolucionaria transformación, es necesario resolver los problemas de confiabilidad de los sistemas basados en la estructura de IoT. Dentro de la industria, uno de los principales problemas abordados en este sector ha sido el gran consumo de energía requerido por los dispositivos para conectarse a Internet vía WiFi, lo cual impacta en la propia autonomía del dispositivo (Joao Mesquita, 2018). Como solución, recientemente se ha extendido en el mercado global un dispositivo WiFi de bajo costo, ESP8266, el cual es un módulo de ultra bajo consumo para habilitar la conexión de IoT en cualquier sistema de monitoreo. El diagrama de los módulos de los bloques funcionales del ESP8266 se muestran en la Figura 1.

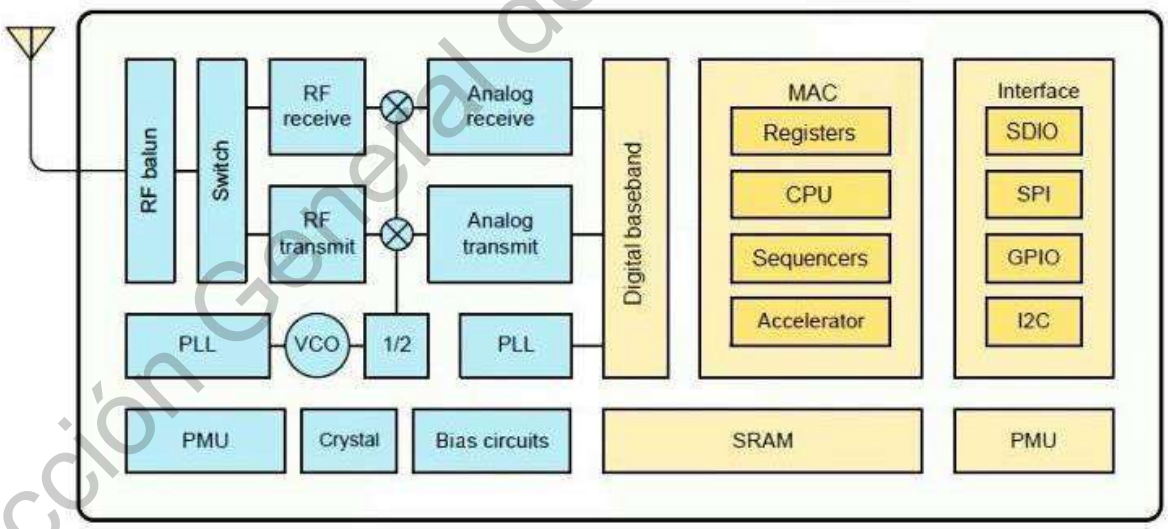


Figura 1. Diagrama de los módulos de bloques funcionales del ESP8266.

Dentro de las principales ventajas que hacen el módulo ESP8266 particularmente atractivo para aplicaciones de IoT es su bajo costo, $60 pesos mexicanos aproximadamente; su tamaño compacto, 24 x 16 mm y que funciona bajo la comunicación estándar IEEE 802.11 con una antena WiFi embebida.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

El procesador de 32 bits provee de suficiente poder computacional para realizar comunicación en tiempo real, lo que permite el desarrollo de sistemas de monitoreo. No obstante, el módulo presenta una radiación con un patrón no uniforme de geometría toroidal alrededor de la antena con el eje perpendicular a la dirección longitudinal de la misma, por lo que es importante considerar la sensibilidad del rango de la comunicación con respecto a la localización y orientación del módulo (Joao Mesquita, 2018).

### 1.3 Tendencias en investigaciones IoT con ESP8266

Diferentes investigaciones basadas en IoT se han desarrollado con el módulo ESP8266 para ser integrados en la industria y otras áreas. ¨Por ejemplo, Jagadesh et al. (2020) desarrollaron un sistema de monitoreo IoT que puede ser utilizado para monitorear diversas aplicaciones de acuerdo a la necesidad de la empresa; el sistema puede monitorear nivel de líquido, controlar la velocidad de motores y monitorear el consumo de energía. En otra investigación, Jie Xiao et al. (2020) diseñaron e implementaron un sistema inteligente de monitoreo en tiempo real de la temperatura y humedad ambiental, está basado en el servidor ZigBee y conectado a Internet través del módulo ESP8266. El sistema tiene un gran potencial para invernaderos y acuacultura además de que puede adaptarse para la detección ambiental en cualquier industria. En la Tabla 1 se muestran otras investigaciones recientes enfocadas al desarrollo de sistemas IoT en la industria y otras áreas que están basados en el módulo ESP8266.

Tabla 1 Investigaciones y desarrollo de sistemas IoT basado en ESP8266

| Referencia(s) | Investigación | Aplicación |
|---|---|---|
| (Shevchuk,2020) (Kumar,2020) (Shevchuk,2020) | Sistema IoT de monitoreo ambiental | Ventilación/acondicionamiento inteligente |
| (Jayaysingh,2020) (Shahid,2020) | Monitoreo del pulso cardiaco a través de la | Monitoreo de pacientes, prevención de enfermedades |

Dirección General de Bibliotecas UAQ

| | | |
|---|---|---|
| (Akhtar, 2020) | nube. | |
| (Kumari N. , 2020) | Monitoreo del clima en tiempo real | Notificación de emergencias |
| (Aziz, 2020) | Sistema de monitoreo del pH, turbulencia y temperatura del agua de un río | Monitoreo de contaminación ambiental |
| (Raviteja,2020) (Saini,2020) (Rekha,2020) (Bhojwani, 2020) | Sistema de monitoreo de agricultura basado en IoT | Eficiencia de la producción agrícola |
| (Tripathy, 2020) | Monitoreo de la calidad del agua del grifo en las ciudades usando IoT | Salud pública, monitoreo del abastecimiento de agua |
| (Singh,2020) (Waluyo,2020) (Gupta, 2020) | Sistema de monitoreo de la calidad del aire | Monitoreo de las condiciones de salud poblacional o dentro de una empresa |
| (Manimegalai, 2020) | Sistema IoT de monitoreo inteligente de la calidad del agua | Cuidado de recursos naturales, evaluación de la contaminación en el agua |
| (Puri, 2020) | Sistema de monitoreo de glucosa en la sangre con IoT | Monitoreo de las condiciones de salud de un paciente remoto |
| (Sheth, 2020) | Sistema IoT de monitoreo de flete de las fuerzas armadas indias | Rastreo de objetivos. Seguridad pública |
| (Kavitha, 2020) | Sistema IoT de monitoreo | Monitoreo de condiciones de |

Dirección General de Bibliotecas UAQ

| | | |
|---|---|---|
| | de polvo en la atmósfera | vida o trabajo en un espacio |
| (Athawale,2020)<br>(Rawal,2020)<br>(Kohli, 2020) | Sistema IoT para el monitoreo inteligente de plantas | Agricultura, cuidado de medio ambiente |
| (Ghazi, 2020) | Monitoreo remoto de la incubadora de un infante prematuro | Salud, medicina, monitoreo remoto en tiempo real las 24 horas |
| (Ahmad,2020)<br>(Hussain, 2020) | Diseño de un sistema inteligente para monitorear y controlar la energía | Administración de la energía, apagado y encendido de motores |
| (Jayaysingh,2020)<br>(Jabirullah,2020)<br>(Padmaja,2020)<br>(Rajasekaran,2020)<br>(Thaung, 2020) | Sistema IoT de monitoreo de paciente | Salud, medicina, evaluación del paciente de manera continua |
| (Raj, 2020) | Monitoreo de la salud de puentes mediante IoT | Seguridad, evaluación de arquitecturas |
| (Wang, 2020) | Diseño de un alimentador inteligente para mascotas pequeñas basado en IoT | Smart home, cuidado del hogar y las mascotas |
| (Ahmed, 2020) | Sistema de mapeo en tiempo real de la contaminación sonora | Salud pública, diseño urbano |
| (Sugumar, 2020) | Monitoreo y rastreo inteligente de vehículos mediante RFID e IoT | Seguridad pública |

Dirección General de Bibliotecas UAQ

| | | |
|---|---|---|
| (Chew, 2020) | Monitoreo de la humedad en un sistema de irrigación | Eficiencia económica y de recursos naturales en la agricultura |
| (Kumari, 2020) | Monitoreo y control de la seguridad en minas de carbón a base de IoT | Seguridad en el trabajo |
| (Cañete-Carmona, 2020) | Dispositivo de bajo costo para el monitoreo en tiempo real de la fermentación alcohólica del vino | Eficiencia en la producción y control de la calidad de bebidas y alimentos |
| (Lee, 2020) | Sistema IoT para el monitoreo del metabolismo de peces y actividad en acuaponía. | Preservación de los recursos naturales, mejor calidad en la producción de alimento de origen animal |

La tendencia del IoT indica una acelerada incorporación de esta tecnología a los distintos ámbitos del desarrollo industrial, económico y social de cualquier país. Esto llevará a que existan sistemas de IoT de naturaleza crítica, como el monitoreo de pacientes de un hospital o la evaluación de la seguridad de un lugar o proceso. Gracias a su bajo costo y fácil implementación, el módulo ESP8266 ha facilitado el desarrollo exponencial de diferentes sistemas de IoT para la industria y otras áreas. Sin embargo, estos sistemas se encuentran en aún en etapa temprana de desarrollo y existen pocos estudios sobre el rendimiento del módulo ESP8266.

### 1.4 Confiabilidad en el IoT

En un mundo donde el Internet de las Cosas se proyecta a ser parte intrínseca de la producción industrial y otras áreas de la vida, es necesario que el dispositivo sea confiable, esperando que tenga un mínimo desempeño bajo ciertas condiciones. La eficiencia de un sistema IoT de monitoreo es determinada

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ampliamente por la intensidad de la conectividad inalámbrica. Si la calidad es mala, hay una probabilidad considerable de que el monitoreo de cualquier parámetro sea incorrecto o falle en su función de respuesta en tiempo real. La calidad de los datos se puede definir por las propiedades estadísticas de las múltiples mediciones obtenidas del sistema de medición operando bajo condiciones estables.

Todos los procesos y sistemas basado en Internet de las Cosas comparten el mismo modo de falla, el cual es la pérdida de la conexión entre los dispositivos IoT del sistema. Una causa común para este modo de falla es el hecho de que el dispositivo de IoT se desplace fuera del alcance del punto de acceso. En la actualidad, existen dos bandas de frecuencias de comunicación; 2.4 y 5 GHz. La banda que usa el módulo ESP8266 es la más común, 2.4 GHz; esto puede generar interferencias, ruido, reflexión y atenuaciones en el canal de comunicación.

Debido a la acelerada implementación que está experimentando la tecnología de IoT, es necesario evaluar las limitaciones del rendimiento de los nuevos dispositivos que se encuentran en el mercado. Por lo que en la presente investigación se plantea modelar la confiabilidad de la conectividad remota WiFi del módulo ESP8266 en un entorno de comunicación máquina a máquina y es un espacio abierto. Se pretende que los resultados apoyen el desarrollo de espacios ciber-físicos para la Industria 4.0

## 1.5 Planificación de tesis

### 1.5.1 Estrategia basada en Normas Internacionales ISO

Para la planificación de esta tesis se utilizó el manual de sistema de gestión de calidad ISO 9001:2015 y la Norma Internacional de gestión del riesgo ISO 31000:2018 de AIAG como guías estratégicas en la planeación y desarrollo del proyecto. En la Norma Internacional ISO 9001:2015 se emplea el enfoque a procesos, que incorpora el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA) y el pensamiento basado en riesgos. El enfoque a procesos, dentro de un proyecto u organización, permite planificar los procesos y sus interacciones. El ciclo PHVA

Dirección General de Bibliotecas UAQ

permite que los procesos cuenten con los recursos y que las oportunidades de mejora se identifiquen y se actúe en consecuencia. Finalmente, el pensamiento basado en riesgos permite determinar los factores que podrían causar que los procesos se desvíen de los resultados planificados.

### 1.5.2 Enfoque a procesos

Enfoque a procesos es la actividad de definir y gestionar sistemáticamente los procesos y sus interacciones con el fin de alcanzar los objetivos previstos. En la Figura 2 se muestra un esquema del proceso de llevar a cabo un proyecto de tesis.


Figura 2. Esquema enfocado al proceso de la tesis.

### 1.5.3 Ciclo PHVA

El ciclo PHVA (Planear-Hacer-Verificar-Actuar), también llamado ciclo de Deming para la mejora continua. Puede aplicarse a cualquier proceso o sistema para establecer los objetivos y recursos necesarios para generar los resultados planificados. Posteriormente, se implementa lo planificado y se realiza un seguimiento y medición de las actividades para informar los resultados. Por último, se toman las acciones pertinentes para mejorar el desempeño.

En el presente estudio se utiliza la estrategia PHVA dentro de las actividades del proyecto como herramienta para alcanzar los resultados. En la

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Figura 3 se muestra la representación de la estructura del proyecto con el ciclo PHVA.

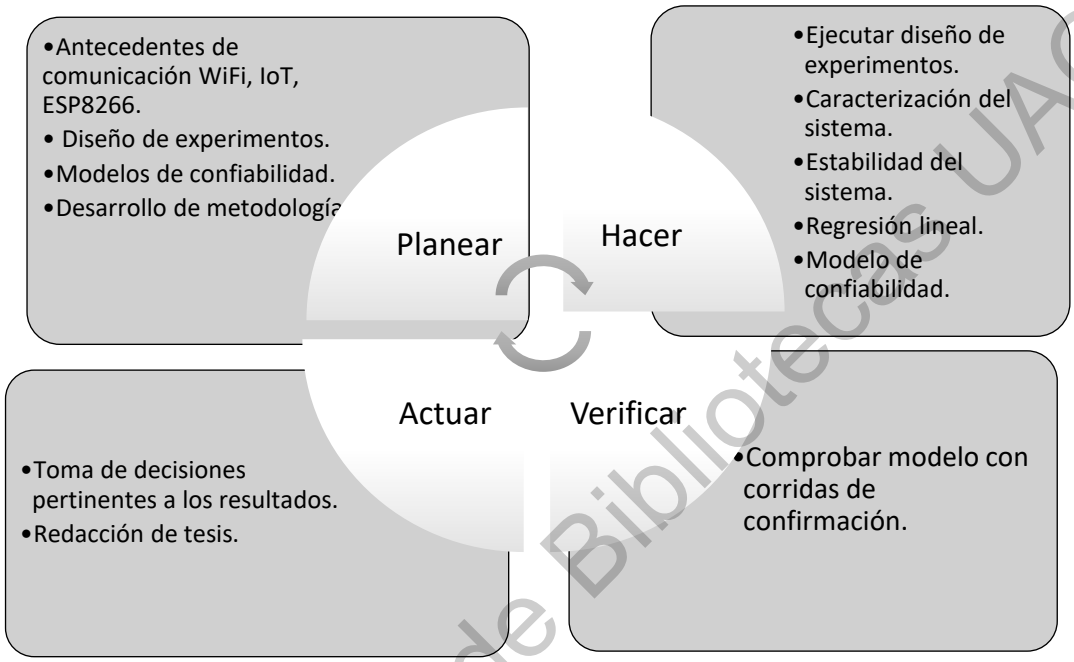


Figura 3. Estrategia del estudio con el ciclo PHVA

### 1.5.4 Pensamiento basado en riesgos

Según la ISO 31000:2018 (AIAG, 2018), el riesgo se define como el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos, es decir, la desviación respecto a lo previsto. El proceso de gestión del riesgo implica la identificación, análisis y valoración de los riesgos que pueden ayudar o impedir lograr los objetivos planificados.

En el presente estudio se utiliza el AMEF (Análisis de Modo y Efecto de la Falla) como herramienta de análisis de riesgos. Esta herramienta provee una técnica sistemática de evaluar los potenciales modos de falla, sus causas y efectos con el fin de prevenir y corregir dichas fallas mediante el establecimiento de acciones y mecanismos de control. En el Cuadro 1 se muestra el resultado final de llevar a cabo el AMEF para definir los modos potenciales de falla y los controles de prevención.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Tabla 2. AMEF del proyecto

| **Pasos claves del proyecto** | **Modos potenciales de la falla** | **Efectos potenciales de la falla** | **Casusas potenciales de falla** | **Controles de prevención** |
|---|---|---|---|---|
| Compra de módulos ESP8266 | Diferente rendimiento de la conexión | Sesgo en el análisis de confiabilidad | Existe más de un fabricante | Conseguir muestra de diferentes fabricantes |
| Programación de ESP8266 vía Arduino IDE | Error en el código para medir RSSI | Inestabilidad en el sistema de medición | Falta de paqueterías y librerías de WiFi | Búsqueda e instalación de paqueterías |
| Conexión WiFi entre módulos ESP8266 | Falla en la conexión | Inestabilidad en el sistema de medición | Interferencias físicas, error en el código Arduino | Análisis del sistema de medición |
| Diseño de experimento | Metodología sin sustento estadístico | Bajo nivel de confianza en los resultados | Falta de referencias | Investigar tipos de diseños de experimentos |
| Análisis de confiabilidad | Falta de confiabilidad en los datos | Bajo nivel de confianza en las conclusiones | Falta de análisis de sistema de medición | Desarrollar metodología MSA para el estudio |
| Análisis de sistema de medición | Sesgo en el análisis por la variabilidad de los dispositivos ESP82266 | Sesgo en las conclusiones. | Utilizar solo un par de módulos ESP8266. | Utilizar una muestra de por lo menos 5 dispositivos. |
| Análisis de sistema de medición. | Sesgo en los resultados por la variabilidad de la | Falta de confianza en el análisis por no | Falta de análisis del efecto de configurar un | Considerar la configuración del módulo ESP8266 |

Dirección General de Bibliotecas UAQ

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | configuración del módulo ESP866 | considerar causas especiales | módulo como punto de acceso en las mediciones RSSI | como variable de diseño y realizar estudio de su efecto en las mediciones |
| Medición de valores RSSI | La variación de los valores RSSI entre modulo y modulo es significativa | Cometer el error de considerar causas especiales como variación natural del experimento. | No conoces las variables o factores significativos del diseño | Realizar diseño aleatorio por bloques para evaluar la variación entre módulos y su configuración |
| Pruebas de modo de falla | Sesgo en la medición de la falla | Conclusiones erróneas | No confirmar que la falla es constante en cualquier momento del día | Realizar estudio de estabilidad del sistema de medición. |

### 1.2.5 Alcance

Este estudio se ha enfocado a caracterizar y realizar un análisis de confiabilidad sobre la conexión WiFi en un entorno de comunicación máquina a máquina entre 2 módulos ESP8266 para su aplicación en el Internet de las Cosas. El principal factor de interés en el estudio es el rendimiento de la conectividad WiFi hasta que falle debido a la distancia. Sin embargo, se encuentra presente otro factor de control que tuvo que ser considerado y evaluado estadísticamente; la programación de uno de los módulos como punto de acceso y el otro como dispositivo móvil de medición. Así mismo, se tomó en cuenta la variación intrínseca que puede existir en la fabricación de los dispositivos. Por lo anterior, primero se realizó un diseño de experimentos factorial considerando tres factores para analizar el efecto que tiene la selección y configuración del módulo. Una vez hecho el análisis de todos los factores, se realizó un diseño de bloques completamente al

Dirección General de Bibliotecas UAQ

azar para enfocar el estudio en el modo de falla.

Debido a que muchas aplicaciones de IoT son en espacios abiertos, como en el campo, el estudio se realizó en un área libre de interferencias físicas, sin personas, ni ondas electromagnéticas cercanas como los generados por los hornos de microondas.

# II. Antecedentes

## 2.1 Comunicación Wifi

### 2.1.1 Principio del WiFi

Las raíces del Wifi se remontan a la década de los años 40´s, cuando una popular actriz de Hollywood titulada como “la mujer más bella en el mundo”, Hedy Lamarr, encontró una manera de evitar que las señales de radio fueran manipuladas (Rhodes, 2012). Esta investigación fue impulsada durante la guerra, debido a que los torpedos orientados por radio podían ser interceptados y manipulados fácilmente por el enemigo. Hedy Lamarr obtuvo el número de la patente 2.292.387 por su “sistema de comunicación secreto” que se basa en el envío de señales saltando entre múltiples frecuencias (Reina, 2016). Sin embargo, la investigación no tuvo mayor impulso ni reconocimiento por parte de la comunidad científica. Para la década de los 80´s, el principal problema del desarrollo del internet inalámbrico moderno era el mismo problema para el cual Hedy Lamarr ya había inventado la solucionado 10 años antes de la primera computadora (Blackburn, 2017). No fue sino hasta finales de los 90s cuando se desarrolló el primer estándar de tecnología inalámbrica para la comunicación por ondas de radio a 2.4GHz según la norma IEEE 802.1, bajo la marca Wi-Fi. Esto quiere decir que el usuario tiene la garantía de que todos los dispositivos que tengan el sello Wi-Fi pueden conectarse y enviar datos entre sí.

Un dispositivo emisor WiFi usa una antena para propagar señales

Dirección General de Bibliotecas UAQ

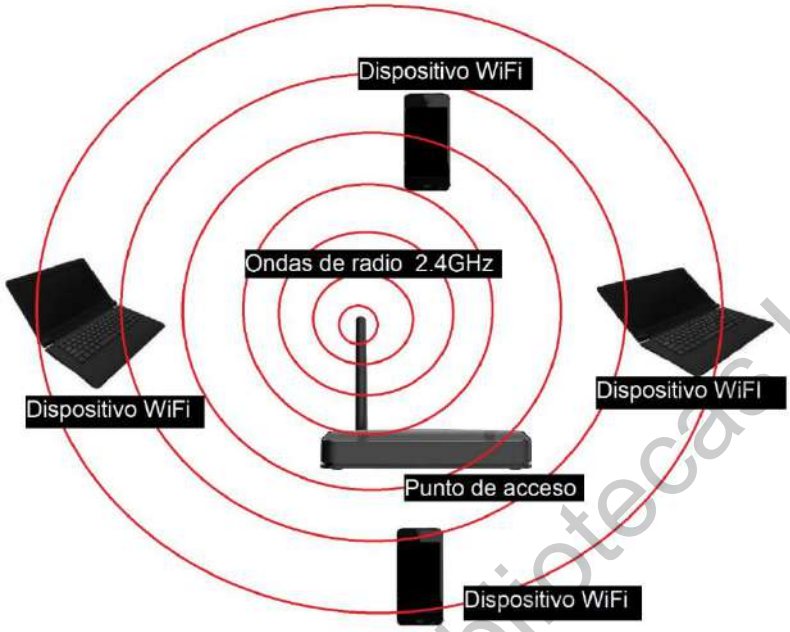


Figura 4. Diagrama de transmisión WiFi. (Fuente propia)

electromagnéticas a través del espacio en todas direcciones. Un dispositivo receptor WiFi que se encuentra en el área de alcance del emisor puede recibir la señal propagada a través de una antena. Posteriormente se puede realizar una comunicación de dos vías si se conocen las credenciales del dispositivo emisor, es decir, nombre de la red y contraseña. Un ejemplo de esto es la red doméstica, como se observa en la Figura 4, se tiene un dispositivo transmisor WiFi que funciona como punto de acceso de comunicación a lo que otros dispositivos WiFi se pueden conectar.

La principal ventaja de la comunicación vía WiFi es que los dispositivos pueden moverse libremente dentro de un área de cobertura. Sin embargo, la señal recibida por el receptor no conserva la integridad original debido a que toda señal sufre degradación a medida que viaja por el espacio; esta degradación depende principalmente de los mecanismos de propagación.

### 2.1.2 Mecanismos de propagación

El mecanismo de propagación se refiere a como la señal electromagnética es propagada a través del medio ambiente. Los principales tipos de mecanismos

Dirección General de Bibliotecas UAQ

de propagación son reflexión, dispersión y difracción.

La reflexión ocurre cuando la onda transmitida encuentra un objeto de grandes dimensiones comparada con la longitud de onda, como las paredes de un edificio, los árboles y el suelo. Algunas ondas de energía son absorbidas por la obstrucción y el resto son reflejadas de la superficie del medio. La energía de las ondas reflejadas depende de la geometría del objeto, las propiedades del material, la amplitud, fase y polarización de la onda incidente (A.Asmussen, 2005).

La dispersión ocurre cuando la señal transmitida encuentra una gran cantidad de objetos de pequeñas dimensiones relativas a la longitud de onda, como muebles, personas o arbustos. La energía reflejada es distribuida en todas las direcciones añadiendo diferentes interferencias constructivas y destructivas de la señal. La difracción ocurre cuando la superficie de obstrucción tiene bordes agudos que producen ondas secundarias alrededor de éste, esto genera una pérdida de potencia en la señal original y la señal difractada es de significativamente menor intensidad (Frenzel, Carrasco, Monachesi, & Chaile, 2010).

### 2.1.3 Fuerza de la señal recibida RSSI

El indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI por sus siglas en inglés *Received Signal Strength Indicator*) es un valor de referencia presentada por el dispositivo receptor de la señal WiFi. Este parámetro se obtiene del procesamiento de los cambios de voltaje medidos por el circuito receptor y es utilizado para configurar la estructura de modulación y codificación, con el fin de obtener la comunicación más óptima.

Si el dispositivo receptor presenta valores bajos de RSSI significa que existe una interferencia física o electromagnética o que se encuentra a una larga distancia del punto de acceso. Esto puede implicar que el dispositivo perderá la conexión en poco tiempo. Es por esto que las lecturas de RSSI son muy útiles para prevenir fallas de comunicación a través de los dispositivos conectados.

Desafortunadamente, la norma IEEE 802.11 indica que el RSSI es un valor

Dirección General de Bibliotecas UAQ

arbitrario de la fuerza de la señal WiFi, por lo que cada fabricante genera su propio rango y algoritmo de medición de los valores RSSI. Sumado a esto, el cálculo de RSSI se relaciona con la tasa de señal a ruido más la interferencia del canal, lo que significa que es sensible a ruido, interferencia, reflexión, atenuación y el tipo de antena WiFi. Lo anterior se ve reflejado en una alta variación de los valores de RSSI en el espacio y tiempo (Alvaro Suarez, 2014).

### 2.2 Estudios previos del rendimiento de ESP8266

Dentro de los primeros estudios de evaluación del rendimiento del ESP8266 se encuentra el de Chruszczyk (2017). En su investigación presenta un análisis estadístico de las lecturas de RSSI medidas en un ambiente de espacio cerrado. Las mediciones se realizaron utilizando diferentes módulos de IoT en 4 bandas de frecuencias; 433/868 MHz y 2.4/5 GHz y un punto de acceso WLAN 802.11. Para el módulo ESP8266 se tomaron 4000 muestras cada segundo y se normalizaron las mediciones tomando de referencia la media aritmética. El objetivo de la investigación fue comparar el error medio cuadrado (MSE, *medium square error*) del ajuste de los datos normalizados a seis diferentes funciones de densidad de probabilidad: gaussiana (normal), kernel (con función normal de kernel), estable, scala t, logística y de valor extremo. Los resultados presentados muestron a la función de densidad de probabilidad kernel con el menor valor de MSE, seguido por la función estable y la gaussiana (normal). El autor concluye que la función gaussiana (normal), en muchos casos, no es buen candidato para estimar las lecturas de RSSI dentro de los algoritmos de los dispositivos receptores. No obstante, la función normal tiene un ajuste aceptable, el cual tiende a mejorar si aumenta el tamaño de la muestra.

En otro estudio de medición de la distancia y valores RSSI, Barai et al. (2017) describieron un método para medir la distancia entre dos módulos ESP8266 usando los valores de RSSI y la técnica de ajuste de curva (CFT *Curve Fitting Technique*). Se comparó esta técnica con la de fuerza de la señal estimada (ESS *Estimated Signal Strength*) y la ecuación de transmisión Friis (FTE *Friis Transmision*

Dirección General de Bibliotecas UAQ

*Equation*). En el estudio se calculó la desviación estándar y se asumió una distribución normal tomando 17 muestras a diferentes distancias en un rango de 0.3 a 10 mts para un total de 300 valores de RSSI. Los resultados de este análisis mostraron una menor desviación alrededor de 1 metro de distancia y la mayor desviación alrededor de 3 metros de distancia. Cabe mencionar que en el estudio se afirma una distribución normal de los datos de origen sin presentar evidencia estadística que lo compruebe. Además de que el método propuesto presentó una alta variación de los porcentajes de error entre las distintas estimaciones de distancia.

Mesquita et al. (2018) realizaron un experimento donde el módulo ESP8266 fue programado para enviar continuamente 85B de paquetes de datos cada segundo a distintas distancias (1 a 8 metros) del receptor. Debido al patrón de radiación no uniforme presentada por la antena embebida del módulo, por cada punto de distancia de tomaron las mediciones de RSSI en 4 posiciones distintas. Por cada distancia se tomaron 60 valores de RSSI. Los resultados muestran que a partir de los 4 metros aumenta la variación de los valores debido al propagación e interferencias. En el estudio también se exploraron las limitaciones de conectividad en el interior de un edificio. Los resultados concluyen que el módulo tiene una buena conectividad, pero no se exploró el alcance máximo de ésta.

Rosli et al.(2018) llevaron a cabo un análisis de las características de los valores RSSI calculados por el módulo ESP8266. El objetivo de la experimentación fue explorar las posibilidades de usar los valores de RSSI como parámetro único de referencia en diferentes aplicaciones del Internet de las Cosas. Las características de las lecturas de RSSI se analizaron desde dos aspectos. El primer aspecto fue como la obstrucción en la línea de vista (LoS *Line of Sight*) afecta las lecturas de RSSI. El segundo aspecto es como la tasa de muestreo y el cruzamiento de personas a través de LoS afecta las lecturas RSSI. Los resultados mostraron que las mediciones de RSSI son afectadas fuertemente por la obstrucción de LoS entre el receptor y emisor. Así mismo, se observa que la tasa de muestreo no presenta efecto significativo en la variación de las lecturas, pero el cruzamiento de

Dirección General de Bibliotecas UAQ

personas resulta en atenuación de las mediciones. Se propone como tema de investigación el cálculo de espesor de materiales y la identificación de personas por medio de la atenuación que presentan las mediciones de RSSI entre dos módulos ESP8266.

Yoppi et al. (2018) compararon los valores de RSSI de distintos módulos basados en ESP8266 para evaluar el alcance de la cobertura WiFI. La experimentación se realizó en un área abierta a 20, 30 y 40 metros de distancia. Por cada modelo se utilizaron dos placas de desarrollo, una programada como punto de acceso y la otra como estación. Por cada distancia, el punto de acceso fue rotado en su plano horizontal 45° por paso hasta completar el círculo completo. Por cada ángulo, el valor de RSSI fue tomado cada medio segundo durante 30 segundos y se tomó calculó su media. Los resultados mostraron que los módulos con antenas de dipolos tienen mejor alcance que los de cerámica, seguido por la antena de PCB y al final las antenas invertidas.

## 2.3 Diseño de experimentos

### 2.3.1 Error experimental

Un experimento consiste en la manipulación de las condiciones de operación de un sistema o proceso con el fin de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del resultado. Cuando una operación o un experimento es repetido bajo las mismas circunstancias, los resultados observados no son siempre idénticos. La fluctuación entre el resultado de una repetición y otra es llamada ruido, variación experimental, error experimental o simplemente error. Existen muchas fuentes que contribuyen al error experimental como errores de análisis, muestreo o medición. Una buena planeación para la generación de los datos, como el diseño de experimentos, asegura una disminución en el error experimental (George E. P. Box, 2005).

### 2.3.2 Variable de respuesta

La variable de respuesta es el resultado de cada prueba experimental donde

Dirección General de Bibliotecas UAQ

se busca identificar el efecto de manipular las condiciones de operación, también se conoce como *salida, y´s de un proceso o simplemente respuesta*. En el presente estudio se tiene como variable de respuesta la distancia a la falla y los valores RSSI para la conexión WiFi entre módulos ESP8266.

### 2.3.2 Factores de control y ruido

Los factores de control son variables de proceso que tienen efecto en la salida y se pueden manipular y fijar en un nivel dado. También son llamados *variables de entrada, condiciones de operación, variables de diseño, parámetros del proceso, las X´s de un proceso* o *simplemente factores.*

Los factores de ruido son aquellas características intrínsecas del sistema que causan variabilidad en el resultado del proceso y no pueden ser controlados durante la operación o el experimento.

En el presente experimento se tienen como factores de ruido todo objeto físico que se encuentre entre los módulos, así como las interferencias electromagnéticas de equipos como microondas.

### 2.3.2 Diseño de bloques completos al azar

Cuando se define un solo factor de interés para el estudio, los factores adicionales se les llama *factores de bloque.* En un diseño de bloques completos al azar (DBCA) se consideran tres fuentes de variabilidad: el factor de tratamientos, el factor de bloque y el error aleatorio.

El modelo estadístico para este diseño esta dado por:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}; \begin{cases} i = 1,2,\dots,k \\ j = 1,2,\dots,b \end{cases}$$

donde $Y_{ij}$ es la medición que corresponde al tratamiento i en el bloque j; $\mu$ es la media global poblacional; $\tau_i$ es el efecto debido al tratamiento i, $\gamma_j$ es el efecto debido al bloque j, y $\varepsilon_{ij}$ es el error experimental. El diseño de bloques completos aleatorizados se muestra en la Figura 5.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

| Bloque 1 | Bloque 2 | … | Bloque n |
|---|---|---|---|
| Tratamiento 1 | Tratamiento 1 | … | Tratamiento 1 |
| Tratamiento 2 | Tratamiento 2 | … | Tratamiento 2 |
| Tratamiento 3 | Tratamiento 3 | … | Tratamiento 3 |
| … | … | | … |
| Tratamiento k | Tratamiento k | … | Tratamiento k |

Figura 5. Diagrama de diseño de bloques completos aleatorizados

### 2.3.2 Análisis de la varianza

Para saber si el efecto de un factor es estadísticamente significativo se requiere del análisis de varianza (ANOVA). El resultado del ANOVA es la separación de la variación total en las partes que son debidas a factores y la variación debida al error.

El objetivo del ANOVA es probar la hipótesis de igualdad del efecto de los tratamientos que se describe como:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \cdots = \tau_k = 0$$

$$H_A: \tau_i \neq 0 \text{ para algún i}$$

donde $\tau_i$ es el efecto del tratamiento i sobre la variable de respuesta. Si se rechaza la hipótesis nula se puede concluir que al menos un factor tiene un efecto sobre la salida del sistema.

El modelo de los efectos se describe como:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}; \begin{cases} i = 1,2,\ldots,k \\ j = 1,2,\ldots,b \end{cases}$$

donde la media global es un parámetro común para todos los tratamientos.

### 2.3.2 Supuestos del modelo ANOVA

La validez de los resultados obtenidos en cualquier ANOVA requiere que se

Dirección General de Bibliotecas UAQ

satisfagan ciertos supuestos. Específicamente, los supuestos son que el modelo $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$ describe de manera adecuada las observaciones, y que los errores siguen una distribución normal e independiente con media cero y varianza constante pero desconocida. Para comprobar los supuestos existen diferentes pruebas analíticas y gráficas.

## 2.4 Análisis del sistema de medición

Los datos de mediciones tienen como objetivo ser usados en la toma de decisiones, por ejemplo, para cambiar los elementos de un proceso de manufactura. La calidad de los datos de medición se determina mediante la interpretación de las propiedades estadísticas de múltiples mediciones obtenidas por el sistema. Una mala calidad de datos de medición puede ser debido a la variación excesiva del sistema.

### 2.4.1 Calidad de las mediciones

La calidad de los datos medidos se puede evaluar por las propiedades estadísticas de múltiples mediciones obtenidas bajo un sistema de medición estable (AIAG, 2010). Las propiedades estadísticas más usadas para caracterizar la calidad de los datos son el *sesgo* y *varianza* del sistema de medición. La propiedad llamada sesgo hace referencia a la localización del promedio de los datos medidos en relación a un valor de referencia y la propiedad llamada varianza hace referencia a la dispersión entre las mediciones. Si existe demasiada variación entre las mediciones se considera una baja calidad de datos, esto puede ser debido a casusas especiales que influyen en la salida del sistema. Así mismo, un cambio considerable del sesgo a través del tiempo indica inestabilidad del sistema de medición; lo que sugiere que hay interacción entre el sistema de medición y las condiciones de operación (medio ambiente).

La estabilidad de un sistema de medición se refiere a la variación total en las mediciones obtenidas sobre la misma parte en un periodo de tiempo extenso. El



Dirección General de Bibliotecas UAQ

sistema es estable si se encuentra bajo control estadístico con respecto a la variación y localización.

### 2.4.2 Estabilidad estadística

. La estabilidad se traduce en la variabilidad y comportamiento de un proceso a través del tiempo, de esta manera es posible discriminar entre variaciones por causas comunes o especiales. Un sistema se considera estable cuando, bajo condiciones de repetibilidad, la variación de la salida es debida solo a causas comunes y no especiales. La repetibilidad es la variación de las mediciones obtenidas con un instrumento de medición usado por varias veces por el mismo evaluador midiendo la misma característica sobre la misma parte. También se conoce como la variación del equipo.

Para analizar la estabilidad de un sistema se evalúa la consistencia de las mediciones tomadas a través del tiempo. La diferencia en la variación de los datos puede indicar la presencia de factores que impactan en la consistencia de las mediciones. Este análisis se puede realizar de manera gráfica mediante las cartas de control de Shewhart.

### 2.4.3 Cartas de control de Shewhart

Shewhart (1926) implementó las cartas de control como una herramienta estadística para distinguir entre la variación común y eventos especiales. El método se visualiza a manera de gráfica, donde el eje horizontal es la línea central que representa la media esperada de la distribución de la variable y los límites de control son definidos por la desviación estándar.

Cuando el sistema se encuentra en control estadístico, existe una alta probabilidad de que todos los valores obtenidos se localicen dentro de los límites de control y de manera aleatoria sobre la línea central, por lo que un punto fuera de los límites de control, o una tendencia de puntos poco probable, es señal de una variación especial debida a un evento no estocástico. Así, la carta funciona como una herramienta para detectar cambios en el sistema.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Cuando se tiene la oportunidad de obtener muestras de subgrupos mayores a 10 datos, la carta de control más conveniente es la X-S, ésta se encuentra formada por dos gráficas; la gráfica de desviación estándar y la gráfica de medias. La gráfica S muestra el cambio en la variación entre medición y medición, y la gráfica X muestra el cambio en la localización de la distribución. Un sistema estable mostrará un patrón aleatorio de puntos dentro de los límites de control y sobre el promedio de los rangos y las medias. La señal de que ha ocurrido un evento especial se ve reflejado con uno o más puntos fuera de los límites de control o con una secuencia de puntos no aleatoria, como una tendencia ascendente o un flujo de más de seis puntos por debajo o arriba de la media.

Los límites se obtienen de la expresión:

$$\mu \pm 3\sigma$$

El manual MSA (AIAG, 2018), define hasta ocho criterios para identificar causas especiales. En la Tabla 3 se muestran los criterios típicos para causas especiales.

Tabla 3. Criterios de causas especiales de variación.

| | |
|---|---|
| 1 | Uno o más puntos más allá de tres desviaciones estándar de la línea central |
| 2 | Siete puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central |
| 3 | Seis puntos consecutivos de manera ascendente o descendente |
| 4 | Catorce puntos consecutivos alternando arriba y abajo |
| 5 | Dos de tres puntos se encuentran a más de dos desviaciones estándar |
| 6 | Cuatro de cinco puntos se encuentran a más de una desviación estándar |
| 7 | Quince puntos consecutivos a una desviación estándar |
| 8 | Ocho puntos consecutivos más ala de una desviación estándar |

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## 2.5 Estudio de confiabilidad

### 2.5.1 Confiabilidad

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un componente o sistema desempeñe de manera satisfactoria la función para la que fue creado, durante un periodo establecido y bajo condiciones de operación específicos (Gutierrez Pulido, 2009).

En un estudio de confiabilidad, se analiza la vida de un producto medida en unidades de tiempo o unidades relacionadas como el número de ciclos, distancia recorrida, piezas producidas, etc.

. Los tópicos de interés sobre el rendimiento de un producto son:

1.- Determinar el cuantil p, que es la distancia dp hasta la cual se espera que falle una proporción p de lo módulos en operación. Esto es útil para caracterizar el producto y determinar parámetros de operación.

2.- De manera complementaria al primer punto, se puede determinar la proporción 1-p para estimar la confiabilidad del módulo a la distancia dp.

3.- Determinar la propensión a fallar la conexión del módulo en una distancia dada. Esta información sirve para planear el diseño de los sistemas de IoT.

4.- Dado que un módulo sigue conectado a la distancia d0, encontrar la probabilidad de que éste siga conectado con una distancia d adicional. Con esto es posible planear cambios en los sistemas de IoT considerando las limitaciones del producto.

### 2.5.2 Tipos de censura en confiabilidad

En un estudio de confiabilidad existe el concepto de *observaciones* o *datos censurados.* No es censura en el sentido de ocultar algo, sino de trabajar con información parcial acerca del modo de falla. Esto surge cuando los especímenes de un experimento de confiabilidad están sujetos a un rango límite de observación, esto puede ser debido a restricciones de tiempo, recursos, técnica, etc.

En las pruebas con censura no se conoce el momento exacto en el que

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ocurre la falla, pero sí hay información parcial obtenida según el tipo de censura. Existen distintos tipos de observaciones censuradas: la *censura por derecha tipo I,* es cuando los datos resultan de unidades que no han fallado en un rango de prueba especificado. La *censura por derecha tipo II*, es cuando la prueba dura hasta que cierta cantidad de las unidades falla. La *censura por izquierda*, es cuando los datos resultan de las unidades que fallaron dentro de rango de prueba especificado. La *censura por intervalo* es cuando no es posible realizar una inspección continua, pero se puede saber si la unidad falló dentro de un intervalo definido. Por último, la *censura múltiple* es cuando en el mismo estudio de confiabilidad se tienen diferentes tipos de censura.

### 2.5.3 Estimación de parámetros con el método de máxima verosimilitud

Un aspecto fundamental en cualquier estudio de confiabilidad es identificar cuál es la distribución que mejor modela el factor de falla. El método de máxima verosimilitud es el más usado para estimar los parámetros de un modelo logístico de regresión.

Sean $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ los valores de una muestra aleatoria extraída de una población $f(x)$ con parámetro θ, la función de verosimilitud de la muestra está dada por: $L(\theta) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n; \theta)$. El método se reduce a encontrar los valores del parámetro θ que maximicen la función de verosimilitud $L(\theta)$.

### 2.5.4 Modelo de confiabilidad

Para la variable de respuesta de la distancia $(y)$. La función *f* (y) es función de densidad (continua) si se cumple que:

$$f(y) \geq 0 \ \ donde \int_{-\infty}^{\infty} f(y)dy = 1; \ -\infty < y < \infty$$

es decir, es una función no negativa cuya integral, sobre todos los valores posibles, es igual a 1. Lo anterior significa que el área bajo la curva entre dos valores es la probabilidad de observar fallas en ese intervalo.

Con ello es posible contestar cualquier pregunta acerca de la confiabilidad

Dirección General de Bibliotecas UAQ

del producto objeto de estudio. Las siguientes funciones, definidas a partir de la función de densidad, son útiles para contestar otras preguntas de interés.

*Función de distribución acumulada*

Esta función, denotada con $F(y)$, obtiene la probabilidad de que un producto falle antes de la distancia "$y$", con lo que $F(y) = P(Y \leq y)$. De esta manera, si limitamos la función de densidad de probabilidades en el intervalo de cero a infinito, entonces $F(y)$ se obtiene integrando la función de densidad $f(y)$ de la siguiente manera:

$$F(y) = P(Y \leq y) = \int_0^y f(y)dy$$

*Función de confiabilidad*

Esta función, denotada con $C(y)$, se conoce también como *función de supervivencia, y* obtiene la probabilidad de que el producto no haya fallado (sobrevive) cuando se encuentra a la distancia "$y$". Con lo que $C(y) = P(Y > y) = 1 - F(y)$

En la Figura 6 se muestra la relación entre las funciones de densidad $f(y)$, de distribución acumulada $F(y)$ y de confiabilidad $C(y)$. Ya que las dos últimas representas áreas bajo la curva de la función de densidad, determinan probabilidades.

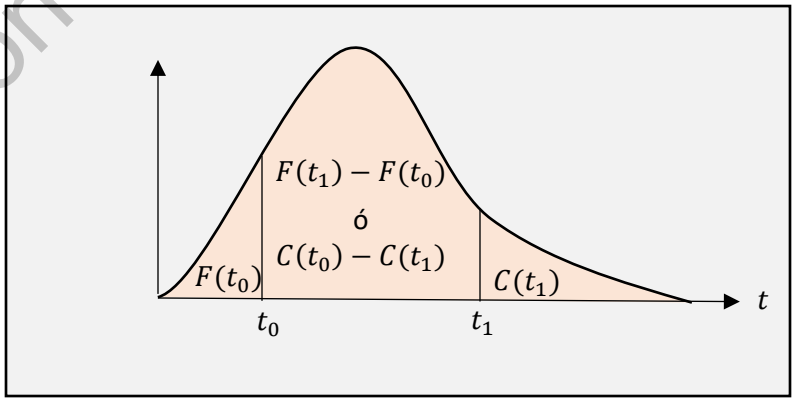


Figura 6. Relación entre la función de densidad, distribución acumulada y supervivencia.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

*Función de riesgo*

La función de riesgo h(y), obtiene la propensión a fallar del dispositivo a una distancia “y”. También se le conoce como tasa de falla instantánea o tasa de riesgo. Se define como:

$$h(y) = \frac{f(y)}{C(y)} = \frac{f(y)}{1 - F(y)}$$

en el caso de la función exponencial:

$$h(y) = \frac{f(y)}{C(y)} = \frac{\lambda e^{-\lambda y}}{e^{-\lambda x}} = \lambda$$

*Función cuantil*

En la presente investigación, el cuantil p es la distancia $y_p$ al cual falla una proporción *p* de conexiones. Ésta se puede definir en términos de la función de distribución acumulada como:

$$y_p = F^{-1}(p)$$

Donde $F^{-1}$ es la función inversa de *F*(*y*).

## III. Hipótesis

La probabilidad de falla de conexión WiFi, del módulo ESP8266, se determina con los valores RSSI medidos por el receptor.

## IV. Objetivo general y particulares

### 4.1 Objetivo general

Realizar un estudio de la confiabilidad de la conectividad WiFi del módulo ESP8266 para su implementación en el Internet de las Cosas.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

### 4.2 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de comunicación IoT entre un punto de acceso y un receptor ESP8266 que indique al usuario los valores RSSI bajo el protocolo estándar de comunicación IEEE 802.11
- Evaluar el efecto de las fuentes de variación en el sistema
- Evaluar la estabilidad del sistema
- Ajustar un modelo probabilístico al modo de falla de la conexión WiFi
- Describir el modelo del modo de falla con las funciones de confiabilidad

## V. Metodología

La metodología propuesta es una compilación de dos libros de los autores Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar; “Análisis y diseño de experimentos” (2008) y “Control estadístico de calidad y Seis Sigma” (2009), además de la guía internacional para el análisis de sistemas de medición MSA de AIAG (2010) y la guía internacional para análsisi estadístico de procesos SPC de AIAG (2010).

La metodología para cumplir con los objetivos se conforma por 4 etapas principalmente, como se muestra en la Figura 7. La primer parte, diseño de sistema IoT de medición RSSI (ver sección 5.1), describe los elementos y las variables de diseño presentes en el experimento. La segunda etapa, análisis del sistema de medición, tiene como objetivo evaluar la confiabilidad de los datos medidos. Para lo grar este objetivo, primero se análiza el efecto de las fuentes de variación mediante un diseño de experimentos de bloques completos aleatorios y el ANOVA. Una vez que se ha caracterizado el comportamiento del sistema, se confirma la estabilidad del mismo mediante la carta de control de Shewhar. El tercer punto (ver sección 5.3), explica el procedimiento para realizar las pruebas del modo de de falla de la conectividad WiFi. Y finalmente, la cuarta etapa (ver sección 5.4) describe el

Dirección General de Bibliotecas UAQ

método de maxima verosimilitud para ajustar los parámetros del modelo probabilístico y realizar el análisis estadístico de confiabilidad de la conectividad WiFi del módulo ESP8266.

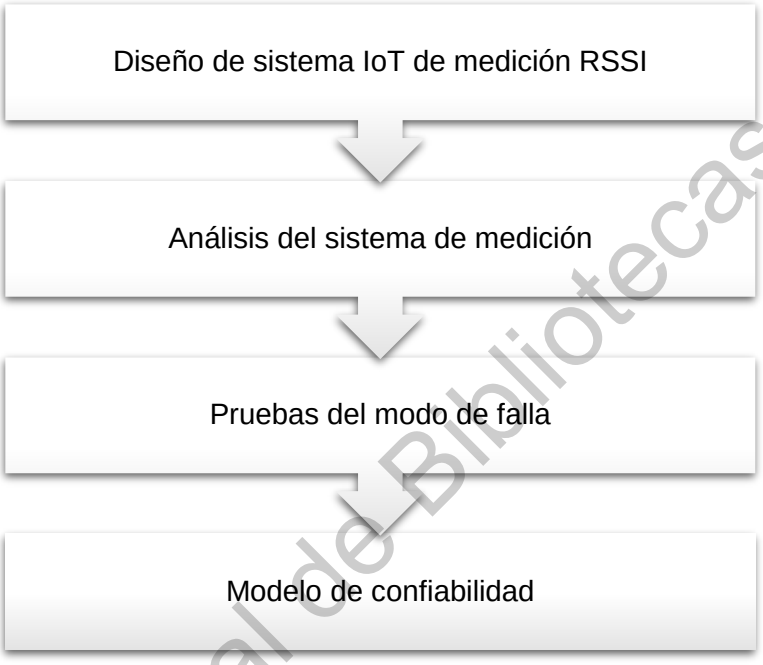


Figura 7. Flujo de la metodología propuesta

**5. 1 Sistema IoT de medición RSSI con ESP8266**

El sistema de comunicación consiste de 2 módulos ESP8266 de 32bit 80MHz con procesador Xtensa Tensilica y una Laptop Acer con procesador Intel® Core™ i3-6006U 2.00GHz con 4 GB de RAM y S.O. Windows 10. En la Figura 8 se muestra el diagrama *pinout* y modo de conexión para el módulo ESP8266 con NodeMCU

. Con el uso del entorno de programación IDE de Arduino, se compilan las instrucciones para que un módulo se comporte como punto de acceso y otro como receptor. El módulo programado como punto de acceso tiene una identificación única (SSID) y contraseña. El módulo programado como receptor tiene las instrucciones para conectarse al punto de acceso y leer los valores RSSI. En este arreglo, el dispositivo receptor se encuentra conectado a laptop para imprimir los

Dirección General de Bibliotecas UAQ

valores RSSI en la consola IDE Arduino. Como resultado, cada medición es igual a la media de 100 lecturas RSSI tomadas a una frecuencia de 2Hz.

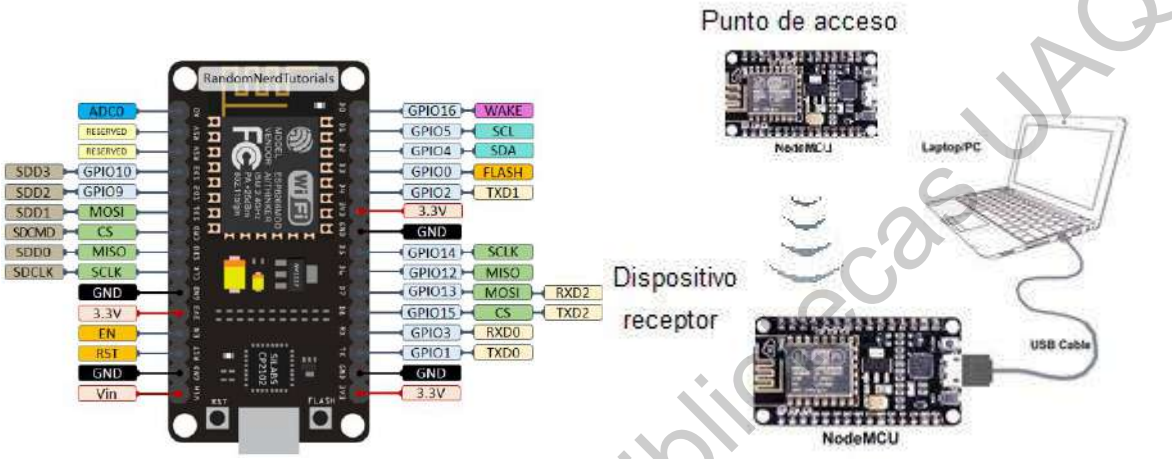


Figura 8. Diagrama pinout de NodeMCU con ESP8266 y conexión para la implementación del sistema de medición. (Fuente: www.randomnerdtutotials.com, 2020)

## 5. 2 Análisis del sistema de medición

### 5.2.1 Variabilidad en el sistema

En el presente estudio, la distancia a la que se encuentran conectados dos módulos ESP8266 es el principal factor de control para conocer la confiabilidad de la conexión WiFi. Sin embargo, realizar el estudio con un par único de dispositivos puede provocar un sesgo en el análisis, por lo que se considera la variabilidad del módulo utilizando una muestra de cinco dispositivos ESP8266. Así mismo, también se considera la variable de diseño de configurar un módulo como punto de acceso y el otro como dispositivo receptor que mide de los valores RSSI. Por lo que en el presente experimento se cuenta con un total de 3 variables de diseño o factores de control.

El objetivo en esta primera etapa es evaluar si la variación intrínseca de los módulos, así como el modo de configuración, tienen efecto significativo en las mediciones RSSI, por lo que se plantea un experimento con diseño de bloques

Dirección General de Bibliotecas UAQ

completos al azar, donde el factor de la distancia se considera factor de bloqueo en esta primera parte del estudio.

| Tratamientos | | Bloques | |
|---|---|---|---|
| Par de módulos | Modo de configuración | 0mts | 10m |
| #1 - #2 | AP-DM | $Y_{11}$ | $Y_{12}$ |
| #1 - #3 | AP-DM | $Y_{21}$ | $Y_{22}$ |
| #1 - #4 | AP-DM | $Y_{31}$ | $Y_{32}$ |
| #1 - #5 | AP-DM | $Y_{41}$ | $Y_{42}$ |
| #2 - #3 | AP-DM | $Y_{51}$ | $Y_{52}$ |
| #2 - #4 | AP-DM | $Y_{61}$ | $Y_{62}$ |
| #2 - #5 | AP-DM | $Y_{71}$ | $Y_{72}$ |
| #3 - #4 | AP-DM | $Y_{81}$ | $Y_{82}$ |
| #3 - #5 | AP-DM | $Y_{91}$ | $Y_{92}$ |
| #4 - #5 | AP-DM | $Y_{101}$ | $Y_{102}$ |
| #1 - #2 | DM-AP | $Y_{111}$ | $Y_{112}$ |
| #1 - #3 | DM-AP | $Y_{121}$ | $Y_{122}$ |
| #1 - #4 | DM-AP | $Y_{131}$ | $Y_{132}$ |
| #1 - #5 | DM-AP | $Y_{141}$ | $Y_{142}$ |
| #2 - #3 | DM-AP | $Y_{151}$ | $Y_{152}$ |
| #2 - #4 | DM-AP | $Y_{161}$ | $Y_{162}$ |
| #2 - #5 | DM-AP | $Y_{171}$ | $Y_{172}$ |
| #3 - #4 | DM-AP | $Y_{181}$ | $Y_{182}$ |
| #3 - #5 | DM-AP | $Y_{191}$ | $Y_{192}$ |
| #4 - #5 | DM-AP | $Y_{201}$ | $Y_{202}$ |

Tabla 4. Arreglo experimental del diseño de bloques aleatorizado

Dirección General de Bibliotecas UAQ

La primera variable de diseño es la selección de un par de módulos a conectar vía WiFi, al contar con 5 dispositivos se tiene un total de 10 combinaciones de pares. La segunda variable de diseño es el modo de configurar un módulo como punto de acceso o como receptor (medidor de valores RSSI), por lo que se cuenta con 2 maneras de configurar cada par de módulos. Para el factor de la distancia se consideran 2 niveles de bloqueo donde exista contraste en las mediciones; 0m y 10m. El arreglo experimental se muestra en la tabla, este cuenta con 20 tratamientos en 2 niveles de bloqueo para un total de 40 combinaciones.

El modelo estadístico para este diseño esta dado por:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij} \; ; \begin{cases} i = 1,2,\dots,20 \\ j = 1,2,3 \end{cases}$$

donde $Y_{ij}$ es la medición RSSI que corresponde al tratamiento $i$ en el bloque $j$, $\mu$ es la media poblacional, $\tau_i$ es el efecto debido al tratamiento, $\gamma_j$ es el efecto debido al bloque y $\varepsilon_{ij}$ es el error aleatorio atribuible a la medición.

La hipótesis de interés es que el efecto en la medición RSSI es igual en todos los tratamientos, es decir, no hay diferencia entre módulos en cualquier configuración:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \cdots = \tau_k = 0$$

$$H_A: \tau_i \neq 0$$

La hipótesis se prueba con un ANOVA con dos criterios de clasificación; el factor del tratamiento y el factor de bloque. El aspecto del ANOVA para el diseño por bloques aleatorios se presenta en la tabla 5.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Tabla 5. ANOVA para el diseño por bloques aleatorios.

| Fuente de variabilidad | Suma de cuadrados | Grado de libertad | Cuadrado medio | $F_0$ | Valor-P |
|---|---|---|---|---|---|
| Tratamientos | $SC_{TRAT}$ | *k*-1 | $\frac{SC_{TRAT}}{k-1}$ | $\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$ | $P(F>F_0)$ |
| Bloques | $SC_B$ | *b*-1 | $\frac{SC_B}{b-1}$ | $\frac{CM_B}{CM_E}$ | $P(F>F_0)$ |
| Error | $SC_E$ | $(k-1)(b-1)$ | $\frac{SC_E}{(k-1)(b-1)}$ | | |
| Total | $SC_T$ | N-1 | | | |

### 5.2.2 Estabilidad estadística

Una vez que se ha evaluado el comportamiento del sistema, se debe confirmar que, en ausencia de causas especiales, la distribución de datos será la misma en cualquier momento del tiempo, es decir, el sistema es estable. Para lograr este objetivo se utiliza la carta de control de Shewhart de medias y desviación estándar.

Para la conducción del estudio se realiza el bloqueo de la distancia a 0 metros. Se toma una muestra 100 subgrupos de 50 valores RSSI a 2HZ de frecuencia de muestreo.

La línea de tendencia central es igual a la media global obtenida anteriormente en el diseño por bloques de los tratamientos a 0 metros. De igual manera, los límites de control se obtienen a partir de la desviación estándar total.

Se utilizan las mediciones de RSSI como entrada para la carta de control y se observa la gráfica S (desviación estándar) y la gráfica X (medias) en busca de señales fuera de control. Primero se analiza la gráfica S para observar el comportamiento de la variación entre medición y medición, si no se observan causas especiales de variación, entonces se procede a analizar la gráfica X para observar el comportamiento de la localización de la media de los valores RSSI.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## 5. 3 Pruebas del modo de falla

La variable de respuesta o característica de calidad de interés en el presente estudio es la conectividad WiFi. Donde el principal modo de falla es la pérdida de la conexión, y la principal causa es que el dispositivo móvil se encuentra fuera de alcance del punto de acceso. Para obtener datos del modo de falla se realizará la prueba hasta que falle la conexión entre los ESP8266. Las consideraciones para las pruebas son las siguientes:

- Para obtener el modelo de confiabilidad es necesario observas fallas. Se considera que componente o dispositivo IoT falla cuando pierde la conectividad inalámbrica.
- La unidad del estudio son los metros a los que se desconecta el dispositivo móvil del punto de acceso y el último valor RSSI medido antes de la desconexión.
- Se realiza la prueba en espacio libre y lejos de dispositivos de ondas electromagnéticas domésticas como microondas. El objetivo es reducir la variación de la señal WiFi por factores de ruido.

## 5. 4 Modelo de confiabilidad

El primer propósito en el estudio de confiabilidad es identificar cuál es la distribución que mejor modela el factor de falla de la conexión WiFi. Para especificar la distribución y sus parámetros se aplicó el método de máxima verosimilitud de manera computacional mediante el software de RStudio. Los datos de las pruebas de falla son distancias con valores no negativos que tienen un comportamiento asimétrico con sesgo positivo. Esto hace que la variable aleatoria de la distancia tenga comportamientos diferentes al modelo normal, por lo que se compararon las distribuciones de probabilidad más frecuentes para modelar tiempos de vida. Las cuales son la Weibull, lognormal, exponencial y gamma y lognormal de 3 parámetros. Los valores de entrada son los obtenidos en las pruebas del modo de falla. Posteriormente, con el modelo resultante se calcularon las funciones de

Dirección General de Bibliotecas UAQ

confiabilidad para responder a todas las preguntas de acerca de la probabilidad del modo de falla. De la misma manera, se realiza el mismo procedimiento con los valores RSSI con el fin de obtener un modelo predictivo de la falla de conexión considerando otras causas del modo de falla como la reflexión debida al espacio u objetos presentes y también la interferencia de otras ondas electromagnéticas.

## VI. Resultados y discusión

### 6.1 Sistema de medición IoT con ESP8266

#### 6.1.1 Análisis de la variación en el sistema

La respuesta del experimento con diseño de bloques completos al azar se muestra en la Tabla. El análisis de varianza se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del experimento con bloques.

| Tratamientos | | Bloques | |
|---|---|---|---|
| Par de módulos | Modo de configuración | 0mts | 10m |
| #1 - #2 | AP-DM | -0.22772277 | -63.7524752 |
| #1 - #3 | AP-DM | 2.28712871 | -70.960396 |
| #1 - #4 | AP-DM | -0.91089109 | -64.1980198 |
| #1 - #5 | AP-DM | 2 | -63.1782178 |
| #2 - #3 | AP-DM | -7.84158416 | -72.5247525 |
| #2 - #4 | AP-DM | 4.08910891 | -66.039604 |
| #2 - #5 | AP-DM | 6.6039604 | -67.1782178 |
| #3 - #4 | AP-DM | 1.84158416 | -64.9108911 |
| #3 - #5 | AP-DM | 4.77227723 | -68.7425743 |
| #4 - #5 | AP-DM | 5.26732673 | -68.6237624 |
| #1 - #2 | DM-AP | 5.81188119 | -63.8019802 |

Dirección General de Bibliotecas UAQ

| | | | |
|---|---|---|---|
| #1 - #3 | DM-AP | 5.72277228 | -65.1782178 |
| #1 - #4 | DM-AP | 5.69306931 | -64.7326733 |
| #1 - #5 | DM-AP | 4.89108911 | -67.6336634 |
| #2 - #3 | DM-AP | 7.06930693 | -73.0693069 |
| #2 - #4 | DM-AP | 7.95049505 | -68.4158416 |
| #2 - #5 | DM-AP | 4.64356436 | -70.2079208 |
| #3 - #4 | DM-AP | 6.54455446 | -67.0693069 |
| #3 - #5 | DM-AP | 6.03960396 | -70.2079208 |
| #4 - #5 | DM-AP | 3.12871287 | -66.8910891 |

Tabla 7. Resultados del ANOVA.

| Fuente de variabilidad | Suma de cuadrados | Grado de libertad | Cuadrado medio | $F_0$ | Valor-P |
|---|---|---|---|---|---|
| Modo de configuración | 213.46 | 19 | 11.23 | 1.06 | 0.448 |
| Bloques | 50601.38 | 1 | 50601.38 | 4781.58 | 2.71e-24 |
| Residuales | 201.06 | 19 | 10.58 | | |

De la Tabla 7 se observa que para los modos de configuración se obtuvo un valor-*p* = 0.448 > α = 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula de que no hay diferencia entre los dispositivos o modo de configuración al momento de medir valores RSSI. En contraste, se observa que para los bloques se obtiene un valor-*p*= 2.71e-24, lo cual confirma que la variación de la intensidad WiFi es principalmente debido a la distancia. Estos resultados se pueden comprobar de manera gráfica, en la Figura 9 se muestra el gráfico de cajas, donde se observa que la diferencia de las mediciones es debido al bloque y no al modo de configuración. Así mismo, en la Figura 10 se observa el gráfico de interacciones, aquí se puede confirmar que no existe interacción entre el factor de bloque y el de los tratamientos.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

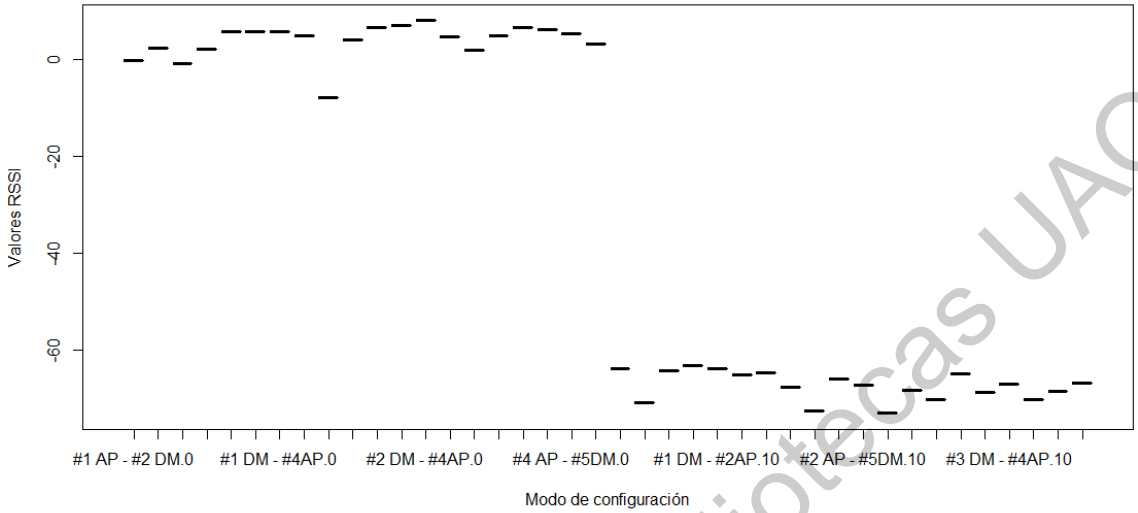


Figura 9. Diagrama de cajas de los valores RSSI por bloques.

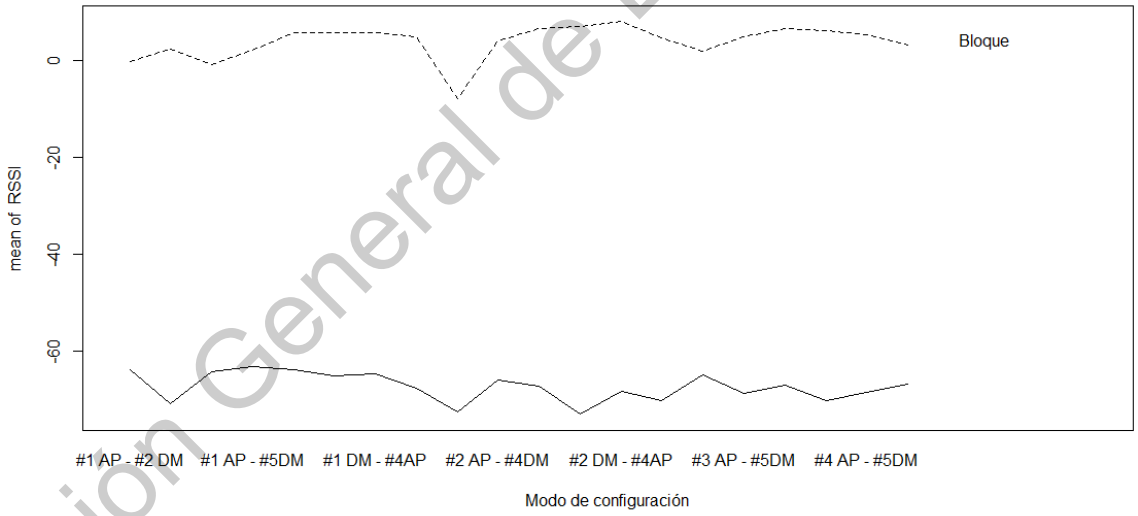


Figura 10. Gráfica de interacciones.

### 6.1.2 Estabilidad del sistema

En la Figura 11 se muestra el gráfico S donde no se observan puntos fuera del límite de control, por lo que se puede concluir que la diferencia entre valores RSSI medidos es debida solo a causas comunes de variación.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

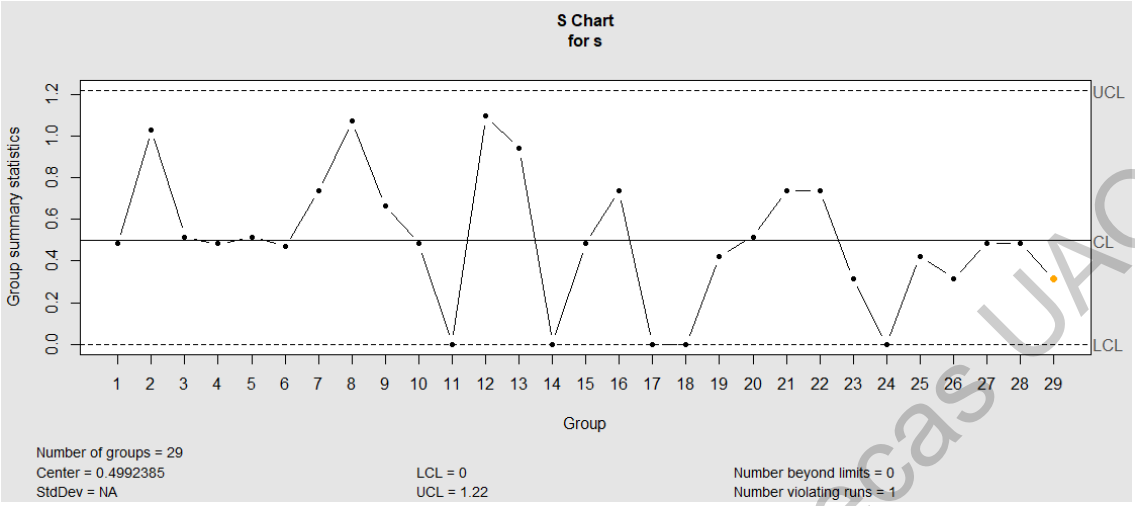


Figura 11. Gráfica de desviación estándar.

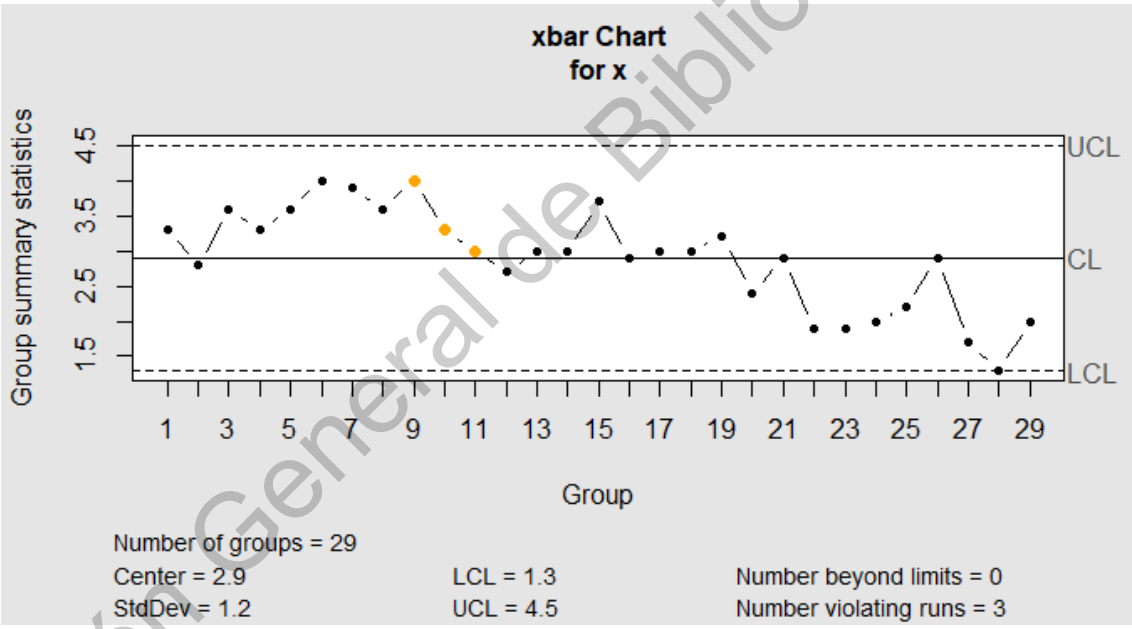


Figura 12. Gráfica de medias.

Una vez que se confirma que no existen causas especiales de variación en el grafico S, se procede a analizar la gráfica de medias. En la figura se observa la gráfica x, al igual que la gráfica S, no se observan puntos fuera de control. Sin embargo, se muestran algunos puntos amarillos, los cuales representan posibles corridas no aleatorias. No obstante, este comportamiento es comprensible en mediciones de tipo digital.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## 6.2 Estudio de confiabilidad

Se realizaron 30 pruebas del modo de falla. En cada prueba se tomó la distancia a la que falló el dispositivo móvil y el último valor RSSI registrado antes de la desconexión. En la tabla 8 se muestran los valores para las distancias y los valores RSSI al momento de la falla de conexión.

Tabla 8. Respuestas de las pruebas del modo de falla

| No. de prueba | Metros | RSSI | No. de prueba | Metros | RSSI |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 128 | -96 | 16 | 107 | -95 |
| 2 | 113 | -95 | 17 | 112 | -96 |
| 3 | 105 | -95 | 18 | 123 | -96 |
| 4 | 132 | -96 | 19 | 112 | -96 |
| 5 | 107 | -96 | 20 | 105 | -96 |
| 6 | 109 | -95 | 21 | 105 | -94 |
| 7 | 107 | -95 | 22 | 112 | -94 |
| 8 | 123 | -96 | 23 | 119 | -95 |
| 9 | 112 | -94 | 24 | 107 | -94 |
| 10 | 120 | -94 | 25 | 128 | -96 |
| 11 | 107 | -96 | 26 | 118 | -96 |
| 12 | 110 | -94 | 27 | 115 | -95 |
| 13 | 122 | -96 | 28 | 118 | -95 |
| 14 | 102 | -96 | 29 | 105 | -95 |
| 15 | 107 | -95 | 30 | 113 | -95 |

De la tabla anterior se observa que la distancia tiene mayor variación con respecto a los valores RSSI medidos, además de que no son proporcionales uno del otro. Lo anterior se traduce en que los valores RSSI, además de ser discretos, responden a otros factores de referencia como la geometría del espacio físico y la interferencia de ondas electromagnéticas.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

### 6.2.1 Estimación de función de densidad

Utilizando el software estadístico RStudio se obtuvieron los parámetros de la distribución Weibull, lognormal, exponencial, gamma y lognormal de 3 parámetros que más se ajustan a los datos de las pruebas del modo de falla. En la Figura 13 se presenta la comparación gráfica del histograma de los datos medidos con el modelo de distribución Weibull, cuyo parámetro de forma estimado es 14.085 con una escala de 117.29. También se presenta la gráfica de cuantiles para visualizar el ajuste de los datos al modelo.

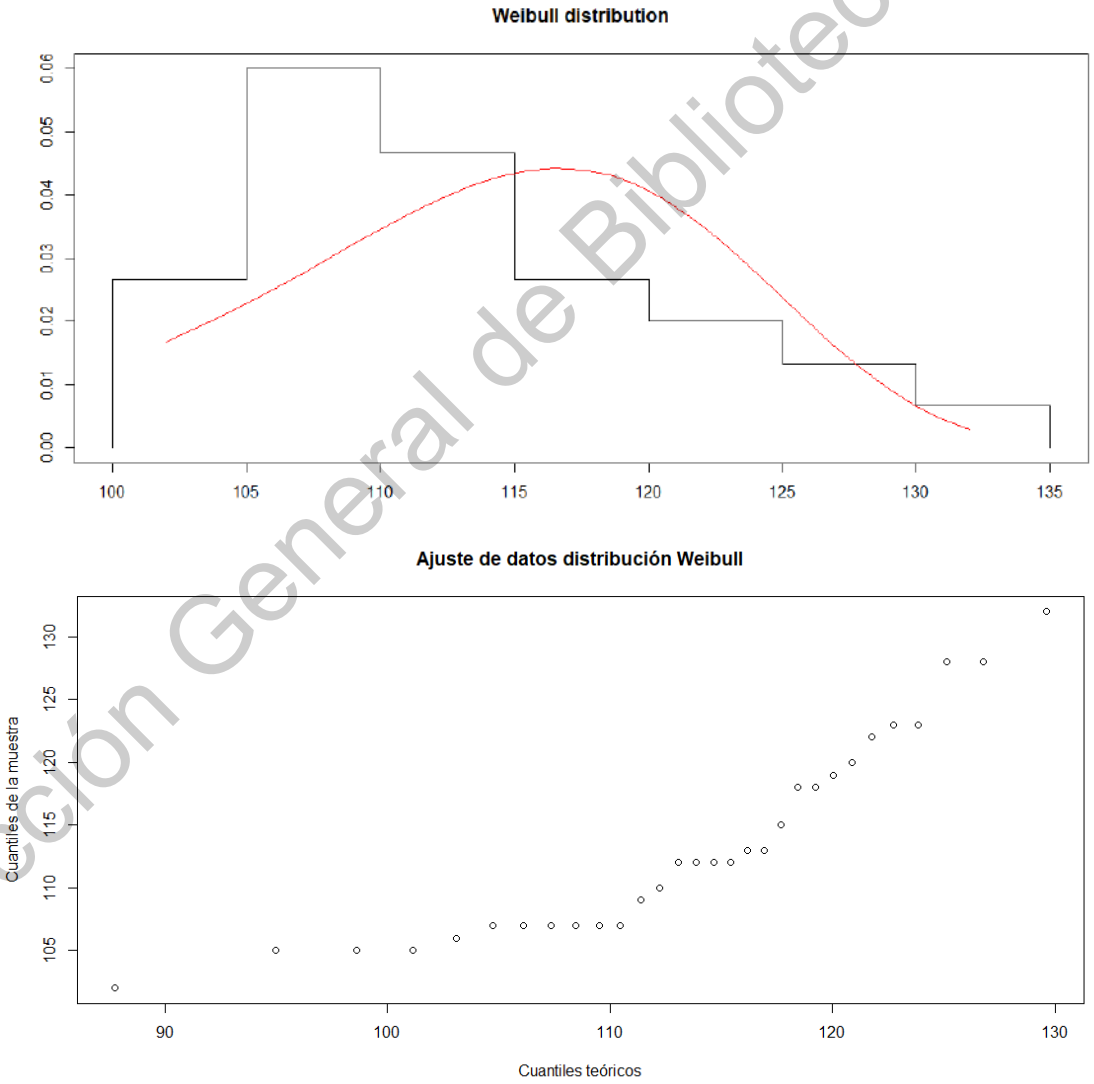


Figura 13. Distribución Weibull.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

En la Figura 14 se muestra la comparación con la distribución lognormal, con una media logarítmica de 4.7 y una desviación estándar de 0.06. También se presenta la gráfica de cuantiles para observar el ajuste de los datos.

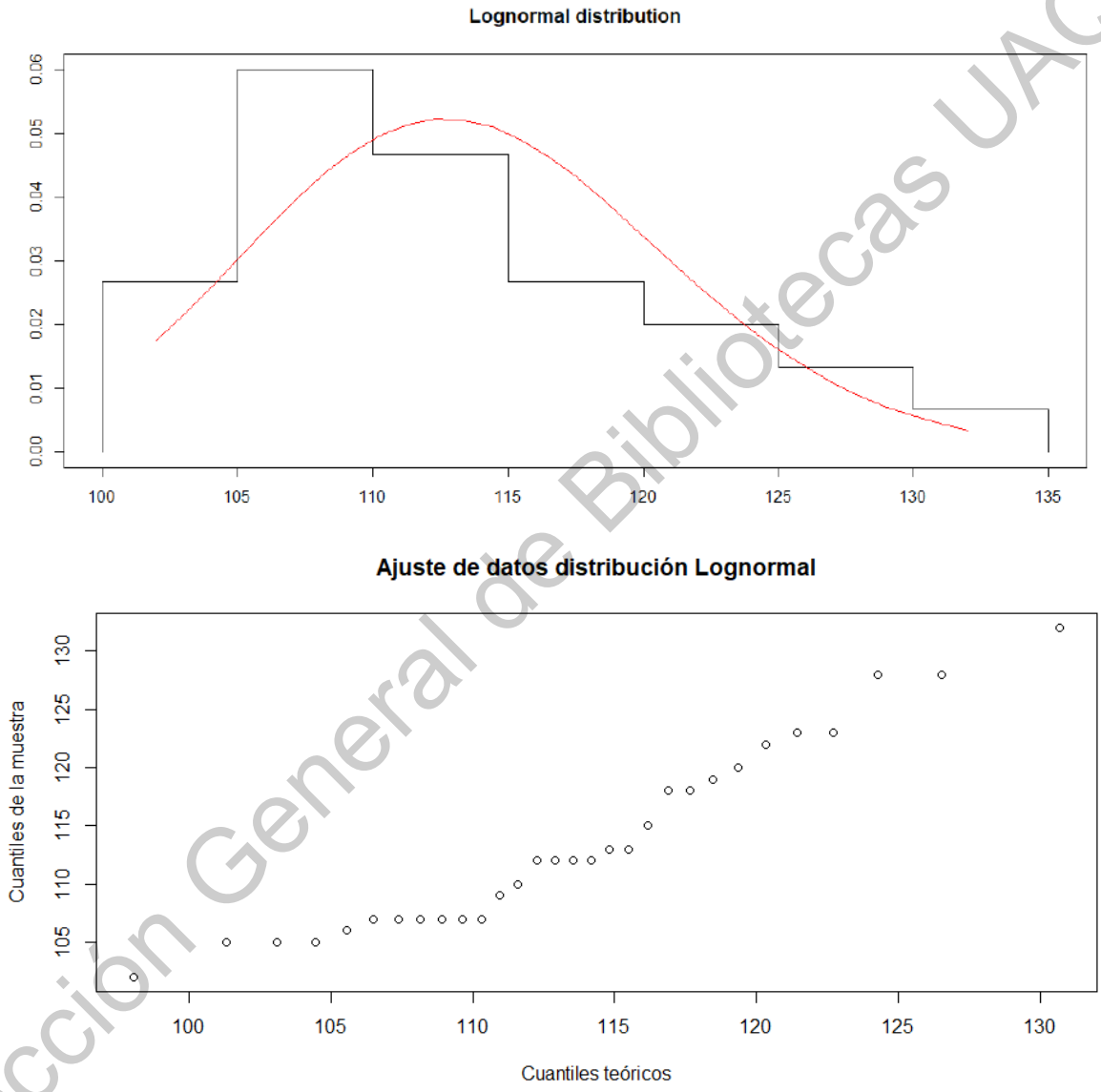


Figura 14. Distribución Lognormal

Dirección General de Bibliotecas UAQ

En la Figura 15 se muestra la comparación con la distribución exponencial, con parámetro gamma 0.00881. También se presenta la gráfica de cuantiles para observar el ajuste de los datos.

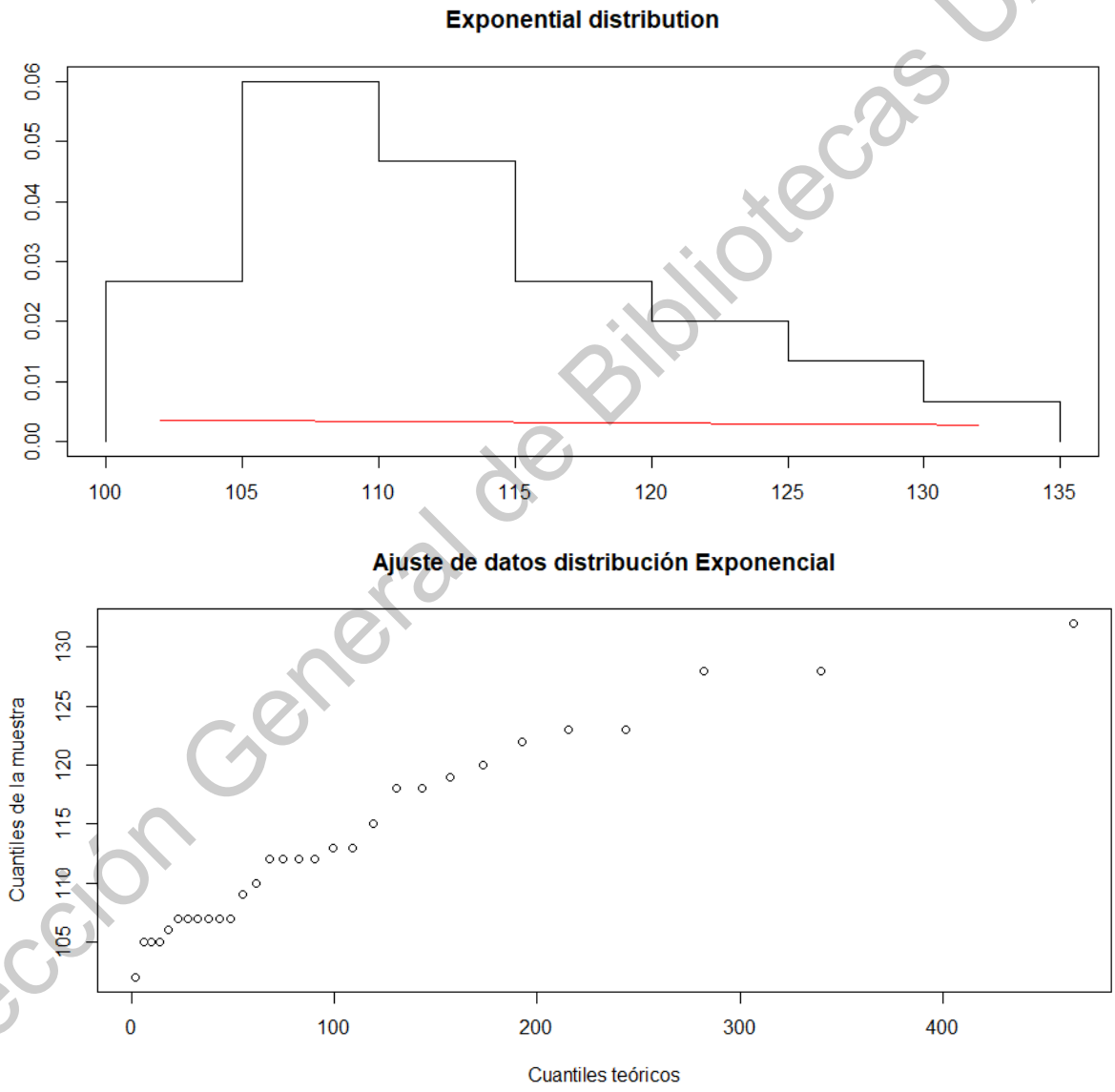


Figura 15. Distribución exponencial.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

En la Figura 16 se muestra la comparación con la distribución gamma, con parámetro de forma 210.891 y una escala de 0.538. También se presenta la gráfica de cuantiles para observar el ajuste de los datos.

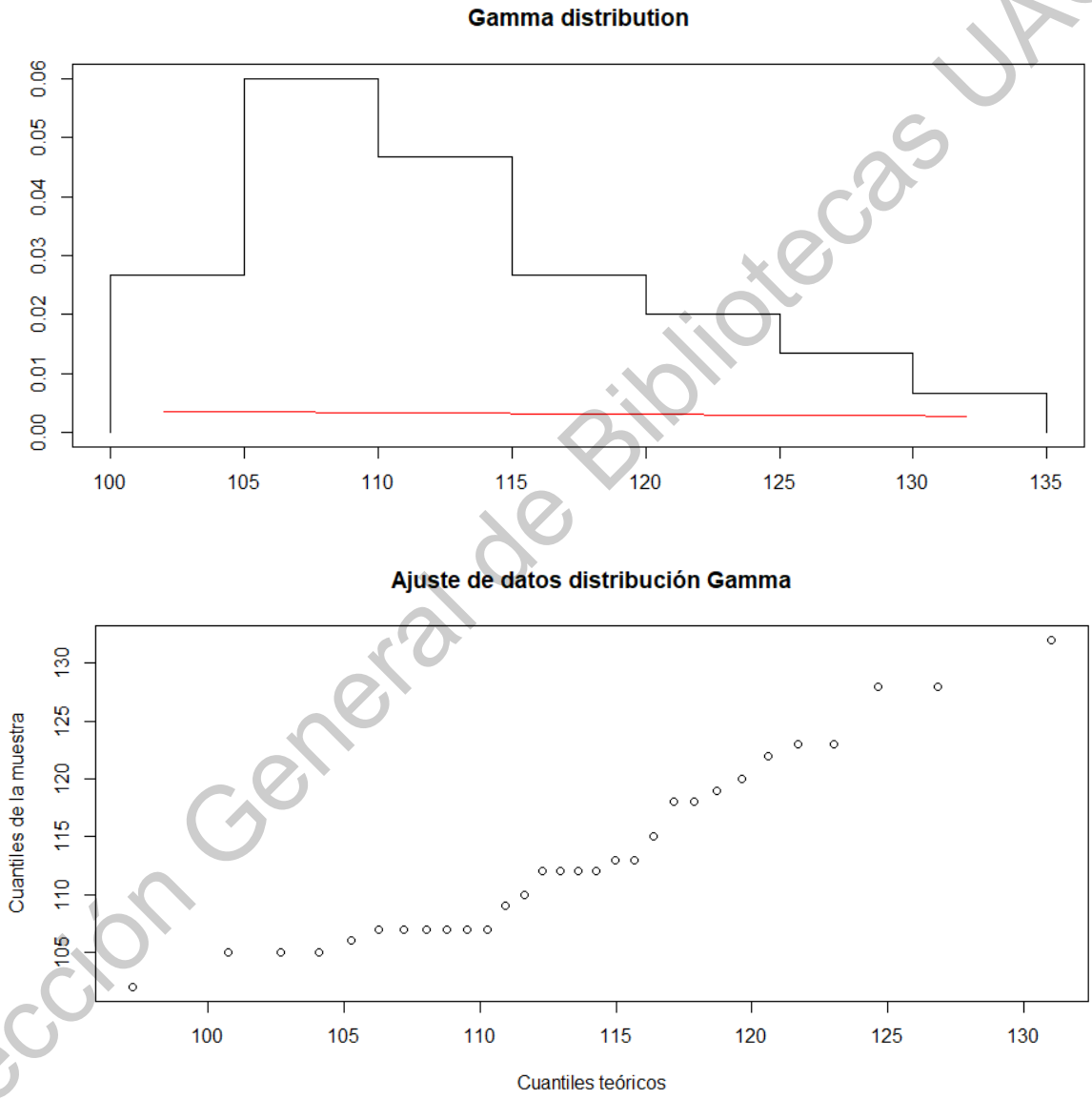


Figura 16. Distribución gamma.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

En la Figura 17 se muestra la comparación con la distribución gamma, con parámetro de forma 210.891 y una escala de 0.538. También se presenta la gráfica de cuantiles para observar el ajuste de los datos.

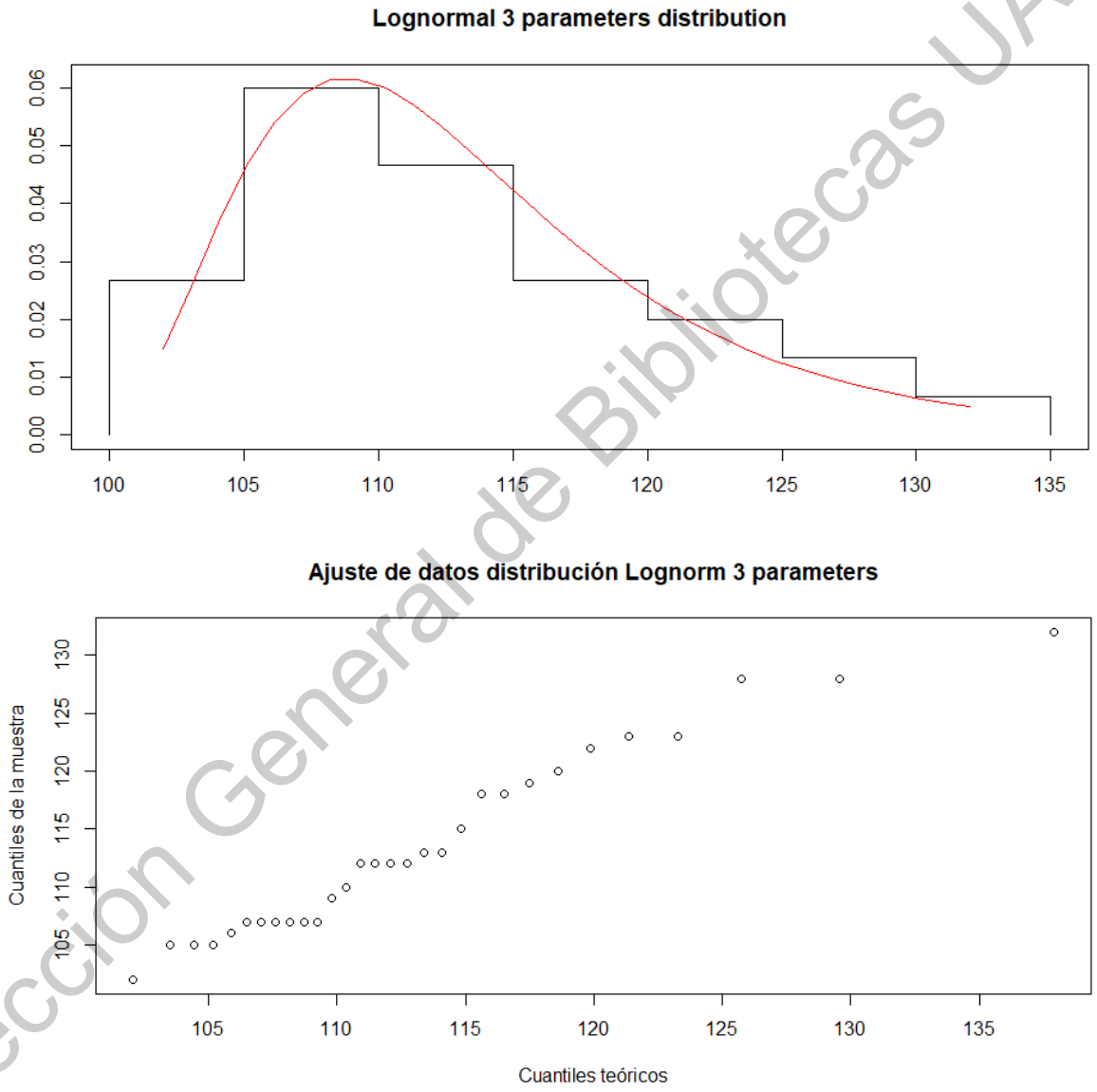


Figura 17. Distribución lognormal de 3 parámetros.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

De manera gráfica se observa que la distribución Weibull, lognormal y lognormal de 3 parámetros representan mejor la función de densidad de la probabilidad de falla. Para confirmar la selección de la distribución se calculó la bondad de ajuste de cada modelo, la distribución lognormal de 3 parámetros resultó ser la más adecuada con un resultado del test de 0.9639 y un p-value de 0.168. En contraste, la siguiente distribución con mejor valor de ajuste es la lognormal con W = 0.9307, pero tiene un p-value de 0.0513, con lo que ya se puede considerar el rechazo de la hipótesis nula por tener una alta probabilidad del error tipo I. La distribución Weibull presentó un resultado de W = 0.8766182 con un p-value de 0.0023, por lo que utilizarla como modelo de probabilidad de la falla sería incorrecto.

Los valores del modelo lognormal de 3 parámetros son 2.7415141 para el parámetro de escala, 0.4642063 para el parámetro de forma y 96.2802588 para el parámetro umbral. Entonces, la función de densidad del modo de falla de conexión debido a la distancia está dada por la función:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{0.9284\pi}(x - 96.28)} exp\left\{-\frac{[\ln(x - 96.28) - 2.741]^2}{0.43}\right\}$$

cuya integral estima la probabilidad de observar fallas en la conexión WiFi entre dos puntos. En la Figura 18 se observa que las fallas se observan aproximadamente a partir de los 100 metros y hasta los 140 metros. Lo anterior se traduce a que si ocurre una falla entre 0 y 100 metros es porque se encuentra presente otro modo de falla. A partir de esta función se definen otras que responden a cualquier pregunta acerca de la confiabilidad de la conexión WiFi debido a la distancia.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

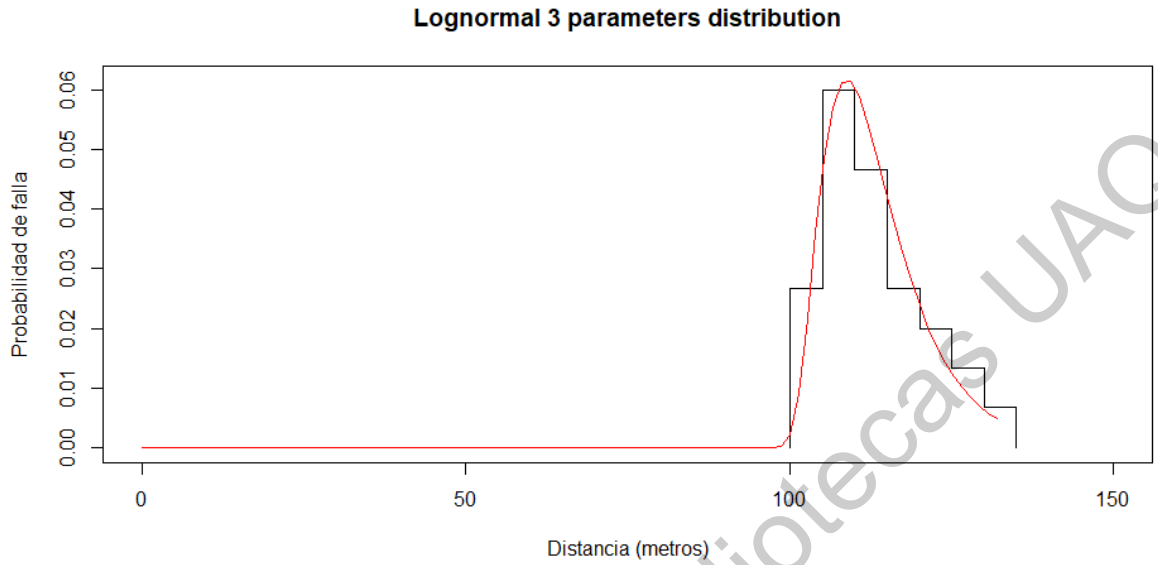


Figura 18. Modelo de distribución de probabilidad del modo de falla de conexión

### 6.2.2 Función de distribución acumulada

La función de distribución acumulada está dada por

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{0.9284\pi}(x - 96.28)} exp\left\{-\frac{[\ln(x - 96.28) - 2.741]^2}{0.43}\right\} dx$$

cuya gráfica se observa en la Figura 19.

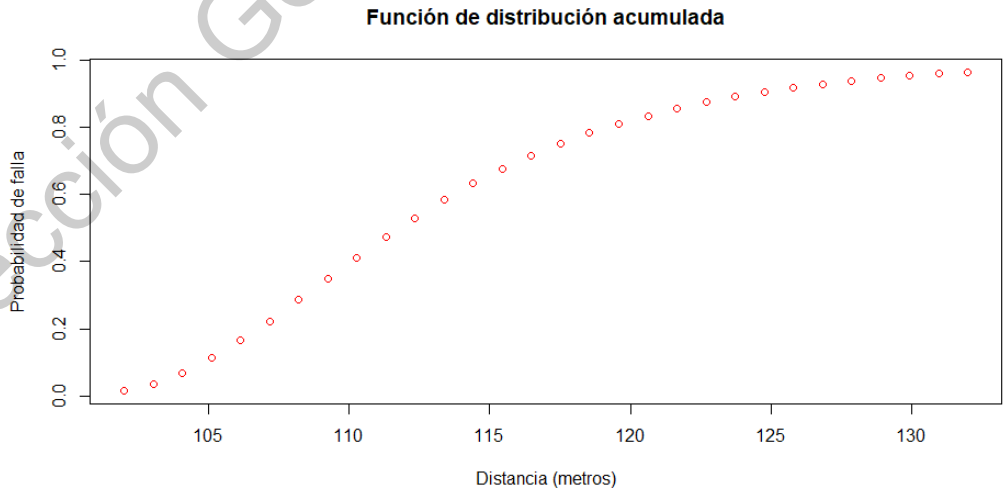


Figura 19. Función de distribución acumulada.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

La función representa la probabilidad de que el dispositivo pierda la conexión antes de cierta distancia, en la cual se observa que a más de 135 metros se puede asegurar el fallo de la conexión.

### 6.2.3 Función de confiabilidad

La función de confiabilidad está dada por

$$C(x) = 1 - \int_0^x \frac{1}{\sqrt{0.9284\pi}(x - 96.28)} exp\left\{-\frac{[\ln(x - 96.28) - 2.741]^2}{0.43}\right\} dx$$

cuya gráfica se muestra en la Figura 20.

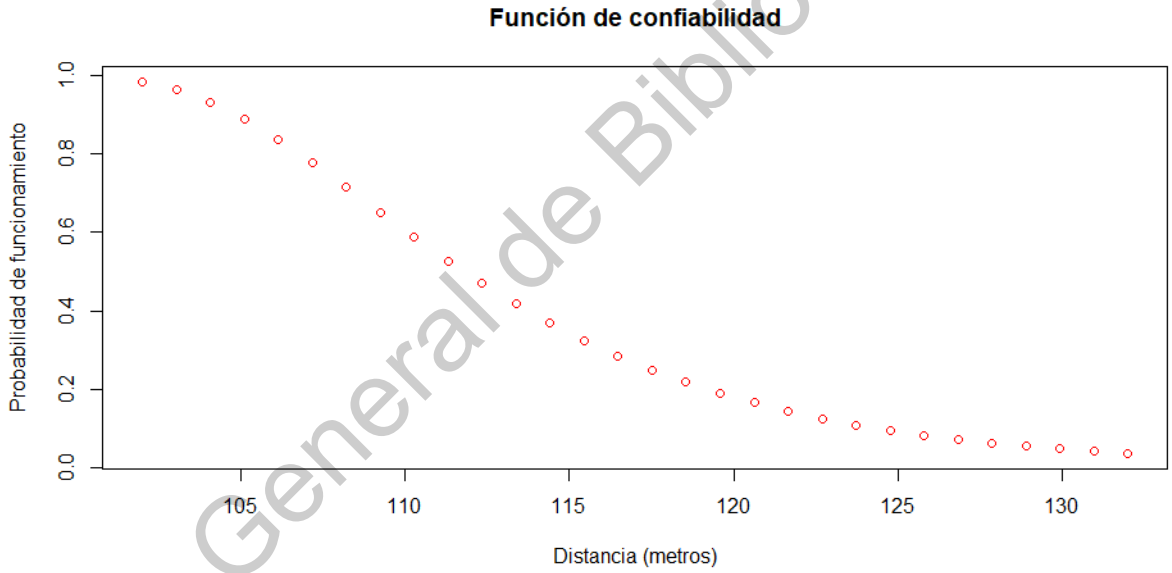


Figura 20. Función de confiabilidad.

Esta función es de las más importantes, representa la probabilidad de que el dispositivo ESP8266 siga conectado a la red WiFi cuando se encuentra a cierta distancia.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

### 6.2.4 Función de riesgo

La función de riesgo está dada por

$$h(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{0.9284\pi}(x-96.28)} exp\left\{-\frac{[\ln(x-96.28)-2.741]^2}{0.43}\right\}}{1-\int_0^x \frac{1}{\sqrt{0.9284\pi}(x-96.28)} exp\left\{-\frac{[\ln(x-96.28)-2.741]^2}{0.43}\right\} dx}$$

y se representa en la gráfica

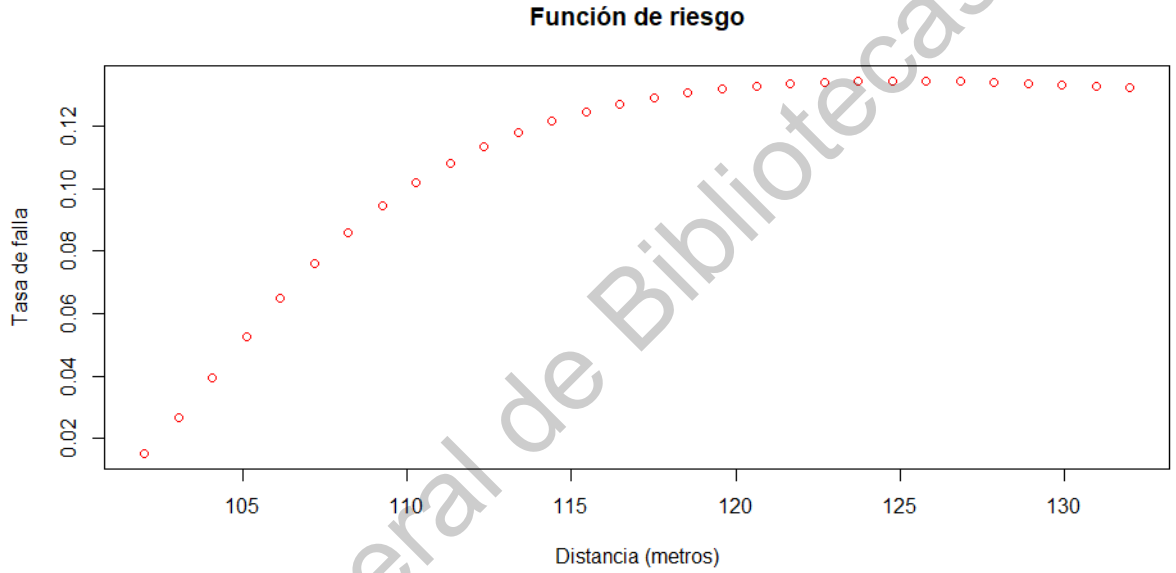


Figura 21. Función de riesgo.

En la gráfica se observa que la tasa de falla instantánea presenta el efecto esperado, el cual es que a medida que aumenta la distancia, el riesgo de desconexión incrementa.

### 6.2.6 Función cuantil

La función cuantil está dada por el inverso de $F(t)$, función de distribución acumulada.

$$t_p = F^{-1}(p)$$

Mediante el software estadístico RStudio se calcula la distancia a la que se espera que fallen cierta fracción de módulos ESP8266. Por ejemplo, la distancia estimada en la que se espera que fallen la mitad de los dispositivos es

Dirección General de Bibliotecas UAQ

$$t_p = F^{-1}(0.5) = 111.79\, m$$

### 6.3 Modelo de las mediciones RSSI

Para encontrar el modelo que mejor se ajusta a la probabilidad de falla de conexión en función de los valores RSSI medidos, se realizó el mismo procedimiento usado en la distancia. Sin embargo, los valore RSSI son negativos por representar decibelios, esto dificulta la aproximación a un modelo de distribución común, por lo que se opta por tomar el valor absoluto. Esta decisión no afecta la predicción de la falla de conexión debido a que el menor valor de RSSI se aproxima a cero, como se observó en el diseño experimental por bloques. Como resultado se obtuvo que la mejor función de densidad es la distribución uniforme, esto es debido a que, en el dispositivo ESP8266, se basa en un algoritmo para calcular los valores RSSI discretos. Si se considera un intervalo de confianza, a partir de -94 RSSI el dispositivo tiene la misma probabilidad de fallar.

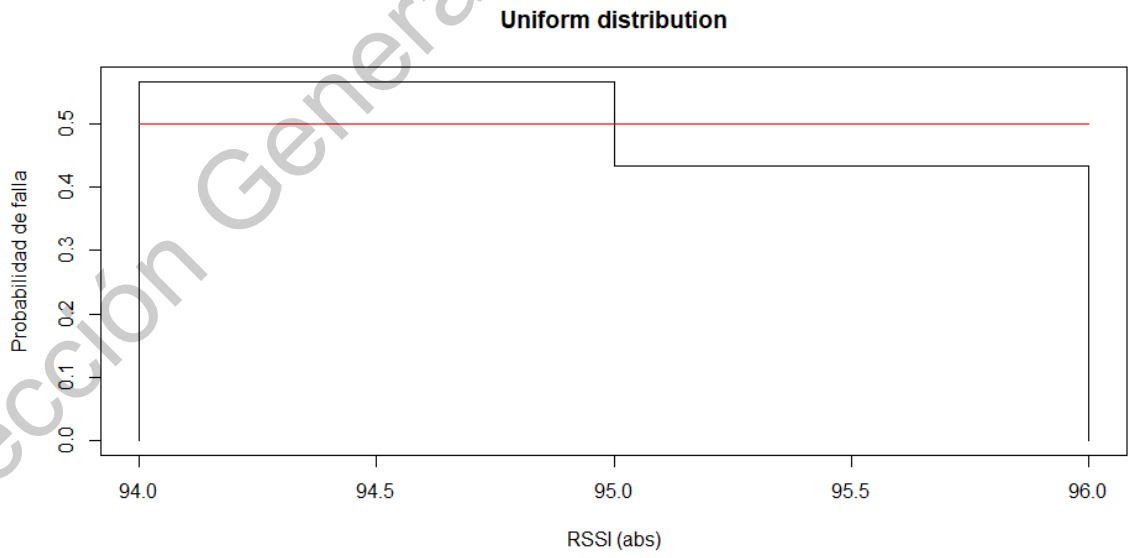


Figura 22. Distribución RSSI.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## VII. Conclusiones

Este estudio se enfocó evaluar la confiabilidad de la conexión inalámbrica WiFi del módulo ESP8266. En un sistema de comunicación entre dos módulos, se comprobó que no hay diferencia significativa entre dispositivos o modo de configuración. La conexión se comporta estable de 0 hasta 100 metros en un espacio abierto sin interferencia de objetos físicos. Por lo que un sistema IoT con base en el módulo ESP8266 tiene una garantía de conexión WiFi de hasta 100 metros de distancia.

Se estimó una función de densidad del comportamiento del modo de falla de conexión debido a la distancia, donde es importante mencionar que esta distribución de probabilidad supone dos cosas, ausencia de reflexión de las ondas debido a objetos físicos o espacios cerrados y una alta confiabilidad del sistema electrónico. De considerar otros factores, lo más probable es que siga aproximadamente la misma distribución con diferente localización. Es decir, se comportaría de la misma manera en un intervalo de distancia menor.

El modelo de confiabilidad será muy útil en el diseño de mallas de red y para sistemas móviles inalámbricos basados en el ESP8266. Usando la función de riesgo, dependiendo del propósito de la aplicación, se puede considerar cierta tasa de riesgo si el alcance es importante. Sin embargo, se recomienda no exceder los 105 metros en el radio de movilidad en un espacio abierto.

En cuanto a las mediciones de los valores RSSI, a pesar de ser estables en el tiempo, demostraron poca resolución en el rango de operación y una alta sensibilidad a los mecanismos de propagación. Es decir, ya que los valores RSSI son discretos, un solo valor RSSI se repite en varios metros. Así mismo, si están presentes otros mecanismos de propagación, como en una ciudad industrial, los valores de RSSI presentarán una alta variación estocástica. Lo anterior dificulta utilizar los valores RSSI para ciertas aplicaciones como estimar la distancia o detectar objetos físicos en el espacio. No obstante, se observó que los valores RSSI antes de la desconexión son altamente constantes, por lo que a partir de esos valores se puede predecir el modo de falla donde los principales factores son los

Dirección General de Bibliotecas UAQ

mecanismos de propagación y la distancia a la que se encuentra el dispositivo.

## VIII. REFERENCIAS


A, A. F. (2020). Monitoring system water pH rate, turbidity, and temperature of river water. *IOPScience*.

A.Asmussen, R. R. (2005). MC1319x Range Performance. *Freescale Semiconductor*.

Ahmad, Z. (2020). Design of IoT Embedded Smart Energy Management System. *IEEE*.

Ahmed. (2020). IoT Based Real Time Noise Mapping System for Urban Sound Pollution Study. *arXiv preprint arXiv:2002.11188.*

AIAG. (2010). *MSA 4th edition.* México: McGraw Hill.

AIAG. (2018). *ISO 31000.*

Akhtar. (2020). A Study and Application Development on Monitoring Cardio-Vascular Attack using Internet of Thing (IoT). *IEEE*.

Alvaro Suarez, J. A. (2014). RSSI prediction in WiFi considering realistic heterogeneous restrictions. *Network protocols and algorithms*.

Ashton, K. (2009). That "Internet of Things" Thing. *FDI journal*.

Athawale. (2020). An IoT-Based Smart Plant Monitoring System. *Smart Computing Paradigms: New Progresses and Challenges*.

Bhojwani. (2020). Crop Selection and IoT Based Monitoring System for Precision Agriculture. *IEEE*.

Blackburn. (2017). The secret life of Hedy Lamar. *Sciencemag*.

Business Insider. (02 de Junio de 2020). *Bussiness Insider.* Obtenido de https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report?IR=T

Cañete-Carmona, E. (2020). A Low-Cost IoT Device to Monitor in Real-Time Wine Alcoholic Fermentation Evolution Through CO2 Emissions. *IEEE*.

Chew, K.-M. (2020). IoT Soil Moisture Monitoring and Irrigation System Development. *ICSCA*.

Chruszczyk, L. (2017). Statistical Analysis of Indoor RSSI Read-outs for 433 MHz,. *INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*.

Crosby, P. B. (1979). *Quality is Free: The Art of Making Quality Certain.* New York: McGraw-hill.

Evaluation of TCP over IPv4 and IPv6 for the ESP8266 in Normal Operation and Under a DoS Attack. (2020). *ACME-SE*.

Evans, D. (2011). Internet de las cosas. *Cisco Internet Bussiness Solutions Group-IBSG*.

Frenzel, A., Carrasco, A., Monachesi, E., & Chaile, M. (2010). *Efecto de la Foresta en las Transmisiones Electromagneticas dentro de una WLAN (LAN inalámbrica).* Argentina: edUTecNe Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.

George E. P. Box, J. S. (2005). *Statistics for experimenters.* New Jersey: John Wiley & Sons.

Ghazi, A. (2020). Remote monitoring of a premature infants incubator. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*.

Gupta. (2020). IoT Enabled Air Pollution Monitoring in Smart Cities. In Handbook of Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges in Current Scenario's . *Springer, Cham*.

Gutierrez Pulido, d. l. (2008). *Análisis y diseño de experimentos.* México: McGraw Hill Interamericana.

Gutierrez Pulido, d. l. (2009). *Control de calidad y seis sigma.* México: McGraw Hill.

Humberto Gutierrez Pulido, R. d. (2009). *Control estadístico de la calidad y seis sigma.* México: McGraw Hill.


Dirección General de Bibliotecas UAQ

Hussain. (2020). Intend and Accomplishment of Power Utilization Monitoring and Controlling System by Using IoT. *Recent Trends and Advances in Artificial Intelligence and Internet of Things*.

Jabirullah. (2020). Development of e-Health Monitoring System for Remote Rural Community of India. *IEEE*.

Jagadesh, M. S. (2020). Monitoring system in industry using IoT. *IEEE*.

Jayaysingh, R. (2020). IoT based patient monitoring system using NodeMCU. *5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*.

Jayaysingh, R. (2020). IoT Based Patient Monitoring System Using NodeMCU. *IEEE*.

Jie Xiao, J. T. (2020). Design and Implementation of Intelligent Temperature and Humidity Monitoring System Based on ZigBee and WiFi. *Procedia Computer Sciences*.

Joao Mesquita, D. G. (2018). Assessing the ESP8266 WiFi module for. *IEEE*.

Juran, J. M. (1999). *Juran´s Quality Handbook.* New York: McGraw-Hill.

Kavitha. (2020). Development of an IOT-Based Atmospheric Fine Dust Monitoring System. *Internet of Things, Smart Computing and Technology: A Roadmap Ahead*.

Kohli. (2020). Smart Plant Monitoring System Using IoT Technology. *Handbook of Research on the Internet of Things Applications in Robotics and Automation*.

Kumar. (2020). Design and Analysis of IoT based Air Quality Monitoring System. *IEEE*.

Kumari. (2020). IOT based Coal Mine Safety Monitoring and Controlling . *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*.

Kumari, N. (2020). Real-time cloud based weather monitoring system. *IEEE*.

Lee. (2020). Development of a cloud-based IoT monitoring system for Fish metabolism and activity in aquaponics. *Aquacultural Engineering*.

Manimegalai. (2020). An IoT Based Smart Water Quality Monitoring System using Cloud. *IEEE*.

Nayvar. (2016). Smart farming: IoT based smart sensors agriculture stick for live temperature and moisture monitoring using Arduino, cloud computing & solar technology. *In Proc. of The International Conference on Communication and Computing Systems (ICCCS-2016) (pp. 9781315364094-121)*.

Padmaja. (2020). IOT Based Stress Detection and Health Monitoring System. *Helix*.

Puri, V. (2020). Chapter 11 - BioSenHealth 2.0—a low-cost, energy-efficient Internet of Things–based blood glucose monitoring system. *Emergence of Pharmaceutical Industry Growth with Industrial IoT Approach*.

Rafhanah Shazwani Rosli, M. H. (2018). Characteristic Analysis of Received Signal Strength. *IEEE*.

Raj. (2020). Bridge health monitoring using IoT. *5th International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT-2019)*.

Rajasekaran. (2020). Patient Health Monitoring System and Detection of Atrial Fibrillation, Fall, and Air Pollutants Using IoT Technologies. *Incorporating the Internet of Things in Healthcare Applications and Wearable Devices*.

Rakich, J. S. (2010). Strategic Quality Planning. *Hospital Topics*, 78:2, 5-11.

Raviteja, K. (2020). IoT-Based Agriculture Monitoring System. *Data Engineering and Communication Technology*.

Rawal. (2020). IoT based Computing to Monitor Indoor Plants by using Smart Pot. *SSRN*.

Reina, M. (2016). Hedy Lamarr. Pionera de las telecomunicaciones. *¿Cómo ves? (Revista de Divulgación de la Ciencia de la Universidad Nacional Autónoma de México), año 18, núm. 206, 24-27.México: Dirección General de Divulgación de la Ciencia (UNAM). ISSN 1870-3186*.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Rekha. (2020). Sensor Based Waste Water Monitoring for Agriculture Using IoT. *IEEE*.
Rhodes. (2012). Hedy's Folly: The life and breakthrough inventions of Hedy Lamarr, the most beautiful woman in the world. *Vintage*.
Saha. (2017). Data centre temperature monitoring with ESP8266 based Wireless Sensor Network and cloud based dashboard with real time alert system. *IEEE*.
Saini. (2020). An IoT Instrumented Smart Agricultural Monitoring and Irrigation System. *IEEE*.
Shahid. (2020). Remote Heart Beat Monitoring System . *NFC IEFR Journal of Engineering and Scientific Research*.
Shancang Li, L. D. (2015). The internet of things: a survey. *Information Systems Frontier*.
Sheth, M. (2020). Smart Fleet Monitoring System in Indian Armed Forces Using Internet of Things (IoT). *International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems*.
Shevchuk. (2020). TEMPERATURE MONITORING SYSTEM IN IOT NETWORK BASED ON ESP8266 MICROCONTROLLER AND THINGSPEAK SERVICE. *бірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції* .
Shevchuk A.O., R. O. (2020). TEMPERATURE MONITORING SYSTEM IN IOT NETWORK. *Institute of Telecommunication Systems,*.
Shewhart, W. A. (1926). Quality Control Cards. *The Bell System Technical Journal*.
Singh, P. (2020). Smart City Air Quality Monitoring System and Method of Reducing Cost by Predicting Data using Linear Regression. *Sustainable Humanosphere*.
Sugumar. (2020). Smart Vehicle Monitoring and Tracking System Powered by Active Radio Frequency Identification and Internet of Things. *Intelligent Data-Centric Systems*.
Suvankar Barai, D. B. (2017). Estimate Distance Measurement using NodeMCU. *IEEE*.
Taguchi, G. (1985). Quality engineering in japan. *Communications in Statistics*.
Thaung. (2020). Exploratory Data Analysis Based on Remote Health Care Monitoring System by Using IoT. *Communications*.
Tripathy. (2020). Monitoring Quality of Tap Water in Cities Using IoT. *Emerging Technologies for Agriculture and Environment* .
W. A. Shewhart, W. E. (1986). *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control.* New York: Dover Publications Inc.
Waluyo, B. D. (2020). Multiplexer Performance Testing For IoT-Based Air Quality Monitoring System . *Journal Mantik*.
Wang. (2020). Design of Mini Pets Feeding Intelligent Home System Based on IoT. *Springer*.
William Q. Meeker, L. A. (2003). Reliability: The Other Dimension of Quality. *Quality Technology & Quantitative Management,* .
Xing, L. (2020). Reliability in Internet of Things: Current Status and Future Perspectives. *IEEE*.
Yoppi, R. A. (2018). RSSI Comparison of ESP8266 Modules. *IEEE*.
Yoppy. (2019). Performance Evaluation of ESP8266 Mesh Networks. *Iopscience*.

Dirección General de Bibliotecas UAQ