

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**Diseño e implementación de una red WiFi mallada
que soporte protocolo MODBUS para
equipos de control industrial.**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Adrian Vazquez
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, Abril de 2020

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**Diseño e implementación de una red WiFi mallada
que soporte protocolo MODBUS para
equipos de control industrial.**

TUTOR ACADÉMICO: Profesor José Alonso

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. nombres y apellidos para optar
al título de Ingeniero Electricista.

Caracas, Abril de 2020

A quien desees dedicar este trabajo

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Adrian Vazquez

**Diseño e implementación de una red WiFi mallada
que soporte protocolo MODBUS para
equipos de control industrial.**

**Tutor Académico: José Alonso. Tesis. Caracas, Universidad Central
de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica.
Mención Electrónica. Año 2020, xvii, 144 pp.**

Palabras Claves: Palabras clave.

Resumen.- Escribe acá tu resumen

ÍNDICE GENERAL

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE GENERAL	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XII
INTRODUCCIÓN	1
MARCO HISTÓRICO	4
MARCO TEÓRICO	6
MARCO METODOLÓGICO	7
3.1. Documentar el funcionamiento de las redes WiFi malladas	7
3.2. Diseño de una red mallada basada en el microcontrolador ESP32 .	7
3.3. Implementar el módulo del programa para el manejo del protocolo Modbus en el bus RS-485.	8
3.4. Implementar el programa de la red diseñada que soporte la trans- misión del protocolo Modbus	10
3.5. Diseñar el circuito de un nodo para una red WiFi mallada basada en el microcontrolador ESP32	10
3.6. Implementar la red mallada diseñada.	11

3.7. Analizar el rendimiento de la red de acuerdo a variaciones en los parámetros de transmisión de datos	11
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	12
PRUEBAS EXPERIMENTALES	13
RESULTADOS	14
CONCLUSIONES	15
RECOMENDACIONES	16
TÍTULO DEL ANEXO	17
TÍTULO DEL ANEXO	18
TÍTULO DEL ANEXO	19
REFERENCIAS	20

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE ACRÓNIMOS

INTRODUCCIÓN

En el área de la ingeniería eléctrica, las comunicaciones se pueden clasificar en dos grupos: las alámbricas y las inalámbricas. En el primer caso el medio es tangible estando, generalmente, compuesto por varios conductores metálicos o fibra óptica y en el segundo no hay medio físico. Las comunicaciones inalámbricas se clasifican básicamente según la banda de frecuencia o el estándar que satisface, así las tecnologías IEEE 802.15.1 (bluetooth), IEEE 802.11 (WiFi) y GSM (telefonía celular).

Las tecnologías basadas en el estandar IEEE 802.11, también conocidas como WiFi, han ganado popularidad en el mundo de las comunicaciones proveyendo interconectividad entre clientes (PC, laptops, smartphones) y puntos de acceso. Las redes que usan dicha tecnología se clasifican (según la topología) en centralizadas o descentralizadas dependiendo si la conectividad entre clientes posee como intermediario o no un punto de acceso Sharma y Singh (2016).

Dentro de las redes descentralizadas tenemos a las redes de topología mallada, donde los clientes están en capacidad de ser, simultáneamente, puntos de acceso brindando servicio a otros clientes y servir de puente a otros nodos. Además, las redes WiFi malladas difieren de las convencionales en que no es obligatorio que todos los nodos estén conectados al nodo central, en su lugar, cada nodo se puede conectar a el nodo vecino. Esto abre la posibilidad de ampliar la cobertura manteniendo la interconectividad de la red .

Las redes WiFi brindan la posibilidad de que la adquisición de información pueda estar presentes en virtualmente cualquier cosa de manera inalámbrica, poseyendo potencialidad en el monitoreo y control de procesos. No obstante, los

inconvenientes de ruido, seguridad y distancia han hecho que se hayan desarrollado arquitecturas que vayan superando estas limitaciones .

Aunque el estándar IEEE 802.11s establece las normas generales de la comunicación WiFi mallada Hiertz y cols. (2010), todavía es un terreno actualmente se encuentra en exploración, especialmente en los entornos electromagnéticamente ruidosos o congestionados. En el mismo orden de ideas, existen reservas respecto al manejo de datos críticos o sensibles en un proceso industrial, debido a la confiabilidad y seguridad de los datos Cheng, Yang, y Huachun (2018).

Modbus es el protocolo de comunicación industrial estándar de facto desde 1979 Modbus Organization (2017). Al emplear un protocolo Modbus se establece un sistema de comunicación de tipo maestro/esclavo. En este tipo de sistemas un nodo principal o maestro envía una solicitud específica a un esclavo y este genera la respuesta. Los esclavos no transmiten datos sin una instrucción previa y no se comunican con ningún otro esclavo. En la capa física del sistema de comunicación, el protocolo Modbus puede emplear diversas interfaces físicas, entre las que se encuentran la RS-485 y RS-232, en la cual la interfaz TIA/EIA-485 (RS-485) de dos cables es la más común .

En el ámbito industrial la reducción de costos es siempre una meta y las redes inalámbricas podrían ser una alternativa frente a las alámbricas, en las que las grandes distancias cubiertas por conductores representan un costo relativamente elevado Cheng y cols. (2018). Así mismo, los conductores instalados son vulnerables a hurtos, lo que se traduce en pérdidas económicas para las industrias.

Tomando en cuenta lo anterior, se propone el diseño de una red inalámbrica WiFi mallada con una comunicación basada en el protocolo Modbus orientada a la implementación a un entorno industrial, cuyos nodos estarán constituidos por microcontroladores ESP32. Este trabajo tiene por finalidad presentar la metodología

para el diseño e implementación de la red , además se presentan los detalles del planteamiento del problema y la factibilidad de proyecto así como el cronograma para la ejecución de actividades para lograr los objetivos planteados .

Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar una red WiFi mallada que soporte protocolo Modbus usando microcontroladores ESP32 para equipos de control industrial.

Objetivos específicos

1. Documentar el funcionamiento de las redes WiFi malladas.
2. Diseñar una red mallada basada en el microcontrolador ESP32.
3. Implementar el módulo del programa para el manejo del protocolo Modbus en el bus RS-485.
4. Implementar el programa de la red diseñada que soporte la transmisión del protocolo Modbus.
5. Diseñar el circuito de un nodo para una red WiFi mallada basada en el microcontrolador ESP32.
6. Implementar la red mallada diseñada.
7. Analizar el rendimiento de la red de acuerdo a variaciones en los parámetros de transmisión de datos.

CAPÍTULO I

MARCO HISTÓRICO

Planteamiento del problema

La creciente popularidad de las redes inalámbricas en casi todos los sectores ha hecho que las infraestructuras asociadas, dispositivos y protocolos se vean en la necesidad de mejorar constantemente para manejar la creciente cantidad de usuarios de manera segura y eficiente. Así mismo, las redes WiFi centralizadas están limitadas por la capacidad del punto de acceso, en el ámbito de cobertura y cantidad de clientes, restricciones que se pudiesen superar con las redes WiFi malladas.

Actualmente la redes malladas están en una etapa de desarrollo, por lo que no existe un estándar sólido para la implementación de toda la red, lo que causa reservas en las industrias, especialmente debido a la vulnerabilidad de los datos, la confiabilidad en ambientes electromagnéticamente ruidosos y el rendimiento. Es por eso que una red mallada WiFi con comunicación basada en el protocolo Modbus podría representar una solución a este problema.

Justificación

Se plantea una red WiFi lo cual representaría una reducción de costos en la implementación de un sistema de control y adquisición de datos, dado que se necesitan menos conductores. Además, se explorará el campo popular hoy en día

de las redes WiFi y su rendimiento como red mallada. Dicha red representa una alternativa a superar la limitaciones de número de clientes y área de cobertura presentes en las redes WiFi centralizadas, y más aún, supone una solución a llegar a lugares lejanos de un nodo central sin la necesidad de agregar puntos de acceso adicionales.

La constitución de la red mallada se elaborará basados en comunicación WiFi a través de microcontroladores ESP32, que poseen características de tamaño, potencia y costos aunado a las ventajas principales de las redes mallada de cobertura y conectividad. También se sustentará la transmisión de información en el protocolo Modbus debido a su confiabilidad todos los sectores aplicables, especialmente el industrial.

Alcance y limitaciones

La red se compondrá de al menos cuatro nodos, donde cada nodo tendrá conexión con al menos otro nodo usando red WiFi y estarán constituidos por microcontroladores ESP32 con módulo WiFi integrado y el programa asociado a la red. Los nodos deben estar apropiadamente alimentados, cuyo diseño no forma parte del proyecto.

El programa se diseñará para que se logre transportar la información bajo el protocolo Modbus por la red inalámbrica, considerando que solo en un nodo está conectado el maestro. Así mismo, algunos de los nodos restantes poseerán esclavos. Cabe resaltar que las unidades que generan los datos del protocolo Modbus (maestro y esclavos) no forman parte de la red a diseñar, ya que se asume que se recibe información en los nodos sin tener en cuenta mayor detalle de su origen.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Documentar el funcionamiento de las redes WiFi malladas

3.2. Diseño de una red mallada basada en el microcontrolador ESP32

La red mallada se diseño para una sola red Modbus, por lo que, solo puede existir un maestro y una cantidad de XXX esclavos (Citacion required). Teniendo en consideración lo anterior, se definió la topología de la red mallada; las rutas de comunicación se determinan según el esclavo que el maestro Modbus esté interrogando. Así, aunque las rutas sean estáticas, el enrutamiento de cada nodo variaría según una tabla de enrutamiento determinada.

Por otro lado, existen otras características de comunicación, como lo es el estándar del bus serial y la características del mismo. Ya que se usa el estándar RS-485, quedaba por definir la tasa de transmisión. Esta variar, por lo que el nodo es configurable y compatible para las tasas de Baudios siguientes:

Entonces, quedando diferenciadas las dos etapas (la inalambrica y la serial) y además, se consideraron los dos sentidos de la información (desde y hacia el esclavo), para establecer una lógica para el funcionamiento del nodo.

Cada nodo contemplaron dos sentidos, el primero es si se le introduce la información por el bus serial entonces esta debe transmitirse inalambricamente;

y si recibe información inalámbricamente entonces debe pasarla a su bus serial o bien debe trasnmitirla a otro nodo.

Cada nodo debe ser configurable respecto a su identificador, tabla de enrutamiento y tasa de baudios de la interfaz serial, para así adaptarlos a los entornos de comunicación industriales. Sabiendo que se transmite el protocolo Modbus entoinces se consideró conveniente considerar a los nodos como esclavos en el sistema. Se reservaron identificadores para los nodos, lo que deja menos cantidad de identificadores de esclavos disponibles para la red en la que se implemente la red mallada.

La comunicación entre los nodos es unicast para así aprovechar las ventajas que esto implica como lo son encriptación, respuesta de agradecimiento y ahorro de (sobrecarga). Para tener mayor cobertura, los esclavos pueden estar a mas de un nodo intermedio del nodo que posee el maestro y la red se diseño para poseyera la capacidad de reenviar dicha información convenientemente.

Definidas estar características de funcionamiento, se investigaron las librerías que el microcontrolador ESP32 poseía para hacer tales funciones. Se encontraros dos tipos de redes WiFi descritos por Espressif: mesh y espnow. Para elegir cual usar se tomó en cuenta la flexibilidad, descentralización, seguridad y alcance; pues bien son las cualidades que entraban en concordancia para la elaboración de la arquitectura de red anteriormente descrita.

3.3. Implementar el módulo del programa para el manejo del protocolo Modbus en el bus RS-485.

Como se trabajó en en microcontrolador ESP32, los programas elaborados son administrados por un sistema operativo en tiempo real (RTOS). Al mismo tiempo, el diseño de los programas contempló todas las características que un

RTOS implica. Esto se traduce en un paradigma de programación basado en tareas, eventos, colas, etc.

Para manejar el protocolo Modbus en el bus RS-485 se creó una tarea específicamente para la recepción de los datos provenientes del UART conectado al chip MAX485. Para contemplar los casos en los que los datos pudiesen estar corrompidos u otra falla en la comunicación serial, la recepción se baso en eventos. Por otro lado se agrego una cola para controlar el estado de la tarea del uart, para que no este activa mientras el bus serial esta ocioso, evitando así que consuma recursos innecesariamente.

Si los datos son recibidos bien se debe evaluar si la trama es una respuesta, una trama para el nodo en cuestión o si se debe enviar a otro nodo. Es por eso que se agrega un *case* del lenguaje C para ello. La evaluación se baso en la tabla de enrutamiento, pues de allí deriva la lógica asociada a la acción.

Si la trama recibida serialmente se debe enviar a otro nodo inalámbricamente entonces los datos recibidos son escritos en una cola que se comunica con la tarea asociada a la transmisión WiFi.

En la dirección opuesta, es decir, cuando la información es transmitida desde el uart, entonces este proceso es realizado desde una instrucción específica en las tareas que esto sea requerido. Por ejemplo, cuando la información recibida mediante WiFi sea para un nodo que este conectado a mi bus serial, en cuyo caso en la misma tarea de recepción inalámbrica es llamada la instrucción de escritura hacia el uart.

Otro aspecto que se consideró fue que la tasa de baudios fuese configurable . Para lograr esto, en la función de configuración del uart se deja como parámetro un valor que está asociado a la tasa de baudios. Si se recibe la orden para cambiar

la velocidad del uart, dicha función de configuración del uart es llamada dándole como parámetro el valor asociado a la nueva tasa de baudios.

3.4. Implementar el programa de la red diseñada que soporte la transmisión del protocolo Modbus

Para la implementación del programa se diseñó una estructura basada en el diseño de la red. Esto quiere decir, que basadas en tareas que se ejecutan secuencialmente según la información es introducida al nodo. Así para soportar la transmisión del protocolo Modbus basta enviar en la sección de carga la trama correspondiente. Para lograr esto se debe tener en cuenta que la librería usada requiere que se cubran ciertos parámetros.

La dirección MAC del nodo destino, el buffer de datos y la longitud de la trama son los campos obligatorios. Sin embargo, para la comunicación unicast se necesita que adicionalmente el punto destino esté registrado.

Cumplidos estos requisitos el protocolo Modbus es exitosamente soportado a nivel inalámbrico, sin más limitaciones que las definidas por la distancia entre los nodos.

3.5. Diseñar el circuito de un nodo para una red WiFi mallada basada en el microcontrolador ESP32

El microcontrolador ESP32 no posee periférico de comunicación RS-485 por lo que se le agregó al circuito el chip MAX3485 para obtener dicha capacidad usando el uart. Adicionalmente se colocó una resistencia de pull-up en el receptor del uart ya que cuando se está transmitiendo el R0 del MAX3485 se coloca en alta impedancia, dejando el receptor del uart en un comportamiento indeterminado (si no tuviese el pull-up). Cabe recordar que el transmisor del uart en estado ocioso

posee nivel lógico alto.

Por su puesto el microcontrolador en su encapsulado WROM-32, la cual se tomó por disponibilidad. Así mismo, se agregaron pin header en los pines necesarios para la programación del microcontralador por los son el GPIO 0, el enable y los I/O del UART0.

Considerando que en un ámbito industrial es común tener presente la tensión de 24VDC, entonces se uso para la alimentación un convertidor DC/DC. Con la salida regulada permite que se pueda alimentar desde 24 v a 5 V. En caso de que este disponible solo la tensión de la red, se podría usar una fuente de 120VAC/5VDC muy comunes en el mercado.

Para diseñar la topología se tomó en cuenta que disposición física de los elementos del circuito en el circuito impreso fuese el más optimo; aprovechando las dos capas y la dispocision de la fuente en la capa posterior al MCU.

La capa 1 posee el MCU y el chip MAX485 y, la capa 2 los bloques terminales para la alimentación, la entrada de datos del bus RS-485, los pin header de programación y los de la colocación del chip DC/DC. De esta manera se logra la menor interferencia sobre el areá de antena del MCU.

Para el trazado de las pistas y vias no se tuvieron más limitación mas que las de área prohibida de lejanía de la antena y las propias de diseño de circuitos impresos.

3.6. Implementar la red mallada diseñada.

3.7. Analizar el rendimiento de la red de acuerdo a variaciones en los parámetros de transmisión de datos

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

CAPÍTULO V

PRUEBAS EXPERIMENTALES

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

Apéndice I

TÍTULO DEL ANEXO

Apéndice II

TÍTULO DEL ANEXO

Apéndice III

TÍTULO DEL ANEXO

REFERENCIAS

- Cheng, Y., Yang, D., y Huachun, Z. (2018, 02). Det-lb: A load balancing approach in 802.11 wireless networks for industrial soft real-time applications. *IEEE Access, PP*, 1-1. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2802541
- Hiertz, G., Denteneer, T., Max, S., Taori, R., Cardona, J., Berlemann, L., y Walke, B. (2010, 03). Ieee 802.11s: the wlan mesh standard. *Wireless Communications, IEEE, 17*, 104 - 111. doi: 10.1109/MWC.2010.5416357
- Modbus Organization, I. (2017, Abril). *Modbus application protocol specification*. ([Internet; accedido el 25 de Octubre del 2019] Disponible en: http://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf)
- Sharma, P., y Singh, G. (2016, 10). Comparison of wi-fi ieee 802.11 standards relating to media access control protocols. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 14, 856-862.