

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRANSMISIÓN DE DATOS ORIENTADO A MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA, UTILIZANDO UNA RED MALLADA WIFI CON MICROCONTROLADORES ESP32

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Marco Alejandro Rodríguez Ferrer
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, julio de 2020

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRANSMISIÓN DE DATOS ORIENTADO A MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA, UTILIZANDO UNA RED MALLADA WIFI CON MICROCONTROLADORES ESP32

TUTOR ACADÉMICO: Ing. José Alonso

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Marco Alejandro Rodríguez Ferrer
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, julio de 2020

*A mis padres
Ayarlen Ferrer y Marco Rodríguez.*

*A la memoria de mis abuelos
Esperanza Merecuana y Francisco Ferrer.*

*Dónde quiera que se encuentren, por todo lo que hicieron por mí.
Eternamente gracias.*

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Autor del Trabajo de Grado

Título del Trabajo de Grado

Tutor Académico: nombre del profesor. 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	XI
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE ACRÓNIMOS	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROYECTO	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. JUSTIFICACIÓN	4
1.3. OBJETIVO GENERAL	5
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
MARCO REFERENCIAL	7
2.1. Sistema SCADA	7
2.1.1. Definición	7
2.2. Fundamentos de medición consumo de energía eléctrica	7
2.2.1. Definición	7
2.2.2. Clasificación de los medidores	8
2.2.3. Infraestructuras de medición de energía	10

2.2.4. Normativa aplicada a las redes de medición	14
2.3. Redes malladas	18
2.3.1. Definición	18
2.3.2. Características	18
2.4. Sistema operativo en tiempo real	21
2.4.1. FreeRTOS	21
2.5. Microcontrolador ESP32	21
2.5.1. Descripción	21
2.5.2. Características	22
DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE	27
3.1. Definición y Descripción del Hardware	27
3.1.1. Definición	27
3.1.2. Descripción	27
DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	28
4.1. Definición del software	28
4.2. Descripción del software	30
4.2.1. Tablas de particiones en el ESP32	30
4.2.2. Modo de operación	33
4.2.3. Modo de configuración	34
PRUEBAS Y RESULTADOS	35
CONCLUSIONES	36
RECOMENDACIONES	37

TÍTULO DEL ANEXO	38
TÍTULO DEL ANEXO	39
TÍTULO DEL ANEXO	40
REFERENCIAS	41

LISTA DE FIGURAS

2.1.	Infraestructura general de un sistema de medición avanzado . . .	11
2.2.	Arquitectura de red en comunicaciones para medición inteligente. J. Ekanayake and K. Liyanage, SMART GRID TECHNOLOGY AND APPLICATIONS, First edit. New Delhi, 2013.	13
2.3.	E. Hossain, Z. Han, and V. Poor, Smart Grid Communications and Networking. New York: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012. 17	
2.4.	Interacción del OS con otras capas del sistema informático.	21
4.1.	Diagrama ilustrativo de la memoria flash para los modelos de tablas de partición	31

LISTA DE TABLAS

2.1. Otra tabla	26
2.2. Ejemplo	26
4.1. ESP-IDF Tabla de Particiones por defecto (Aplicación única de fábrica, sin OTA)	32

LISTA DE ACRÓNIMOS

IEC: International Electrotechnical Comission Comisión Electrotécnica Internacional

RTOS: Real Time Operative Sysyem, Sistema operativo en tiempo real

AMR: Automatic Meter Reading, Lectura de medición automática

HAN: Home Area Network, Red de área doméstica

NAN: Neighbourhood Area Network, Red de área de vecindario

WAN: Wide Area Network, Red de área amplia

ISO: International Organization for Standardization, Organización Internacional de Normalización

OSI: Open System Interconnection, Interconexión de Sistemas Abiertos

GUI: Grafic User Interface, Interfaz Gráfica de Usuario

NVS: Non volatile Storage, Memoria no Volátil

STA: STA, Estación (Utilizado para WiFi)

AP: Access Point, Punto de Acceso

INTRODUCCIÓN

Los primeros indicios del uso de la energía eléctrica sucedieron en el cuarto final del siglo XIX. La sustitución del gas y aceite por la electricidad además de ser un proceso técnico fue un verdadero cambio social que implicó modificaciones extraordinarias en la vida cotidiana de las personas, cambios que comenzaron por la sustitución del alumbrado público y posteriormente por varias clases de procesos industriales como motores, metalurgia, refrigeración y de último llegaron a las comunicaciones con la radio y la telefonía.

El siguiente cambio de paradigma en el que se vio involucrado la electricidad tuvo lugar a lo largo del siglo XX y surge desde la necesidad de facilitar las tareas realizadas a diario en casa. En ello los investigadores de la época vieron una solución adaptando equipos con energía eléctrica para su uso en el hogar. Las industrias replicaron el crecimiento tecnológico que tuvieron en sus productos, lo que trajo como consecuencia el desarrollo los electrodomésticos. La primera producción de aparatos en masa como refrigeradores, lavadoras, televisores y radios sucedieron en esta época y tuvieron una alta receptividad por parte de los compradores. La invención del transistor solo aceleró el reemplazo de aparatos dada su capacidad de minimizar los equipos.

La integración de la electrónica a la industria fomentó la creación de sistemas automatizados de adquisición de datos, supervisión y control también llamados sistemas *SCADA* por sus siglas en inglés. Estos sistemas manejan áreas críticas de las industrias y son parte de los procesos fundamentales de muchas de ellas por lo

que necesitan ser diseñados con robustez, fiabilidad y seguridad. La aparición del Internet y las comunicaciones modernas en estos sistemas permite a los usuarios, de manera inalámbrica incluso, monitorear y actuar sobre el sistema a distancia, sin presencia física en la planta.

Además de poder monitorear y realizar acciones sobre los sistemas, los instrumentos de medida de última tecnología se fabrican de modo que puedan ser compatibles con medios de comunicación inalámbricas lo que posibilita la transmisión de datos adquiridos sin necesidad de cable a la central del sistema *SCADA*. El presente trabajo de grado pretende realizar el diseño de un sistema de adquisición y transmisión de datos integrando microcontroladores ESP32 a medidores de energía eléctrica para formar una red mallada inalámbrica capaz de transmitir los datos recolectados a un punto central.

En este archivo debe escribir su introducción.

De acuerdo a Brea la transformada de Laplace debe estudiarse como una función definida en el campo de los números complejos [?].

Otro modo de referencial es [?]

El resto del reporte consta de: en el Capítulo ?? se describe...

En el trabajo se emplea el enfoque de [?]

De acuerdo a la ecuación

CAPÍTULO I

CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La energía eléctrica es diferente de otras manifestaciones de la energía, debido a que no se puede almacenar por sí sola como electricidad. Esto obliga a que la energía eléctrica consumida por un equipo u aparato tenga que generarse al momento en el cual se vaya a consumir. Los procesos para la generación de energía tienen costos altos de desarrollo e implementación a gran escala (países o estados) por lo que surtir de energía a las industrias y electrodomésticos tiene un costo que la empresa que genera la energía necesita recuperar. Como consecuencia se suele medir el consumo de cada uno de los usuarios por razones enteramente económicas.

En Venezuela se utiliza el mismo método de adquisición de datos desde que se instaló el sistema eléctrico. Este consiste en un operador que se acerca hasta el lugar donde se encuentra un medidor de energía y registra la lectura que marca el medidor, esto se hace de manera repetitiva para todos los sitios donde se quiera registrar el consumo. En ocasiones los medidores tienen una salida codificada donde comunica el valor del consumo por infrarrojo lo que permite al operador registrar el valor de ese consumo mediante un aparato compatible con este protocolo. Debido a esta problemática surge la necesidad de sustituir este sistema de adquisición de datos manual por uno que no requiera el traslado del

operador hasta el sitio, que sea económico, confiable y eficiente.

Los principales equipos de medición de energía poseen en su diseño una salida por pulsos y soportan distintos protocolos de comunicación, lo que representa una ventaja al trabajar con microcontroladores, pues estos son adaptables a la mayoría de los protocolos mediante programación lo que facilita la adquisición de los datos a partir del medidor. Por otra parte trabajar con microcontroladores ofrece la posibilidad de realizar comunicaciones inalámbricas si se adapta un módulo WiFi como periférico. Interconectar estos módulos WiFi para formar una red mallada permitiría la transmisión de los datos captados a una mayor distancia que la lograda por un único módulo y permitiría su salida hacia alguna red externa deseada sin utilizar cables entre los medidores y la central de adquisición de datos, y sin intervención presencial del operador. Ilustradas las debilidades expuestas anteriormente y las ventajas que representaría un sistema de este tipo se evidencia la necesidad de realizar el diseño.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Una red mallada WiFi utilizando microcontroladores permite adaptar a la red equipos que soportan distintos métodos de extracción de datos; otorga la posibilidad de interconectar dispositivos mediante comunicaciones inalámbricas, que no poseen dicha capacidad originalmente; además su desarrollo permitiría extender las variables a medir y los métodos de adquisición de datos del sistema; y por último, posee bajos costos de instalación al no requerir de cableado entre los elementos de la red.

Establecer la red mallada se requiere de nodos que posean la capacidad de enlazarse entre sí formando redes de comunicación, además los nodos deben ser capaces de enrutar los mensajes donde viaja la información. Para un sistema de adquisición de datos es ideal que cada nodo de la red este conformado por un microcontrolador con un módulo WiFi integrado, esto permitiría que cada uno de los nodos extrajera los datos según el método que se requiera en cada fuente de datos y al formar parte de la red mallada se facilitaría la adquisición de datos para un sistema central. El ESP32 es una opción viable para esta aplicación debido a su módulo WiFi integrado y las librerías desarrolladas en comunicación vía WiFi, utilizar dicha tarjeta representa una ventaja económica y reduce los tiempos de desarrollo respecto a otros microcontroladores.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de adquisición y transmisión de datos orientado a medidores de energía eléctrica, utilizando una red mallada WiFi con microcontroladores ESP32.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar los principales métodos de extracción de datos soportados por un medidor de energía, en particular, el protocolo Modbus por RS485 y la salida por pulsos.
- Diseñar el módulo de programa para los nodos que componen la red mallada, conformados por microcontroladores ESP32
- Adaptar un nodo para ser compatible con la salida por pulsos de un medidor de energía y almacenar el valor de la medida para su adquisición mediante

la red.

- Adaptar un nodo para adquirir datos desde un medidor de energía que soporte protocolo Modbus RTU vía RS485.
- Validar el funcionamiento del sistema.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se documentarán los fundamentos sobre sistemas SCADA, Medidores de energía, Redes WiFi Malladas y el protocolo Modbus.

2.1. Sistema SCADA

2.1.1. Definición

2.2. Fundamentos de medición consumo de energía eléctrica

2.2.1. Definición

Los medidores de consumo de energía eléctrica, también llamados contadores de energía debido a la tarea que desempeñan, son “Un instrumento destinado a medir la energía eléctrica integrando la potencia con respecto al tiempo” [1]. Las compañías de electricidad utilizan medidores de energía instalados en cada cliente con el propósito de monitorear y facturar el consumo. Debido a ello estos equipos suelen estar calibrados en unidades de facturación de energía, comúnmente se utiliza el kilovatio hora [kWh] y se lee el valor registrado en cada medidor una vez ha llegado el período de cobranza.

Cuando se desea ahorrar energía durante ciertos periodos de tiempo, algunos medidores pueden registrar la demanda de energía, es decir el máximo uso de potencia en un intervalo de tiempo. Aplicar esta metodología de registro de demanda brinda la capacidad de variar las tarifas de electricidad durante el día, permitiendo registrar el consumo de cada usuario durante periodos de tarifas altas (picos de demanda) o en casos de tarifas bajas donde la demanda de energía en el sistema es baja y la energía menos costosa. Incluso en algunas áreas los medidores de energía poseen relés para desprendimiento de cargas por un periodo de tiempo en caso de picos muy altos de demanda.

2.2.2. Clasificación de los medidores

Tomando como referencia lo que [2] refleja en su trabajo, los medidores de consumo de energía pueden agruparse mediante las siguientes clasificaciones.

Según el principio de funcionamiento

Medidores electromecánicos: El tipo más común de medidor eléctrico, el registro de la energía se realiza mediante el conteo de las revoluciones de un disco metálico que es conductor eléctrico pero no conductor magnético. Este disco se hace rotar mediante la inducción electromagnética generada por la alimentación, a una velocidad proporcional a la potencia que pasa a través del medidor. El número de vueltas es entonces proporcional a el consumo de energía.

Medidores electrónicos: De forma general este medidor está compuesto por la alimentación, un circuito de medición, un circuito de procesamiento (usualmente microcontroladores) y comunicación además de otros módulos agregados como un RTC, una pantalla de cristal líquido, un módulo de

comunicación mediante infrarrojo, entre otros.

El circuito de medición está compuesto por muestreadores y cuantificadores conectados a las entradas de corriente y tensión, así como a la referencia de tensión. Esto viene seguido por una sección de conversión analógica-digital para encontrar el equivalente digitalizado del valor de las entradas. Dichas entradas en formato digital son tratadas utilizando un procesador digital de señal para calcular los distintos parámetros de medición.

Este tipo de medidor muestra la energía consumida en una pantalla LCD o LED, además de medir la energía consumida pueden también registrar otros parámetros de la carga y del suministro, como la tasa de demanda instantánea y máxima.

Según su construcción:

Medidor monofásico bifilar (una fase y neutro):

Está compuesto por una bobina de tensión y una de corriente. Su capacidad usualmente está entre 15 A y 60 A.

Medidor bifásico bifilar (dos fases):

Está compuesto por dos bobinas de tensión y dos bobinas de corriente. Usualmente utilizado para medir la energía eléctrica consumida por aparatos que funcionan con la tensión fase-fase residencial.

Medidor bifásico trifilar (dos fases y neutro):

Está compuesto por dos bobinas de tensión y dos bobinas de corriente. Se usa para medir la energía consumida por aparatos que requieran para su funcionamiento dos fases, con este medidor se puede medir la energía consumida por otros aparatos conectados a la misma instalación que funcionen con una sola fase.

Medidor trifásico tetrafilar (tres fases y neutro):

Está compuesto por tres bobinas de tensión y tres bobinas de corriente. Se utiliza para medir la energía consumida por aparatos que requieran funcionar con tres fases.

2.2.3. Infraestructuras de medición de energía

La infraestructura de cada sistema de medición es la característica que delimita sus particularidades, "El cambio de visión de la medición de energía eléctrica se realiza desde el año de 1970 con la incorporación del envío de datos, la comunicación en los años 70 era unidireccional, en una sola vía, desde el usuario hasta la empresa distribuidora. La primera etapa fue la medición AMR (Automatic Meter Reading) y duró alrededor de 30 años dando paso a la evolución, llamada medición inteligente o smart Metering. Smart metering requiere un alto grado de telecomunicaciones en ambas vías: usuario-empresa distribuidora." [3].

La meta en cuanto a estos sistemas es llegar a una medición inteligente avanzada, es decir incorporar a toda la red eléctrica dispositivos con la capacidad de operar por medio de telecomunicaciones, permitiendo equilibrar la generación de energía eléctrica al consumo real, por medio de los datos enviados por todos los medidores inteligentes.

Existen ciertos requerimientos para realizar una medición inteligente: alta confiabilidad, vida útil, interoperabilidad, rentabilidad, seguridad, consumo mínimo de energía, bajos costos de instalación y mantenimiento. La tecnología desarrollada debe cumplir con estos requerimientos para ser realmente funcional en el campo de la medición automática de consumo.

Para realizar medición inteligente se pueden emplear diferentes tipos de tecnologías de telecomunicaciones de acuerdo al área de aplicación y al canal de transmisión. La figura 2.1 muestra los tipos de arquitecturas de comunicación que son empleadas en la medición inteligente. Los medios guiados para realizar telecomunicaciones incluyen la red telefónica pública conmutada (PSTN), PLC portadora en la línea de alimentación, Ethernet y cable módems. Los medios no guiados para realizar telecomunicaciones incluyen WiFi, ZigBee, infrarrojos, RFID y GSM / GPRS / CDMA celular.

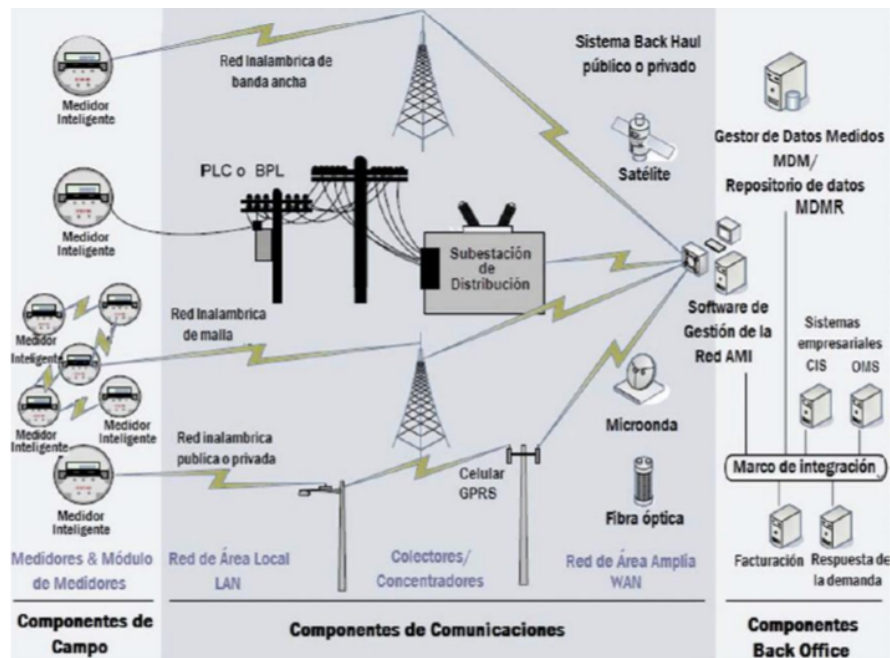


Figura 2.1. Infraestructura general de un sistema de medición avanzado
Fuente: Adaptado de [4]

La infraestructura necesaria para la medición inteligente se divide en tres zonas de acuerdo al tipo de comunicación [4], dichas zonas son las siguientes:

- Red de área local (HAN).

- Red de área de vecindad (NAN).
- Red de área amplia (WAN).

Red de área local (Home Area Network)

Es un sistema integrado dentro de los hogares que permite la comunicación entre diferentes dispositivos inteligentes, el dispositivo límite de esta red es el medidor de energía eléctrica. Este tipo de redes puede utilizar comunicaciones cableadas como BPL (Broadband over Power Lines) o PLC (Power Line Carrier) pero también comunicaciones inalámbricas como redes privadas, una red de banda ancha o redes malladas para comunicarse con la red NAN.

Red de vecindad (Neighbourhood Area Network)

Este tipo de red permite la conexión entre múltiples HANs, es un sistema de interconexión entre redes de medidores inteligentes. El principal elemento que lo constituye es el concentrador. El concentrador es el dispositivo que actúa como un puente entre los contadores inteligentes y la puerta de enlace. El concentrador de datos detecta y gestiona los medidores inteligentes de forma automática, realiza lecturas de los consumos y transfiere la información a los centros de control, también facilitan los mensajes de diagnóstico, actualizaciones de firmware y supervisión de las condiciones de los medidores.

Red de área amplia (Wide Area Network)

Es la red encargada de conectar múltiples sistemas de distribución y actúa como un puente entre redes de menor tamaño y la red del cliente. Debe ofrecer una red de retorno para conectar los servicios de recolección de datos con las instalaciones del cliente. Dicha red de retorno puede adoptar una variedad de tecnologías (Ethernet, red celular, banda ancha) para transferir la información extraída de las redes NAN a las oficinas locales de servicios públicos. Una puerta de enlace perteneciente a la red WAN puede utilizar la conexión de banda ancha o una red basada en IP para proporcionar un acceso para que el cliente puede acceder a los datos requeridos. La privacidad, fiabilidad y seguridad de la información son los principales aspectos que se evalúan en este tipo de redes.

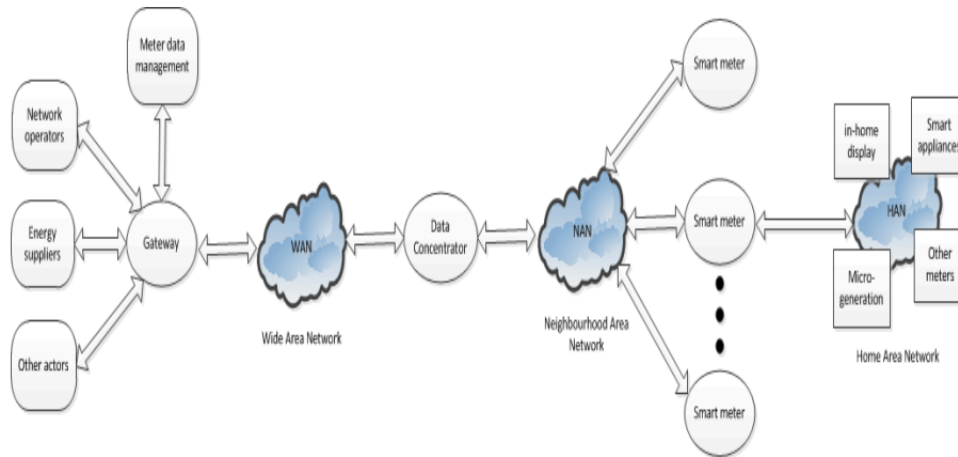


Figura 2.2. Arquitectura de red en comunicaciones para medición inteligente. J. Ekanayake and K. Liyanage, SMART GRID TECHNOLOGY AND APPLICATIONS, First edit. New Delhi, 2013.

2.2.4. Normativa aplicada a las redes de medición

Los problemas en redes de medición suelen ocurrir cuando falla la interoperabilidad entre los distintos sistemas que las componen, esto es causado por la transmisión de datos que se efectúa a través de diversas redes y sistemas de comunicación. Es por ello que la interoperabilidad se convierte en algo fundamental, permitiendo a la infraestructura y la información fluir correctamente en un sistema interoperable permitiendo el intercambio de datos sin necesidad de la intervención manual. El punto más relevante de la interoperabilidad es proporcionar un sistema con la capacidad de integrar componentes plug-and-play, esto se refiere a la capacidad de configurar los componentes y el sistema principal automáticamente comienza a operar con solo conectarlo. Aunque es un concepto sencillo en muchas situaciones puede llegar a ser complejo y poco práctico mostrar una interfaz estándar entre dos sistemas diferentes. Estas consideraciones en la interoperabilidad no solo reducen los costos de instalación y de integración sino que también definen los requisitos que un componente nuevo debe tener para conectarse al sistema existente, lo que se refleja en la sustitución sencilla de componentes y en una alta escalabilidad del sistema en caso de una mayor demanda o implementación de tecnologías más eficientes.

Modelo OSI

Existen diferentes modelos y arquitecturas referenciales para el diseño de un sistema, el primer modelo creado por la ISO en 1980 es llamado OSI (Open System Interconnection) es un estándar que tiene por objetivo conseguir interconectar sistemas de procedencia distinta para que estos pudieran intercambiar información sin ningún tipo de impedimentos debido a los protocolos con los que estos operaban

de forma propia según su fabricante. El modelo OSI está conformado por 7 capas o niveles de abstracción:

1. De aplicación
2. De presentación
3. De sesión
4. De transporte
5. De red
6. De enlace de datos
7. Capa física

Cada uno de estos niveles ejerce sus propias funciones para que en conjunto el sistema sea capaz de alcanzar su objetivo final. Es por esta abstracción que el modelo hace posible la intercomunicación en diferentes sistemas al delimitar las funciones que debe realizar cada capa de operación. Es importante aclarar que el modelo OSI no es la definición de una topología ni un modelo de red en sí mismo. Tampoco especifica ni define los protocolos que se utilizan en la comunicación, ya que estos están implementados de forma independiente a este modelo. Lo que realmente hace OSI es definir la funcionalidad de ellos para conseguir un estándar.

- **Capa de aplicación:** Ofrece la posibilidad de acceder a los servicios de las demás capas. Define los protocolos que utilizan las aplicaciones para intercambiar datos. Normalmente el usuario no interactúa con esta capa sino con programas que sirven de interfaz para ocultar el nivel de complejidad subyacente.

- **Capa de presentación:** Se encarga de representar la información funcionando como un traductor entre equipos. En esta capa se trabajan más los datos en sí que cómo se establece el enlace para que estos lleguen. Se tratan aspectos como la semántica (qué significan) y la sintaxis (formato de los datos) para garantizar la compatibilidad con los equipos del sistema. También es la encargada de cifrar los datos y comprimirlos de ser necesario.
- **Capa de sesión:** Esta capa es la que se encarga de mantener y controlar el enlace establecido entre dos computadores que están transmitiendo datos de cualquier índole. Por lo tanto, el servicio provisto por esta capa es la capacidad de asegurar que, dada una sesión establecida entre dos máquinas, la misma se pueda efectuar para las operaciones definidas de principio a fin, reanudándolas en caso de interrupción.¹¹ En muchos casos, los servicios de la capa de sesión son parcial o totalmente prescindibles.

GWAC

La integración de la automatización asociada con los recursos eléctricos es importante para respaldar una mayor eficiencia e incorporar recursos renovables, variables y vehículos eléctricos en el sistema eléctrico. Los problemas de integración que enfrenta esta comunidad son análogos a los que enfrenta la industria de la salud, los servicios de emergencia y otras comunidades complejas con muchas partes interesadas. Para resaltar este problema y fomentar la comunicación y el desarrollo de una comunidad de interoperabilidad de redes inteligentes, el GridWise Architecture Council (GWAC) creó un Marco de establecimiento de contexto de interoperabilidad. Este "modelo conceptual" ha sido útil para explicar la importancia de la alineación organizativa, además de las especificaciones de interfaz técnica e informativa para dispositivos y sistemas de redes inteligentes". Como siguiente paso para construir una comunidad sensible a la interoperabilidad,

el GWAC ha estado desarrollando un Modelo de madurez de interoperabilidad de redes inteligentes (SG IMM) tomando prestado del trabajo realizado por otros para abordar circunstancias similares. El modelo proporciona un medio para medir el estado y el progreso, analizar las brechas y priorizar los esfuerzos para mejorar la situación. El objetivo es crear una herramienta, o un conjunto de herramientas, que fomente una cultura de interoperabilidad en la comunidad de redes inteligentes. En la siguiente ilustración se hace referencia a una comparación de OSI y GWAC con sus respectivos niveles o capas cada uno:

OSI	GWAC	Función de las capas
7. Aplicación	3. Sintaxis de interoperabilidad Comprensión de los datos Estructura mensajes Intercambio entre sistemas	- Traducción de los caracteres de datos de un formato a otro. - Estructura del contenido del mensaje - Patrones de intercambio de mensajes
6. Presentación		
5. Sesión		
4. Transporte	2. Interoperabilidad de las redes Intercambio de mensajes entre el sistema a través de una variedad de redes	- Traducción de direcciones lógicas y nombres a direcciones físicas. - Transferencia transparente y fiable de datos entre sistemas. - La transferencia de datos entre el origen y el destino a través de intermediarios de la red. - Gestión de la orden de entrega de mensajes
3. Red		
2. Enlace de datos	1. Conectividad básica Mecanismo para establecer conexiones físicas y lógicas del sistema	- Acceso a los medios de hardware y conectividad eléctrica - Transferencia de datos entre nodos de red - Codificación de caracteres, transmisión, recepción, decodificación y corrección de errores
1. Física		

Figura 2.3. E. Hossain, Z. Han, and V. Poor, Smart Grid Communications and Networking. New York: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012.

2.3. Redes malladas

2.3.1. Definición

Una red WiFi mallada se puede definir como una red que permite la comunicación entre nodos a través de múltiples saltos en una topología mallada [5]. Un nodo es la unidad mínima de la red, estas unidades son las encargadas de generar los enlaces entre los dispositivos usuarios que construyen la red mallada.

Por lo general estas redes poseen clientes, enrutadores y puertas de enlace. Los clientes son dispositivos electrónicos, sistemas embebidos o sensores que pueden comunicarse con otros en la red. El enrutador es un dispositivo electrónico que sirve como un intermediario entre dos o más redes para transportar los datos de una red a otra. Y las compuertas de enlace son dispositivos electrónicos que conectan la red con Internet. [6]

Cuando un nodo no puede operar, el resto de los nodos en la red WiFi mallada aún pueden comunicarse con los otros, bien sea, directa o indirectamente a través de uno o más nodos intermediarios [7]

2.3.2. Características

La red de Internet como la conocemos es el ejemplo más conocido y similar a una red mallada, puesto que Internet es una red con gran cantidad de nodos en los que el mensaje es enviado desde un punto y es recibido en otro mediante un enrutado inherente a la red. Tomando este ejemplo como base se pueden delimitar algunas características de esta topología de red:

- Permite que el camino recorrido por el mensaje entre un punto y otro sea dinámico, es decir, que la ruta que toma el mensaje cambie si se requiere debido a la ocurrencia de algún evento que impidan la comunicación con un nodo intermedio específico.
- Ofrece una mayor cantidad de rutas posibles para el mensaje ya que idealmente cada nodo puede conectarse con cualquier otro directamente o a través de terceros.
- Cada nodo posee un identificador único en la red que lo diferencia de los demás nodos para que no haya errores en el direccionamiento de la información.

Sobre los protocolos de enrutamiento en las redes Malladas

Esta capacidad de elegir la ruta debe estar basada en algoritmos para determinar el camino óptimo que será recorrido por el mensaje. Este algoritmo de enrutamiento debe tomar en cuenta las distintas condiciones que puede presentar el medio de transmisión, las interferencias o ruido que pueda existir según la banda de transmisión, la posible colisión de datos en un nodo, etc, para así determinar hacia dónde debe ir el mensaje en cada nodo para llegar a su destino.

La implementación de topologías malladas en sistemas embebidos ha encontrado problemas en la necesidad de procedimientos adicionales relacionados con el enrutamiento. Hay algunos ejemplos de protocolos que soportan la red mallada sobre una red IP, por ejemplo el protocolo B.A.T.M.A.N (Better Approach To Mobile Adhoc Networking), Babel (Protocolo de distancia de vector para IPv6 y IPv4 con propiedades de convergencia rápida), HWMP (Protocolo Híbrido Inalámbrico Mallado), entre otros [6]. El problema surge en la implementación de

la pila TCP/IP en estos sistemas puesto que un sistema embebido posee recursos de cómputo limitados. Es por ello que se debe seleccionar según la aplicación el poder de cómputo necesario y la topología de la red que se requiere para cumplir con cada solución. Se describirán algunas redes WiFi malladas, con funcionamiento caracterizado según la aplicación:

Para que el mensaje tenga un destinatario debe existir una manera de identificar cada nodo de una red mallada, en el caso de la red mallada WiFi se utiliza la dirección MAC para diferenciar un nodo de otro.

Direccionamiento por MAC

En una red de computadoras, la dirección MAC es un valor único asociado a un adaptador de red. La dirección MAC también es conocida como dirección de hardware o dirección física del adaptador [6]. Las direcciones MAC se componen de doce números hexadecimales (48 bits de longitud). Por convención las direcciones MAC son escritas en uno de los dos formatos siguientes:

$$MM : MM : MM : SS : SS : SS \quad o \quad MM-MM-MM-SS-SS-SS \quad (2.1)$$

La primera mitad de la dirección MAC contiene el número identificador del fabricante del adaptador (i.e. 00:A0:C9:14:C8:29). Dichos identificadores están regulados por un estándar de Internet. La segunda parte de la dirección MAC representa el número de serial asignado al adaptador por el fabricante. [6]

2.4. Sistema operativo en tiempo real

Un sistema operativo es un conjunto de órdenes y programas de un sistema informático que gestiona los recursos de hardware y provee servicios que permiten el funcionamiento de otros programas.



Figura 2.4. Interacción del OS con otras capas del sistema informático.

La ventaja de utilizar sistemas operativos es que estos permiten gestionar los recursos de modo que se puedan ejecutar múltiples órdenes al mismo tiempo. Aunque en realidad cada procesador solo está ejecutando una orden a la vez, el sistema operativo es esa capa de abstracción que simula la ejecución en paralelo de varias tareas.

2.4.1. FreeRTOS

2.5. Microcontrolador ESP32

2.5.1. Descripción

El ESP-32 es un chip con integración WiFi y Bluetooth diseñado con la tecnología de ultra bajo consumo de 40 nm. Este microcontrolador esta diseñado

para aplicaciones móviles, electrónicos personales, y de Internet de las cosas (IoT). Posee características de bajo consumo, incluyendo reloj de alta precisión, múltiples estados de energía, y escalamiento de consumo dinámico.

Además es una solución integrada, que ya posee WiFi, Bluetooth, junto con alrededor de 20 componentes externos. El chip incluye un interruptor de antena, acoplador de radio-frecuencia, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, filtros, y módulos de administración de consumo.

Este microcontrolador posee dos núcleos CPU que pueden ser individualmente controlados, con un reloj ajustable entre 80 MHz y 120 MHz. Además, usa el sistema operativo en tiempo real freeRTOS y tensión de alimentación nominal de 3,3 V.

2.5.2. Características

WiFi

- 802.11 b/g/n.
- 802.11 n (hasta 150Mbps).
- WMM.
- TX/RX A-MPDU, RX A-MSDU.
- Bloque de ACK inmediato.
- Defragmentación.
- Monitorización de faro automático (Hardware TSF).
- 4 interfaces virtuales WiFi.

- Soporte simultaneo para estación, Punto de acceso y modo promiscuo.
- Diversidad de antena.

CPU y Memoria

- Doble núcleo Xtensa de 32 bits, hasta 600 MIPS.
- 448 kB ROM.
- 520 kB SRAM.
- 16 kB SRAM en RTC.
- Memoria flash embebida de hasta 16MB

Relojes y temporizadores

- Oscilador interno con calibración de 8MHz, RC
- Oscilador externo de cristal desde 2 a 60MHz.
- Dos grupos de temporizadores, incluyendo 2x64-bits con un perro guardián en cada uno.
- TX/RX A-MPDU, RX A-MSDU.
- Un temporizador y un perro guardián RTC.

Periféricos

- 34 GPIO mapeables.
- ADC de 12 bits con hasta 18 canales.

- Do convertidores de digital a analógico
- 10 sensores táctiles.
- 4 SPI, 2 I^2C , 3 UART
- 1 host (SD/eMMC/SDIO)
- Interfaz de MAC Ethernet con DMA dedicado y soporte IEEE 1588.
- CAN 2.0.
- Soporte simultaneo para estación, Punto de acceso y modo promiscuo.
- IR (TX/RX).
- Motor PWM.
- LED PWM hasta de 16 canales
- Sensor Hall.

Seguridad

- Modo Boot seguro.
- Encriptación de flash.
- 1024-bits OTP, hasta 768-bit clientes
- Aceleración de criptografía por hardware:
 - AES.
 - SHA-2
 - RSA
 - ECC

- 4 SPI, 2 I^2C , 3 UART
- 1 host (SD/eMMC/SDIO)
- Interfaz de MAC Ethernet con DMA dedicado y soporte IEEE 1588.
- CAN 2.0.
- Soporte simultaneo para estación, Punto de acceso y modo promiscuo.
- IR (TX/RX).
- Motor PWM.
- LED PWM hasta de 16 canales
- Sensor Hall.

Gnat	per gram	13.65
	each	0.01
Gnu	stuffed	92.50
Emu	stuffed	33.33
Armadillo	frozen	8.99

Tabla 2.1. Otra tabla

Tabla 2.2. Ejemplo		
Item		
Animal	Description	Price (\$)
Gnat	per gram	13.65
	each	0.01
Gnu	stuffed	92.50
Emu	stuffed	33.33
Armadillo	frozen	8.99

Un ejemplo de tabla es

CAPÍTULO III

DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

3.1. Definición y Descripción del Hardware

3.1.1. Definición

3.1.2. Descripción

CAPÍTULO IV

DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

4.1. Definición del software

Para el objetivo planteado en este proyecto, se requiere el uso de un microcontrolador por lo que se debe implementar un programa o firmware para configurar y utilizar, de manera correcta, los periféricos correspondientes a las conexiones inalámbricas y el manejo de datos seriales; además es necesario un protocolo de conexión hacia un agente externo que permita enviar los datos recolectados por la infraestructura, una infraestructura que debe ser creada mediante este firmware y como método de configuración de los nodos una interfaz gráfica de usuario (GUI) que le permita a la red adaptarse de manera sencilla al lugar donde se instale.

El firmware en el microcontrolador (ESP32) debe ser capaz de iniciar en dos modos: el modo de operación y el modo de configuración. El modo de inicio debe ser controlado por el usuario.

La rutina de configuración debe ofrecer al usuario una interfaz gráfica donde se pueda modificar todos los parámetros que sean necesarios para establecer la conexión con el punto de acceso local, del mismo modo se debe conectar la red con el agente externo y realizar el envío de datos; los parámetros de funcionamiento

de la parte serial de cada nodo para extraer desde los medidores la información y los necesarios en la red mallada para establecer la cantidad de conexiones y el registro de nodos en la red; además del usuario y contraseña de acceso a dicha página. Por último debe ofrecer el reinicio del micro en su modo de operación para que una vez que estén configurados los parámetros se realiza de manera inmediata la puesta en marcha.

Por otra parte, la rutina de configuración debe detenerse en caso de que faltase algún parámetro fundamental para el funcionamiento, en caso contrario debe ir activando etapa por etapa los procesos para: configurar los periféricos necesarios, activar la conexión inalámbrica, conectarse con el punto de acceso y registrarse en la red mallada.

Las operaciones anteriores son compartidas en todos los nodos y son necesarias para entrar en la red. Las siguientes rutinas a ejecutarse dependen de la jerarquía que posee el nodo en la red mallada y de la función que se haya configurado para el nodo en la interfaz gráfica. La jerarquía que tiene un nodo dependerá de la intensidad de señal de este respecto al punto de acceso.

En caso de ser el nodo de mayor jerarquía, dicho nodo será el encargado de gestionar la comunicación de la red con el exterior, este nodo servirá como el enlace para enviar y recibir la información para toda la red. Además a partir de este nodo se formará el resto de la topología de red mallada.

Los demás nodos deben ser repetidores para que la señal pueda abarcar el espacio físico necesario o nodos conectados a medidores para la extracción de

datos. Estas dos rutinas no deben ser excluyentes, los nodos deben tener la capacidad de ser repetidores y extraer datos al mismo tiempo.

Hay dos rutinas principales para la extracción de datos, una mediante la salida de calibración del medidor y otra que se conecta a un bus serial RS485. La rutina de extracción de datos debe estar configurada para que se utilice el método necesario según el medidor. En caso de que los datos sean extraídos por la salida de calibración del medidor se debe diseñar una rutina para contar y almacenar los pulsos que esta genera considerando la cantidad inicial de kWh, esto por ser el registro que se desea transmitir debe estar almacenado de manera persistente y debe estar protegido contra pérdidas de alimentación. Por el contrario si en el nodo los datos son adquiridos mediante un bus serial, la persistencia de datos es realizada por el medidor, entonces la rutina en este caso solo debe encargarse de la trama serial. En ambos casos una vez adquiridos los datos se deben enviar a la red exterior cuando sean solicitados.

4.2. Descripción del software

Agregar un diagrama de bloques con explicación de los principales bloques de la aplicación.

4.2.1. Tablas de particiones en el ESP32

Un código cualquiera en el ESP32 puede contener múltiples aplicaciones, así como muchos tipos diferentes de datos (datos de calibración, sistemas de archivos, almacenamiento de parámetros, etc.) es por esto que las tablas de particiones se encuentran con un offset para cada código en cuestión en la memoria flash.

En cada grabado se utiliza un archivo de tabla de particiones por defecto que es definida en el menú de configuraciones también llamado *menuconfig*, hay dos tablas modelos para utilizar en este menú: *Aplicación única de fábrica, sin OTA* (4.1) y *Aplicación de fábrica, dos definiciones OTA*. La diferencia entre ambas tablas radica en la cantidad de particiones en la memoria flash y cómo son utilizadas: La aplicación sin *OTA* solo posee un código para arranque de tipo *app* en la tabla de particiones, mientras que la tabla de dos definiciones *OTA* posee dos códigos para iniciar el micro y es el gestor de arranque mediante ciertas reglas el que decide cuál data de tipo *app* poner en marcha. Este último modelo de tabla es útil cuando se quiere incorporar actualizaciones inalámbricas del programa en el micro también llamadas *Over The Air updates (OTA)*.

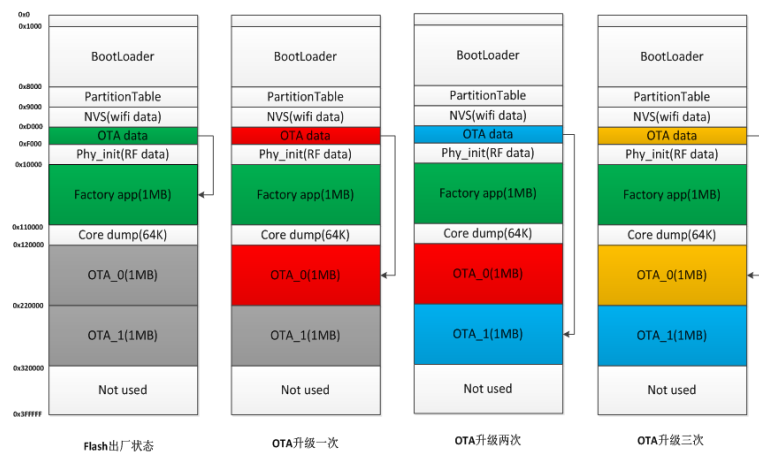


Figura 4.1. Diagrama ilustrativo de la memoria flash para los modelos de tablas de partición

En este proyecto se utiliza una aplicación única sin actualizaciones inalámbricas por lo que se utilizó el primer modelo de tabla, cuyas estructuras en archivo CSV se especifican a continuación:

Tabla 4.1. ESP-IDF Tabla de Particiones por defecto (Aplicación única de fábrica, sin OTA)

Name	Type	SubType	Offset	Size	Flags
nvs	data	nvs	0x9000	0x6000	
phyinit	data	phy	0xf000	0x1000	
factory	app	factory	0x10000	1M	

Con un desplazamiento de 0x10000 (64KB) en la flash, se encuentra la aplicación llamada "fábrica". El gestor de arranque ejecutará esta aplicación de forma predeterminada. También hay dos regiones de datos definidas en la tabla de particiones para almacenar la partición de la biblioteca *NVS* y los datos de inicio *PHY* (Que son datos de calibración de periféricos).

Con la finalidad de adaptarse a la aplicación fue necesario modificar la tabla de particiones puesto que la interfaz gráfica de modo de configuración y las diferentes particiones para datos requerían de un tamaño mayor al que posee la tabla de particiones original. Para crear o modificar los tamaños en una partición basta con configurar en el *menuconfig* del proyecto que se utilizará una tabla de particiones personalizada.

Explicación de particiones de memoria para configuración, operación y memoria rotativa

Explicar el modo de configuración (Página WEB)

Al iniciar el programa se configuran los periféricos necesarios mediante las API que ofrece el fabricante *Espressif Systems* para el ESP32.

4.2.2. Modo de operación

En este modo el primer periférico en configurarse en cualquiera de los nodos es la memoria no volátil (NVS), también llamada memoria flash, que se utiliza para almacenar información persistente entre reinicios del microcontrolador. El fabricante ofrece una interfaz de programación de aplicaciones () que permite configurarla y operar fácilmente con esta.

Esto se debe a que ahí se almacenan todos los datos que se transmiten al microcontrolador mientras este se encuentra en el modo de configuración.

Se toma desde la memoria flash la información sobre el tipo de nodo (serial RS485, entrada por pulsos o repetidor) y todos los parámetros que vienen asociados a este (tasa de baudios, ID serial, kWh iniciales, etc.), así como los parámetros necesarios para registrarse en la red mallada y poder comunicarse a través de la red.

Luego se debe configurar el WiFi en cada uno de los medidores para poder unirse a la red mallada. Este periférico en el ESP32 posee también una interfaz de programación de aplicaciones para programarlo de manera más sencilla (). Mediante esta interfaz, se calibra el WiFi, se asigna un lugar para almacenar sus parámetros de calibración y se coloca el modo de operación. El ESP32 posee tres modos de operación para este periférico: estación (STA), punto de acceso (AP) y un modo híbrido (AP/STA). Este último es el que se suele utilizar en la red mallada. Una vez configurado el WiFi se procede con la configuración e inicio de la red mallada.

La red mallada y el nodo central

La topología de red mallada utilizada en el proyecto está basada en la que provee *Espressif* para ser utilizada en conjunto con el ESP32. Dicha topología es llamada ESP-MESH y el fabricante proporciona una interfaz de programación de aplicaciones () para interactuar y modificar dicha topología con la intención de que sea adaptable a las soluciones que se deseen implementar.

Según el tipo de medidor que haya sido configurado serán activadas unas tareas u otras, puesto que cada medidor debe realizar diferentes funciones para extraer y transmitir sus datos.

Nodo Repetidor

Nodo serial RS485

Nodo de entrada por pulsos

4.2.3. Modo de configuración

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

CAPÍTULO VII

RECOMENDACIONES

Apéndice I

TÍTULO DEL ANEXO

Apéndice II

TÍTULO DEL ANEXO

Apéndice III

TÍTULO DEL ANEXO

REFERENCIAS

- [1] IEC. (2007) 313-01-35. Disponible en <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=313-01-35> , consultado en agosto 2020. [Online]. Available: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=313-01-35>
- [2] D. Londono, “Desarrollo de una guía enfocada a medidores de energía y conexiones de medidores,” 2013, obtenido desde <https://core.ac.uk/download/pdf/71397220.pdf> , en agosto 2020.
- [3] M. Ruiz, “Interoperabilidad entre medidores inteligentes de energía eléctrica residencial,” 2015, obtenido desde <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8435/6/UPS-KT01062.pdf> , en agosto 2020.
- [4] M. Alvarado, “Servicios de medición avanzada (AMI) para redes inteligentes y su adaptabilidad en el marco de la legislación ecuatoriana,” 2011.
- [5] M. Bahr, “Update on the hybrid wireless mesh protocol of IEEE 802.11s,” *Siemens Corporate Technology, Information and Communications*, p. 1, 10 2016.
- [6] A. Vazquez, “Diseño e implementación de una red wifi mallada que soporte protocolo modbus para equipos de control industrial.” 2020, consultado en Octubre, 2020.
- [7] M. B. Rifki Muhendra, Aditya Rinaldi, “Development of WiFi mesh infrastructure for internet of things applications,” *Engineering Physics International Conference, EPIC 2016*, p. 331, 2016.