

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Metrocontadores inteligentes para la lectura del consumo eléctrico y su despliegue en la Infraestructura de Medición Avanzada.

Autor: Angel Villegas Zuazo.

Tutor: Ing. Adrián Acuña Pérez.

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Telecommunications and Electronic Academic

TRABAJO DE DIPLOMA

Title: Smart meters for reading electricity consumption and their deployment in the Advanced Metering Infrastructure

Author: Angel Villegas Zuazo

Thesis Director: Ing. Adrián Acuña Pérez

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

“La mejor forma de predecir el futuro es crearlo “

Abraham Lincoln

DEDICATORIA

A mi mamá y mi hermano por su apoyo y comprensión incondicionales.

A mis amigos, por estar en las buenas y en las malas.

A mis profesores, por permitirme superarme.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, porque gracias a ella he podido llegar hasta aquí.

A mi tutor, indispensable para concretar este logro.

A mis amigos, por todo en lo que me han ayudado.

En fin, a todo aquel que me ha aportado algo.

TAREA TÉCNICA

A continuación, se muestran las tareas técnicas que se llevaron a cabo para dar cumplimiento a los objetivos propuestos y así seguir un orden para la realización de la presente investigación:

1. La identificación de las principales características y estructura de los metrocontadores inteligentes.
2. La indagación de diferentes diseños de metrocontadores inteligentes con diferentes tecnologías de comunicación implementadas.
3. La evaluación el despliegue de los metrocontadores inteligentes a nivel mundial.
4. La realización de un estudio de las principales características y estructura de la Infraestructura de Medición Avanzada.
5. La búsqueda de las tecnologías de comunicación utilizadas en la Infraestructura de Medición Avanzada.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Los metrocontadores inteligentes son elementos esenciales para la transición hacia las redes eléctricas inteligentes. Estos permiten monitorear, junto al consumo eléctrico, diversos parámetros para mejorar la calidad del servicio. Además, eliminan la necesidad de un lector/cobrador al transmitir la información, hacia el proveedor del servicio eléctrico, mediante tecnologías de comunicación, cableadas o inalámbricas. Los metrocontadores inteligentes están compuestos principalmente por: un transformador reductor, un microprocesador, un reloj en tiempo real, una unidad de memoria, un módulo para la comunicación y una pantalla LCD. Para la correcta utilización de los metrocontadores inteligentes, en las redes eléctricas inteligentes, es necesario contar con una Infraestructura de Medición Avanzada (AMI). Para la implementación de AMI se utilizan diversas tecnologías inalámbricas y cableadas. Todas estas tecnologías tienen sus ventajas y desventajas en cuanto a velocidad, alcance, costo de implementación, seguridad, entre otras. Por tal motivo, en este trabajo se investiga sobre estas tecnologías de comunicación, que permiten el despliegue de los metrocontadores inteligentes en AMI. Esta investigación permite conocer cuáles son las tecnologías de comunicación más utilizadas en los metrocontadores inteligentes y en AMI. También muestra el despliegue de los metrocontadores inteligentes a nivel mundial y algunos de los diseños existentes actualmente.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
TAREA TÉCNICA.....	vii
RESUMEN	viii
TABLA DE CONTENIDOS	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. METROCONTADORES INTELIGENTES PARA LA LECTURA DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	5
1.1 Características y estructura	5
Control y calibración	7
Medición Cuantitativa.....	7
Suministro de Energía.....	8
Sincronización	8
Interfaz de Usuario.....	8
Seguridad	9
Comunicación	9
1.2 Diseño de metrocontadores inteligentes.....	10
1.2.1 Metrocontador inteligente basado en LoRaWAN	11
1.2.2 Metrocontador inteligente basado en Wi-Fi / RFID	12
1.2.3 Metrocontador inteligente basado en IoT / Wi-Fi	14

1.2.4	Metrocontador inteligente basado en GSM	15
1.2.5	Metrocontador inteligente basado en <i>blockchain</i> con LongFi.....	16
1.3	Despliegue de los metrocontadores inteligentes a nivel mundial	18
	Conclusiones parciales.....	21
CAPÍTULO 2. INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA.....		23
2.1	Características y estructuras de la Infraestructura de Medición Avanzada	23
2.2	Tecnologías de comunicación utilizadas para HAN, NAN y WAN.....	28
2.2.1	HAN.....	29
2.2.2	NAN.....	34
2.2.3	WAN.....	39
	Conclusiones parciales.....	45
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		46
	Conclusiones	46
	Recomendaciones	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		48
ANEXOS		59
	ANEXO 1: Comparativa por regiones de la tasa de crecimiento del mercado de metrocontadores inteligentes (2020 - 2025)	59
	ANEXO 2 Tamaño del mercado global de metrocontadores inteligentes de 2021-2030 (miles de millones de USD).....	60

INTRODUCCIÓN

El método actual de generación y distribución de energía eléctrica predominante en el mundo, se diseñó y construyó en el siglo pasado y no ha cambiado significativamente desde entonces. La fiabilidad se intenta garantizar con una capacidad excesiva y un flujo de energía unidireccional desde la central eléctrica hasta el consumidor a través de líneas de transmisión de alta tensión, recorriendo a menudo largas distancias. Con la demanda de energía eléctrica en continuo aumento y las cantidades crecientes de fuentes de energía renovable, los sistemas de almacenamiento de energía requieren nuevas formas de gestionar y controlar la red eléctrica. Así como, distribuir la energía de forma más eficiente, eficaz y sostenible desde el punto de vista medioambiental y económico [1].

Las Redes Eléctricas Inteligentes (*Smart Grid*, SG) son las nuevas redes eléctricas en las que se fusionan las tecnologías modernas de la información y las comunicaciones (TIC), la automatización y el control [2]. Una red eléctrica inteligente de funciones completas utiliza una gran cantidad de sensores en toda la red de transmisión y distribución, incluidos los metrocontadores inteligentes (*Smart Meters*, SM) [3], que son los utilizados por la Infraestructura de Medición Avanzada (*Advanced Metering Infrastructure*, AMI), en lugar de los metrocontadores mecánicos antiguos [4].

Existe una necesidad inmediata de gestionar adecuadamente la creciente demanda de energía eléctrica. Una forma efectiva de hacer esto es igualar la demanda con la oferta, reduciendo así el desperdicio de energía, así como reduciendo la demanda de energía pico. El metrocontador inteligente ofrece, tanto al lado de la oferta como al lado de la demanda, la capacidad de lograr este objetivo. Gracias a esto, se ha mejorado la seguridad y exactitud en la lectura de sus datos, además con el uso de tales metrocontadores se obtienen los valores de un mayor número de variables con respecto a los antiguos, como, por ejemplo, armónicos de corriente, factor de potencia, potencia reactiva, potencia máxima, entre otras.

Una vez es procesada dicha información, puede ser acopiada para su análisis y posteriores aplicaciones. La información implícita en estas variables puede ser de gran beneficio para la compañía encargada de distribuir la energía eléctrica y para los clientes. Además, el progreso registrado en tecnologías de comunicación ha permitido que hoy en día, este tipo de metrocontadores cuenten con capacidad de transmitir datos a través de diversas tecnologías de comunicación. Dado que poseen estas tecnologías, dichos metrocontadores inteligentes, son capaces de comunicar directamente toda la información recogida, gracias a la capacidad de comunicación de datos bidireccional. En base a esto, además de la medición, pueden ejecutar comandos locales o recibidos a distancia; mientras que los metrocontadores tradicionales se limitan a permitir la recopilación manual de datos y la facturación [5]. Sin embargo, para utilizar completamente las capacidades del metrocontador inteligente en una vivienda, se necesitan disímiles tecnologías y estándares para lograr la comunicación entre este y las aplicaciones externas, lo que conlleva un despliegue de infraestructura avanzada.

En Cuba, aunque se hacen esfuerzos por implementar las nuevas tecnologías, la infraestructura de red eléctrica que actualmente está en uso, se puede considerar obsoleta. La red eléctrica nacional utiliza, prácticamente en su totalidad, metrocontadores convencionales. Solo en algunos grandes consumidores del sector estatal se utilizan metrocontadores inteligentes, pero de forma aislada, sin constituir redes inteligentes. Únicamente en este sector, a partir de la RESOLUCIÓN 66/2021 [6], se establecen, tarifas diferenciadas por horarios, incluyendo el horario pico. También se aplica el cálculo del consumo eléctrico a partir de parámetros como el Factor de Potencia, para lo cual es necesario contar con metrocontadores inteligentes. Sin embargo, este sector representa menos del 40 % del consumo de energía eléctrica total del país. El restante 60%, constituido por el sector residencial, cuenta con más de 4 millones de metrocontadores convencionales [7].

Debido a las limitaciones económicas Cuba, la sustitución total de los metrocontadores convencionales que actualmente se encuentran en funcionamiento en el país, no es una opción viable. Sería factible entonces, una solución para la lectura avanzada que reutilice los millones de metrocontadores existentes, desplegados por todo el país.

Partiendo de lo planteado anteriormente, es necesario adquirir un mayor conocimiento, a través de la investigación, de las características y ventajas, que trae consigo el despliegue de metrocontadores inteligentes dentro de una infraestructura avanzada de medición, en las redes eléctricas. De esta situación surge el siguiente **problema científico**:

¿Cuáles son las características de los principales metrocontadores inteligentes y las tecnologías utilizadas para su despliegue en la infraestructura de medición avanzada?

Para darle respuesta a la anterior interrogante, nos fijamos como **objetivo general**: Investigar sobre los metrocontadores inteligentes y las tecnologías utilizadas para su despliegue en la infraestructura de medición avanzada.

Como **objetivos específicos** nos planteamos los siguientes:

- Describir las principales características y estructura de los metrocontadores inteligentes.
- Mencionar las diferentes tecnologías de comunicación de los metrocontadores inteligentes
- Identificar el despliegue de los metrocontadores inteligentes a nivel mundial.
- Describir las principales características y estructura de la Infraestructura de Medición Avanzada.
- Mencionar las tecnologías de comunicación utilizadas en la Infraestructura de Medición Avanzada.

Los anteriores objetivos específicos les dan respuestas a las siguientes **interrogantes científicas**:

- ¿Qué características y estructura poseen los metrocontadores inteligentes?
- ¿Cómo se implementan en los metrocontadores inteligentes las diferentes tecnologías para comunicarse con la red?
- ¿Cómo es el despliegue de los metrocontadores inteligentes a nivel mundial?
- ¿Cuáles son las principales características y estructura de la Infraestructura de Medición Avanzada?
- ¿Cuáles son las diferentes tecnologías de comunicación utilizadas en la Infraestructura de Medición Avanzada?

Con la realización de este proyecto de investigación, se pretende ampliar la información existente, a partir de investigaciones anteriores, sobre el tema de los metrocontadores inteligentes de energía eléctrica y la Infraestructura Avanzada de Medición, utilizando referentes de información actualizados.

Esta tesis está conformada por la introducción, el desarrollo, compuesto por dos capítulos, las conclusiones de la investigación, las recomendaciones, referencias bibliográficas utilizadas y por último los anexos.

Introducción: Se justifica la necesidad de hacer una investigación exhaustiva sobre el tema que se aborda en el presente trabajo, se presenta la situación del problema a analizar en esta investigación, así como los objetivos de la realización de la misma.

Capítulo 1: Dedicado a los Metrocontadores Inteligentes, presentando sus características y estructura. Asimismo, se exponen ejemplos de diseños de metrocontadores inteligentes donde se implementan diferentes tecnologías de comunicación y se expone como es su despliegue en la actualidad.

Capítulo 2: Se muestran las características y estructura de la Infraestructura Avanzada de Medición y se describen las tecnologías de comunicación que se implementan para la comunicación dentro de ella.

Conclusiones y Recomendaciones

Referencias Bibliográficas

Anexos

CAPÍTULO 1. METROCONTADORES INTELIGENTES PARA LA LECTURA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En el presente capítulo, se hace un análisis de los beneficios de los metrocontadores inteligentes. Se profundiza en las características y arquitectura que poseen estos equipos, considerando su división en bloques funcionales. También, se muestran diferentes propuestas de diseños de metrocontadores inteligentes con disímiles tecnologías de comunicación, especialmente las funciones que cumplen los componentes que los conforman. Por último, se hace un estudio de la situación del mercado de metrocontadores inteligentes a nivel global y cómo se comporta su despliegue en las diferentes regiones del mundo.

1.1 Características y estructura

Un metrocontador inteligente tiene dos funciones, que son la medición y la comunicación. Para mediciones cuantitativas, el metrocontador inteligente debe poder medir con precisión la cantidad del medio utilizando diferentes principios físicos, topologías y métodos. Los metrocontadores inteligentes cuentan con funciones de control y calibración. Los clientes deben poder ver la información del metrocontador ya que esta información es la base para la facturación. También se necesita una pantalla como gestión de la demanda en el lado del cliente. La sincronización de tiempo es fundamental para la transmisión confiable de datos al concentrador central u otros sistemas de recolección para el análisis de datos y la facturación. Todos los datos y variables necesarios se pueden medir, y luego se pueden recolectar, guardándolos en varias unidades de almacenamiento. Luego de que estos datos que se almacenan, se analizan, las variables y las condiciones instantáneas, se pueden

utilizar a través de pantallas de visualización. Todo este proceso se realiza mediante infraestructuras de medición avanzada [8].

Los metrocontadores inteligentes son una combinación de hardware y software. La capacidad de estos equipos se basa en algoritmos que pueden ejecutarse y compilarse para funcionar de manera inteligente en segundo plano. A pesar de que en el mercado internacional existen diversos fabricantes y modelos, un metrocontador inteligente consta, como se muestra en la Figura 1-1 de una estructura de hardware básica [9]. Tiene un transformador reductor, un núcleo de microprocesador, un reloj en tiempo real, una unidad de memoria, un módulo para la comunicación y una pantalla LCD. Permite procesar los datos de forma rápida y eficaz, gracias a un kit electrónico que cuenta con un *System on a Chip* (SoC), un microcontrolador y algunos bytes de memoria flash. En los metrocontadores inteligentes se puede ver el seguimiento instantáneo de los datos de flujo de energía y comunicarlos hacia el destino correspondiente, puede incluir varios componentes de hardware en forma modular de acuerdo con las condiciones y situaciones específicas [8].

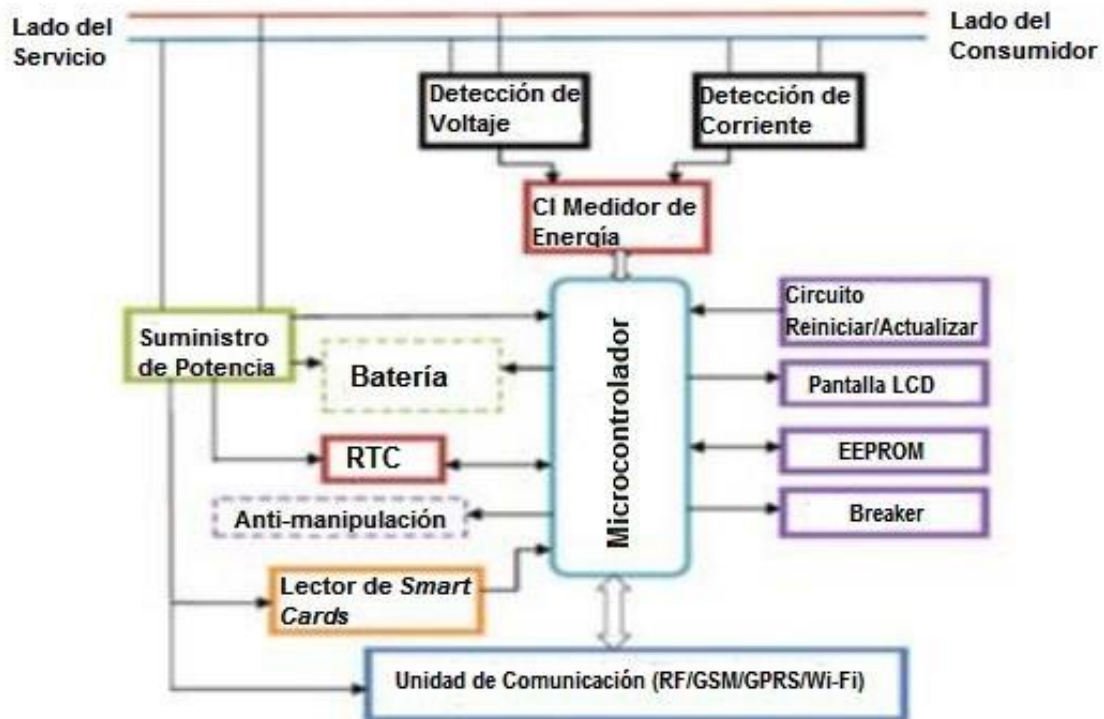


Figura 1-1: Estructura de Hardware de un Metrocontador Inteligente [10].

Partiendo de la Figura 1-1, se puede analizar un metrocontador inteligente dividiéndolo (en bloques funcionales) según las tareas que realizan sus respectivos componentes.

Control y calibración

Aunque varían ligeramente según el tipo de sistema, el metrocontador debe ser capaz de compensar las pequeñas variaciones en el sistema.

- Filtro *anti-aliasing*: el *front-end* analógico para voltaje consta de resistencias de protección contra picos, seguidas de un divisor de voltaje y un filtro de paso bajo RC que actúa como un filtro *anti-aliasing*. Las resistencias *anti-aliasing* en los lados positivo y negativo son diferentes porque la impedancia de entrada al terminal positivo es mucho más alta y, por lo tanto, se usa una resistencia de menor valor para evitar un gran cambio de fase.
- Análisis de armónicos: El análisis de armónicos se realiza para reducir la pérdida de transmisión. Tres procesos de eliminación de armónicos de las señales analógicas son: el uso de un filtro limitador de banda, el uso de métodos basados en Fourier y el uso de monitoreo adaptativo en tiempo real [11].
- Circuito Reiniciar/Actualizar: Permite al operario de la compañía proveedora del servicio medido, luego de acceder, reajustar las condiciones del servicio o actualizar el sistema del metrocontador inteligente.

Medición Cuantitativa

El metrocontador inteligente debe poder medir con precisión la cantidad del medio utilizando diferentes principios físicos, topologías y métodos para ello consta de:

- El Circuito Integrado (CI) Medidor de Energía que puede medir voltaje y corriente de línea, voltaje y corriente RMS, así como potencia activa, reactiva y aparente. Los canales del voltaje (V) y la corriente (I) del chip están conectados a los circuitos de detección, que perciben el V y la I de línea reales y los transforman a niveles adecuados para que este los pueda procesar.
- Microcontrolador: el microcontrolador de los metrocontadores inteligentes generalmente realiza varias tareas, que son cálculos de energía, visualización de parámetros eléctricos, lectura de tarjetas inteligentes, administración de datos y

energía, detección de manipulaciones, comunicación con otros dispositivos. Un módulo de microcontrolador de un metrocontador inteligente puede realizar la tarea requerida programándolo para ello, dentro de los límites del hardware.[8]

- Memoria EEPROM: módulo de memoria utilizado por el microcontrolador.

Suministro de Energía

Se necesita un requerimiento de energía constante para medir y registrar datos en tiempo real. Este se deriva de la parte de suministro de energía de un metrocontador inteligente. Además en caso de pérdida de la fuente primaria de energía, el sistema debe poder mantener su funcionalidad [11].

- La fuente de alimentación de un metrocontador inteligente permite el funcionamiento del mismo, alimentado directamente desde la red o mediante un transformador reductor. Contiene transformadores reductores, rectificadores, convertidores AC-DC, reguladores, filtros y cargador de baterías.
- Batería: se incluye una batería de respaldo, que se carga a través de un voltaje reducido, suministrado por el circuito interno del metrocontador inteligente.

Sincronización

La sincronización de tiempo es fundamental para la transmisión confiable de datos al concentrador central u otros sistemas de recopilación para el análisis de datos y la facturación. La sincronización es aún más crítica en el caso de la comunicación inalámbrica [11].

- Reloj en Tiempo Real (*Real Time Clock*, RTC): El reloj en tiempo real es una unidad de hardware vital en todos los metrocontadores inteligentes que realiza un seguimiento de la hora actual. Proporciona información de hora y fecha y señales de alarma.

Interfaz de Usuario

Los clientes deben poder ver la información de los metrocontadores ya que esta información es la base para la facturación [11].

- Pantalla: se necesita una, ya que la gestión de la demanda, en el extremo del cliente, no será posible sin el conocimiento del mismo de su consumo en tiempo real.

Seguridad

La seguridad es esencial, debe ser capaz de hacer frente a los ataques deliberados y a los accidentes involuntarios, como los errores de los usuarios y los fallos de los equipos. Además, con el aumento del número de dispositivos conectados, aumentará la posibilidad de ciberataques contra la red eléctrica [11].

- *Breaker*: Permite conectar/desconectar el servicio en caso de ser necesario.
- Lector de *Smart Card*: Permite la identificación digital (cliente o proveedor), así como para aplicación de servicio prepago o monedero electrónico.
- Circuito anti manipulación: provee protección contra la manipulación o alteración de los datos de medición, el acceso no autorizado a los datos de medición del metrocontador y la recuperación no autorizada de datos.

Comunicación

Envío de datos almacenados y recepción de comandos operativos, así como actualizaciones remotas de firmware. La comunicación desempeña un papel importante en los metrocontadores inteligentes, ya que una de las diferencias más significativas entre las redes tradicionales y las redes eléctricas inteligentes a las que pertenecen los metrocontadores inteligentes, es la comunicación bidireccional [11].

- Unidad de Comunicación: Los datos medidos y calculados por el metrocontador inteligente se almacenan y transfieren de acuerdo con diferentes estándares y tecnologías de comunicación según sea necesario. Éstas varían en función del fabricante, del metrocontador inteligente que instale la empresa de servicios públicos y de la aplicación, así como de la extensión del área geográfica que se pretenda cubrir. La comunicación puede ser cableada o inalámbrica.

En las redes eléctricas inteligentes, la mayoría de los metrocontadores inteligentes están ubicados en la red de área doméstica (HAN) , equivalente a red de área de edificio (BAN) y a red de área industrial (IAN). Se podrían utilizar tecnologías alámbricas e inalámbricas;

las primeras proporcionan una mayor capacidad de transmisión y alcanza mayores distancias, mientras que, las segundas pueden ser más económicas, según el caso, y pueden llegar a zonas difíciles.

1.2 Diseño de metrocontadores inteligentes

Los fabricantes a nivel mundial implementan diferentes tecnologías de telecomunicaciones en sus equipos con la finalidad de llegar todos los mercados y cumplir con las necesidades y los requerimientos de cada sector, sea residencial o industrial. Sin embargo, en el mercado actual, los metrocontadores inteligentes, tienen costos muy elevados. Además, los fabricantes pueden implementar tecnologías con licencia, lo que puede encarecer su soporte.

Por lo anterior, surge la necesidad de desarrollar diseños propios, con tecnologías de acceso libre y de implementación más factibles. No obstante, al diseñar un sistema de medición inteligente, existen muchos desafíos que son de naturaleza multifacética. La primera y la restricción más desafiante es identificar claramente las funciones necesarias en el metrocontador inteligente en función de los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, los metrocontadores inteligentes para aplicaciones residenciales tienen espectros de diseño totalmente diferentes en comparación con los metrocontadores inteligentes necesarios para aplicaciones industriales o de servicios públicos.

Para desarrollar un diseño de metrocontador inteligente se pueden explorar diferentes componentes (modelos de microcontroladores, fuentes de alimentación, mecanismos de seguridad, etc.). Al seleccionar equipos eléctricos, se realiza una comparación comercial de los componentes disponibles en el mercado. Las características técnicas más importantes para la evaluación del desempeño pueden incluir precisión, rango operativo, tiempo de respuesta, sensibilidad, resolución y linealidad. En particular, esto se aplica a la selección de los transductores de voltaje y corriente para la etapa de adquisición de señales del metrocontador inteligente. Parámetros adicionales a considerar durante la selección de los transductores podrían ser restricciones eléctricas, restricciones mecánicas, restricciones térmicas y condiciones ambientales. Aunque existen muchos tipos de transductores que se pueden utilizar para medir parámetros eléctricos básicos, la selección del transductor más adecuado para cualquier medida depende del cumplimiento de los requisitos de diseño. Los

métodos comunes de medición de voltaje son el divisor de voltaje, transformador de voltaje, optoacoplador, sigma-delta y transductores de voltaje de efecto Hall, mientras que los transductores de corriente comunes son resistencias de derivación, transformador de corriente, Efecto Hall, bobina Rogowski, optoacoplador, y transductores de corriente sigma-delta [12].

Un elemento a considerar, es que los metrocontadores inteligentes pueden ser destinados a redes eléctricas de baja tensión (menores a 1kV), media tensión (1kV a 25kV) o, alta tensión (superiores a 25kV), asimismo pueden ser monofásicos, bifásicos o trifásicos.

La unidad de microcontrolador (*Microcontroller Unit*, MCU), debe tener capacidades de procesamiento flexibles, almacenamiento suficiente y una interfaz para conectarse a diferentes tipos de transductores y sensores, además, debe ser capaz de adaptarse a varios protocolos de comunicación. Al realizar la investigación, las MCUs más recurrentes para diseños de metrocontadores inteligentes, son los Raspberry Pi, Arduino, PIC, NodeMCU y el ATMEGA de Atmel, en sus diferentes variantes.

El tipo de tecnología de comunicación también es importante. Tecnologías inalámbricas y alámbricas o, las combinaciones de ambas, son utilizadas indistintamente. Algunas de las MCUs también incluyen módulos de comunicación integrados. Las tecnologías más utilizadas en los metrocontadores inteligentes son: Wi-Fi, PLC, GSM, LoRaWAN y ZigBee, entre otras descritas en la sección 2.2 del presente trabajo.

No menos importantes son los diferentes mecanismos de seguridad que se pueden seleccionar para el metrocontador inteligente a diseñar. En estudios como [13], se revela cómo un atacante puede explotar los metrocontadores inteligentes comprometidos para inyectar, modificar y eliminar datos en la puerta de enlace o el enrutador en la red de medición SG. Para garantizar la integridad de la información y de los propios equipos, se pueden aplicar técnicas basadas en modelos matemáticos [14], la criptografía [15] o, protocolos como el OpenSSL [16], entre otras disímiles técnicas.

1.2.1 Metrocontador inteligente basado en LoRaWAN

En [17] se diseña un metrocontador de energía inteligente basado en LoRaWAN para medir el consumo de energía eléctrica utilizando la conectividad que brinda esta tecnología de comunicación. Este equipo consta de varios componentes, incluida la MCU, el módulo

Modbus RS-485 para la comunicación en serie con el metrocontador eléctrico convencional, una interfaz de bus serie universal (*Universal Serial Bus*, USB) para fines de programación y depuración, y el transceptor LoRa SX1276. La Figura 1-2 ilustra el diagrama de bloques del metrocontador inteligente. La MCU se comunica con el módulo Modbus RS-485 y la interfaz USB mediante Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (*Universal Asynchronous Transmitter-Receiver*, UART), mientras que la comunicación con el SX1276 se realiza mediante Interfaz de Comunicación Serie (*Serial Peripheral Interface*, SPI), pin de interrupción y pin de entrada/salida de propósito general (*General Purpose Input/Output*, GPIO). El módulo Modbus RS-485 se conecta al metrocontador de potencia existente mediante comunicación serie RS-485. El firmware está diseñado para usar LoRaWAN Clase A y el usuario final también puede acceder a los datos del metrocontador inteligente mediante la interfaz de usuario de una aplicación web.

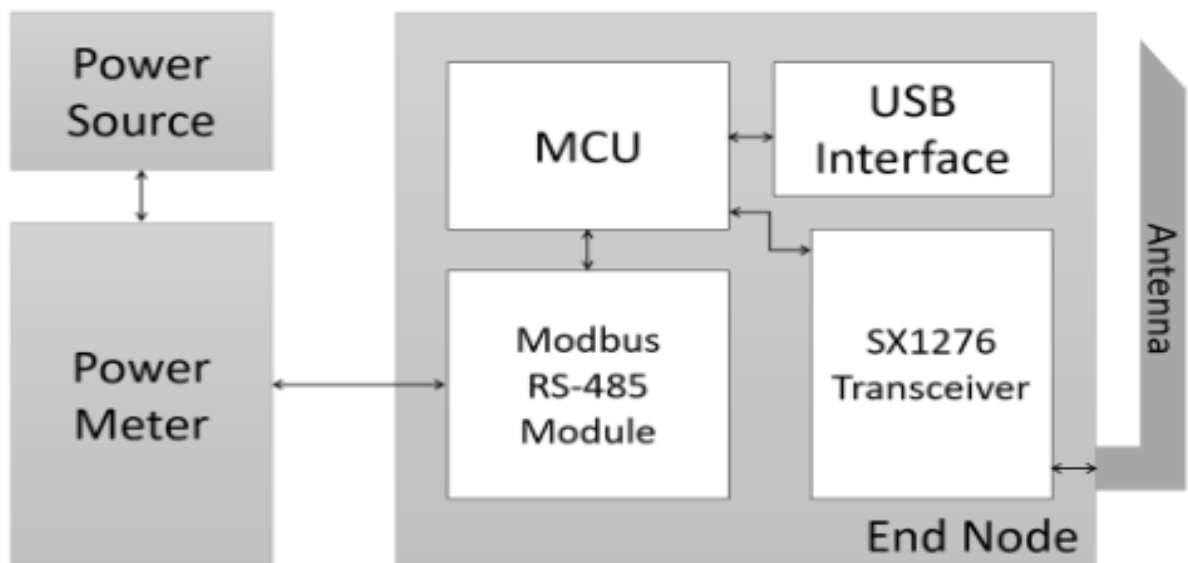


Figura 1-2: Diagrama de bloques del metrocontador inteligente propuesto basado en LoRaWAN.

1.2.2 Metrocontador inteligente basado en Wi-Fi / RFID

En [18] se diseña e implementa un metrocontador inteligente moderno y de alta precisión usando tecnología de identificación por radiofrecuencia (*Radio Frequency Identification*, RFID) y basado en IoT, donde la transmisión de la energía consumida y la información del

metrocontador inteligente se envía usando tecnología Wi-Fi a la unidad central de control. En el diagrama de bloques de la Figura 1-3, se observan los elementos que componen el diseño de hardware propuesto. El microcontrolador ESP32, que se utiliza como corazón del metrocontador inteligente y se conecta con todos los demás componentes. Un *buzzer*¹, que se encarga de dar una alarma cuando la energía restante alcanza el punto umbral, es decir que avisa al cliente de que "el saldo es bajo y debe recargar su tarjeta". La señal de alarma se recibe desde el microcontrolador. Un sensor de tensión y corriente (PZEM-004T), por supuesto mide la tensión y la corriente, luego calcula y envía la potencia, la frecuencia y el factor de potencia, así como la lectura de la corriente y el voltaje al microcontrolador para procesar esta información. Una pantalla *e-Paper* conectada a los pines SPI del microcontrolador ESP32 para mostrar los kilowatts consumidos, la potencia, la frecuencia, la tensión, la corriente, el factor de potencia y el balance. Un lector de tarjetas RFID (RC522) que se conecta con el ESP32 para activar el sistema de prepago, entregando la energía eléctrica a la vivienda mediante el uso de la tarjeta RFID, que se rellena previamente. Un reloj (RTC) para ajustar la hora del metrocontador inteligente. Un relé, dispositivo que controla la fuente de alimentación de la carga.

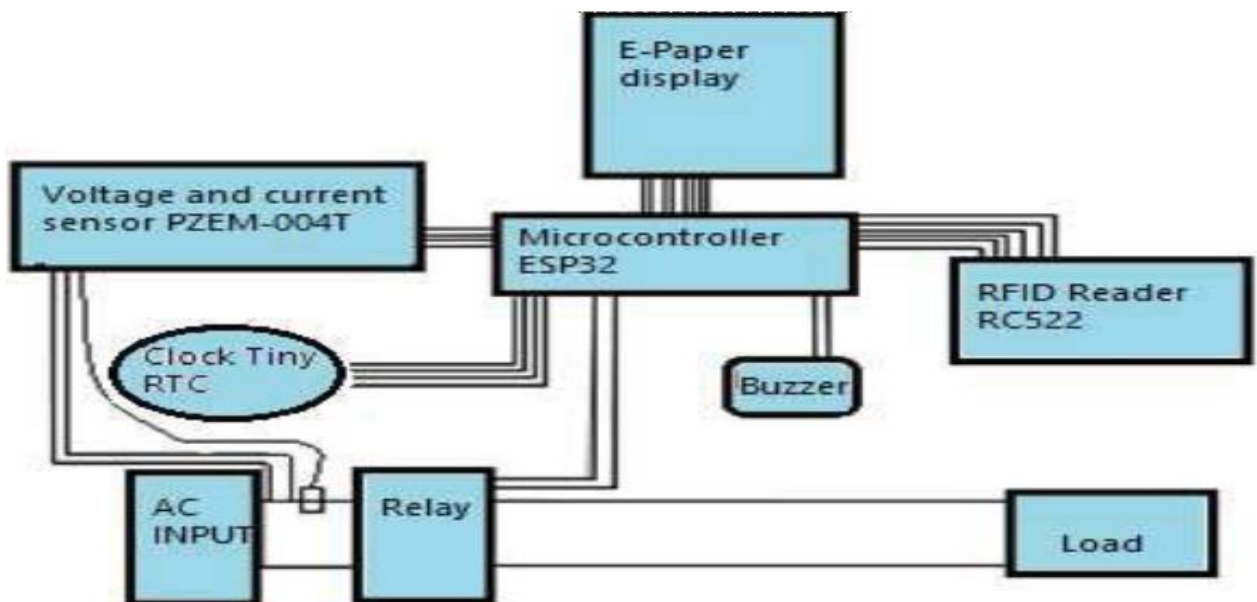


Figura 1-3: Diagrama de bloques del metrocontador inteligente basado en IoT / RFID

¹ En español zumbador, es un transductor electroacústico que produce un sonido constante o intermitente.

1.2.3 Metrocontador inteligente basado en IoT / Wi-Fi

En [19] se utiliza el microcontrolador Arduino con módem Wi-Fi para introducir la funcionalidad "inteligente" en un metrocontador doméstico tradicional. El diagrama de bloques funcional del metrocontador inteligente desarrollado se muestra en la Figura 1-4.

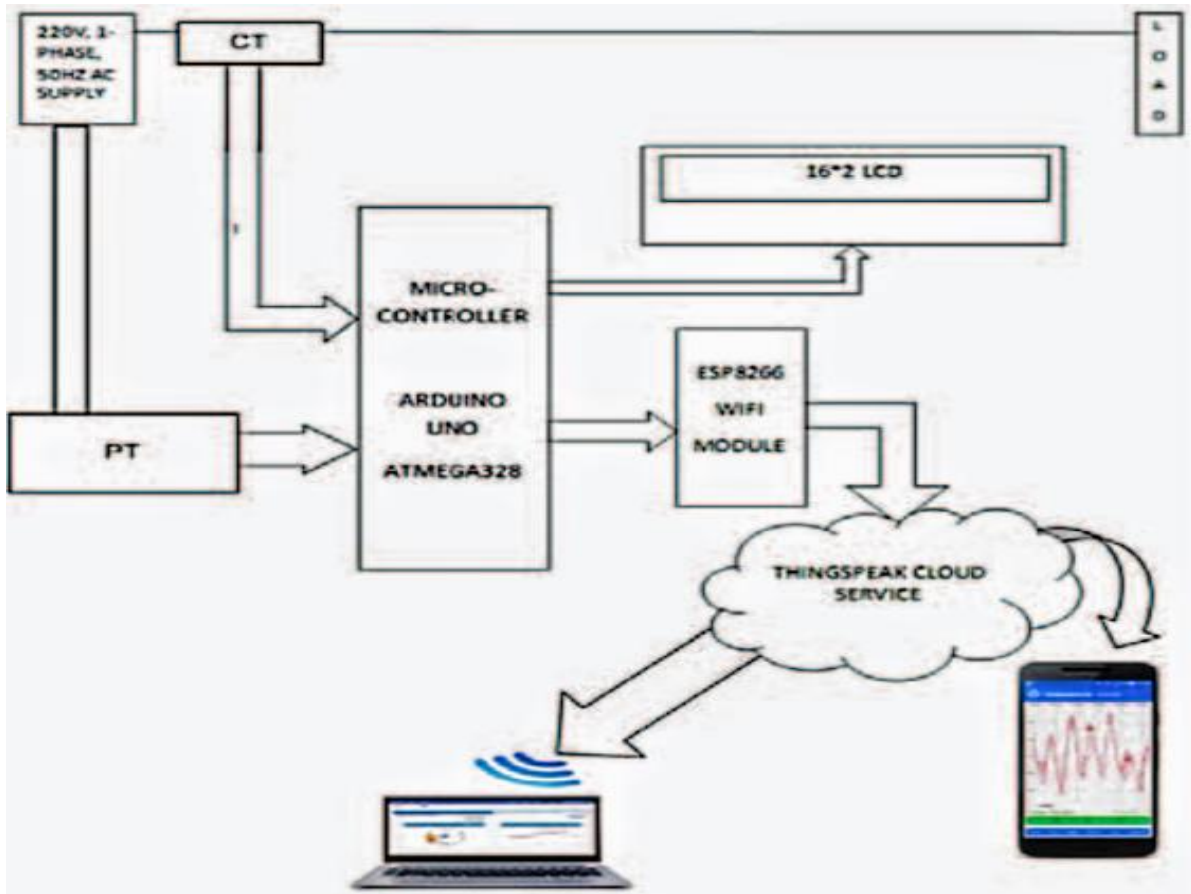


Figura 1-4: Diagrama de bloques funcional del metrocontador inteligente basado en IoT.

Los componentes principales que se utilizaron para este trabajo son Arduino UNO, módulo Wi-Fi ESP8266-01, transformador de corriente (TC), transformador de potencial (TP), regulador de voltaje AMS1117 y una pantalla LCD de 16x2. El software que se usó para ejecutar la simulación primero es PROTEUS y luego la parte de programación se hizo en Arduino IDE.

Los pines de entrada analógica de Arduino se utilizan para recopilar los datos de corriente de línea y voltaje de línea después de ser reducidos por TC y TP respectivamente. El TC usado fue de clasificación 5A/5mA y el TP de 230V/10V. Se hace que la corriente de salida del TC fluya a través de una carga de valor fijo de 33Ω . La salida del TP se conecta a un circuito divisor de potencial resistivo de $10k\Omega:1k\Omega$. Después de reducir el voltaje y la corriente de entrada, se agrega una compensación de CC (Corriente Continua) del valor adecuado a esas señales para que puedan llevarse dentro del rango medible de 0-5 V en el Arduino. Los valores calculados de potencia, energía, potencias activa y reactiva y factor de potencia se muestran localmente en la pantalla LCD de 16x2 y también se actualizan a intervalos regulares. El módulo Wi-Fi ESP8266-01 se usa para acceder a Internet. Una vez que se asegura el acceso a Internet, el módulo puede enviar con éxito todos los datos relevantes a la plataforma *ThingSpeak Cloud*.

1.2.4 Metrocontador inteligente basado en GSM

En [20] se desarrolla otro diseño donde no se reemplazan los metrocontadores de energía que ya están instalados en nuestras casas, pero que con una pequeña modificación puede convertirlos en "inteligentes". Este dispositivo utiliza el microcontrolador ATMEGA 328P para fines informáticos, el módem GSM (*Global System for Mobile Communication*) y el módulo RF (Wi-Fi). El módulo Wi-Fi ESP8266 se integrará en el metrocontador e implementará el protocolo TCP/IP para las comunicaciones entre el metrocontador y una aplicación web. El esquema en bloques de este metrocontador inteligente propuesto se ilustra en la Figura 1-5. El metrocontador de energía inteligente propuesto puede proporcionar todos los servicios de medición y facturación, como medir la energía consumida, enviar la factura generada por SMS (servicio de mensajes cortos) a través de la red GSM, así como servicios de seguridad anti manipulación.

Después de encender el Arduino y el módem GSM, enciende el relé y conecta el metrocontador de energía a la carga a través del relé. Luego lee la EEPROM y muestra los datos actuales. Arduino comprueba el impulso proveniente del metrocontador de energía, es decir, si se produce un impulso, actualiza los datos y muestra los actuales. El módem GSM comprueba si hay un nuevo SMS y lo lee. Si el SMS es "DATA", envía los datos a un número especificado previamente. Si el SMS es "LINE CUT", apaga el relé para que la

carga se desconecte. Nuevamente, si el SMS es "LINE OK", entonces enciende el relé para que la carga se conecte. Si hay algún otro SMS en cualquier otro formato, lo elimina. Ante cualquier intento de manipulación que ocurra en la unidad de medida; Arduino apaga el relé, enciende el *buzzer* y envía un SMS al proveedor de servicios.

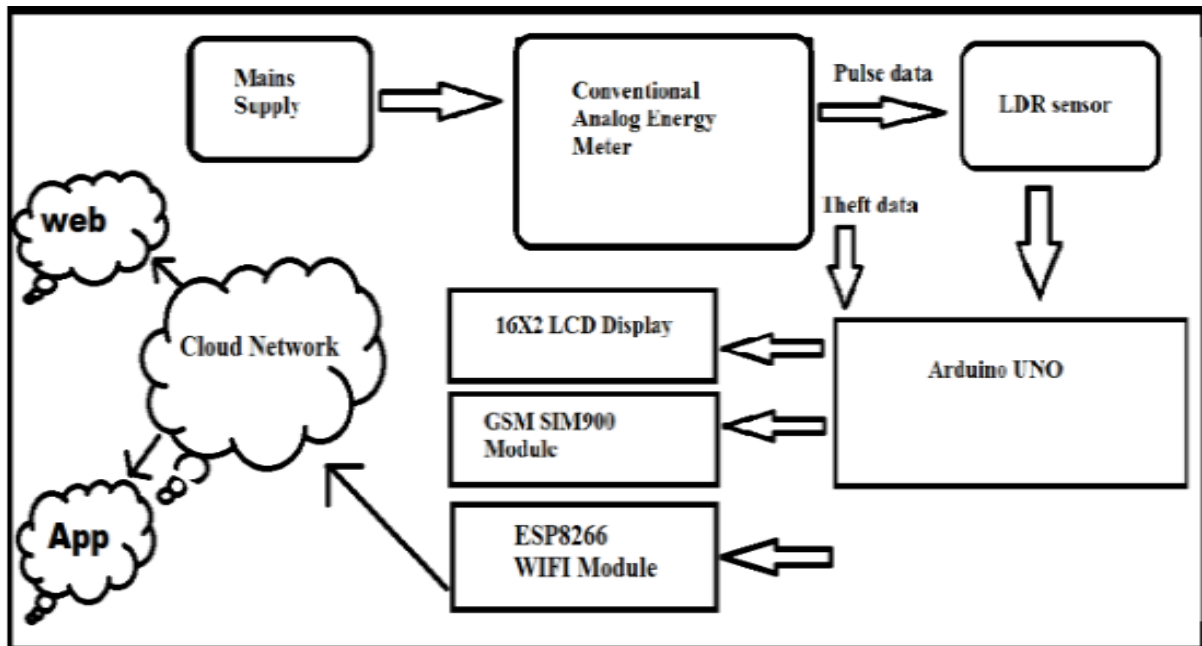


Figura 1-5 Esquema del metrocontador inteligente basado en GSM.

1.2.5 Metrocontador inteligente basado en *blockchain* con LongFi

En [21] se propone un diseño completo de la parte de hardware de un metrocontador inteligente, con el fin de habilitar el mercado de energía *blockchain* P2P (*Peer to Peer*). Esta se considera una forma de optimizar no solo el flujo de energía sino también el flujo de precios de la energía, donde los consumidores y productores se convierten en prosumidores, osea consumen, producen, compran y venden energía directamente entre sí. El metrocontador inteligente diseñado deberá estar conectado a una microrred residencial; por lo tanto, la arquitectura propuesta se conectará a la red de baja tensión de CA (Corriente Alterna) en modo serie. La corriente y el voltaje se miden usando el sensor ACS71020 o ACS37800_1 o equivalente que comunica los datos con un microcontrolador ATMEGA328P usando el protocolo de comunicación I2C. El microcontrolador calcula la

potencia y la energía consumida o producida y almacena en la memoria además a los identificadores de transacciones y bloques, que se calculan utilizando la placa de desarrollo OKDO E1. La transacción calculada, realizada por el OKDO E1, se comparte y comunica mediante la antena de la placa Helium, que comparte toda la información de las transacciones con otros metrocontadores a través de LongFi en un área amplia, lo cual es muy útil en las microrredes. Todos los componentes, tal y como se presenta en el esquema sinóptico de la Figura 1-6, se alimentan directamente de la red a través de un rectificador y cargan la batería LiPo interna a través del sistema de gestión de la batería (*Battery Management System*, BMS) si la energía está disponible, de lo contrario, la batería interna alimentará a los demás componentes.

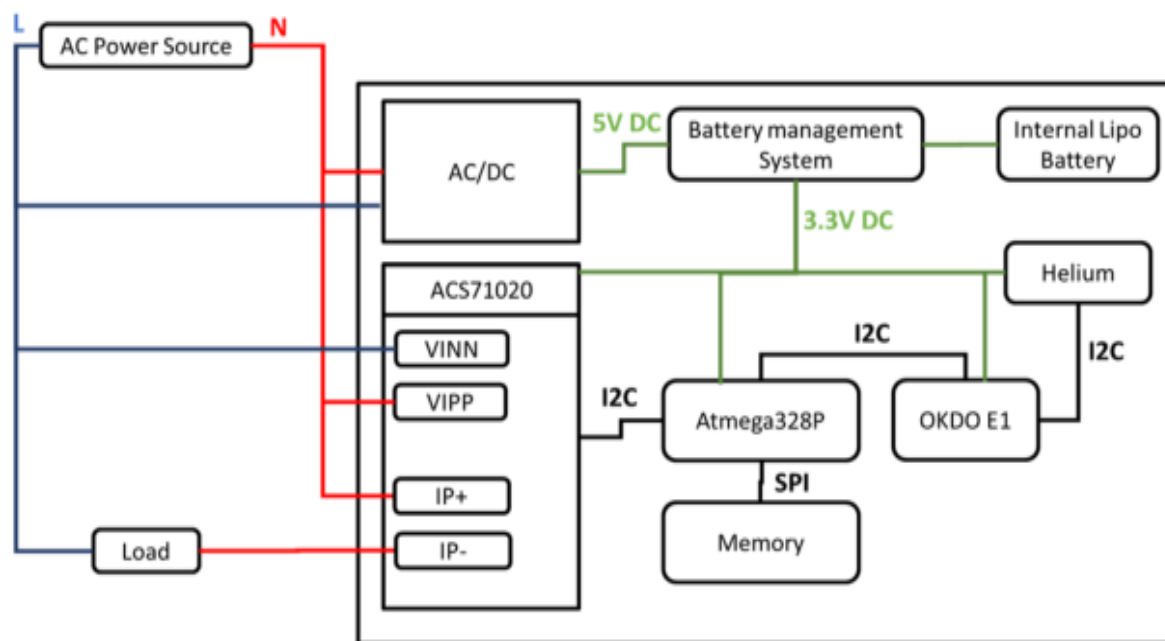


Figura 1-6: Esquema sinóptico de metrocontador inteligente basado en *blockchain*.

La elección de uno u otro de los estándares de comunicación para los metrocontadores inteligentes depende de diferentes criterios. En [22] identifican siete criterios técnicos y cinco no técnicos.

Los siete criterios técnicos son: el alcance en el interior de los edificios, el alcance total, las bandas de frecuencia, las velocidades/latencias de los datos, la robustez, la

interoperabilidad y la semántica/modelos de datos. Mientras que los cinco primeros criterios son relevantes para los estándares de capa inferior (véase el modelo OSI), la interoperabilidad también es importante para los estándares de la capa aplicación. El último criterio, "semántica y modelos de datos", sólo es relevante para los estándares de la capa aplicación. Por otro lado, los cinco criterios no técnicos son: la base instalada actual y la prevista (2 criterios), la apertura de un estándar, la propiedad de la red y los costos.

1.3 Despliegue de los metrocontadores inteligentes a nivel mundial

Los metrocontadores inteligentes, que son una parte integral de las redes inteligentes, se están adoptando en todo el mundo. En la Unión Europea (UE), los Estados miembros se comprometieron a lograr un despliegue de cerca de 200 millones de metrocontadores inteligentes de electricidad para el año 2020. Esto significó que cerca del 71% de los consumidores europeos contaba con un metrocontador de electricidad inteligente instalado. En Noruega desde el 1 de enero de 2019, la mayoría de los usuarios finales tienen instalado metrocontadores de electricidad inteligentes como parte de la implantación de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) en la red eléctrica noruega. A finales de 2020, alrededor de 3,2 millones, es decir, el 99% de los metrocontadores de electricidad de este país eran metrocontadores inteligentes. A nivel mundial la cifra alcanzaría los 800 millones de metrocontadores inteligentes para ese propio año [1].

Según [23] el mercado de metrocontadores inteligentes fue testigo de un envío de aproximadamente 136,45 millones de unidades de metrocontadores inteligentes a nivel mundial en 2020 y se estima que alcanzará los 198,53 millones de unidades para 2026, registrando una tasa de crecimiento anual compuesta (*Compound Annual Growth Rate*, CAGR ²) del 6,6 % para el período de pronóstico (2021-2026) y se muestra una comparación de las tasas de crecimiento de este rubro por regiones en el período 2020 - 2025 (Ver Anexo 1).

En una de las áreas comerciales más importantes del mundo, Estados Unidos, según un informe publicado por el Instituto para la Innovación Eléctrica (IEI), en enero de 2020 [23],

² $CAGR = \left(\frac{VALOR\ FINAL}{VALOR\ INICIAL} \right)^{\frac{1}{AÑOS}} - 1$

las compañías eléctricas de ese país instalaron más de 98 millones de metrocontadores eléctricos inteligentes en 2019, cubriendo más del 70 % de los hogares estadounidenses. El número total de metrocontadores eléctricos inteligentes instalados se esperaba alcanzara los 107 millones a finales de 2020.

En [24], donde se expone un estudio de mercado realizado por una organización mundial de consultoría e investigación de mercado llamada *Precedence Research*, se anunció que el tamaño del mercado global de metrocontadores inteligentes se valoró en US\$ 28,03 mil millones en 2021 y se espera que alcance los US\$ 65,6 mil millones para 2030, creciendo a una CAGR del 11,5% de 2022 a 2030 (Ver Anexo 2).

Según dicho estudio, Asia-Pacífico es el segmento más grande para el comercio de metrocontadores inteligentes, en términos de región, debido a su densidad poblacional, con China dominando este mercado en dicha región. La expansión del mercado de metrocontadores inteligentes en la región está siendo impulsada por el aumento de las inversiones en infraestructura. Además, los participantes de la industria están empleando distintas técnicas para impulsar el mercado de metrocontadores inteligentes.

La región de Europa, se muestra como la de más rápido crecimiento en el mercado de metrocontadores inteligentes. El Reino Unido, Francia, España e Italia tienen la participación de mercado más alta de Europa. La necesidad de metrocontadores inteligentes en la región está siendo impulsada por el creciente número de instalaciones de metrocontadores eléctricos inteligentes. La presencia de importantes actores del mercado, el mayor uso de tecnologías novedosas y la creciente aceptación de fuentes de energía renovable están impulsando el crecimiento del mercado de metrocontadores inteligentes en esta región.

La incorporación de medición inteligente de energía eléctrica a nivel de América Latina aún es un tema pendiente, ha quedado muy por debajo de Europa o Norte América, debido principalmente a la falta de adopción de políticas que aborden las barreras de adopción a gran escala. Este mercado está liderado por México y Brasil, pero incluso en México donde la penetración de metrocontadores inteligentes es del 10%, no está claro si logrará alcanzar su objetivo de tener 30 millones de metrocontadores inteligentes (79% de penetración) en 2025 y en el caso de Ecuador únicamente hay planes piloto. Se estima que las empresas eléctricas sudamericanas, particularmente las de Brasil, Colombia y Chile, invertirán

US\$18.100 millones en medición inteligente, automatización de redes y otros segmentos del mercado de redes inteligentes durante la próxima década, según un informe reciente de la firma estadounidense de investigación de mercado *Northeast Group* [25].

Hay a la venta varios modelos aprobados de diferentes fabricantes en toda América Latina, como Landis + Gyr, Itron, que se enfocan en soluciones de medición, además de productos de las firmas de soluciones de automatización industrial Siemens, Honeywell, ABB y Schneider Electric, entre otras. La eléctrica italiana Enel, que introdujo su sistema de medición inteligente en 2005, ha sido uno de los líderes en la región, a través de proyectos piloto en sus mercados principales, incluidos Brasil, Argentina, Colombia, Chile y Perú. Uno de los líderes del mercado global, Landis+Gyr tiene operaciones en la mayor parte de la región y contratos con empresas eléctricas en México, Centroamérica y Sudamérica. Su sede regional se encuentra en la ciudad brasileña de Curitiba, en el estado de Paraná. Otra potencia mundial, Itron, anunció que la brasileña Accell será su distribuidora líder para la Latinoamérica y fabricará dispositivos exclusivamente para la región, mientras que también se encargará del servicio y soporte al cliente [25].

El mercado de metrocontadores inteligentes es altamente competitivo y consta de varios fabricantes importantes, así como otros más pequeños. Los principales actores con una participación destacada en el mercado se están enfocando en expandir su base de clientes en países extranjeros. Estas empresas están aprovechando las innovaciones estratégicas y las iniciativas de colaboración para aumentar su cuota de mercado y aumentar su rentabilidad [19]. Con este panorama el mercado ha sido testigo de la formación de alianzas estratégica por parte de los principales proveedores del mercado con los proveedores de tecnología de comunicación para fortalecer su oferta y también se espera que la posición impulse el metrocontador eléctrico inteligente. Por ejemplo, en 2019, Genesis se asoció con Chirpy Chirpyplus, la comunidad en línea más nueva de Australasia para mayores de 55 años, para brindar acceso a energía a sus clientes de Nueva Zelanda [26].

En 2019, IntelliHUB completó la adquisición de la unidad de medición inteligente Metrix of Mercury en un acuerdo de NZD 270 millones para fortalecer su posición de mercado en Nueva Zelanda. Metrix, que contaba con un excedente de 460.000 metrocontadores inteligentes, aumentaría el total de metrocontadores contratados o controlados de forma independiente de Intellihub a casi 2 millones [19].

En marzo de 2020, SENSUS USA INC. se asoció con Gray Stone Corporation para la implementación de 120 000 nuevos metrocontadores de electricidad inteligentes. La red de servicios públicos inteligentes de la cooperativa incluirá nuevos metrocontadores de electricidad residenciales Stratus IQ y una actualización de su tecnología de malla existente a la red de comunicación FlexNet [19].

PayGo y Landis+Gyr anunciaron su asociación en enero de 2021 [27], al firmar un acuerdo de socios de pago y facturación. Los clientes de medición sofisticada de Landis+Gyr podrán utilizar los servicios de pago de PayGo y la facturación digital prepaga como resultado del acuerdo. Los sistemas de prepago de servicios públicos han demostrado ser beneficiosos tanto para los consumidores como para los servicios públicos, brindando a los clientes más control sobre su utilización de energía y alentándolos a usar más energía.

Aunque los números en general muestran que la industria de la energía eléctrica continúa su transición hacia una energía más limpia mediante la modernización de las redes de energía a metrocontadores inteligentes este proceso no está exento de limitaciones como los altos costos iniciales, ya que las unidades de fabricación de metrocontadores inteligentes requieren una gran cantidad de dinero. Además, no solo el costo de instalación es alto, sino que también las operaciones y el mantenimiento requieren una gran cantidad de capital. Por lo tanto, la instalación de metrocontadores inteligentes requiere grandes inversiones, lo que restringe en cierta medida la expansión del mercado global de metrocontadores inteligentes durante el período proyectado. También el proceso de instalación de metrocontadores inteligentes es bastante complejo y complicado por naturaleza. Para la instalación de metrocontadores inteligentes, se requieren profesionales calificados y capacitados. Este personal debe seguir los mandatos del gobierno durante este proceso. Debería haber seguridad de datos y privacidad asociada con los metrocontadores inteligentes. Por lo tanto, la falta de profesionales calificados es el mayor desafío para el crecimiento y desarrollo del mercado mundial de metrocontadores inteligentes [23].

Conclusiones parciales

Los metrocontadores inteligentes constituyen un elemento fundamental para dar el salto hacia las redes eléctricas inteligentes. Estos, con respecto a los anteriores metrocontadores electromecánicos, introducen nuevas funcionalidades y ventajas. Por sus características

brindan más seguridad y confiabilidad en la facturación del consumo eléctrico. Sus componentes brindan flexibilidad a la hora de diseñar estos metrocontadores inteligentes, pudiéndose implementar en ellos diversas tecnologías de comunicación de información, en dependencia de las condiciones existentes para su instalación. A nivel global existen varios fabricantes de metrocontadores inteligentes y el mercado de estos equipos está en constante aumento, sin embargo, su despliegue no es equitativo en todas las regiones del mundo.

CAPÍTULO 2. INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA

En el presente capítulo se desarrolla una investigación sobre la infraestructura de medición avanzada (AMI) en las redes eléctricas. Se describen sus características y estructuras además de los diferentes elementos que la componen. Se muestran las diferentes partes en que se divide una AMI y las particularidades que estas poseen. También se describen las tecnologías de comunicación que pueden utilizarse en AMI, con sus respectivos protocolos, clasificándolas por el alcance geográfico de cada una.

2.1 Características y estructuras de la Infraestructura de Medición Avanzada

De acuerdo con la definición del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (*Electric Power Research Institute*, EPRI), con sede en los Estados Unidos, establecida por los proveedores de servicios eléctricos, AMI es un sistema que consta de hardware y software electrónico-digital moderno, que permite la medición de datos de forma intermitente y la comunicación remota de forma continua. Estos sistemas tienen una infraestructura que puede realizar mediciones detalladas, recopilar información basada en el tiempo constantemente y compartir esta información con las partes según sea necesario [8].

La infraestructura de medición avanzada consta de componentes físicos y virtuales, incluidos sensores, sistemas de monitoreo, metrocontadores inteligentes, software, sistemas de gestión de datos y redes de comunicación. AMI es responsable de recopilar, analizar y almacenar datos de medición enviados desde sensores y sistemas de monitoreo y metrocontadores inteligentes en el usuario final a las empresas de servicios públicos para facturación, administración de redes y pronósticos [28], [29]. La infraestructura de medición avanzada no es una sola tecnología, es una configuración de infraestructuras que

integra cierto número de tecnologías para alcanzar su fin. Esta arquitectura es una evolución de la lectura automática de metrocontadores (*Automated Meters Reading*, AMR)

Los sistemas AMR quedan por detrás de AMI, ya que los AMR funcionan con tecnologías menos desarrolladas, como apagar electrodomésticos manualmente, recopilar datos (no en tiempo real) mensualmente, etc., pero las infraestructuras de medición avanzadas tienen unidades de gestión y control remoto, operaciones en tiempo real, opciones de clientes/precios/servicios públicos, al agregar un marco de comunicación bidireccional, que se implementó para facilitar la lectura de metrocontadores, la facturación y la planificación del consumo. Esta función de comunicación bidireccional de AMI también ofrece operaciones adicionales en una red. Por lo tanto, la transición a avanzadas infraestructuras de medición es crucial para construir estructuras de redes inteligentes.

Una AMI es un sistema intermedio entre el dominio del usuario y el dominio de la utilidad (proveedor del servicio). Sus objetivos principales son la tarificación de la energía y la gestión de la demanda. Una arquitectura AMI generalmente cuenta con tres tipos principales de componentes [30]:

- 1) Un metrocontador inteligente que se puede usar para registrar el consumo de energía eléctrica, agua o gas y transferir información de consumo a una empresa proveedora de servicios públicos. También se utiliza para recibir comandos o señales de precios de una empresa de servicios públicos.
- 2) Sistema de Gestión de Datos de Medición (*Metering Data Management System*, MDMS), componente crítico para realizar las funciones potenciales de AMI, cuyas principales funciones incluyen: automatizar y simplificar el complejo proceso de recopilación de datos del metrocontador desde múltiples tecnologías de recolección de datos de metrocontadores, evaluar la calidad de esos datos generando estimaciones cuando existan errores y pérdidas de información y entregar esos datos en un formato apropiado a los sistemas de facturación de servicios públicos.
- 3) La red de comunicación es otro componente importante de AMI, que proporciona un canal para intercambiar información entre los usuarios finales y el proveedor. Con comunicaciones bidireccionales, las empresas de servicios públicos pueden monitorear el consumo en tiempo real de los usuarios finales; y, al mismo tiempo, los usuarios

finales pueden participar activamente en la operación del sistema al recibir señales de precio o control de dichas empresas.

El diseño de una infraestructura de red de comunicaciones robusta es importante para que se logre una operación confiable y eficiente en las redes eléctricas inteligentes. Hay varios modelos de arquitectura de AMI en redes eléctricas inteligentes, pero todos siguen una estructura similar de varias capas. Uno de estos modelos define las tres capas principales como:

- 1) Capa de Hardware: en esta se incluyen los SMs, CDs y el proveedor.
- 2) Capa de Datos: en esta capa se procesa la información para emitir mensajes de seguimiento y control, así como utilizar los datos relevantes para el cliente, que pueden representar el consumo de electricidad del usuario o los comandos enviados desde el proveedor, para aplicaciones como gestión de la demanda, lectura automática de metrocontadores y detección de fraude o mal uso.
- 3) Capa de Comunicaciones: puede ser cableada o inalámbrica y proporciona interconexión entre todos los componentes del sistema, mediante la recopilación de datos de sensores e interfaces de usuario final, para transmitirlos a centros de datos y viceversa.

Estas tres capas descritas anteriormente se ilustran en la Figura 2-1.



Figura 2-1: Capas de AMI y sus componentes [31].

Se pueden utilizar varias arquitecturas para implementar una AMI según los componentes y la tecnología de comunicación utilizada. La arquitectura debe cumplir con el objetivo

principal de la AMI, que es enviar datos de los metrocontadores inteligentes a la empresa que brinda el servicio eléctrico, a través de un canal de comunicación bidireccional [32]. En términos de interconexión, hay dos categorías principales de arquitectura AMI: directa e indirecta [33]. En una arquitectura directa, un metrocontador inteligente se conecta directamente al centro del proveedor del servicio eléctrico, a través de una red de comunicación, ya sea cableada o inalámbrica, sin necesidad de un concentrador de datos (CD), que también se denominan puertas de enlace de metrocontadores inteligentes o agregadores de datos. La ventaja de una arquitectura directa es la implementación simple. Este tipo de arquitectura es apropiada para un área pequeña y cuando la cantidad de usuarios y la cantidad de datos es baja. Con más usuarios y datos, una arquitectura directa ya no es la elección óptima, por lo que se utilizaría una arquitectura indirecta. Una arquitectura indirecta tiene un intermediario entre los metrocontadores inteligentes y el proveedor. El intermediario puede ser la nube, para que los datos sean reenviados por internet. Alternativamente, para una arquitectura basada en agregadores, hay CD entre los metrocontadores inteligentes y la empresa del servicio [34]. En la Figura 2-2 se ilustran los principales componentes de hardware que conforman una arquitectura AMI, así como los 3 tipos de redes que, por extensión geográfica, componen una AMI.

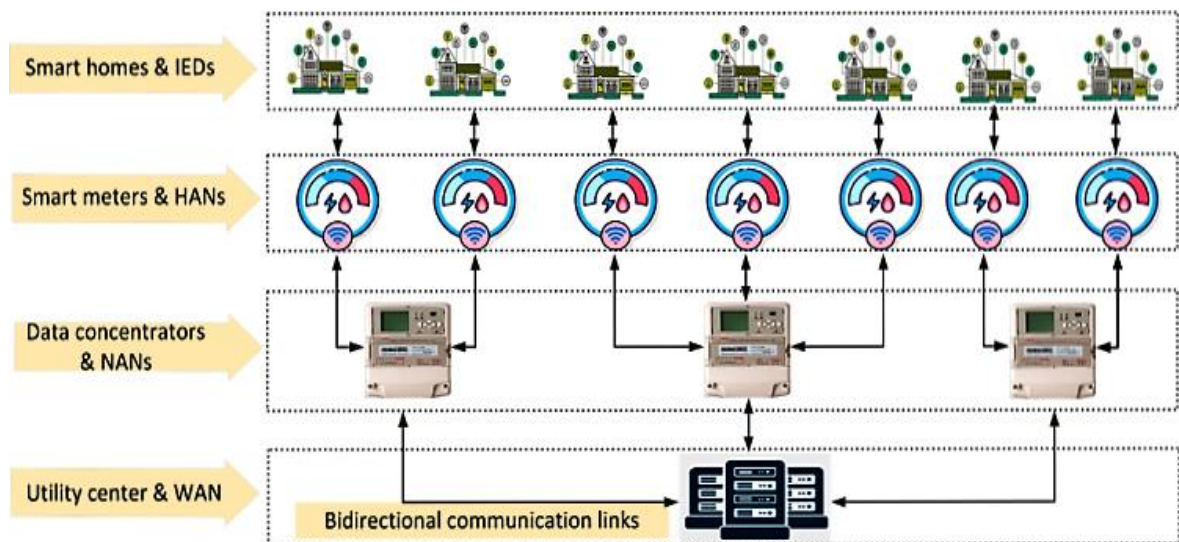


Figura 2-2: Elementos de hardware y estructura general de una AMI.

Usualmente la red de comunicación usada para AMI está compuesta por Redes de Área Amplia (*Wide Area Network*, WAN), Redes de Área de Vecindad (*Neighborhood Area Network*, NAN) y Redes de Área Doméstica (*Home Area Network*, HAN).

- **HAN:** Es la primera capa de la red que consta de todos los electrodomésticos de los hogares, dispositivos inteligentes, vehículos eléctricos, fuentes de energía renovable (calentamiento solar de agua, horno solar, paneles solares). A partir de estos dispositivos, la red necesita datos sobre el comportamiento del consumo y el uso de energía. Para proporcionarlo sin un gran aumento del consumo, se necesitan tecnologías de comunicación de bajo consumo energético. Estas cuentan con una velocidad de transmisión de datos relativamente baja. HAN se ubica en la vivienda o edificio residencial, en estructura empresarial y plantas comerciales. Esto básicamente integra los metrocontadores inteligentes con el nodo de la red, por ejemplo, la unidad concentradora de datos, que generará una gran demanda de tráfico, utilizada para la evaluación de los parámetros de la red inteligente como la precisión y la seguridad [35].
- **NAN:** La capa intermedia de AMI, es una colección de una gran cantidad de diferentes tipos de información proveniente de múltiples HAN y difunde señales de control desde y hacia una gran cantidad de dispositivos eléctricos introducidos en las instalaciones del cliente y también transmite a las unidades de CD que conecta las NAN a la WAN de la red inteligente [36]. Todos los metrocontadores inteligentes en el área vecina forman una red de malla, transmiten sus datos a través de NAN a la red de retorno (*backhaul*³), que luego se comunican con la red central con la ayuda de la red de área amplia (WAN). En NAN, los datos se transmiten entre una enorme cantidad de consumidores, subestaciones y dispositivos de campo. Por lo tanto, las tecnologías de comunicación utilizadas en NAN deberían admitir una velocidad de datos máxima que oscila entre 0,1 Mbps y 10 Mbps con un área de cobertura de aproximadamente 10 km. Los datos adquiridos del metrocontador inteligente se utilizan con fines de seguimiento y control. Tanto las tecnologías inalámbricas como las cableadas son factibles para conmutar datos a través de NAN [37].

³ Interconecta redes utilizando diferentes tipos de tecnología alámbricas o inalámbricas

- **WAN:** Sirve como red troncal para el sistema de energía, ya que une la conexión entre redes más pequeñas ampliamente distribuidas (NAN, BAN, IAN) y la red central principal. Los datos en tiempo real de las subestaciones remotas y los consumidores se transmiten a través de WAN. Estos datos son utilizados por el sistema de gestión de energía para el control, monitoreo y protección en tiempo real de la red eléctrica. WAN requiere un gran ancho de banda para enviar datos desde la red de *backhaul* al centro de control principal. Los medios de comunicación utilizados para WAN suelen tener el mayor alcance, baja latencia, mayor velocidad de datos y mayor ancho de banda. Tanto las tecnologías inalámbricas como las cableadas se pueden utilizar para la conectividad WAN [29].

Por otro lado, también ha sido centro de atención en las investigaciones, la seguridad que AMI ofrece, ya que esta se deben aplicar fórmulas para evitar fraudes eléctricos y robo de energía. En [38] se hace una investigación de la seguridad de las redes y propone contramedidas para evitar la infiltración de agentes externos ajenos a la infraestructura. Mientras que en [39], se estudian los ciberataques para robar energía, que buscan evadir los pagos correspondientes al consumo. Para contrarrestar estas vulnerabilidades, se examinan cinco técnicas para abordar o minimizar las violaciones de la confidencialidad y la privacidad. También los métodos de encriptación han sido de particular importancia, ya que, los equipos destinados a la medición del consumo son de bajos recursos, por lo que no se pueden hacer encriptaciones suficientemente fuertes. En [40], proponen un nuevo esquema de gestión de claves para la comunicación segura entre el metrocontador inteligente y los dispositivos HAN del sistema AMI en la red inteligente para reducir el costode cambio de clave.

2.2 Tecnologías de comunicación utilizadas para HAN, NAN y WAN.

En esta sección se describen varias tecnologías de comunicación que son utilizadas según el área geográfica abarcada por las redes, tomando en consideración protocolos y normativas que permiten la transmisión de información entre metrocontadores eléctricos inteligentes, concentradores de datos y las empresas de servicio eléctrico.

2.2.1 HAN

La infraestructura de comunicación necesaria para el nivel de cliente en una AMI debe proporcionar una comunicación de bajo costo y eficiencia energética con un nivel de seguridad y confiabilidad aceptable para distancias de cobertura cortas (hasta 100 m).

- **Modbus:** es un protocolo de comunicación creado por Modicon en 1979 como un protocolo de comunicaciones en serie desarrollado con aplicaciones industriales en mente. Permite la comunicación de muchos dispositivos en la misma red, es fácil de mantener e implementar. Publicada abiertamente y libre de derechos, se ha convertido en un protocolo de comunicación estándar para conectar dispositivos electrónicos industriales. Entre todas las versiones de protocolo de Modbus, las más utilizadas son Modbus RTU (generalmente a través de la comunicación serie RS485) que sigue un mecanismo de verificación de errores para garantizar la fiabilidad de los datos; y Modbus TCP / IP es una variante de Modbus utilizada para las comunicaciones a través de redes TCP / IP, que no requiere un cálculo de suma de comprobación como Modbus RTU, ya que las capas inferiores ya proporcionan protección de suma de comprobación [41].
- **M-Bus o Meter Bus:** es un estándar europeo para la lectura remota de metrocontadores de electricidad, gas y agua. Fue desarrollado para permitir la lectura remota y la conexión en red de metrocontadores de servicios públicos. Utilizado principalmente para el intercambio de datos unidireccional o bidireccional con metrocontadores de gas, agua y calor. También se puede utilizar con varios sensores y actuadores. El protocolo también admite la alimentación remota de dispositivos de comunicación a través de cables de datos (alimentación sobre datos). Está estandarizado por CEN TC 294, "Sistemas de comunicación para metrocontadores y lectura remota de metrocontadores" en la serie EN 13757. Este EN 13757-1 [42], es un estándar general para el intercambio de datos de metrocontadores, que cubre varios medios físicos, protocolos y el modelo de datos de aplicación COSEM. M-Bus se puede utilizar alternativamente con DLMS/COSEM [43]: la capa de aplicación COSEM especificada en IEC 62056-53, los objetos COSEM especificados en IEC 62056-62 y el sistema de identificación de objetos (*Object Identification System, OBIS*), especificado en IEC 62056-61 (electricidad) y en EN 13757-1 (que no sea electricidad). M-Bus es un protocolo optimizado desde el punto

de vista del metrocontador, que permite implementaciones simples y de bajo costo y una batería de larga duración [44].

- **DATOS POR PSTN:** La transmisión de datos a través de la red telefónica pública conmutada (*Public Switched Telephone Network*, PSTN) se ha utilizado desde hace mucho tiempo. Con los avances en las tecnologías de módem de banda de voz en los últimos años, la velocidad de transmisión ha aumentado de manera constante, prácticamente alcanzando el límite de Shannon del canal de línea telefónica analógica de extremo a extremo con ancho de banda limitado (0,3 a 3,1 kHz) con el estándar V.34. El estándar V.34bis logra un rendimiento máximo de 33,4 kbps en un canal completamente analógico. Se basa en modulación de orden superior codificada en rejilla y técnicas de ecualización sofisticadas. Con la digitalización de la PSTN detrás de la central local (oficina final) que proporciona un canal digital de 64 kbps por llamada telefónica, el uso de estándares de módem aún más rápidos ha sido posible para unir el segmento analógico restante de 'última milla' únicamente.
 - ❖ La V.92 es una recomendación ITU-T [45], titulada Mejoras a la Recomendación V.90 que establece un estándar de módem que permite una descarga cercana a 56 kb/s y 48 kb/s de subida.
- **Wavenis:** fue originalmente una tecnología patentada creada por Coronis Systems en 2001. En 2008, Coronis abrió la tecnología y la ofreció al mercado para la estandarización de la industria. Wavenis Wireless Technology es un sistema inalámbrico bidireccional diseñado para operar en bandas UHF ISM. Las características principales de la tecnología Wavenis son: comunicaciones de baja velocidad de datos en el rango de 4,8 kbps a 100 kbps (19,2 kbps típico) [46]. Esto cumplen con los requisitos para aplicaciones de medición, transceptores de radio con consumo de energía ultra bajo en metrocontadores para lograr una operación de varios años con dispositivos alimentados por batería y alto presupuesto de enlace para lograr un gran alcance de radio y penetración de señal interna. El protocolo Wavenis define las 3 capas más bajas del modelo de referencia OSI. La capa física especificada proporciona un uso mundial al operar en las principales bandas ISM sin licencia y cumple con los siguientes estándares regulatorios: 868 MHz (EU EN300-220), 915 MHz (US FCC15-247, 15-249), 433 MHz (Asia), 2400 MHz (en todo el mundo). Las aplicaciones actuales de la tecnología

Wavenis son la telemetría, la automatización industrial, el monitoreo de metrocontadores de servicios públicos AMI y AMR, la comodidad del hogar, las alarmas para proteger a las personas y la propiedad, la atención médica en el hogar, la administración centralizada de edificios, etc. [47].

- **IEEE 802.15.1 (Bluetooth):** es un protocolo inalámbrico abierto para el intercambio de datos en distancias cortas desde teléfonos y dispositivos móviles, destinado a ser una forma segura y económica de conectar y transferir datos entre dispositivos compatibles, creando redes de área personal (*Personal Area Network*, PAN). Originalmente fue concebido como una alternativa inalámbrica a los cables de datos RS232. En la actualidad, hay muchas versiones de Bluetooth disponibles, como *Bluetooth Low Energy* (BLE), que es una tecnología de transmisión inalámbrica de corto alcance que tiene como objetivo la comunicación de baja complejidad y bajo costo en una red de área de cuerpo (*Body Area Network*, BAN) inalámbrico mediante el uso de bandas de radio de frecuencia de 2.4 a 2.485 GHz. Aunque puede conectar varios dispositivos, superando problemas de sincronización, solo admite un número limitado de nodos [48].

❖ (*Bluetooth Low Energy*, BLE) es algo más que una versión de baja energía de Bluetooth. En realidad, sus implementaciones son diametralmente opuestas a las aplicaciones Bluetooth estándar. Es probablemente la forma más forma más aparente de tecnología inalámbrica para enviar y recibir pequeñas cantidades de datos con muy poco consumo de energía. Funciona en un espectro de frecuencia de 2,4 GHz con una latencia de 6 ms. Puede manejar 1 Mbps, mientras que el Bluetooth tradicional puede manejar hasta 3 Mbps. Los dispositivos BLE suelen alimentarse con una pequeña batería con una pila de botón, lo que los hace más eficientes energéticamente que ZigBee, Bluetooth clásico y Wi-Fi (Panetas et al., 2020). Es compatible con las redes de malla y permite redes de malla con una capacidad de 32.767 sistemas o nodos. Debido a su escaso ancho de banda y a su limitado alcance (normalmente de 30 m a 100 m), no puede ser implementado en proyectos de IoT. Su aplicación incluye rastreadores de fitness, smartwatches y dispositivos médicos (medidores de glucosa, bombas de insulina) [49].

- **IEEE 802.15.4 (*Wireless Personal Area Network*, WPAN)** [50] : El estándar opera en uno de tres posibles bandas de frecuencia sin licencia:

- ❖ 868-868,8 MHz: Europa, permite un canal comunicación.
- ❖ 902-928 MHz: Norteamérica, hasta treinta canales.
- ❖ 2400-2483,5 MHz: uso mundial, hasta dieciséis canales.

ZigBee: es un protocolo basado en estándares que proporciona la infraestructura de red necesaria para las aplicaciones de red de sensores inalámbricos. ZigBee es el protocolo de comunicación, que se basa en las capas IEEE 802.15.4 MAC y PHY, desarrollado por La IEEE y Zigbee Alliance [51]. Se utiliza en aplicaciones que requieren una velocidad de datos baja, batería de larga duración, bajo costo y redes seguras. Las aplicaciones incluyen interruptores de luz inalámbricos, metrocontadores eléctricos con pantallas en el hogar, sistemas de gestión del tráfico y otros equipos industriales y de consumo que requieren una transferencia inalámbrica de datos de corto alcance a velocidades relativamente bajas. Permite la conexión de hasta 60.000 dispositivos a su red, con una velocidad entre 20 y 250 kb/s, adecuada para datos periódicos o intermitentes o una transmisión de señal única desde un sensor o dispositivo de entrada. La tecnología definida por la especificación ZigBee pretende ser más simple y menos costosa que otras redes inalámbricas de área personal (WPAN), como Bluetooth o Wi-Fi. Las redes ZigBee están protegidas por claves de cifrado simétrico de 128 bits. Existe una aplicación “ZigBee Smart Energy” que permite la integración de metrocontadores inteligentes en la red ZigBee junto con otros dispositivos. Al usar esta aplicación, los metrocontadores inteligentes pueden recopilar información de los dispositivos integrados y controlarlos. Además, los consumidores pueden ver su consumo de energía en tiempo real. También permite un mejor consumo de energía y precios dinámicos en tiempo real. Las redes de malla ZigBee son ideales para algunas aplicaciones de medición debido a sus capacidades inherentes de redundancia, autoconfiguración y autorreparación, pero su funcionamiento en frecuencia sin licencia de 868 MHz y 2,4 GHz puede tener interferencias con otras señales de Wi-Fi, Bluetooth y Microondas [52].

- **6LoWPAN:** es un acrónimo de IPv6 sobre redes de área personal inalámbricas de baja potencia. 6LoWPAN es el estándar del Grupo de trabajo de ingeniería de Internet IETF [53] publicado en 2007, que optimiza IPv6 para su uso con tecnologías de comunicación de bajo consumo y bajo ancho de banda, como IEEE 802.15.4. El grupo 6LoWPAN

tenía como objetivo definir mecanismos de compresión de encabezados que permitieran enviar y recibir paquetes IPv6 a través de redes basadas en IEEE 802.15. La especificación básica desarrollada por el grupo 6lowpan IETF es el RFC 4944. 6LoWPAN podría realizar el concepto principal de la "Internet de las cosas" al hacer posible la asignación de una dirección IP a los dispositivos, sensores y actuadores más pequeños.

- **IEEE 802.11 (WLAN/Wi-Fi)** [54] : En los últimos años, las tecnologías inalámbricas de banda ancha basadas en el estándar IEEE 802.11 han encontrado una amplia aceptación en todo el mundo para las redes de área local inalámbricas (WLAN). Estas tecnologías WLAN están diseñadas para funcionar en las bandas de frecuencia ISM de 2,4 GHz o 5 GHz. WLAN admite servicios similares a los que ofrecen las LAN con cable (p. ej., Ethernet) y se puede utilizar para construir redes informáticas fijas o móviles. La Wi-Fi es una tecnología muy recomendable para la interconexión de los dispositivos que integran la HAN, dado que provee una comunicación inalámbrica robusta en entornos ruidosos y de espectro compartido. y de alta tasa de transferencia que puede ser punto a punto o punto a multipunto.. Hoy en día, la familia de estándares IEEE 802.11 es la más establecida (IEEE802.11 a, b, g, h, n) y las tasas de datos varían de 2 Mbit/s a 300 Mbit/s. El ancho del canal en todos los estándares está entre 10 y 30 MHz. Debido al acceso al canal y la sobrecarga de señalización, aproximadamente el 50 % de las tasas de datos de la capa física están disponibles como rendimiento real del usuario. Opera en bandas sin licencia del espectro y brinda mecanismos que posibilitan un desempeño Se incluye además el soporte de aplicaciones IP (tanto IPv4 como IPv6) y su globalización dentro de los fabricantes. Como desventaja se puede señalar un mayor consumo de energía en comparación con otras tecnologías como Bluetooth o las basadas en el estándar IEEE 802.15.
- ❖ **IEEE 802.11s** [55] : dentro de la tecnología Wi-Fi esta este estándar, que es una extensión al estándar 802.11, que añade la capacidad de enrutamiento multi-salto. Es una actualización de los tipos de red de 802.11 que solo permitía los modos BSS (*Basic Service Set*) e IBSS (*Independent Basic Service Set*) en despliegues de redes de área local inalámbrica (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Network*). Los cambios en esta actualización fueron realizados en la capa MAC del estándar original,

por lo que opera en las mismas bandas (2.4 y 5 GHz) y permite rangos de transmisión similares a su predecesor (hasta 140 metros teóricamente). A pesar de ser un estándar robusto y de tener la capacidad de sobreponerse a fallas en los enlaces, los rangos de transmisión que pueden alcanzar los dispositivos se tornan insuficientes para el nivel NAN. Las ventajas de la WLAN son el bajo costo, la amplia implementación en todo el mundo y los dispositivos *plug and play*. La principal desventaja de WLAN es el alto potencial de interferencia con otros dispositivos que se comunican en las mismas frecuencias.

2.2.2 NAN

Debido al aumento del tamaño de los datos y la cantidad de clientes en una NAN en comparación con una HAN, la tecnología de comunicación debe poder transferir una gran cantidad de datos de manera más segura. Así, se utilizan redes inalámbricas, RF y sistemas de comunicación por línea eléctrica mayormente.

- **ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*):** La línea de abonado digital asimétrica es una tecnología de comunicaciones de datos que permite una transmisión de datos mucho más rápida a través de líneas telefónicas de cobre que la que pueden proporcionar los módems de banda de voz convencionales y evita el aumento de los costes de implementar una red de comunicación separada de los servicios eléctricos. Lo hace utilizando frecuencias muy por encima de la banda de voz (>25 kHz). La banda de 25,875 kHz a 138 kHz se utiliza para el flujo ascendente, mientras que de 138 kHz a 1104 kHz se utiliza para el flujo descendente. VDSL, HDSL y ADSL son los tres tipos de DSL disponibles. DSL tiene un rango de frecuencia de 2kHz a 1MHz y una latencia de 10 a 70 ms. La distancia y la eficiencia de la DSL, por otra parte, son inversamente proporcionales, como lo demuestran los tres tipos de DSL. La VDSL tiene una velocidad de datos de 15 a 100 Mbps y un rango de cobertura de hasta 1,2 km. HDSL y ADSL, en cambio, tienen un rango de cobertura mayor, de hasta 3,6 km y 5 km, respectivamente, pero ambos tienen una velocidad de datos baja, de 2 Mbps y 1-8 Mbps. Además, el coste de la DSL puede ser elevado, ya que los proveedores de telecomunicaciones pueden cobrar a las empresas de servicios públicos tarifas exorbitantes por utilizar sus redes

[56]. Con ese panorama su uso a tarifa plana hace de esta tecnología un candidato interesante en un concepto AMI.

- **Plextek:** es una solución de radio de bajo costo para aplicaciones de telemetría de área amplia, lectura automática de metrocontadores, control y monitoreo de datos con requisitos de velocidad de datos modestos. Plextek se basa en una tecnología patentada de banda ultra estrecha (*Ultra Narrow Band*, UNB) con salto de frecuencia adicional y técnicas patentadas de procesamiento de señales digitales para mejorar la sensibilidad del receptor en presencia de interferencias, como es típico en las bandas libres de licencia. El sistema opera en las bandas de frecuencia ISM de 868 MHz o 915 MHz. Las características clave del sistema son: equipo de estación externa de bajo costo, arquitectura de punto a multipunto, 'modo de retransmisión' de corto alcance (100 m), radio de celda típico de 2 a 20 km según las alturas de la antena y el entorno de propagación. Puede manejar un gran número de estaciones remotas (típicamente 5000 - 433/868 MHz en Europa con una potencia de transmisión de 200 mW. 10.000) por concentrador (estación base). El número real de estaciones remotas depende de los volúmenes de transmisión de datos. El sistema completo incluye protocolo de radio completo, instalaciones de registro de datos, una amplia gama de interfaces y protocolos estándar para comunicaciones centrales. Es adecuado para la conexión directa de concentradores a Internet [57].
- **Ethernet:** Ethernet es una popular tecnología de comunicación por cable para redes de área prometida, que generalmente proporciona conexiones de red de área local (LAN) y de red de área amplia (WAN). El estándar Ethernet se basa en la norma IEEE 802.3. La implementación de Ethernet requiere cables, que pueden ser coaxiales, de par trenzado o de fibra óptica, así como un concentrador o un conmutador de red. Ethernet puede proporcionar velocidades de datos que van desde los 10 Mbps hasta los 100 Gbps. Dado que Ethernet es una red cableada, es inmune al ruido. Sin embargo, una vez colocada la red, es difícil hacer cambios. Los dispositivos pueden conectarse a una red Ethernet de varias maneras, utilizando cableado de cobre de "par trenzado" o fibra óptica. Por lo general, en las redes de instalaciones del cliente (*Customer Premises Network*, CPN) se utiliza el cableado de cobre. Con un cable de cobre que se conecta a un concentrador o a un conmutador en una topología en estrella, se pueden alcanzar diversas velocidades,

como: 10 Mbps, 100 Mbps, 1000 Mbps y 10000 Mbps. 100 Mbps es la velocidad más común que se encuentra en las instalaciones de los clientes [58].

- **Comunicaciones por Línea Eléctrica (PLC):** La comunicación por línea eléctrica, transporta datos en un conductor, que también se usa simultáneamente para la transmisión de energía eléctrica de CA o la distribución de energía eléctrica a los consumidores, es decir, implica utilizar la misma red para el transporte de electrones y datos. No se necesita cableado adicional ya que el metrocontador está conectado a la red en cualquier caso. Por lo tanto, los sistemas de PLC a menudo se consideran una "solución rentable y directa" [22]. Cuando se compara con tecnologías inalámbricas, las tecnologías PLC también tienen ventajas en el despliegue de metros dentro de los hogares o incluso en sótanos. El ruido creado por los componentes electrónicos de potencia en el canal es una de las principales preocupaciones de esta forma de comunicación [59]–[61]. La distorsión de los datos en torno a los transformadores y la necesidad de evitarlo ante otras técnicas de comunicación es otra desventaja del PLC. Extensas mediciones de campo muestran que las características del canal PLC difieren significativamente de un entorno a otro, lo que lleva a un rendimiento variable [62]. El gran despliegue de cables eléctricos también hace que la combinación de la técnica PLC con otras tecnologías de comunicación (por ejemplo, radiofrecuencia, comunicación de luz visible, etc.) sea un enfoque atractivo para ampliar la cobertura de la comunicación, permitiendo así una variedad de aplicaciones como el hogar inteligente, Internet de las cosas, etc. [63]–[65].

❖ **PRIME (*Powerline Intelligent Metering Evolution*)** [66]: es la especificación de las capas inferiores de un sistema para proporcionar una solución de PLC de banda estrecha abierta y libre de regalías para la capa PHY y MAC, junto con la definición de ciertas capas de convergencia. PRIME está destinado a operar en la banda A de CENELEC en redes eléctricas de BT. PRIME busca la interoperabilidad para equipos y sistemas de diferentes proveedores. Los miembros PRIME, involucrados en la definición de la tecnología, incluyen Advanced Digital Design, CURRENT Group, ERDF - Electricité Réseau Distribution Landis+Gyr, STMicroelectronics, uSyscom y ZIV Medida. La capa PRIME PHY se basa en canales OFDM adaptativos junto con FEC. La ventaja de OFDM es su capacidad para hacer frente a condiciones de canal

severas, como la atenuación selectiva de frecuencia y la interferencia de banda estrecha, sin complejos mecanismos adicionales (por ejemplo, filtros de ecualización). Además, OFDM es espectralmente eficiente, lo que permite velocidades de datos más altas dado el rango de frecuencia utilizable limitado en la banda A de CENELEC. 2, 4 u 8.

- ❖ **SITRED, LonTalk / Telegestore:** La empresa de distribución de energía más grande de Italia, ENEL, comenzó en octubre de 1999. proyecto Telegestore. Los metrocontadores electrónicos se comunican con un concentrador cercano al transformador a través de PLC (DLC en terminología IEC). El concentrador se comunica con el centro de adquisición a través de un servidor de acceso vía GSM, PSTN o satélite. Se utilizan dos protocolos de comunicación (que utilizan PLC): una versión mejorada de LonTalk y, más recientemente, ENEL reintrodujo su protocolo propietario SITRED que se utilizó en el proyecto piloto original. SITRED utiliza una solución simple basada en FSK de banda estrecha (CENELEC banda A, 2400 baudios ⁴). LonTalk y SITRED difieren en las capas PHY y MAC, pero se utilizan la misma capa de aplicación [57].
- ❖ **PLC Linky [67] :** ERDF, el operador de red de distribución de electricidad más grande de la Unión Europea, ha publicado las especificaciones del protocolo de comunicaciones de línea eléctrica para la comunicación de metrocontador/concentrador desarrollado e implementado por Atos Origin y Trialog. El protocolo es la columna vertebral del Laboratorio PLC, que garantizará la interoperabilidad de los equipos de medición y servirá como la única autoridad de certificación para dispositivos de todos los fabricantes de equipos. IskraEmeco, Itron y Landis+Gyr ayudaron a desarrollar el protocolo abierto y ya han demostrado su capacidad para garantizar la interoperabilidad de sus equipos. El objetivo de los protocolos PLC implementados para el proyecto Linky es permitir que un dispositivo Cliente (el concentrador) se comunique con los dispositivos Servidor (los metrocontadores) utilizando los servicios definidos por la capa de aplicación COSEM o DLMS sobre una infraestructura de red PLC. La capa de aplicación de COSEM está

⁴ Baudio (baud): Es una unidad de la velocidad de transferencia de una señal, relacionada con la capacidad de transmisión de un sistema y no con el volumen de información transmitido (calculado en bits por segundo)

definida por la serie de estándares IEC 62056 y sus extensiones descritas en los libros DLMS UA. La capa de aplicación DLMS y las capas inferiores del protocolo están definidas por el subconjunto de las normas IEC 61334-4. Este objetivo de comunicación también incluye la gestión de la red, utilizando los servicios proporcionados por la capa CIASE descritos en IEC 61334-4 [68].

- ❖ **G3-PLC [67]:** es una especificación de comunicaciones de línea eléctrica basada en estándares que promueve la interoperabilidad en implementaciones de redes inteligentes en todo el mundo. Promueve la interoperabilidad, la operación 10 kHz a 490 kHz cumple con FCC, CENELEC y ARIB, coexiste con los sistemas IEC 61334, IEEE® P1901 e ITU G.hn. Transmisión de más de 6 km en líneas de media tensión, la comunicación a través de transformadores permite menos concentradores de datos Robustez incorporada con PHY basado en OFDM. La capa MAC basada en IEEE 802.15.4 es adecuada para velocidades de datos más bajas. El modo robusto supera las condiciones de canal ruidosas. Dos capas de corrección de errores hacia adelante. La capa de adaptación 6LoWPAN admite paquetes IPv6 y un motor criptográfico AES-128 rápido.
- ❖ **HomePlug 1.0 y HomePlug AV:** son los dos principales estándares industriales para comunicaciones por línea eléctrica de banda ancha (BPL) especificados por The HomePlug Alliance [69], un gran grupo de partes interesadas que abarca unas 70 empresas. HomePlug 1.0 se ha especificado con un enfoque específico en las redes domésticas (LAN internas en el cableado de alimentación existente), mientras que HomePlug AV apunta a la distribución de audio y video en el hogar a través de líneas eléctricas. En mayo de 2008, ANSI/TIA incorporó la tecnología de línea eléctrica HomePlug 1.0 en el estándar internacional TIA-1113 recién publicado. Al igual que WLAN 802.11a/g, HomePlug 1.0 se basa en OFDM y un protocolo CSMA/CA, pero utiliza el rango de frecuencia de 4 a 21 MHz a través de la línea eléctrica [70].
- ❖ **OPERA/UPA:** es otro estándar industrial para BPL, que ha sido promovido por Universal Powerline Association (UPA) [71] y especificado por Open PLC European Research Alliance [72], un consorcio de unos 26 socios, dentro de proyectos financiados por la CE OPERA I y OPERA II. OPERA/UPA se basa en la tecnología desarrollada por la casa española de diseño de chips con sede en Valencia DS2 con

un enfoque específico en el mercado de acceso a la "última milla". Actualmente, el estándar OPERA también incluye mejoras para redes internas. OPERA/UPA opera en el rango de frecuencia de 2 a 32 MHz utilizando un esquema OFDM cuidadosamente diseñado con un espaciado de portador estrecho (típicamente <10 kHz) y un espectro de transmisión bien definido. Admite varios modos de ancho de banda (10, 20, 30 MHz) y notching de frecuencia altamente eficiente configurable para proteger los servicios de radio si es necesario. El estándar admite una tasa máxima de carga útil de la capa PHY de 205 Mbps (semidúplex) con un rendimiento efectivo en el puerto Ethernet del orden de 130 Mbps [57].

2.2.3 WAN

En esta clasificación de red, se prefieren las técnicas celulares para comunicarse entre el consumidor y el control principal. La WAN tiene una velocidad de transmisión de datos muy alta de hasta unos pocos Gbps y se adoptan tecnologías como redes Ethernet, WiMAX, 3G/LTE y transmisión de microondas.

- **IEEE 802.16 (*Worldwide Inter-operability for Microwave Access* , WiMAX)** [73]: es una tecnología de acceso de banda ancha inalámbrica (BWA) basada en el estándar de la serie IEEE 802.16. Ha sido diseñado para proporcionar velocidades de transmisión de hasta 72 Mbit/s en ambas direcciones, soporta topologías de red punto a punto y punto a multipunto y multitud de modos de transmisión y anchos de banda para adaptarse a las diferentes condiciones de propagación y demandas del usuario. Puede ajustar dinámicamente la modulación de la señal y la codificación en dependencia del nivel de ruido presente en el enlace. Gracias a esto logra altas tasas de transferencia de datos. Brinda una comunicación segura utilizando encriptación AES (*Advanced Encryption Standard*) de 128 bits. Las características básicas de la interfaz aérea de WiMAX (IEEE 802.16e-2005) son un esquema OFDM escalable, anchos de banda que van de 1,25 MHz a 20 MHz, codificación y modulación adaptables mediante BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM, compatibilidad con múltiples antenas (técnicas MIMO) y modos FDD y TDD. Opera en las bandas 3,5 GHz y 5,8 GHz para comunicación fija y en 2,3 GHz, 2,5 GHz y 3,5 GHz para comunicaciones móviles, de estas la única no está licenciada es la de 5,8 GHz. Tiene un alcance de línea de visión (LOS) de 10-50 km y un alcance de no línea de

visión (NLOS) de 1 a 5 km. Se diseñó para hacer posible las transmisiones dúplex de banda ancha con una alta tasa de datos, por ejemplo, para la fijación de precios en tiempo real y la monitorización remota. Sin embargo, como las torres WiMAX se basan en costosos sistemas de radio, su implantación puede ser muy costosa [56].

- **FTTB, FTTH (*Fiber to the Building, Fiber to the Home*):** La fibra hasta las instalaciones (*Fiber to the Premises, FTTP*) [74], es una forma de entrega de comunicación de fibra óptica, en la que una fibra óptica se ejecuta directamente en las instalaciones de los clientes. Esto contrasta con otras estrategias de entrega de comunicaciones de fibra óptica, como la fibra hasta el nodo (*Fiber to the Node, FTTN*), la fibra hasta la acera (*Fiber to the Curb, FTTC*) o la fibra coaxial híbrida (*Hybrid Fibre-Coaxial, HFC*), todas las cuales dependen de métodos más tradicionales, como cables de cobre o cables coaxiales. cable para entrega de "última milla". Proporciona hasta 40 Gbps de alta tasa de transferencia de datos, alta fiabilidad, la especificación de frecuencia de hasta 353000 GHz, rango de cobertura (hasta 100 km) y una latencia muy baja de 3,34 μ s por km. Se utiliza con frecuencia para transmitir información en tiempo real o grandes datos a larga distancia, y actúa como sistema de comunicación. Sin embargo, la instalación y el mantenimiento de una red de fibra óptica pueden ser costosos [56]. Sin embargo, si una empresa de servicios públicos ya cuenta con un marco de fibra óptica, entonces se puede utilizar para metrocontadores inteligentes debido a la mayor seguridad y a la alta tasa de datos.
- **Tecnologías celulares (GSM):** estas tecnologías (2G/3G/4G), utilizan espectro con licencia para transferir los datos a través de frecuencias de radio. En consecuencia, son costosas y consumen más energía que otras tecnologías de tecnologías de comunicación inalámbrica. Durante mucho tiempo, la tecnología celular más utilizada para productos que no necesitan grandes cantidades de transmisión de datos ha sido el GSM (*Global System for Mobile Communication*) combinado con GPRS (*General Packet Radio Service*), lo que se debe principalmente a la amplia disponibilidad y al bajo coste del hardware GSM/GPRS. No obstante, la mayoría de los operadores de red de todo el mundo han eliminado el GSM, para que los smartphones 4G y 5G con grandes cantidades de transmisión de datos liberen más ancho de banda. Sin embargo, esta transición vendrá con un fuerte aumento de precio. Debido al alto consumo de energía y

al coste, las tecnologías celulares no son tan adecuadas para medición inteligente [75]. Además, los sistemas celulares tienen una latencia que va de 1 a 1000 ms y velocidades de datos que van de 100 a 10 Gb/s. La latencia oscila entre 500 ms y 1000 ms para 2G, GSM, GPRS, EDGE y CDMA con una velocidad de datos de 100 kbps. La velocidad de datos para 3G, UMTS y CDMA2000 está entre 384 y 2 Mb/s con una latencia de 200 ms. Por otro lado, la latencia y la velocidad de datos de 4G, LTE y LTE-A son de 100 ms y 150-45- Mb/s respectivamente. Por último, la 5G es una tecnología revolucionaria con una baja latencia de 1 ms y una velocidad de datos de 10 Gb/s [76].

- **(Low Power Wireless Area Network, LPWAN):** se puede utilizar la tecnología de red de área amplia de baja potencia si otras tecnologías inalámbricas como Bluetooth, Wi-Fi, BLE y ZigBee no son adecuadas para la aplicación en cuestión. Las redes celulares M2M (*Machine to Machine*) celulares son costosas, ya que utilizan espectro con licencia y consumen más energía, pero al mismo tiempo son más seguras que otras tecnologías inalámbricas disponibles. Esta tecnología es adecuada para dispositivos que transmiten pequeños datos a largas distancias y tienen baterías de larga duración. La LPWAN también puede dividirse en LoRa, NB-IoT Sigfox, y LTE-M [77].

❖ **Long Range, LoRa:** significa largo alcance y también se conoce como LoRaWAN. Es un sistema de modulación fiable creado por Cycleo, una empresa francesa que posteriormente adquirió Semtech. Se utiliza en las redes LoRaWAN para comunicaciones inalámbricas de baja potencia y largo alcance. Normalmente, las redes LoRaWAN se organizan en una topología de estrella en la que las pasarelas se encargan de transmitir los mensajes entre los nodos a un servidor central. Las pasarelas están conectadas mediante enlaces IP al servidor de la red, mientras que los nodos se conectan a una o más pasarelas utilizando comunicaciones LoRaWAN de un solo salto [78]. Utiliza el estándar de cifrado AES de 128 bits como seguridad. LoRa es una tecnología LPWAN sin licencia que opera en las bandas ISM 433, 868, 923 y 915 MHz con un ancho de banda de 125 kHz. El CSS o *Chirp Spread Spectrum* es la base de la modulación de LoRa porque ayuda a evitar el desvanecimiento por múltiples trayectorias. LoRa cubre de 8 a 10 km en las ciudades y 22 km en las zonas rurales, dependiendo del hardware utilizado. Tiene un rango de datos versátil de 0,3 a 50 kbps, determinado por variables de y una latencia media de 2 s. Debido a su baja

tasa de datos, LoRa sólo es adecuada para pequeñas cargas útiles (Li et al., 2018). Tiene un consumo de energía de unos 0,042 W y puede durar más de 15 años [79].

❖ (**Narrow Band IoT, NB-IoT**): es una tecnología celular LPWAN que utiliza espectro con licencia. Funciona en casi todas partes produciendo transacciones más estables y seguras. Enlaza de forma rápida y eficaz enlaza dispositivos en las redes móviles existentes utilizando una banda estrecha entre la señal portadora y maneja una pequeña cantidad de datos bidireccionales poco frecuentes de forma segura y fiable [78]. Es más segura que otras tecnologías de comunicación inalámbrica porque utiliza la encriptación 3GPP LTE de 128 a 256 bits como estándar de seguridad. Tiene menos latencia y más rendimiento que el LoRa. Como NB-IoT utiliza un espectro de frecuencias con licencia, aumenta su coste en comparación con LoRa, así como el consumo de energía de NB-IoT es mayor que LoRa. Transfiere grandes cantidades de datos, sobre todo en zonas inaccesibles: lugares remotos o rurales. En adición, utiliza 180 kHz de ancho de banda y un espectro de 900 - 1800 MHz con un área de cobertura de entre 35 - 50 km. La velocidad de datos de NB-IoT es de 250 kbps para las comunicaciones de enlace descendente y de 20-66 kbps para el enlace ascendente comunicaciones con una latencia inferior a 10 s. Nb-IoT tiene un inconveniente importante en que no permite el *handover* ⁵, lo que lo hace inadecuado para las aplicaciones de IoT móvil. Otro problema es la implementación de NB-IoT, que requiere una actualización de hardware del marco LTE actual (Islam et al., 2020). Por último, NB-IoT tiene un consumo de energía de unos 0,14 W y puede durar más de diez años [80].

❖ **Sigfox**: es un protocolo de comunicación unidireccional y una solución de red IoT de extremo a extremo. Utiliza la portadora de banda ultra estrecha de las bandas ISM sub-GHz (433, 868, 915 MHz) y la técnica de modulación (BPSK). Al reducir los niveles de ruido, esta banda extremadamente estrecha mejora el alcance de las comunicaciones. Sigfox limita las comunicaciones de enlace descendente a 4 transmisiones de carga útil de 8 bytes y la comunicación de enlace ascendente a 140 transmisiones de carga útil de 12 bytes para cada dispositivo o nodo final, lo que le da

⁵ Traspaso de una estación base a otra mientras el terminal mantiene activa una sesión de datos o una llamada de voz

una velocidad de datos de 100 a 600 bps con una latencia de 200ms. El rango de cobertura de Sigfox es elevado en zonas rurales (40 km) y más reducido en zonas urbanas (10 km). Se ha introducido y desplegado en algunas naciones, pero no hay itinerancia cuando se utiliza en varios países. El principal inconveniente de Sigfox es que no es ideal para la comunicación dúplex [81].

- ❖ **LTE-M:** En la versión 13 de LTE, la comunicación de tipo máquina LTE o LTE-M es introducida por el 3GPP y NB-IoT como tecnología IoT celular. Una nueva categoría de UE llamada categoría de movilidad (CAT-M1) fue creada por LTE-M. CAT-M1 está pensada para aplicaciones de gran cantidad de datos, a diferencia de NB-IoT. Admite una velocidad de datos de hasta 1 Mbps y tiene un canal de ancho de banda de 1,4 Mhz. Su rango de cobertura es de entre 30 - 40 km con una 10 - 15 ms de latencia. Estas características lo han hecho más adecuado para aplicaciones con dispositivos inteligentes más que para sensores básicos. NB-IoT UE (NB1) sólo está disponible en un ancho de banda de 200 kHz, utilizado principalmente por dispositivos con poca complicación. CAT-M1 admite más características que no se han introducido con NB-IoT. En ha introducido la voz sobre LTE (VoLTE), que permite las llamadas de voz para los dispositivos IoT. La función de transferencia permite un movimiento fluido del sistema entre celdas sin perturbar la conexión. Tanto NB-IoT como LTE-M comparten características específicas del estándar: mayor cobertura de la señal, transmisión de recepción discontinua extendida (eDRX), y bajo consumo de energía. En el que los dispositivos tienen modos de suspensión ampliados en los que permanecen activos mientras transmiten y reciben mientras duermen el resto del tiempo para ahorrar batería y liberar ancho de banda para otros dispositivos. El estándar 3GPP ha introducido una nueva categoría LTE-M denominada CAT-M2 en la versión 14 de LTE. Ofrece mayores velocidades de datos que CAT-M1, con una velocidad de enlace ascendente de 7 Mbps y una velocidad de enlace descendente de 4 Mbps. Ayuda a los dispositivos CAT-M2 a realizar más aplicaciones de alto rendimiento, incluida la transmisión de vídeo. LTE-M (CAT-M1 y CAT-M2) se utiliza para aplicaciones de alta velocidad de datos. Ergo, su coste es mucho mayor que el de NB-IoT, que se utiliza para aplicaciones de baja velocidad de datos [82].

- **Sistemas satelitales:** El uso de sistemas satelitales para la medición y los servicios de usuario final relacionados con la energía en áreas donde no existe una infraestructura de comunicación terrestre adecuada puede ser una solución alternativa [83]. En la actualidad, estarían disponibles varios sistemas de satélite que ofrecen servicios de datos a baja velocidad. Los candidatos son UIRidiumU que se basa en una constelación de satélites múltiples no estacionarios de órbita terrestre baja (*Low Earth Orbit*, LEO) y USpaceCheckerU que utiliza un segmento espacial geoestacionario (*Geosynchronous Equatorial Orbit*, GEO).
- **Comunicaciones ópticas de espacio libre (*Free Space Optical*, FSO):** La demanda de mayores velocidades de datos exige un mayor ancho de banda para los sistemas de comunicación. Entre las distintas tecnologías posibles, la comunicación óptica en el espacio libre (FSO) es una de las más prometedoras para resolver problema del gran ancho de banda y las necesidades de velocidad de datos, así como el "cuello de botella de la última milla". Este sistema funciona transmitiendo luz láser modulada a través del aire entre el transmisor y el receptor. Más concretamente, la señal se transmite mediante una lente o un espejo parabólico estrechando la luz y proyectándola hacia el receptor. A continuación, la luz emitida se recoge en el receptor con una lente o un espejo. Posteriormente, la luz recibida se enfoca en un detector óptico y se convierte en señales eléctricas para la posterior extracción de información [84]. Además de las ventajas de una gran velocidad de datos con un espectro sin licencia, la comunicación FSO también se considera una técnica más segura que la comunicación por RF [85]–[88]. Gracias a las diversas ventajas de las comunicaciones FSO, el enlace de este tipo puede formar parte de la red de comunicación backhaul para aplicaciones de monitorización de subestaciones rurales o remotas. En [89], se propone un sistema FSO basado en un resonador microring (MRR) con capacidad de transmisión de hasta 1 Gbps (en línea de visión) para las dos aplicaciones de redes eléctricas inteligentes (AMI y Respuesta a la Demanda).

En la Tabla 2-1 se ilustra a forma de resumen los tipos de redes por extensión geográfica, con sus requisitos de velocidad y una muestra de algunas de las tecnologías de comunicación usadas en cada caso.

Tabla 2-1 Resumen de los tipos de redes y requisitos [37].

Tipo de Red	Cobertura	Requisitos de Tasa de Datos	Tasa de Datos	Alternativas de Tecnologías
WAN	10–100 km	Alta velocidad de datos, dispositivos tales como enrutadores e interruptores	10 Mbps - 1 Gbps	Inalámbrico: WiMAX, 3G, 4G, 5G. Alámbrico: Ethernet, Fibra Óptica
NAN/FAN	10 m–10 km	Altamente dependiente de la densidad de nodos y topología	100 kbps -10 Mbps	Inalámbrico: ZigBee, Wi-Fi, WiMAX, Celular. Alámbrico: PLC
HAN/BAN/IAN	1–100 m	Depende de la aplicación. Generalmente baja tasa de datos requerida	10 - 100 kbps	Inalámbrico: ZigBee, Z-wave, Wi-Fi. Alámbrico: Ethernet, HomePlug, M-Bus

Conclusiones parciales

La infraestructura de medición avanzada constituye la columna vertebral de las redes eléctricas inteligentes, ya que en ella están incluidos todos los sensores, dispositivos de medición, de gestión de la información, etc., que son necesarios para que estas redes funcionen. Es la evolución del sistema de lectura automática de metrocontadores (AMR), ya que permite la comunicación bidireccional y la recopilación de información en tiempo real, no sólo el consumo eléctrico, sino de disímiles parámetros que pueden ser útiles tanto para el proveedor como para el cliente. Para implementar una AMI, son esenciales las tecnologías de comunicación, que son diversas, con sus ventajas y desventajas. La elección de cual usar depende de las condiciones en que se despliega la red, la velocidad de conexión que se necesite, el costo de implementación, entre otros parámetros.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En el presente trabajo se realizó una investigación sobre los metrocontadores inteligentes y las tecnologías de comunicación que permiten su despliegue en la infraestructura de medición avanzada, dentro de las redes eléctricas inteligentes. Luego de realizar esta búsqueda de información, se arriba a las siguientes conclusiones:

1. Ante la necesidad real que existe, del ahorro de energía, el despliegue de metrocontadores inteligentes, es uno de los primeros pasos para hacer los procesos de lectura y facturación del consumo eléctrico más confiable y eficiente. Aún más en el caso de Cuba donde el 60% del consumo es residencial.
2. Los metrocontadores inteligentes son una combinación de hardware y software. Están compuestos principalmente por un transformador reductor, un microprocesador, un reloj de tiempo real, una unidad de memoria, un módulo comunicación y una pantalla LCD.
3. Existen varios fabricantes oficiales de metrocontadores inteligentes y un creciente mercado de estos equipos a nivel global. Sin embargo, es posible desarrollar diseños propios de metrocontadores inteligentes, modificando los metrocontadores convencionales, con tecnologías libres y más factibles de implementar.
4. El despliegue de metrocontadores inteligentes se concentra principalmente en los países desarrollados, por ello es importante constar con un diseño propio para lograr la soberanía tecnológica.
5. Para lograr el despliegue de una infraestructura avanzada de medición existen varias las tecnologías de comunicación disponibles. Entre las más utilizadas se encuentran las

tecnologías inalámbricas, tales como Wi-Fi, GSM, ZigBee, LoRa, Bluetooth, NB-IoT y Sigfox. En el caso de las tecnologías cableadas las más usadas son fibra óptica y PLC.

Recomendaciones

1. La implementación de una AMI implica incorporar una infraestructura con nuevas tecnologías que son costosas. En el caso de Cuba es más factible utilizar tecnologías ya instaladas como Wi-Fi y GSM.
2. Para el diseño de un metrocontador inteligente cubano se puede modificar los metrocontadores convencionales existentes en el país; añadiendo un microprocesador, un reloj de tiempo real y una interfaz de comunicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. E. Abrahamsen, Y. Ai, and M. Cheffena, “Communication technologies for smart grid: A comprehensive survey,” *Sensors*, vol. 21, no. 23. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 8087, Dec. 03, 2021. doi: 10.3390/s21238087.
- [2] M. I. Rogelio Nevárez-Toledo, “Redes Inteligentes y Energías Renovables Smart Grids and Renewable Energies Redes inteligentes e energias renováveis,” vol. 5, no. 08, pp. 1253–1263, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i8.1657.
- [3] M. Shokry, A. I. Awad, M. K. Abd-Ellah, and A. A. M. Khalaf, “Systematic survey of advanced metering infrastructure security: Vulnerabilities, attacks, countermeasures, and future vision,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 136, pp. 358–377, 2022, doi: 10.1016/j.future.2022.06.013.
- [4] K. S. Kavithakumari, P. P. Paul, and E. Catherineamalapriya, “Advance metering infrastructure for smart grid using GSM,” in *ICONSTEM 2017 - Proceedings: 3rd IEEE International Conference on Science Technology, Engineering and Management*, 2017, vol. 2018-Janua, pp. 619–622. doi: 10.1109/ICONSTEM.2017.8261396.
- [5] J. F. Martins, A. G. Pronto, V. Delgado-Gomes, and M. Sanduleac, “Smart Meters and Advanced Metering Infrastructure,” in *Pathways to a Smarter Power System*, 2019, pp. 89–114. doi: 10.1016/B978-0-08-102592-5.00004-1.
- [6] MFP, “Gaceta Oficial No. 26 Extraordinaria de 13 de abril de 2021.” MINISTERIO DE JUSTICIA, 2021.
- [7] “Modifican tarifas eléctricas para el sector residencial y precios del gas licuado de petróleo | Mesa Redonda,” Dec. 28, 2020. <http://mesaredonda.cubadebate.cu/mesa->

- redonda/2020/12/28/modifican-tarifas-electricas-para-el-sector-residencial-y-precios-del-gas-licuado-de-petroleo/ (accessed Nov. 14, 2022).
- [8] A. N. Akpolat and E. Dursun, “Advanced Metering Infrastructure (AMI): Smart Meters and New Technology,” in *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS’17)*, 2017, no. October, pp. 1–8.
- [9] S. Chakraborty, S. Das, T. Sidhu, and A. K. Siva, “Smart meters for enhancing protection and monitoring functions in emerging distribution systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 127, no. December 2020, p. 106626, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106626.
- [10] K. S. K. Weranga, S. Kumarawadu, and D. P. Chandima, “Smart metering design and applications,” in *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, no. 9789814451819, 2014. doi: 10.1007/978-981-4451-82-6.
- [11] G. R. Barai, S. Krishnan, and B. Venkatesh, “Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - A review,” in *2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference: Smarter Resilient Power Systems, EPEC 2015*, 2016, pp. 138–145. doi: 10.1109/EPEC.2015.7379940.
- [12] S. Sayed, T. Hussain, A. Gastli, and M. Benammar, “Design and realization of an open-source and modular smart meter,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 1405–1422, 2019, doi: 10.1002/ese3.361.
- [13] S. Bhattacharjee, A. Thakur, and S. K. Das, “Towards fast and semi-supervised identification of smart meters launching data falsification attacks,” *ASIACCS 2018 - Proc. 2018 ACM Asia Conf. Comput. Commun. Secur.*, pp. 173–185, May 2018, doi: 10.1145/3196494.3196551.
- [14] S. C. Yip, K. S. Wong, W. P. Hew, M. T. Gan, R. C. W. Phan, and S. W. Tan, “Detection of energy theft and defective smart meters in smart grids using linear regression,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 91, pp. 230–240, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.IJEPES.2017.04.005.
- [15] H. J. Jo, I. S. Kim, and D. H. Lee, “Efficient and Privacy-Preserving Metering

- Protocols for Smart Grid Systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1732–1742, May 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2449278.
- [16] R. T. De Caropreso, R. A. S. Fernandes, D. P. M. Osorio, and I. N. Silva, “An Open-Source Framework for Smart Meters: Data Communication and Security Traffic Analysis,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 1638–1647, Feb. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2808927.
- [17] I. W. Mustika, W. J. Anggoro, E. Maulana, and F. Y. Zulkifli, “Development of Smart Energy Meter Based on LoRaWAN in Campus Area,” *2020 3rd Int. Semin. Res. Inf. Technol. Intell. Syst. ISRITI 2020*, pp. 209–214, 2020, doi: 10.1109/ISRITI51436.2020.9315511.
- [18] G. M. Jasim and K. K. Abdalla, “Single Phase Energy Smart Meter System Design and Implementation Using RFID and Based on IoT,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1090, no. 1, p. 012093, Mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1090/1/012093.
- [19] S. Saha, S. Mondal, A. Saha, and P. Purkait, “Design and implementation of IoT based smart energy meter,” *Proc. 2018 IEEE Appl. Signal Process. Conf. ASPCON 2018*, pp. 19–23, 2018, doi: 10.1109/ASPCON.2018.8748696.
- [20] S. Hassan Mir, “Review on Smart Electric Metering System Based on GSM/IOT,” *Asian J. Electr. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 2019, doi: 10.51983/ajes-2019.8.1.2340.
- [21] O. Laayati, H. El Hadraoui, M. Bouzi, A. El-Alaoui, A. Kousta, and A. Chebak, “Smart Energy Management System: Blockchain-Based Smart Meters in Microgrids,” *Proc. - 2022 IEEE 4th Glob. Power, Energy Commun. Conf. GPECOM 2022*, pp. 580–585, 2022, doi: 10.1109/GPECOM55404.2022.9815559.
- [22] S. Erlinghagen, B. Lichtensteiger, and J. Markard, “Smart meter communication standards in Europe - A comparison,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43. Pergamon, pp. 1249–1262, Mar. 01, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.065.
- [23] “Mercado de medidores de electricidad inteligentes | 2022 - 27 | Participación, tamaño y crecimiento de la industria - Mordor Intelligence.”

- <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/smart-electricity-meter-market> (accessed Oct. 28, 2022).
- [24] “Smart Meters Market Size to Worth Around US\$ 65.6 Bn by 2030.” Accessed: Oct. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/06/08/2459241/0/en/Smart-Meters-Market-Size-to-Worth-Around-US-65-6-Bn-by-2030.html>
- [25] “Bajo la lupa: los medidores inteligentes en América Latina - BNamericas,” 2020. Accessed: Nov. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/bajo-la-lupa-los-medidores-inteligentes-en-america-latina>
- [26] “Genesis partners with Chirpy | Genesis NZ,” Feb. 26, 2019. <https://www.genesisenergy.co.nz/about/news/genesis-partners-with-chirpy> (accessed Nov. 24, 2022).
- [27] “SRP and Landis+Gyr Sign Agreement for Implementation of New Prepay Platform and Expansion of Smart Metering Program - Landis+Gyr,” Dec. 14, 2021. <https://www.landisgyr.com/news/srp-landisgyr-sign-agreement-for-prepay-platform-implementation-and-smart-metering-program-extension/> (accessed Nov. 24, 2022).
- [28] K. Kimani, V. Oduol, and K. Langat, “Cyber security challenges for IoT-based smart grid networks,” *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.*, vol. 25, pp. 36–49, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.IJCIP.2019.01.001.
- [29] E. Kabalci and Y. Kabalci, “Introduction to Smart Grid Architecture,” pp. 3–45, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-1768-2_1.
- [30] D. Bian, M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, “Analysis of communication schemes for Advanced Metering Infrastructure (AMI),” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2014, vol. 2014-Octob, no. October, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2014.6939562.
- [31] M. Shokry, A. I. Awad, M. K. Abd-Ellah, and A. A. M. Khalaf, “Systematic survey of advanced metering infrastructure security: Vulnerabilities, attacks,

- countermeasures, and future vision,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 136. Elsevier BV, pp. 358–377, Nov. 2022. doi: 10.1016/j.future.2022.06.013.
- [32] M. I. Ibrahim, M. Mahmoud, M. M. Fouda, F. Alsolami, W. Alasmay, and X. Shen, “Privacy Preserving and Efficient Data Collection Scheme for AMI Networks Using Deep Learning,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 23, pp. 17131–17146, Dec. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3077897.
- [33] G. Lu and X. Tian, “An Efficient Communication Intrusion Detection Scheme in AMI Combining Feature Dimensionality Reduction and Improved LSTM,” *Secur. Commun. Networks*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6631075.
- [34] D. B. Avancini, J. J. P. C. Rodrigues, S. G. B. Martins, R. A. L. Rabêlo, J. Al-Muhtadi, and P. Solic, “Energy meters evolution in smart grids: A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 217, pp. 702–715, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.229.
- [35] P. Kumar, Y. Lin, G. Bai, A. Paverd, J. S. Dong, and A. Martin, “Smart Grid Metering Networks: A Survey on Security, Privacy and Open Research Issues,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2886–2927, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2899354.
- [36] N. A. Qarabsh, S. S. Sabry, and H. A. Qarabash, “Smart grid in the context of industry 4.0: An overview of communications technologies and challenges,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 18, no. 2, pp. 656–665, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v18.i2.pp656-665.
- [37] F. E. Abrahamsen, Y. Ai, and M. Cheffena, “Communication technologies for smart grid: A comprehensive survey,” *Sensors*, vol. 21, no. 23, pp. 1–24, 2021. doi: 10.3390/s21238087.
- [38] S. N. Islam, Z. Baig, and S. Zeadally, “Physical Layer Security for the Smart Grid: Vulnerabilities, Threats, and Countermeasures,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 12, pp. 6522–6530, 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2931436.
- [39] S. Armoogum and V. Bassoo, “Privacy of energy consumption data of a household in a smart grid,” in *Smart Power Distribution Systems: Control, Communication,*

- and Optimization*, Elsevier Inc., 2018, pp. 163–177. doi: 10.1016/B978-0-12-812154-2.00008-0.
- [40] V. Kumar, R. Kumar, and S. K. Pandey, “LKM-AMI: A Lightweight Key Management Scheme for Secure two Way Communications between Smart Meters and HAN Devices of AMI System in Smart Grid,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 14, no. 1, pp. 82–100, 2021, doi: 10.1007/s12083-020-00921-6.
- [41] W. You and H. Ge, “Design and Implementation of Modbus Protocol for Intelligent Building Security,” in *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT*, Oct. 2019, pp. 420–423. doi: 10.1109/ICCT46805.2019.8946996.
- [42] “CEN and CENELEC - CEN-CENELEC.” <https://www.cencenelec.eu/european-standardization/cen-and-cenelec/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [43] D. V. Arteaga, “Desarrollo de Aplicación Android para comunicación DLMS/COSEM con Smart Meter,” Jul. 2019, Accessed: Nov. 24, 2022. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/29878>
- [44] P. Masek, D. Hudec, J. Krejci, A. Ometov, J. Hosek, and K. Samouylov, “Communication capabilities of wireless M-BUS: Remote metering within smartgrid infrastructure,” in *Communications in Computer and Information Science*, 2018, vol. 919, pp. 31–42. doi: 10.1007/978-3-319-99447-5_4.
- [45] “ITU Telecommunication Standardization Sector.” <https://www.itu.int/en/ITU-T/Pages/default.aspx> (accessed Nov. 15, 2022).
- [46] E. J. Cedeño Herrera, “Contribución a la ejecución de servicios distribuidos tolerantes al retardo, sobre redes de sensores y actuadores,” May 2017, doi: 10.20868/UPM.THESIS.46656.
- [47] I. M. Štůsek, “Research on Reliable Low-Power Wide-Area Communications Utilizing Multi-RAT LPWAN Technologies for IoT Applications,” Nov. 2021, Accessed: Nov. 24, 2022. [Online]. Available: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/135541>

- [48] “IEEE 802.15.1.” <https://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html> (accessed Nov. 15, 2022).
- [49] K. T’Jonck, B. Pang, H. Hallez, and J. Boydens, “Optimizing the Bluetooth Low Energy Service Discovery Process,” *Sensors 2021, Vol. 21, Page 3812*, vol. 21, no. 11, p. 3812, May 2021, doi: 10.3390/S21113812.
- [50] “IEEE 802.15.4.” <https://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> (accessed Nov. 15, 2022).
- [51] C. A. Vera Romero, J. E. Barbosa Jaimes, and D. C. Pabón González, “La Tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física,” *Sci. Tech.*, vol. 22, no. 3, pp. 238–245, 2017.
- [52] C. Alexandre Gouvea Da Silva, E. Leonardo Dos Santos, A. Christian Krainski Ferrari, and H. Tertuliano Dos Santos Filho, “A Study of the Mesh Topology in a ZigBee Network for Home Automation Applications,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 5, pp. 935–942, 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.7910209.
- [53] “IETF | Internet Engineering Task Force.” <https://www.ietf.org/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [54] “IEEE 802.11, The Working Group Setting the Standards for Wireless LANs.” <https://www.ieee802.org/11/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [55] J. C. Z. W. Steven Conner, Jan Kruys, Kyeongsoo (Joseph) Kim, “IEEE 802 . 11s Tutorial Overview of the Amendment for Wireless Local Area Mesh Networking Key Contributors,” *IEEE 802 Plenary*, no. November, p. 93, 2006.
- [56] Y. Li, X. Cheng, Y. Cao, D. Wang, and L. Yang, “Smart choice for the smart grid: Narrowband internet of things (NB-IoT),” *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 3, pp. 1505–1515, Jun. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2781251.
- [57] Z. Lipošcak and M. Bošković, “Survey of smart metering communication technologies,” in *IEEE EuroCon 2013*, 2013, no. July, pp. 1391–1400. doi: 10.1109/EUROCON.2013.6625160.
- [58] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, “Review of communication

- technologies for smart homes/building applications,” *Proc. 2015 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia, ISGT ASIA 2015*, pp. 4–9, 2016, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7437036.
- [59] A. Mathur, Y. Ai, M. Cheffena, and M. R. Bhatnagar, “Performance of Hybrid ARQ over Power Line Communications Channels,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2020-May, May 2020, doi: 10.1109/VTC2020-SPRING48590.2020.9128638.
- [60] A. Pinomaa *et al.*, “Noise analysis of a power-line communication channel in an LVDC smart grid concept,” 2013. Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6525822/>
- [61] Y. Ai, M. R. Bhatnagar, M. Cheffena, A. Mathur, and A. Sedakov, “Game-Theoretical Analysis of PLC System Performance in the Presence of Jamming Attacks,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 10575 LNCS, pp. 74–90, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-68711-7_5/COVER.
- [62] Y. Ai, T. Ohtsuki, and M. Cheffena, “Performance Analysis of PLC over Fading Channels with Colored Nakagami-m Background Noise,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2017-June, Nov. 2017, doi: 10.1109/VTCSPRING.2017.8108404.
- [63] Y. Ai, L. Kong, M. Cheffena, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, “On Performance Characterization of Cascaded Multiwire-PLC/MIMO-RF Communication System,” *Eur. Signal Process. Conf.*, vol. 2021-August, pp. 1656–1660, 2021, doi: 10.23919/EUSIPCO54536.2021.9616275.
- [64] J. Song, W. Ding, F. Yang, H. Yang, B. Yu, and H. Zhang, “An Indoor Broadband Broadcasting System Based on PLC and VLC,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 61, no. 2, pp. 299–308, Jun. 2015, doi: 10.1109/TBC.2015.2400825.
- [65] A. Mathur, M. R. Bhatnagar, Y. Ai, and M. Cheffena, “Performance Analysis of a Dual-Hop Wireless-Power Line Mixed Cooperative System,” *IEEE Access*, vol. 6, 2018, Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8391402/>

- [66] “PRIME Alliance.” <https://www.prime-alliance.org/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [67] C. Lavenu, C. Chauvenet, P. Treffiletti, M. Varesio, and K. Hueske, “Standardization challenges, opportunities and recent evolutions for the G3-PLC technology,” *Energies*, vol. 14, no. 7. 2021. doi: 10.3390/en14071937.
- [68] “IEC 61334-4-512:2001 | IEC Webstore.” <https://webstore.iec.ch/publication/5306> (accessed Nov. 23, 2022).
- [69] “Wi-Fi Alliance® and HomePlug® Powerline Alliance Collaborate on Connected Smart Home | Wi-Fi Alliance.” <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-and-homeplug-powerline-alliance-collaborate-on-connected-smart> (accessed Nov. 15, 2022).
- [70] M. Ayar and H. A. Latchman, “A delay and throughput study of adaptive contention window based HomePlug MAC with prioritized traffic classes,” *2016 Int. Symp. Power Line Commun. its Appl. ISPLC 2016*, pp. 126–131, May 2016, doi: 10.1109/ISPLC.2016.7476293.
- [71] “Powerline Communications News @ www.ipcf.org.” <https://www.ipcf.org/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [72] “Open PLC European research alliance for new generation PLC integrated network | OPERA Project | Fact Sheet | FP6 | CORDIS | European Commission.” <https://cordis.europa.eu/project/id/507667> (accessed Nov. 15, 2022).
- [73] “IEEE Standard for WirelessMAN-Advanced Air Interface for Broadband Wireless Access Systems --Amendment 2: Higher Reliability Networks,” *IEEE Std 802.16.1a-2013 (Amendment to IEEE Std 802.16.1-2012)*. IEEE, 2013. Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6547982/>
- [74] “Fiber Broadband Association: Building Fiber-to-the-Home Communities Together.” <https://www.fiberbroadband.org/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [75] Q. K. Ud Din Arshad, A. U. Kashif, and I. M. Quershi, “A Review on the Evolution of Cellular Technologies,” *Proc. 2019 16th Int. Bhurban Conf. Appl. Sci. Technol. IBCAST 2019*, pp. 989–993, Mar. 2019, doi: 10.1109/IBCAST.2019.8667173.

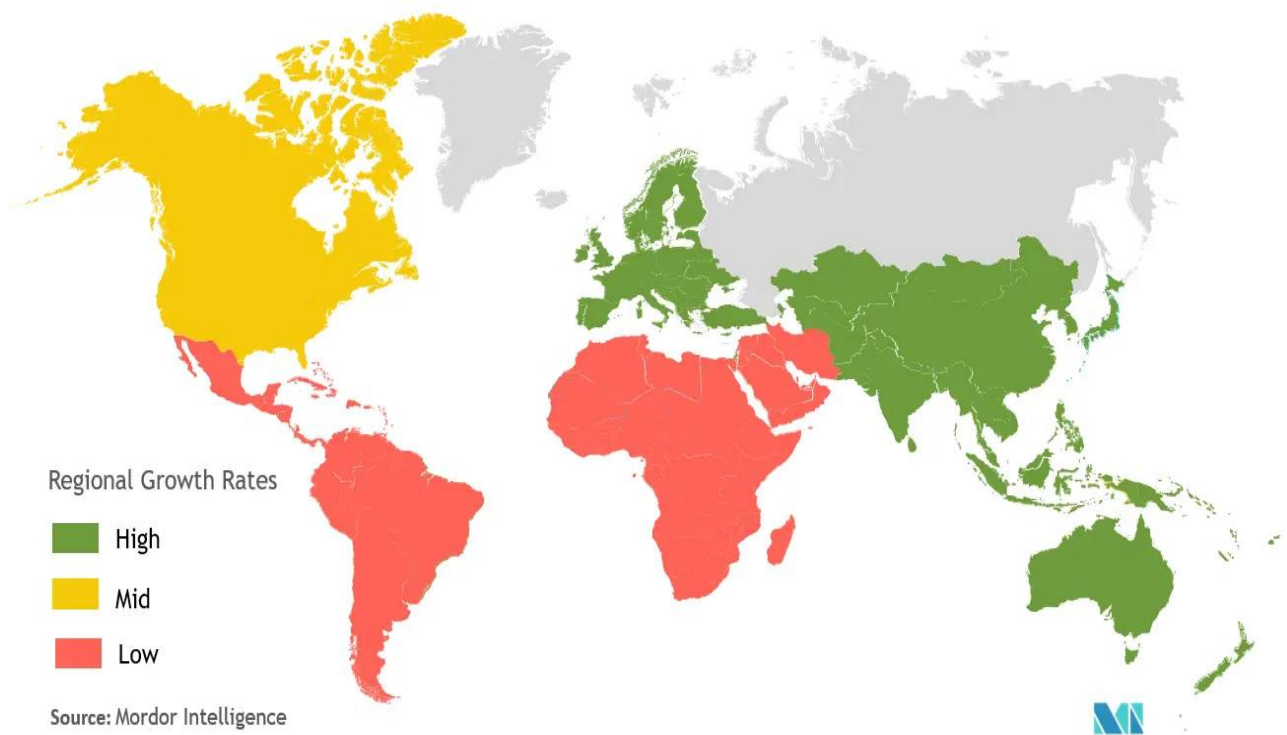
- [76] C. R. Storck and F. Duarte-Figueiredo, "A Survey of 5G Technology Evolution, Standards, and Infrastructure Associated With Vehicle-to-Everything Communications by Internet of Vehicles," *IEEE Access*, vol. 8, 2020, Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9125906/>
- [77] S. Hernández, "Estudio en detalle de LoraWAN. Comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico.," *Univesidad de catalunya*, pp. 1–89, 2020, [Online]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/106369/7/shernandezc6TFM0120memoria.pdf>
- [78] S. Jain, M. Pradish, A. Paventhan, M. Saravanan, and A. Das, "Smart energy metering using LPWAN IoT technology," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2018, vol. 487, pp. 19–28. doi: 10.1007/978-981-10-8249-8_2.
- [79] M. Nurgaliyev, A. Saymbetov, Y. Yashchyshyn, N. Kuttybay, and D. Tukymbekov, "Prediction of energy consumption for LoRa based wireless sensors network," *Wirel. Networks 2020 265*, vol. 26, no. 5, pp. 3507–3520, Feb. 2020, doi: 10.1007/S11276-020-02276-5.
- [80] D. Yang *et al.*, "Understanding power consumption of NB-IoT in the wild," pp. 1–13, Sep. 2020, doi: 10.1145/3372224.3419212.
- [81] N. Islam, B. Ray, and F. Pasandideh, "IoT Based Smart Farming: Are the LPWAN Technologies Suitable for Remote Communication?," 2020. Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9192008/>
- [82] S. R. Borkar, "Long-term evolution for machines (LTE-M)," *LPWAN Technol. IoT M2M Appl.*, pp. 145–166, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-818880-4.00007-7.
- [83] A. Meloni and L. Atzori, "The Role of Satellite Communications in the Smart Grid," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 24, no. 2, pp. 50–56, Apr. 2017, doi: 10.1109/MWC.2017.1600251.
- [84] F. E. Abrahamsen, Y. Ai, K. Wold, and M. Mohamed, "Free-space optical communication: From space to ground and ocean," *IEEE Potentials*, vol. 40, no. 6,

- pp. 18–23, 2021, doi: 10.1109/MPOT.2020.2979057.
- [85] Y. Ai, A. Mathur, M. Cheffena, M. R. Bhatnagar, and H. Lei, “Physical Layer Security of Hybrid Satellite-FSO Cooperative Systems,” *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 1, 2019, Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8610004/>
- [86] G. D. Verma, A. Mathur, Y. Ai, and M. Cheffena, “Secrecy performance of FSO communication systems with non-zero boresight pointing errors,” *IET Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 155–162, Jan. 2021, doi: 10.1049/CMU2.12068.
- [87] Y. Ai, A. Mathur, H. Lei, M. Cheffena, and I. S. Ansari, “Secrecy enhancement of RF backhaul system with parallel FSO communication link,” *Opt. Commun.*, vol. 475, p. 126193, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.OPTCOM.2020.126193.
- [88] Y. Ai, A. Mathur, G. D. Verma, L. Kong, and M. Cheffena, “Comprehensive Physical Layer Security Analysis of FSO Communications over Málaga Channels,” *IEEE Photonics J.*, vol. 12, no. 6, Dec. 2020, doi: 10.1109/JPHOT.2020.3036244.
- [89] P. Sivakumar, R. Nagaraju, D. Samanta, M. Sivaram, M. N. Hindia, and I. S. Amiri, “A novel free space communication system using nonlinear InGaAsP microsystem resonators for enabling power-control toward smart cities,” *Wirel. Networks 2019 264*, vol. 26, no. 4, pp. 2317–2328, Jun. 2019, doi: 10.1007/S11276-019-02075-7.

ANEXOS

ANEXO 1: Comparativa por regiones de la tasa de crecimiento del mercado de metrocontadores inteligentes (2020 - 2025)

Smart Meter Market - Growth Rate by Geography (2020 - 2025)



- Tasa Alta
- Tasa Media
- Tasa Baja

ANEXO 2 Tamaño del mercado global de metrocontadores inteligentes de 2021-2030
(miles de millones de USD)

