



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**Diseño e Implementación de una Red ZigBee para
Determinar el Consumo de Energía de los Usuarios de la
Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

HUGO QUITO ZEA

EDWIN RODAS ARÍZAGA

Director:

DANIEL ITURRALDE PIEDRA, Ph. D

CUENCA – ECUADOR

2017

DEDICATORIA

Dedico de manera especial a Dios pues fue un apoyo y el empuje para culminar esta etapa de mi vida profesional, hacer de mí una persona persistente de responsabilidades y deseos de superación.

Rodas Edwin.

DEDICATORIA

Esta tesis dedico a Dios y la Virgen, por saber guiarme en buen camino, darme fuerzas para salir adelante y permitir afrontar de la mejor manera los obstáculos tanto personal como estudiantil. De manera muy especial a mis papás: Hugo Quito y Lourdes Zea, quienes siempre han estado conmigo y nunca me han abandonado, brindándome su amistad, apoyo y esfuerzo en todo momento que lo necesitaba, también enseñándome a ser una persona responsable y tener presente que nada en la vida se logra sin sacrificio, esfuerzo y dedicación; por último, a mis hermanas: Andrea y Valentina, quienes han estado siempre conmigo.

Quito Hugo.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, doy gracias a Dios por permitirme tener una de las mejores experiencias dentro de la Universidad del Azuay, la misma que ha permitido convertirme en un profesional en lo que tanto me apasiona, gracias al PhD Daniel Iturralde director de tesis que hizo parte de este proceso integral de grado, gracias a las amistades que siempre supieron ser el apoyo en cada uno de los conocimientos.

Rodas Edwin.

AGRADECIMIENTO

Mi tesis agradezco, en primer lugar, a Dios y la Virgen, por darme fuerza, voluntad y guiarme por buen camino para poder terminar mi carrera universitaria. En segundo lugar, agradezco a mis papás: Hugo Quito y Lourdes Zea, por ser los pilares fundamentales en mi vida y permitirme estudiar en la Universidad del Azuay, es un regalo que siempre lo tendré presente, también a mis dos hermanas por comprender y apoyarme en todo. Un agradecimiento a Daniel Iturralde Ph.D director de tesis, por brindar sus conocimientos en este proyecto de grado. Por último, agradezco a mis amigos, compañeros de la universidad que me ayudaron en realizar trabajos, prácticas entre otras actividades de estudio.

Quito Hugo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN:	xii
ABSTRACT:.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	2
1.1. Motivación de la investigación.....	2
1.2. Problemática	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Metodología.....	4
1.5. Organización del trabajo de grado.....	4
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	6
2.1. Estado del arte	6
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	10
3.1. ZigBee	10
3.1.1. Arquitectura del Protocolo ZigBee	11
3.1.2. Estándar IEEE 802.15.4	12
3.1.3. Estándar ZigBee.....	14
3.2. Medidores de consumo	18
3.2.1. Control de consumo eléctrico	18
3.2.2. Medidor eléctrico	19
3.2.3. Clasificación de medidores.....	20
3.2.3.1. Por construcción.....	20
3.2.3.2. Por precisión.....	22
3.2.3.3. Por la energía a medir	23
3.2.3.4. Por el circuito eléctrico de la red	23
3.2.4. Tecnologías aplicadas a medidores.....	25

3.2.4.1.	Tecnología AMR	26
3.2.4.2.	Tecnología AMI.....	27
3.3.	Sensores	28
3.3.1.	Sensor de corriente	28
3.3.2.	Principios físicos.....	28
3.3.3.	Base teórica del sensor de corriente.....	31
3.3.4.	Especificaciones técnicas del sensor de corriente	32
CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA		34
4.1.	Diagrama de bloques	34
4.2.	Interfaz electrónica con Arduino.....	35
4.3.	Control y ajustes	36
4.4.	Red ZigBee	38
4.4.1.	Configuración del módulo XCore 2530	39
4.4.2.	Topología de la red ZigBee.....	42
4.4.3.	Capa de aplicación – Base de Datos.....	43
4.4.3.1.	Gestión de Datos.....	44
4.4.3.2.	Servidor Base de Datos	44
4.4.3.3.	Servidor Web Apache	46
CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y RESULTADOS.....		50
5.1.	Hardware.....	50
5.2.	Pruebas del dispositivo final.	54
5.3.	Consumo del dispositivo final.	56
5.4.	Alcances de la red ZigBee.	56
5.5.	Comunicación y transmisión.....	57
5.6.	Capa de aplicación implementada.....	58
CONCLUSIONES.....		62
RECOMENDACIONES.....		64
BIBLIOGRAFÍA.....		65
ANEXOS		67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Metodología de Investigación.....	4
Figura 3.1: Pila de capas de ZigBee.....	11
Figura 3.2: Topologías de red IEEE 802.15.4 capa MAC.....	13
Figura 3.3: Superframes de la capa MAC IEEE 802.15.4.....	13
Figura 3.4: Distribución de canales IEEE 802.15.4.....	14
Figura 3.5: Asignación de direcciones en la capa NWK.....	16
Figura 3.6: Diagrama de Venn, canal, PAN ID y direccionamiento.....	16
Figura 3.7: Enrutamiento en ZigBee. Problema agujeros en la red.....	17
Figura 3.8: Estructura interna del medidor.....	20
Figura 3.9: Medidor electromecánico.....	21
Figura 3.10: Medidor electrónico Enerlux.....	21
Figura 3.11: Conexión de un medidor monofásico 120V 2hilos.....	23
Figura 3.12: Conexión de un medidor monofásico 240V-120V 3hilos.....	24
Figura 3.13: Conexión de un medidor bifásico 220V-127V 3hilos.....	24
Figura 3.14: Conexión de un medidor trifásico 220V 4hilos.....	25
Figura 3.15: Conexión de un medidor trifásico 220V 3hilos.....	25
Figura 3.16: Tecnología AMR – Arquitectura.....	27
Figura 3.17: Sensor SCT-013-000.....	28
Figura 3.18: Dirección de flujo de corrientes de un transformador.....	29
Figura 3.19: Pinza Amperométrica.....	30
Figura 3.20: Diagrama de bloques del funcionamiento de una pinza amperométrica.....	30
Figura 3.21: Devanado primario y secundario del sensor.....	31
Figura 3.22: Interfaz del sensor con el conductor de corriente.....	32
Figura 3.23: Dimensiones físicas del sensor.....	33
Figura 3.24: Conexiones internas del sensor de acuerdo a lo que se desea medir.....	33
Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema.....	34
Figura 4.2: Adecuación de la señal para el Arduino.....	35
Figura 4.3: Diagrama de bloques de interconexiones para lecturas de consumo eléctrico.....	36
Figura 4.4: Solución para la adquisición de la señal de voltaje.....	37
Figura 4.5: Modelado de la red en un sector de la ciudad.....	39
Figura 4.6: Interfaz grafica del software ZBSCOMM.....	41
Figura 4.7: Topología de la red ZigBee.....	43
Figura 4.8: Arduino Ethernet Shield más Arduino Mega ADK.....	44
Figura 4.9: Mysql Community Server.....	45
Figura 4.10: MySQL Workbench.....	45
Figura 4.11: Conexión del servidor Apache.....	47
Figura 4.12: Página web para visualizar el consumo de energía eléctrica.....	48
Figura 4.13: Reporte de consumo de energía eléctrica.....	49
Figura 5.1: Esquema del dispositivo final.....	50

Figura 5.2: Dispositivo final, muestra de la calibración por medio del potenciómetro.	51
Figura 5.3: Resultados obtenidos y corroborados por instrumentos eléctricos.	52
Figura 5.4: PCB de la tarjeta electrónica.	52
Figura 5.5: Diseño de la tarjeta electrónica.	53
Figura 5.6: Interior del dispositivo final. Conexión de módulos.	53
Figura 5.7: Dispositivo final. Vista externa.	54
Figura 5.8: Laboratorio de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.	54
Figura 5.9: Software del equipo de pruebas, valores precargados.	55
Figura 5.10: Captura de los datos obtenidos por el Arduino.	55
Figura 5.11: Pruebas de alcance en el parqueadero de la Universidad del Azuay.	57
Figura 5.12: Transmisión y recepción entre nodos.	58
Figura 5.13: Base de Datos con inicialización en cero.	59
Figura 5.14: Interfaz web previa a la adquisición de datos de consumo eléctrico.	59
Figura 5.15: Fotografías de los medidores de las residencias con los consumos del 18 de mayo al 1 junio de 2017.	60
Figura 5.16: Interfaz web con datos obtenidos después de las pruebas realizadas.	61
Figura 5.17: Curva de consumo eléctrico dentro de un tiempo de 50000seg.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Especificaciones de las bandas de frecuencias	14
Tabla 3.2: Tipo de direcciones.	15
Tabla 3.3: Parámetros del sensor de corriente.....	32
Tabla 4.1: Valores de la tabla kilovatios.	46
Tabla 5.1: Consumo del dispositivo final.....	56

ÍNDICE DE ANEXOS

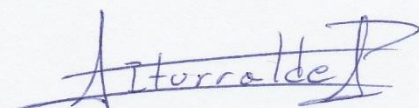
Anexo 1: Descripción de la red ZigBee.	67
Anexo 2: Datos de la curva de consumo eléctrico obtenidos en períodos de 1min.	68

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED ZIGBEE PARA DETERMINAR EL CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS USUARIOS DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO SUR C.A.

RESUMEN:

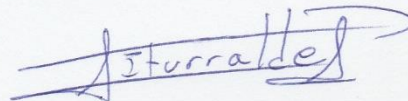
En este trabajo se presenta el diseño e implementación de una red para hogares, enfocada en el uso de la tecnología ZigBee. La red constará de sensores, módulos de comunicación y una central que desempeña el papel de servidor, ubicada en la empresa del servicio eléctrico; todo esto con el fin de establecer una red que permite transmitir en tiempo real los datos de consumo de energía eléctrica de cada hogar. Una vez recolectada la información se crea un diseño de registro digital que otorga los datos de consumo de cada usuario de manera inmediata.

Palabras Clave: ZigBee, Smart metering, Arduino.



Ing. Daniel Iturralde. Ph. D

DIRECTOR DE ESCUELA



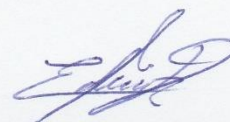
Ing. Daniel Iturralde. Ph. D

DIRECTOR DE TESIS



Hugo Andrés Quito Zea

AUTOR



Edwin Fabián Rodas Arízaga

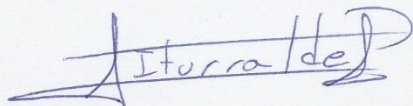
AUTOR

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ZIGBEE NETWORK TO
DETERMINE ENERGY CONSUMPTION OF *EMPRESA ELECTRICA*
REGIONAL CENTRO SUR C.A. USERS**

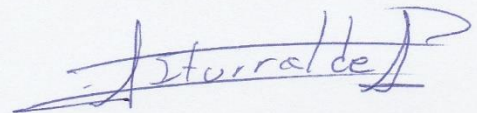
ABSTRACT

This paper dealt with the design and implementation of a network for homes, focused on the use of ZigBee technology. The network will consist of sensors, communication modules and a station located in the electric company that will work as the server. This is carried out in order establish a network that allows real-time transmission of electrical energy consumption data for each household. Once the information is collected, a digital registration design is created, which immediately gives the user's consumption data

Keywords: ZigBee, smart metering, Arduino.



Ing. Daniel Iturralde. Ph. D
SCHOOL DIRECTOR



Ing. Daniel Iturralde. Ph. D
THESIS DIRECTOR



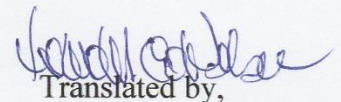
Hugo Andrés Quito Zea
AUTHOR



Edwin Fabián Rodas Arízaga
AUTHOR



Magari Aiteage
UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas



Translated by,

Lic. Lourdes Crespo

Quito Zea Hugo Andrés

Rodas Arízaga Edwin Fabián

Trabajo de graduación

Ing. Daniel Iturralde, PhD.

Junio 2017

Diseño e Implementación de una Red ZigBee para Determinar el Consumo de Energía de los Usuarios de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.

INTRODUCCIÓN

La medición de consumo de energía eléctrica ha sido una de las necesidades de la empresa que brinda el servicio público, por lo que han sido implementados sistemas que realizan una medición del consumo para la facturación mensual. Estos sistemas trabajaban mediante dispositivos mecánicos, electrónicos y electromecánicos, en la actualidad conocidos como medidores, anteriormente estos dispositivos generaban una lectura analógica, hoy en día los mismos dispositivos gracias al avance tecnológico generan una lectura digital.

Una vez obtenida la información sobre el consumo de energía eléctrica de cada uno de los hogares, la empresa del servicio eléctrico dispone de un personal dedicado a realizar las lecturas generadas por los medidores, sin embargo, no se ha podido implementar un sistema, un dispositivo o una red, que desempeñe características incluso funciones que omitan el personal que realiza las lecturas de campo. Debido a que estos sistemas son muy caros.

El presente trabajo tiene como objetivo la creación de una red con tecnología ZigBee, capaz de transmitir la información de consumo eléctrico de cada uno de los hogares hacia la empresa del servicio eléctrico, mediante los dispositivos terminales que serán acoplados con los medidores. Para ello, se realizará una investigación previa sobre temas referenciales como smart metering, ZigBee, topologías de red y proyectos similares. Por último, se realizarán las pruebas de funcionamiento.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1. Motivación de la investigación

La tecnología ZigBee es utilizada para redes domóticas y trabaja en la banda libre de ISM 2.4 GHz para comunicaciones inalámbricas, específicamente para reemplazar la proliferación de sensores individuales. Su objetivo es realizar aplicaciones con redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal Area Network, WPAN), permitiendo tener una comunicación segura, de baja tasa de transferencia de datos y con un consumo bajo de energía. Este tipo de tecnología permite tener una gran escalabilidad pudiendo tener hasta 65000 nodos conectados en una red, cada uno de los nodos puede trabajar como dispositivo final, enrutador o coordinador. Ofrece varios tipos de topologías según la necesidad que requiera el diseño de la red, las topologías más utilizadas son: estrella, árbol y malla. En el momento que existe una interferencia, la tecnología realiza el cambio de canales en forma dinámica permitiendo obtener agilidad en la red ZigBee, es ideal para realizar conexiones punto a punto y punto a multipunto, la tecnología está también diseñada para el direccionamiento y refrescamiento de la red, es utilizada para redes de baja transferencia de datos, reduciendo tiempos de espera en la transmisión y recepción de los mismos (EcuRed, s.f.). Por lo antes mencionado, la investigación en nuevas aplicaciones que se le pueden dar a la tecnología ZigBee daría como resultado grandes beneficios en el área local.

1.2. Problemática

En la actualidad la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. - CENTROSUR, para cumplir con el objetivo de realizar las mediciones del consumo de cada usuario, se ve en la necesidad de contratar personal dedicado a realizar la labor de lecturas en sitio de manera mensual, así poder facturar el consumo respectivo, lógicamente esto repercute en la economía de la empresa.

Los medidores que en la actualidad se utilizan son monofásicos, bifásicos o trifásicos, ya sean analógicos o digitales, estos carecen de almacenamiento de información del consumo de energía, así como de protocolos de comunicación para

la transmisión del mismo. Si es que se quisiera realizar la medición en tiempo real del consumo eléctrico que se genera en el domicilio de cada usuario, la solución actual sería la de cambiar los medidores antes mencionados por medidores inteligentes, los mismos que incurren en un costo relativamente alto en comparación de los ya instalados, cabe destacar que la pérdida por parte de la empresa sería no solamente la de dar de baja al medidor actual sino realizar la compra adicional de nuevo medidor (Murillo, 2005).

1.3. Objetivos

1.3.1.Objetivo general

Diseñar y desarrollar una red de tecnología ZigBee para facilitar el acceso a la información de consumo de energía de los usuarios por parte de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.

1.3.2.Objetivos específicos

- Realizar un análisis del estado del arte y su discusión bibliográfica.
- Revisar la bibliografía referente a ZigBee, los sistemas de telegestión y medición inteligente.
- Describir el sistema de medición de energía eléctrica actual de la CENTROSUR
- Analizar los parámetros de los sensores y dispositivos de comunicación a utilizar.
- Diseñar la topología de la red inalámbrica con la tecnología ZigBee.
- Estructurar la base de datos de acuerdo a los campos necesarios para almacenar la lectura de medición de consumo de energía.
- Implementar la red en tres hogares como prototipo para verificar el funcionamiento del proyecto.
- Realizar pruebas y correcciones para contrastar la lectura de medición de la red implementada con la lectura residencial que otorga la CENTROSUR.

1.4. Metodología

El desarrollo del presente proyecto se realizará en base a dos métodos de investigación, el primero es de tipo descriptivo y el segundo de tipo cuasi – experimental. La formulación de la problemática del proyecto conlleva a la gestión del diseño y al desarrollo de una red ZigBee.

La investigación de tipo descriptivo enfoca a la especificación detallada del diseño del desarrollo tecnológico seguida de la metodología cuasi – experimental que trata de un proceso de implementación donde se realizará las pruebas pertinentes para evaluar el desarrollo tecnológico de la red en relación a los objetivos planteados. En la figura 1.1 se muestra el diagrama respectivo (Anselm Strauss, 2013).

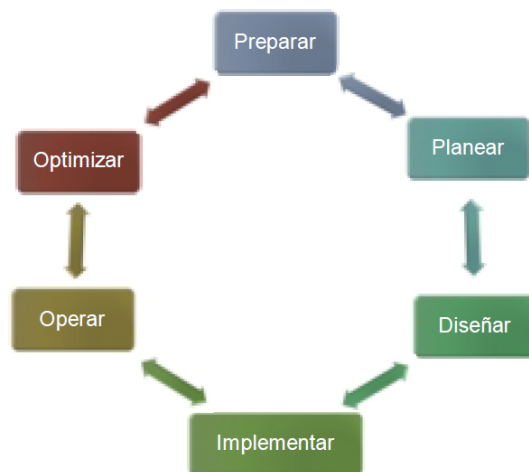


Figura 1.1: Metodología de Investigación.

1.5. Organización del trabajo de grado

- Capítulo 1: Generalidades.

En este apartado se habla sobre la motivación de la investigación implicada por la problemática que surge en la ciudad de Cuenca, para posteriormente definir los objetivos del proyecto y en consecuencia la metodología a aplicarse; por ultimo concretar la estructura de este documento.

- Capítulo 2: Estado del arte.

En este capítulo se enfatizarán los acontecimientos y estados actuales de los desarrollos tecnológicos que preceden ante la problemática surgida con los medios elaborados, para ello se analizarán varios de los estudios en base a la tecnología ZigBee y sus derivaciones inmiscuyendo la determinación del consumo energético en los hogares.

- Capítulo 3: Marco teórico.

Se realizará una exploración de la información pertinente al desarrollo tecnológico que se propone, siendo los temas abordados: las comunicaciones inalámbricas, medidores de consumo, tecnología ZigBee, consumo energético, topologías de red, de tal forma que se pueda llegar a la solución de la problemática.

- Capítulo 4: Descripción del sistema.

En este capítulo se desarrolla la descripción del sistema y su diseño, incluso tratará sobre la implementación de la red ZigBee, adecuando los puntos en cada uno de los hogares. En esta fase se tendrá en cuenta el estudio del diseño tanto lógico, como físico. En este apartado también existirán las pruebas y correcciones previas a resultados finales.

- Capítulo 5: Resultados.

Tratará de una breve síntesis de los aspectos más destacados de cada capítulo, principalmente sobre los resultados del proyecto. Las recomendaciones son aspectos que se va adquiriendo según el avance del proyecto y a su vez generando sugerencias dentro de la investigación.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se enfatizarán los acontecimientos y estados actuales de los desarrollos tecnológicos que preceden ante la problemática surgida con los medios elaborados, para ello se analizarán varios de los estudios en base a la tecnología ZigBee y sus derivaciones, incluyendo la determinación del consumo energético en los hogares.

2.1. Estado del arte

En el año 2012, se realizó la conferencia de tecnologías de innovación para redes inteligentes – Asia (ISGT - ASIA), en la cual se presentó la siguiente publicación científica que se refiere a realizar una arquitectura reutilizable para el software integrado de energía inteligente de los dispositivos HAN (red de área de hogares, por sus siglas en inglés). Este documento propone una arquitectura escalable de diseño de software embebido para SE HAN (energía inteligente en red de área de hogares, por sus siglas en inglés), que son dispositivos que pueden ayudar a la reutilización de software para hacer frente a la rápida evolución de la SEP (perfiles de energía inteligente, por sus siglas en inglés) utilizando ZigBee. Este artículo revisa la arquitectura actual y el diseño de software de los dispositivos SE HAN, y propone una arquitectura modular escalable para facilitar la reutilización de la mayor parte de ellos, cuando existe una mayor evolución de la SEP (Waileung Ha, Member, IEEE, Hongyi Sun, Senior Member, IEEE, 2012).

En la tercera conferencia internacional de energía renovable y sostenible (IRSEC), se presentó un artículo llamado: “Visión general de arquitecturas de sistemas y técnicas de gestión de energía en el hogar” cuyo objetivo fue de informar a los usuarios finales el consumo de electricidad de una red inteligente, para permitir un seguimiento y optimización del consumo. Esto se puede implementar a través de un Sistema de Gestión de Energía para el Hogar (HEMS), que tiene el propósito de controlar y optimizar la eficiencia del consumo de energía de una manera segura. Este sistema requiere el uso de contadores inteligentes, un controlador principal (HC), así como los dispositivos electrónicos inteligentes (IED) instalados en los

diversos aparatos seguidos del sistema de control y adquisición de datos (SCADA), aunque la industria y el mundo académico se está centrando cada vez más en mejorarlo mediante la introducción de redes de sensores inalámbricos (WSN), tales como ZigBee (Jawad LOTFI, 2015).

En (P. Corral, 2012) se describe el estudio de lecturas automáticas de contadores (AMR) para espacios internos, ya que trata de una implementación Wireless Sensor Network (WSN) basada en la tecnología ZigBee. Esta lectura autónoma sobre un medidor se la realiza para la recopilación remota de información de servicios públicos, tales como gas, agua, luz o cualquier otro. Tratará de la monitorización de la energía eléctrica que se puede controlar remotamente, permitiéndose la facturación pre-pagada incluso hasta supervisar la calidad de energía proporcionada por parte de la empresa de dicho servicio. Estas redes se las conoce como redes ad-hoc (red inalámbrica descentralizada), como son las redes de sensores, más conocidas como Wireless Sensor Networks (WSN); estas redes utilizan módulos de radio-comunicaciones que llegan a ser más baratos y pequeños, incluso a realizar un trabajo en conjunto con microcontroladores. Hay tecnologías para realizar comunicaciones en las WSN entre ellas la más prometedora es la llamada ZigBee.

En (Montoya, 2016) se realizó un diseño de una arquitectura que tiene como objetivo controlar y monitorear el consumo energético de los hogares mediante una red ZigBee con la finalidad de disminuir la emisión de CO₂. La metodología utilizada fue una investigación aplicada en la cual se realizaron tres etapas; la primera fue un estado del arte en todo lo referente sobre sistemas de monitoreo y control del consumo energético, segundo se efectúa el diseño de hardware y finalmente se generó el diseño de software. Los resultados que presenta el sistema propuesto se dividen en dos partes: hardware y software.

En (Domenico Balsamo and Gianluca Gallo, 2015) se observa el diseño de un medidor de energía inalámbrica (NIWEN) sin batería externa, no intrusivo para medir la corriente, voltaje y factor de potencia, este medidor para auto sustentarse extrae la energía de la carga monitorizada. Presenta una interfaz inalámbrica (ZigBee) para la comunicación con el sistema de construcción inteligente. La finalidad que tiene la investigación, es la eficiencia energética en los edificios inteligentes que requieren supervisar el consumo de energía de la iluminación,

máquinas y aparatos eléctricos, analizando formas de ondas de voltaje y de corriente, permitiendo diagnosticar la calidad de la energía, con el propósito de reducir su desperdicio. Se realizaron pruebas de funcionamiento para evaluar el rendimiento del sistema en términos de medición de corriente, tensión, factor de potencia y determinación del consumo, contrastando los datos adquiridos con un medidor de potencia calibrado, tal resultado fue que el error máximo obtenida por el sistema diseñado fue del 2%, un error que se da principalmente por los armónicos que presenta la corriente medida.

El artículo presentado en (Wason Somkaew, 2014), tiene como objetivo la investigación y aplicación de la implementación de seguridad de datos en la red ZigBee para sistemas AMI (Infraestructura de medición avanzada). La seguridad de los datos a través de la red es muy vulnerable y tiene que ser robusta debido a que se conecta directamente con la instalación del consumidor. El estándar de protocolos que se ocupa para los sistemas AMI es DLMS/COSEM, que recomienda la criptografía AES GCM de 128 bits. Los resultados que se efectuaron para el cifrado y descifrado de datos, se lo estableció entre la unidad concentradora de datos (DCU) y dos medidores inteligentes monofásicos, utilizando el software Docklight instalado en la PC para realizar el monitoreo. Para la conexión entre el software y los medidores inteligentes se ocupa el puerto serial dado que la comunicación se realiza vía UART. La conexión entre el DCU y el software también se lo realiza mediante puerto serial. A partir de los resultados obtenidos se llega a la conclusión que el crypto-engine (módulo criptográfico autónomo) basado en hardware utiliza menos tiempo de transmisión, es decir 180 ms que la de software, por tal razón es interesante para la implementación de monitoreo en tiempo real para los sistemas AMI.

El artículo desarrollado en (Chunlong Zhang, 2012), es fundamentado en el internet de las cosas y la tecnología ZigBee, dado que se realizó un diseño inteligente basado en la red de sensores inalámbricos utilizando el protocolo IEEE 802.15.4, toda la red utilizó dispositivos MCU de la Texas instruments, que fue el ARM Cortex –M3, todo el sistema se ejecuta en el μ C / OS-II, que tiene incorporado un sistema operativo multitarea que permite trabajar en tiempo real. Los usuarios pueden acceder al sistema mediante una página web o por GSM, dado que permite visualizar los parámetros de acondicionamiento del hogar, tales como, temperatura, lecturas del

medidor, humedad, también permite tener control de ciertas actividades como: la luz, aire acondicionado y calefacción. Se ha demostrado que el sistema propuesto tiene bajo consumo de energía, bajo costo y sobre todo una red segura.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

A continuación, se realiza una exploración de la información pertinente al desarrollo tecnológico que se propone, siendo así los temas abordados serán: las comunicaciones inalámbricas, medidores de consumo, tecnología ZigBee, consumo energético, topologías de red de tal forma que se pueda llegar a la solución de la problemática.

3.1. ZigBee

La ZigBee Alliance es una organización que asocia a grandes empresas del mundo como es SIEMENS y HONEYWELL que son empresas productoras de instrumentación industrial y de medida, circuitos integrados incluso sistemas embebidos como: MICROCHIP, TEXAS INSTRUMENTS, SONY, LG, THOMSON entre otros. Son numerosas las empresas que pertenecen a la ZigBee Alliance, la mayoría de ellas tienen el objetivo de desarrollar un protocolo de comunicaciones inalámbricas de bajo consumo, baja tasa de transferencia de datos y alcances importantes para que las aplicaciones finales sean productos de innovación (Gislason, 2008).

La tecnología ZigBee es utilizada para la radiodifusión digital de datos mediante un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación, tratando de ahorrar lo máximo en cuanto a la energía de consumo. Esta tecnología está basada en el estándar de la IEEE 802.15.4.

El protocolo de comunicación inalámbrica ZigBee da mucho de qué hablar por su versatilidad y facilidad de operación a nivel residencial, comercial e industrial; por lo tanto, se hace un hincapié en las tramas API con las que se manejan redes con el protocolo ZigBee, utilizando los distintos módulos de comunicación existentes en el mercado. Cabe recalcar que estos módulos pueden realizar aplicaciones conjuntamente con microcontroladores de modelos 16F### con una facilidad de conexión incluso con cualquier dispositivo que sea programable y que posea un módulo UART para las comunicaciones (Díaz, 2013).

Los módulos de comunicación por lo general, pueden comunicarse en forma inalámbrica mediante comandos AT o las tramas API. Dentro del protocolo ZigBee existen varias tramas API, esto se debe a que cada una de ellas desempeña una función especial según sea la aplicación a desarrollar. Unos protocolos "despiertan" al nodo para empezar a transmitir y luego vuelve a dejar en reposo para ahorrar energía (Díaz, 2013).

3.1.1.Arquitectura del Protocolo ZigBee

La arquitectura del Standard ZigBee está basada en el modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI), ocupando 4 de las 7 capas del modelo OSI con el fin de simplificar la arquitectura alcanzando un bajo consumo de energía, bajo costo y baja tasa de transmisión.

Como se puede ver en la figura 3.1 el Standard IEEE 802.15.4 define las dos capas inferiores; la capa física (PHY) y la sub-capa de control de acceso al medio (MAC). Por otro lado el Standard ZigBee proporciona la capa de red (NWK) y el marco para la capa de aplicación; en donde la capa de aplicación (APL) consiste en la APS (sub-capa de soporte de aplicaciones) y ZDO (objetos de dispositivos ZigBee) (Chonggang Wang, 2014).

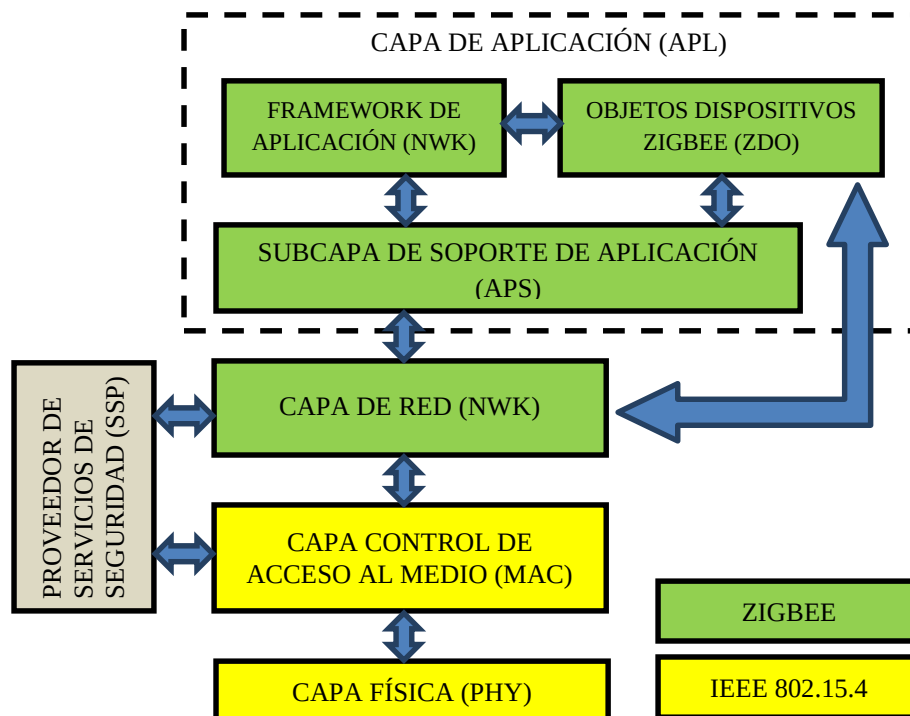


Figura 3.1: Pila de capas de ZigBee.

3.1.2. Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 define las dos capas inferiores que son, el nivel físico y el control de acceso al medio (MAC) de las redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (LR-WPAN) (Stevanovic, 2007).

- **Capa física IEEE 802.15.4**

Esta capa soporta las funciones de selección de canal, la calidad de enlace, la detección de la intensidad de señal recibida y por último la evaluación de canal libre para ayudar a la selección ya mencionada (Stevanovic, 2007). Utiliza un modo de acceso de DSSS (Direct Seq Spread Spectrum) y alguna de las siguientes bandas:

2450 MHz 16 Ch Modulación 0-QPSK

915 MHz 10 Ch Modulación BPSK

868 MHz 1 Ch Modulación BPSK

- **Capa MAC IEEE 802.15.4**

Ofrece el servicio de transmisión de datos y de control, regula la validación de las tramas, regula el acceso al canal físico, gestiona la asociación entre nodos, garantiza *slots* de tiempo y ofrece seguridad. Los nodos reciben una dirección de 16 bits.

Aquí se puede distinguir dos nodos como: los FFD que desempeñan el papel de *enrutadores* y los RFD que suelen ser los dispositivos finales. Los nodos pueden adquirir diferentes roles; los FFD pueden actuar como coordinador, en este caso tienen la capacidad para hacer *enrutador* para otros FFD o para RFD. También pueden adquirir el rol de coordinador pero de toda la red de área personal (PAN), siendo así que los RFD solo pueden ser dispositivos finales (Markus Krauß, 2014).

En lo que se refiere a topologías se muestra en la siguiente figura 3.2 las formas de diseñarlas, la topología estrella, la topología malla y la topología peer-2-peer conocida como punto a punto.

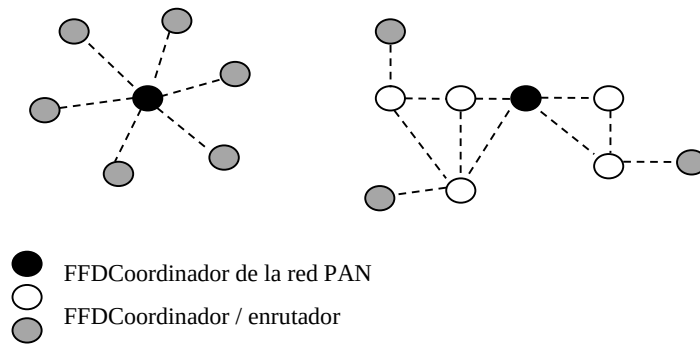


Figura 3.2: Topologías de red IEEE 802.15.4 capa MAC.

En los escaneos de canal activo: los FFD envían un *beacon* y se quedan a la espera de respuestas, de esta manera localizan a los RFD. En el caso de los escaneos de canal pasivo: los FFD solo esperan el *beacon* que usan los RFD para localizar a los FFD (coordinadores y PAN's). Se expone en la figura 3.3. (Stevanovic, 2007).

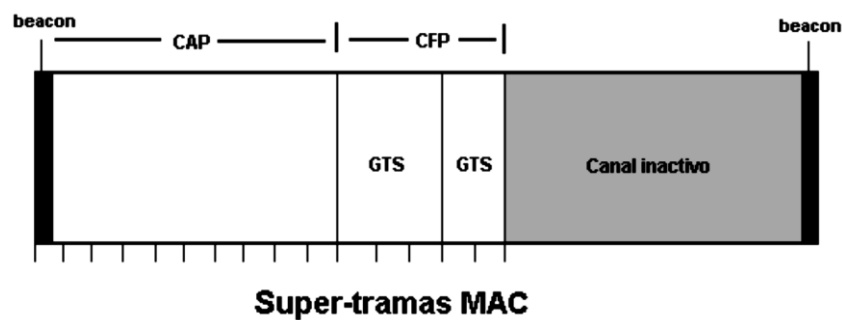


Figura 3.3: Superframes de la capa MAC IEEE 802.15.4.

Fuente: (Stevanovic, 2007).

- **Otras características IEEE 802.15.4**

- Acceso al canal por CSMA-CA.
- 16 canales en la banda ISM de 2.4 GHz, 10 canales en 915 MHz y 1 canal en 868MHz.
- Potencia de transmisión es aproximadamente 1mW.
- Medición de la señal RSSI (indicación de la intensidad de la señal recibida).
- Gestión de energía para garantizar su bajo consumo.

- **Banda de frecuencia IEEE 802.15.4**

IEEE 802.15.4 tiene dos capas PHY que operan en dos rangos de frecuencias separadas, 868/915 MHz y 2.4 GHz. La banda de frecuencia europea de 868 MHz y 915 MHz es utilizada en países como Estados Unidos y Australia; y para el resto del mundo se ocupa 2.4GHz. En la tabla 3.1 se observa las especificaciones que tiene cada banda de frecuencia (Chonggang Wang, 2014).

Tabla 3.1: Especificaciones de las bandas de frecuencias.

Banda de frecuencia	Región geográfica	Tasa de datos	Número de canales
868.3MHz	Europa	20Kbps	0
902-928 MHz	Estados Unidos	40Kbps	1 – 10
2405-2480 MHz	Resto del mundo	250Kbps	11- 26

En la figura 3.4 que se presenta a continuación se observan las distribuciones de canales en las bandas de frecuencia de 868 MHz, 915MHz y 2,4MHz.

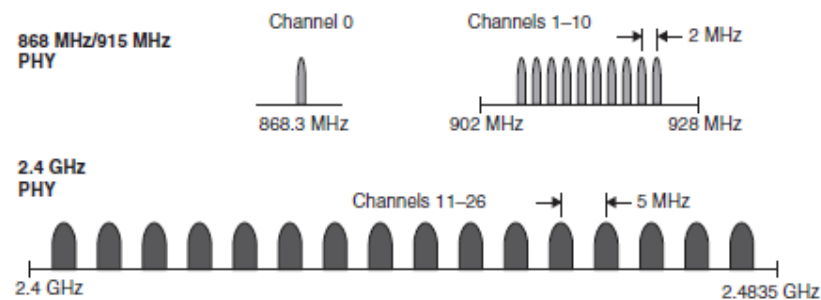


Figura 3.4: Distribución de canales IEEE 802.15.4.

Fuente: (Gislason, 2008)

3.1.3. Estándar ZigBee

El Standard ZigBee trata un conjunto de protocolos basándose en el Standard IEEE 802.15.4 para realizar comunicaciones inalámbricas de radiodifusión digital. Está orientado a aplicaciones que requieren una tasa de envío de datos mínimo con la

necesidad de optimizar el consumo. El Standard ZigBee define dos capas superiores que son, la capa de red (NWK) y la capa de aplicación (APL) en función de los servicios de seguridad (Markus Krauß, 2014).

- **Capa de red (NWK) ZigBee**

La capa NWK de las redes ZigBee en cuanto a tratar con dispositivos se refiere, trabaja con el mismo escaneo que utiliza la capa MAC del Standard IEEE 802.15.4, debido a que las redes ZigBee constan con dispositivos que desempeñan los tres roles principales que son:

- Coordinador ZigBee: es un FFD que gestiona toda la red ZigBee.
- Enrutador ZigBee: es un FFD con capacidad de enrutamiento.
- Dispositivo Final: es un RFD o FFD actuando como nodo simple.

- **Direccionamiento ZigBee**

Al momento que se desea unir un nuevo dispositivo a la red se le asigna un rango de direcciones ya sea de 64 bits (dirección larga) o de 16 bits (dirección corta) todas consecutivas. Entonces la primera dirección del rango es la dirección del propio nodo, las demás están disponibles para que dicho nodo (*enrutador* / *coordinador*) se las asigne a sus hijos ya sean otros *enrutadores* o puede ser dispositivos finales. En la tabla 3.2 se expone los tipos de direcciones.

Tabla 3.2: Tipo de direcciones.

Tipo de dirección	Especificación	Ejemplo
16 – bits	Solo dentro de una red	23F7
64 – bits	Más utilizado	0013A200403E0750

En la siguiente figura 3.5 se expone un ejemplo donde se puede ver como un Coordinador ZigBee dispone de 0 a 28 direcciones, que a su vez asigna al primer

nodo de 1 a 13 direcciones, al nodo 14 le asigna de 14 a 26 direcciones y a los nodos 27 y 28 les atribuye como dispositivos finales con sus respectivas direcciones; el resto del direccionamiento actúa de la misma manera (Hill, 2003).

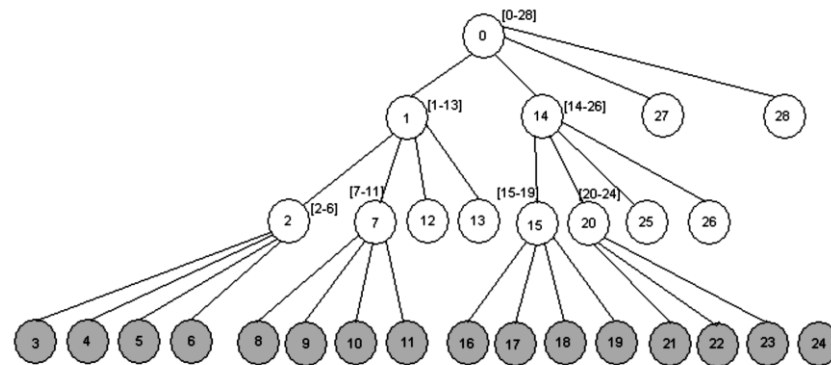


Figura 3.5: Asignación de direcciones en la capa NWK.

Fuente: (Hill, 2003).

Para que llegue un mensaje de un nodo a otro, los nodos deben estar en el mismo canal, tener la misma información PAN (Network Área Personal) y el nodo emisor debe conocer al menos una de las direcciones del nodo receptor, tal como se muestra en la figura 3.6 (Faludi, 2010).

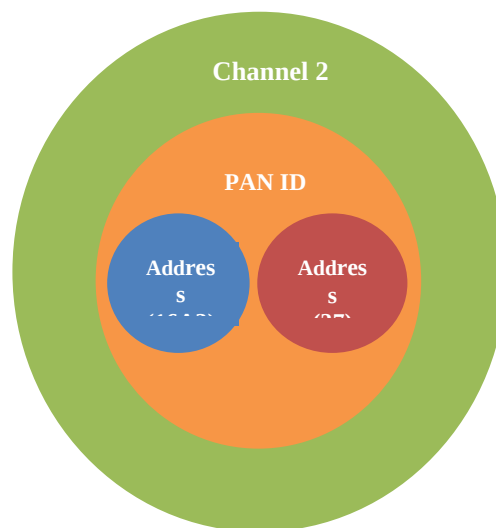


Figura 3.6: Diagrama de Venn, canal, PAN ID y direccionamiento.

- **Enrutamiento ZigBee**

El Standard ZigBee trabaja con dos tipos de topologías, la topología malla y la topología árbol.

La topología árbol; trata de un enrutamiento sencillo, ya que solo existirán enlaces padre-hijo manteniendo su propia dirección y la de sus hijos, es decir, los rangos de direcciones de cada rama que conforma el padre.

La topología malla; trata de un enrutamiento basado en AODV (Adhoc on Demand Distance Vector Routing Algorithm). Entonces el enrutador contiene una tabla denominada RDT (Routing Discovery Table), la misma que contiene los registros de ruteo, ahora, para conocer un destino se emite un mensaje RREQ (*broadcast*) que se envía por toda la red hasta dar con el destino y responde con un RREP. Mientras sucede todo este proceso las tablas RDT se van actualizando (Abouzar Shahraki Kia, 2012).

Ahora es importante decir que de acuerdo a los alcances de cada modelo de los componentes de la red se predispone de un enrutamiento geográfico como se muestra en la figura 3.7, que trata de asignar a los nodos existentes de la red una localización, que puede ser una posición geográfica real o coordenadas virtuales; de esta manera se difunden dichas direcciones (posiciones) periódicamente a los vecinos lo que hace de ellos un enrutamiento para poder minimizar las distancias al momento de buscar un destino (Rogers, 2007).

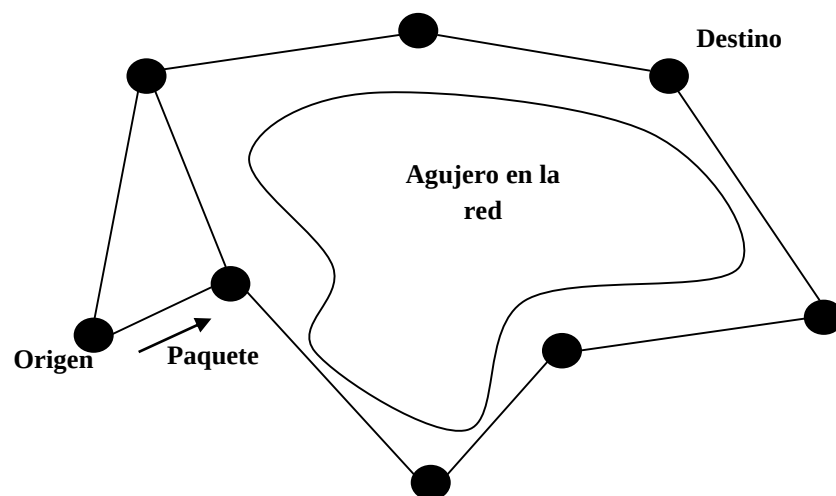


Figura 3.7: Enrutamiento en ZigBee. Problema agujeros en la red.

- **Capa de aplicación (APL) ZigBee**

El servicio que ofrece la capa de aplicación es uno de mucha importancia, ya que es la transferencia de datos entre los objetos de la misma, por ello se puede decir que es importante.

Entonces para entender bien sobre la capa de aplicación se explicará el APO (aplicación de objeto, por sus siglas en inglés), que controla una parte del hardware en cada dispositivo existente de la red. Por otro lado el ZigBee Device Object (ZDO), es el objeto que da servicios a una APO para que brinde una gestión de red, una gestión de comunicación, y una gestión de seguridad, incluso el descubrimiento de servicios implementados en cada dispositivo (Chonggang Wang, 2014).

Es importante decir que el término clúster, es la agrupación de atributos de una APO. Por otro lado se debe implementar un perfil especial en todos los dispositivos de la red ZigBee (ZDO), ya que da soporte para el descubrimiento de dispositivos y descubrimiento de servicios como ya se explicó anteriormente (Chunlong Zhang, 2012).

- **Tipos de tráfico**

Los tipos de tráfico que se presentan dentro de las redes ZigBee son tres en particular

- Datos Periódicos (continuo): son los datos que se transmiten cada cierto tiempo.
- Datos Intermitentes (por evento): son los datos que se transmiten ante un cambio externo.
- Datos Periódicos con comunicación garantizada (GTS) conocida como súper-tramas.

3.2. Medidores de consumo

3.2.1. Control de consumo eléctrico

En esta sección se hablará del control de consumo eléctrico que no es nada más que realizar un control sobre el gasto en kWh de una determinada parte de una casa o

incluso la monitorización del consumo eléctrico total. Para ello el desarrollo de la red ZigBee ayudará a tener ideas más claras en cuanto a un consumo eléctrico mensual.

Últimamente se observa como la empresa que brinda el servicio eléctrico ha sustituido los medidores analógicos por digitales, más no se ha podido implementar contadores inteligentes. Estos dispositivos almacenan la información de consumo eléctrico transmitiendo dicha información hacia una red específicamente diseñada para llevar hacia una base de datos, la misma que permita visualizar los datos según conveniencia de la empresa eléctrica.

Por tal razón, el sistema de consumo eléctrico puede tener un control remoto sobre los clientes, mediante transmisiones bidireccionales. Por lo que se puede decir que el objetivo de un control de consumo eléctrico es medir el consumo eléctrico en los medidores de los domicilios, de forma que se pueda tener el consumo instantáneo de todos los aparatos eléctricos de la casa.

3.2.2.Medidor eléctrico

El medidor eléctrico es un aparato electromecánico, también conocido como contador de servicio básico; es utilizado para medir la energía total consumida en un circuito eléctrico doméstico. El medidor debe estar regulado y estandarizado para que la empresa que brinda el servicio eléctrico pueda realizar una facturación adecuada de la potencia y energía consumida.

El principio de funcionamiento de un medidor se basa en adquirir el voltaje, la corriente y el factor de potencia, siendo este último el coseno del ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente, para a su vez convertir esta información en salida de pulsos (proporcional a la energía eléctrica) permitiendo visualizar en un registro propio de tipo analógico o digital. Como se ve en la figura 3.8, internamente contiene un rotor controlado por un regulador magnético, gira a una velocidad proporcional a la cantidad de potencia consumida; mientras que el eje del rotor está conectado mediante engranajes a un conjunto de indicadores que son los que marcan el consumo de energía domiciliaria (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

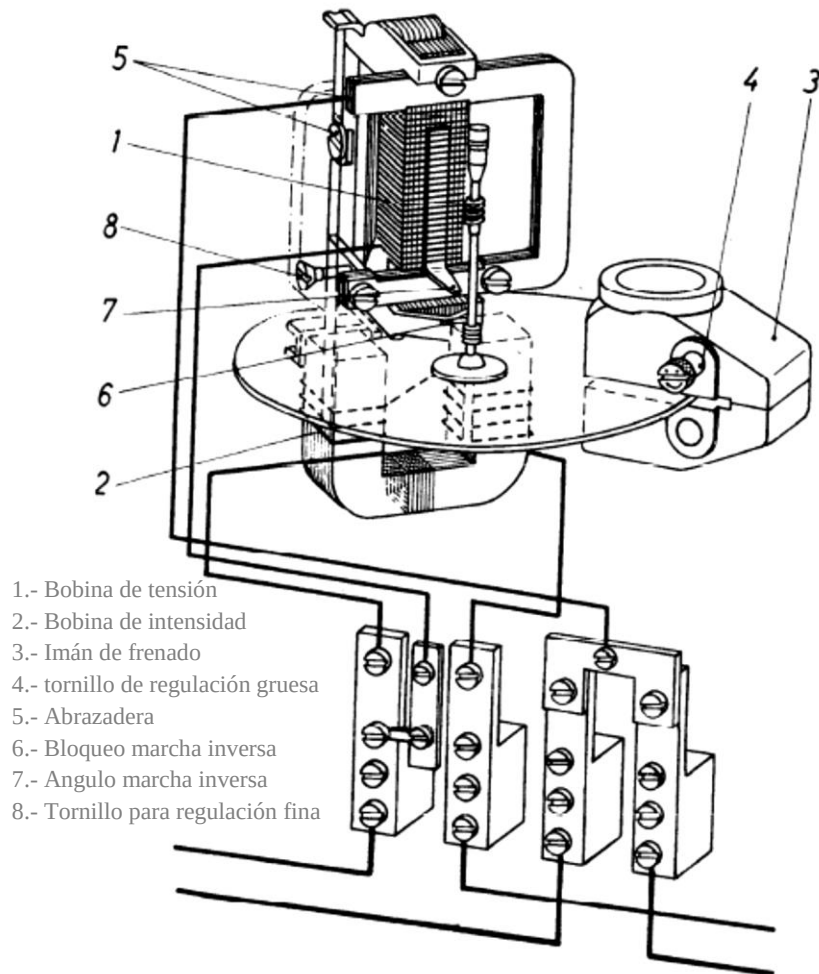


Figura 3.8: Estructura interna del medidor.

Fuente: (Rios, 1999).

Existe una clasificación para los medidores, dependiendo de su construcción, clase de precisión, tipo de energía a medir y de acuerdo al circuito eléctrico.

3.2.3. Clasificación de medidores

3.2.3.1. Por construcción

- **Medidores de inducción**

A este tipo de medidores también se los llama medidores electromecánicos, se los conoce así, porque internamente tiene un conversor electromecánico (vatímetro analógico) que actúa sobre un disco, siendo la velocidad de giro proporcional a la

potencia consumida; por lo que se puede decir que son instrumentos que funcionan en base al principio de inducción magnética en el cual, las corrientes que atraviesan las bobinas reaccionan con las inducidas sobre el disco. A continuación se presenta en la figura 3.9 un medidor electromecánico (NUÑEZ, 2011).



Figura 3.9: Medidor electromecánico.

- **Medidores estáticos**

Este tipo de medidores también se los llama medidores electrónicos, se los conoce así, porque internamente la tensión y la corriente actúan sobre elementos de estado sólido (elementos electrónicos) los mismos que realizan un proceso análogo-digital mediante microprocesadores para generar pulsos de salida con una frecuencia proporcional a los vatios/hora. Por lo general estos medidores son de mayor precisión que los electromecánicos, en la figura 3.10 se presenta un ejemplar (NUÑEZ, 2011).



Figura 3.10: Medidor electrónico Enerlux.

3.2.3.2. Por precisión

De acuerdo al punto de instalación, carga a medir, nivel de tensión, tipo de cliente y otros parámetros, debe utilizarse un medidor de una clase determinada (Likinormas, 2014).

Por lo general se utilizan medidores de clases: 0.2, 0.5, 1 y 2. Siendo de mayor exactitud el medidor clase 0.2. En el cual este valor indica el error porcentual admisible para los valores de corriente entre el 10% nominal y la corriente máxima con el factor de potencia igual a 1 (Likinormas, 2014).

- **Medidor clase 0.2**

Este tipo de medidores permiten medir energía activa, siendo el de mayor exactitud y uno de los más utilizados. Por la misma razón son utilizados en grandes industrias, debido a que el consumo de energía eléctrica es masivo y su margen de error debe ser mínimo.

- **Medidor clase 0.5**

Estos medidores permiten medir energía activa suministrada en un punto de frontera, con otras empresas electrificadoras o para grandes consumidores alrededor de los 115kWh. La instalación debe realizarse con mucho cuidado debido a influencias externas (Likinormas, 2014).

- **Medidor clase 1**

Estos medidores permiten medir la energía activa y reactiva, incluyendo a los medidores trifásicos dentro de esta clase; estos medidores también aplican para grandes consumidores alrededor de los 55kWh (Likinormas, 2014).

- **Medidor clase 2**

Estos medidores entran a una clasificación básica, incluye los medidores monofásicos los cuales permiten medir energía activa de uso doméstico, oficinas, locales comerciales y pequeñas industrias, por lo que se puede decir que aplican a los consumidores con cargas menores a 55kWh (Likinormas, 2014).

3.2.3.3. Por la energía a medir

- **Medidor de energía aparente**

Estos medidores permiten medir la potencia aparente en un tiempo en kilovoltampere – hora (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

$$E = S * t \quad (\text{KVAh}) \quad (3.1)$$

- **Medidor de energía activa**

Estos medidores permiten medir la potencia activa en un tiempo en kilovatios – hora (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

$$E = P * t \quad (\text{KWh}) \quad (3.2)$$

- **Medidor de energía reactiva**

Estos medidores permiten medir la potencia reactiva en un tiempo en kilovoltamperereactivo – hora (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

$$E = Q * t \quad (\text{KVARh}) \quad (3.3)$$

3.2.3.4. Por el circuito eléctrico de la red

- **Medidor monofásico bifilar**

Se utiliza para el registro del consumo de energía de una acometida de dos hilos que conforman una fase y un neutro, siendo la tensión a soportar de 120V o 127V que proviene del sistema monofásico o trifásico respectivamente (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

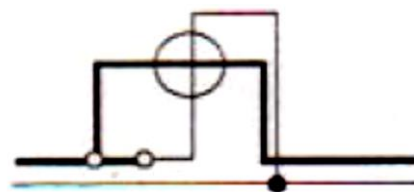


Figura 3.11: Conexión de un medidor monofásico 120V 2hilos.

Fuente: (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996)

- **Medidor monofásico trifilar**

Se utiliza para el registro del consumo de energía de una acometida monofásica de fase partida de tres hilos que conforman dos fases y un neutro, siendo la tensión a soportar de 240V-120V. Actualmente en desuso (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

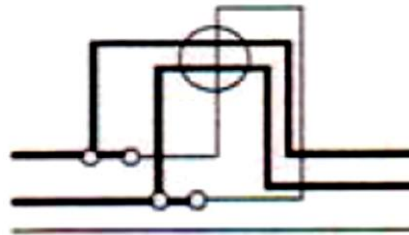


Figura 3.12: Conexión de un medidor monofásico 240V-120V 3hilos.

Fuente: (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996)

- **Medidor bifásico trifilar**

Se utiliza para el registro del consumo de energía de una acometida en baja tensión (B.T.) de tres hilos que conforman dos fases y un neutro, alimentadas de una distribución trifásica, siendo la tensión a soportar de 220V-127V (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

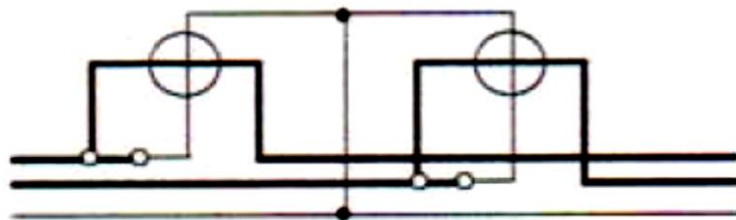


Figura 3.13: Conexión de un medidor bifásico 220V-127V 3hilos.

Fuente: (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996)

- **Medidor trifásico tetrafilar**

Se utiliza para el registro del consumo de energía de una acometida trifásica en baja tensión (B.T.) de cuatro hilos que conforman tres fases y un neutro, siendo la tensión entre fase y fase de 220V y 127V entre fase – neutro (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

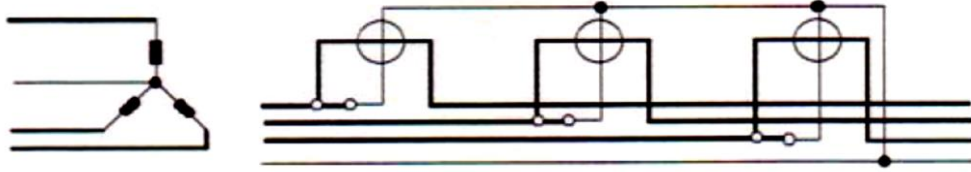


Figura 3.14: Conexión de un medidor trifásico 220V 4hilos.

Fuente (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996):

- **Medidor trifásico trifilar**

Se utiliza para el registro del consumo de energía de una acometida trifásica de tres hilos que conforman tres fases sin neutro, siendo la tensión entre fase y fase de 220V (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996).

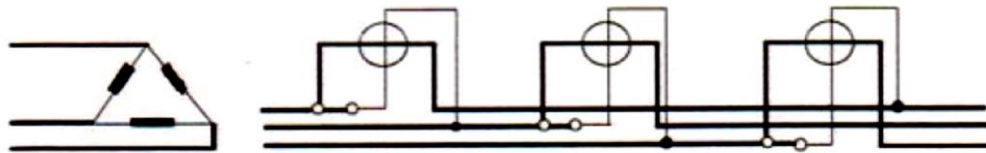


Figura 3.15: Conexión de un medidor trifásico 220V 3hilos.

Fuente (Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, 1996):

3.2.4. Tecnologías aplicadas a medidores

Existen tecnologías inteligentes e innovadoras para el registro, la captura, evaluación e incluso el procesamiento de todos los datos de los contadores (medidores); los mismos que conllevan un estándar en las técnicas de medición, ya sea agua o energía, todo lo que conforma servicios para el consumidor final. Muchas de las empresas industriales, sociedades inmobiliarias y empresas de servicio públicos se arriesgan a realizar lecturas a distancia a través de sistemas M-Bus cableados, sistemas de radio, o sistemas Smart Metering. Este cambio se da rápidamente debido a la privatización, la competencia, los avances tecnológicos y el enfoque a la necesidad de datos precisos y confiables (University of Texas, 1985).

3.2.4.1. Tecnología AMR

AMR son las siglas de la tecnología Automatic Meter Reading cuyo significado en español es la Lectura de Medición Remota, es un término que se aplica para la utilización de una gama de tecnologías específicas en las lecturas de consumos de servicio públicos y la transferencia de información a ciertas bases de datos centralizadas para la facturación y resolución de problemas. La mayoría de empresas de los países como Europa y Estados Unidos, también los continentes asiáticos están en estudios para la implementación de sistemas avanzados de AMR incluso de grandes escalas. La tecnología AMR abarca tecnologías que hacen que todo el sistema que sea posible aplicar para los beneficios predispuestos, tecnologías como son las móviles, tecnologías portátiles, redes basadas en plataformas de telefonía (cableada e inalámbrica), frecuencia de radio (RF), o una de las tecnologías más novedosas que es la transmisión eléctrica (PLC, la más usada en redes eléctricas) (Afinidad Eléctrica, 2007).

Este avance, ahorra a los proveedores de servicios principalmente los gastos de viajes periódicos a cada ubicación física para leer un contador. Otra ventaja es que la facturación se puede basar en el consumo casi en tiempo real y no en estimaciones basadas en consumo previsto o anterior. Esta información actualizada, junto con el análisis, puede ayudar tanto a los proveedores de servicios públicos, como a los clientes a un mejor control del uso y la producción de energía eléctrica, consumo de gas, o consumo de agua. En la figura 3.16 se puede apreciar un esquema como se plantea la tecnología AMR en cuanto a su arquitectura se refiere. Uno de los ejemplares del uso de la tecnología AMR es sobre los medidores electromecánicos siendo la tecnología misma quien caracteriza la comunicación bidireccional entre el medidor y el servidor de datos, de tal forma que la captura de datos puede ser por intervalos, por ejemplo cada 10 minutos, de esta forma el registro que se va generando sería la medición de energía mensual por parte de los usuarios de la empresa que brinda el servicio público (Afinidad Eléctrica, 2007).

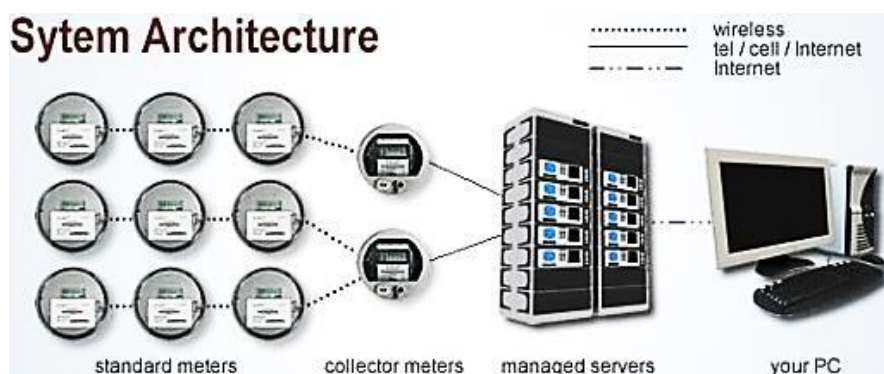


Figura 3.16: Tecnología AMR – Arquitectura.

Fuente: (Afinidad Eléctrica, 2007)

3.2.4.2. Tecnología AMI

AMI son las siglas de la tecnología Advanced Metering Infrastructure, su significado en español es infraestructura de medición avanzada. Es una infraestructura configurada que integra una serie de tecnologías para lograr sus objetivos, que hacen referencia con el consumo, demanda, forma de uso de energía, análisis, gestión y toma de decisiones. Un sistema AMI se compone de tres componentes que son: medidores inteligentes, redes de comunicaciones y sistema de gestión de datos de medición (MDMS) (Ramyar Rashed Mohassel, 2014).

El componente más importante del sistema AMI, es el medidor inteligente que se encuentra instalado en el hogar del consumidor. Las funciones que tiene el medidor en el sistema son: medición de la energía, registro de datos, análisis del uso de energía y comunicación bidireccional que permite enviar los datos remotamente a sistemas de procesamiento de datos con el objetivo de monitoreo y facturación del consumo. Los datos que transfiere el medidor, se recaudan en los concentradores de datos, que permiten a su vez transferir a través de las redes HAN (redes domésticas), NAN (redes de medidores), WAN (redes de área amplia), y FAN (redes de área de campo) a los sistemas de gestión de datos, que se encuentran en el interior de la empresa que suministra el servicio eléctrico, con el objetivo de procesar la información para facturar la energía eléctrica consumida. La tecnología AMI se utiliza en las redes inteligentes (Smart Grid), con el objetivo de crear una vía de comunicación bilateral entre los medidores inteligentes y la empresa eléctrica, generando un intercambio oportuno de la energía consumida en tiempo real,

demanda, momentos de uso de la energía por parte del consumidor, dando la posibilidad de controlar la energía que se consume. AMI permite realizar mediciones remotas, detección de fallas, monitoreo de la carga consumida, entre otras funciones que benefician tanto a la empresa eléctrica como al consumidor. Los beneficios que el sistema brinda es visualizar de forma clara y detallada el consumo de energía, de qué forma se lo está utilizando por parte de los usuarios. También permite mostrar el consumo en los nodos de la red en donde se efectúa la medición con el objetivo de conocer los puntos en donde se consume la energía facturada y la que no es facturada con el objetivo de reducir pérdidas de energía eléctrica (José Martín Gómez López, 2015).

3.3. Sensores

3.3.1.Sensor de corriente

El sensor no invasivo SCT-013-000 que se muestra en la figura 3.17, permite medir la intensidad de corriente que pasa por la acometida de una casa sin modificar la instalación eléctrica. También es posible utilizar modelos superiores o inferiores de acuerdo a la cantidad de corriente que se desea medir.



Figura 3.17: Sensor SCT-013-000.

3.3.2.Principios físicos

Dentro de este apartado se explica los principios físicos para poder realizar una medición de la corriente. Se empezará hablando de lo que es un transformador y su funcionamiento para entender lo esencial que será este hardware para este objetivo.

El primer transformador eléctrico fue construido por Michael Faraday en el año de 1831, este transformador estaba compuesto por dos bobinas enrolladas, una bobina sobre la segunda bobina teniendo como núcleo una barra de hierro. Michael Faraday descubrió que si la corriente de una bobina, era interrumpida, el flujo magnético de la segunda bobina variaba. En el año de 1884 los ingenieros húngaros Zipernowsky, Bláthy y Deri, crearon un modelo de transformador de corriente alterna e incluso descubrieron la fórmula matemática:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{i_p}{i_s} \quad (3.4)$$

Dónde: (V_s) es la tensión en el secundario, (N_s) es el número de espiras en el secundario, (V_p) y (N_p) corresponden al primario.

Entonces el transformador lo que hace es convertir la energía eléctrica alterna de un nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, refiriéndose al fenómeno de la inducción electromagnética, consiguiendo así una intensidad de corriente en el devanado secundario proporcional a la corriente que pasa por el primario.

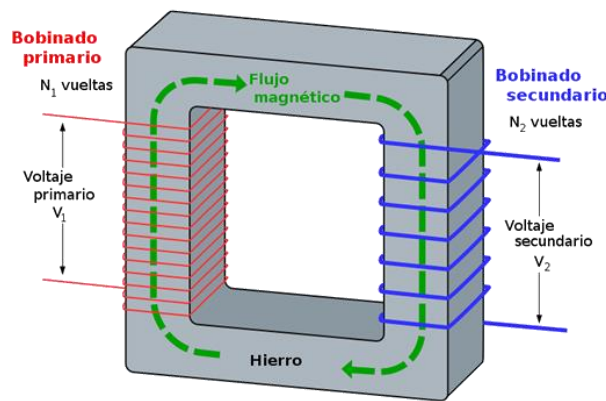


Figura 3.18: Dirección de flujo de corrientes de un transformador.

Fuente: (Alonso, 2015)

Una vez clara la idea sobre el principio del funcionamiento de un transformador, se abordará el tema del funcionamiento de una pinza amperométrica, en la figura 3.19 se muestra una pinza ejemplar. Se sabe que el amperímetro convencional (dispositivo invasivo) funciona interrumpiendo la línea de tensión y conectándolo en serie permitiendo medir la corriente; entonces si se aplica el principio de un

transformador, se puede medir la corriente de manera no invasiva, ya que el conductor a medir realiza el rol de un devanado primario, es así como se obtiene un dispositivo no invasivo conocido como pinza amperométrica. En este caso el devanado primario es de una sola espira.



Figura 3.19: Pinza Amperométrica.

Se puede decir que esta pinza se basa en medir indirectamente la corriente circulante por un conductor (cable) a partir del campo magnético, se la conoce con este nombre porque consta de una pinza que abre y presiona al cable que se desea medir, a más de volverse un método no invasivo para el circuito evita las caídas de tensión que podría producir un instrumento clásico. Siendo un dispositivo seguro para el operario ya que no es necesario de un contacto físico con el circuito eléctrico. La intensidad que se va a medir en el devanado secundario se obtiene por la inducción electromagnética, esta corriente es proporcional a la del devanado primario. A continuación, un diagrama de bloques del funcionamiento interno de la pinza amperométrica en la figura 3.20.

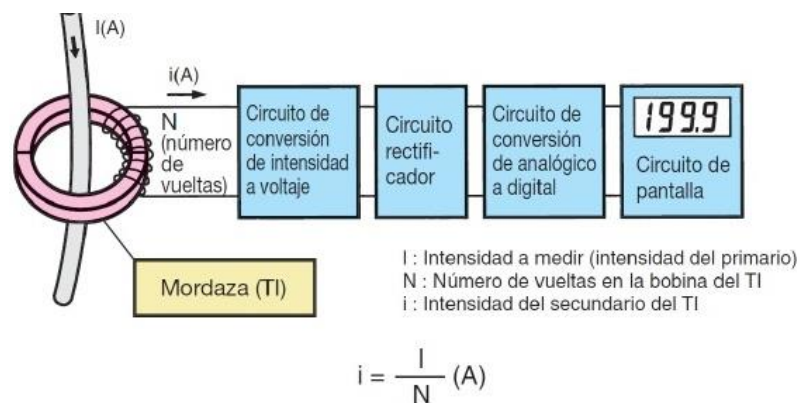


Figura 3.20: Diagrama de bloques del funcionamiento de una pinza amperométrica

Fuente: (Google Sities, s.f.)

3.3.3. Base teórica del sensor de corriente

Para la implementación del proyecto se vio una variedad de sensores con los principios físicos ya mencionados, por lo que se optó por trabajar con un sensor que sea “no invasivo”, al decir no invasivo se hace referencia a no modificar las redes eléctricas existentes de manera que sea fácil el acople, alto rendimiento y de gran aporte con los conocimientos estudiados.

El principio de funcionamiento del sensor de corriente es semejante al desempeño de una pinza amperométrica. Entonces al acoplar el sensor (devanado secundario) al conductor de la red eléctrica (devanado primario), se produce la inducción electromagnética, obteniendo una señal de corriente. Una vez acoplado el sensor, este captará el flujo magnético generado que a su vez será proporcional a la intensidad que circula en ese instante por el conductor de entrada del servicio eléctrico. La inducción electromagnética que se obtendrá en la salida del sensor, entregada por el devanado secundario, será una intensidad proporcional al conductor del servicio eléctrico.

A continuación, en la figura 3.21 se representa la conexión e interfaz del sensor conjuntamente con el conductor de entrada del servicio eléctrico al hogar. Se tomará en cuenta la resistencia que se coloca a la salida del devanado secundario, para cálculos posteriores, que es de donde se obtiene la señal a procesar.

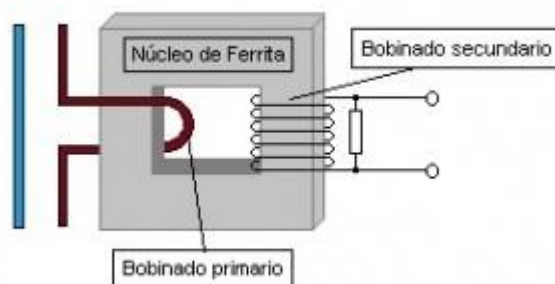


Figura 3.21: Devanado primario y secundario del sensor.

Fuente: (Alonso, 2015)

3.3.4. Especificaciones técnicas del sensor de corriente

En la siguiente figura 3.22 se presentará al sensor SCT-013-000, se observa la construcción del mismo, la ubicación del núcleo de ferrita y se demuestra que no es perjudicial al circuito de la red eléctrica.



Figura 3.22: Interfaz del sensor con el conductor de corriente.

Las especificaciones tanto técnicas como las limitaciones de trabajo del sensor de corriente, vienen dadas por los siguientes parámetros de la tabla 3.3 y en la figura 3.23 se muestra las dimensiones que están en milímetros:

Tabla 3.3: Parámetros del sensor de corriente.

Modelo	SCT-013-000
Corriente de entrada	0 - 100 ^a
Corriente de salida	55mA
Material del núcleo	Ferrita
Temperatura de trabajo	-25°C a +70°C
Número de espiras	2000
Non-linearity	±3%

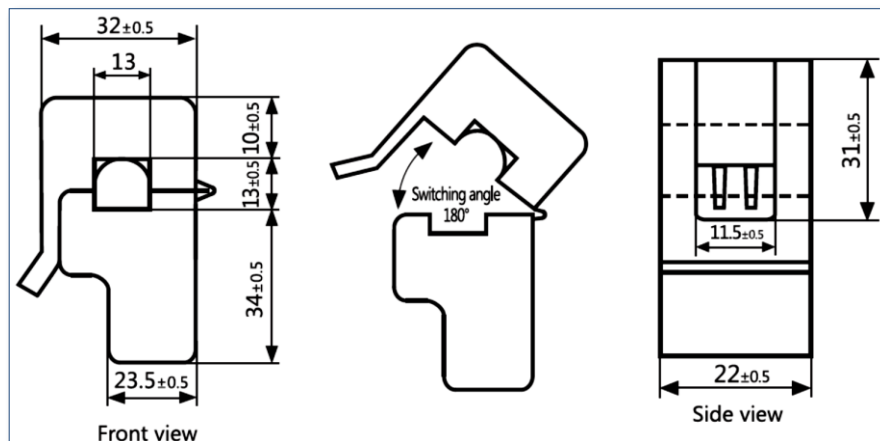


Figura 3.23: Dimensiones físicas del sensor.

Fuente: (Alonso, 2015)

En la figura 3.24 se explica las dos relaciones que se puede dar con un sensor no invasivo:

- Entrada de corriente con salida de voltaje
- Entrada de corriente con salida de corriente

Ambas opciones generan una proporcionalidad referente a la línea de la red eléctrica residencial.

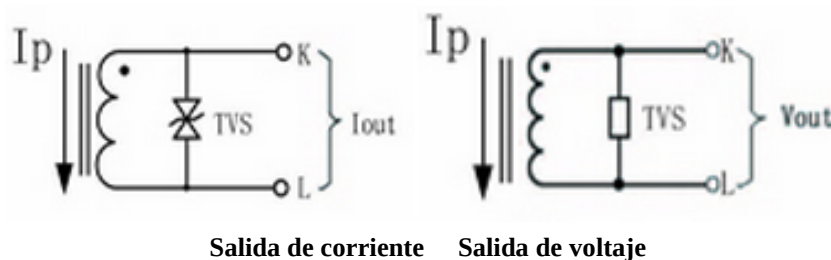


Figura 3.24: Conexiones internas del sensor de acuerdo a lo que se desea medir.

La señal obtenida por el sensor en función del consumo ya sea por intensidad o en tensión será una señal proporcional de un valor muy pequeño, razón por la que se ve la necesidad de implementar un circuito de acoplamiento capaz de amplificar y rectificar la señal para su posterior proceso.

CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se desarrolla la descripción del sistema y el diseño, incluso tratará sobre la implementación de la red ZigBee, adecuando los puntos en cada uno de los hogares. En esta fase se tendrá en cuenta el estudio del diseño tanto lógico, como físico. En este apartado también existirán las pruebas y correcciones previas a resultados finales.

4.1. Diagrama de bloques

El modelo que será presentado en este capítulo, se basa en un monitoreo de consumo de energía eléctrica brindado por parte de la empresa eléctrica, este trabajo de grado será implementado conjuntamente con los medidores instalados en las residencias monofásicas, donde usando un sensor no invasivo captura el flujo de corriente de dicha fase e incluso se verificará el voltaje al mismo instante que se obtiene el valor de corriente, para poder realizar una lectura correcta con el microprocesador ATMEGA328P-PU expuesto por parte de Arduino, aquí es donde el software realizará los cálculos respectivos para posteriormente transmitir mediante protocolo ZigBee, con el fin de llegar hacia la base de datos, donde los kWh acumulados y consumidos por parte de los clientes de la empresa que brinda el servicio eléctrico pueda ser planillado mensualmente según la conveniencia de la empresa. A continuación, se presenta en la figura 4.1 el esquema previo al desarrollo de la red ZigBee.

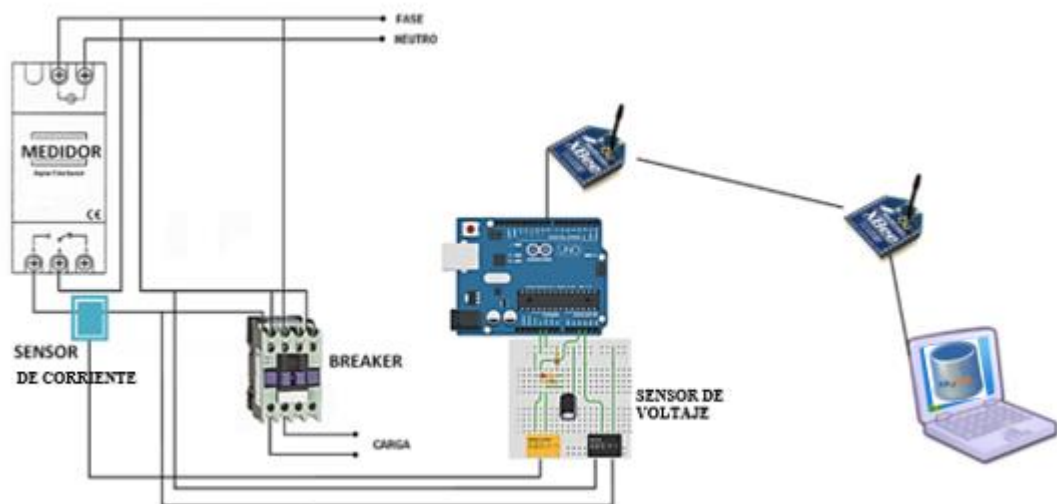
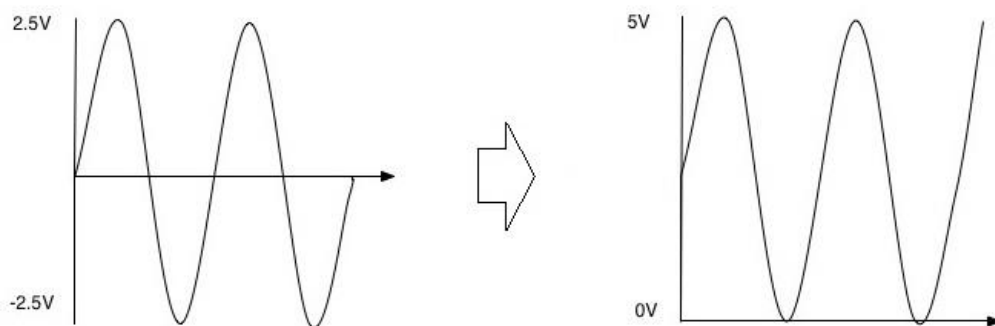


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema.

4.2. Interfaz electrónica con Arduino

El circuito de interfaz electrónica tiene una función específica como es la de amplificar la señal que proviene del sensor ya mencionado, como se sabe es una señal senoidal debido a que es una señal de corriente alterna. Mediante el uso de amplificadores operacionales (A.O.) la señal proporcionada por el sensor del consumo del servicio eléctrico se rectifica convenientemente para realizar una amplificación acorde a la necesidad de la interfaz; se lo llamara “ajuste fino”. Entonces la señal de la interfaz entregará una señal entre los -2.5V y 2.5V . Ahora al conectar a las entradas analógicas del Arduino se presenta la siguiente característica, el Arduino puede medir voltajes entre 0V y 5V , por lo que se debe incrementar 2.5V para llegar al rango predispuesto por el Arduino.

Hay que tener en cuenta que, si se aplica la opción de obtener una señal de corriente, previo al ingreso del Arduino se tiene que convertir la intensidad a voltaje. A continuación, la figura 4.2 muestra el cambio de la señal previa al ingreso del Arduino.



Señal de la interfaz Señal previa al Arduino

Figura 4.2: Adecuación de la señal para el Arduino.

Mediante un diagrama de bloques se ilustra en la figura 4.3 las conexiones entre la red del servicio eléctrico, el sensor, la interfaz de rectificación/amplificación y el Arduino como controlador de señales.

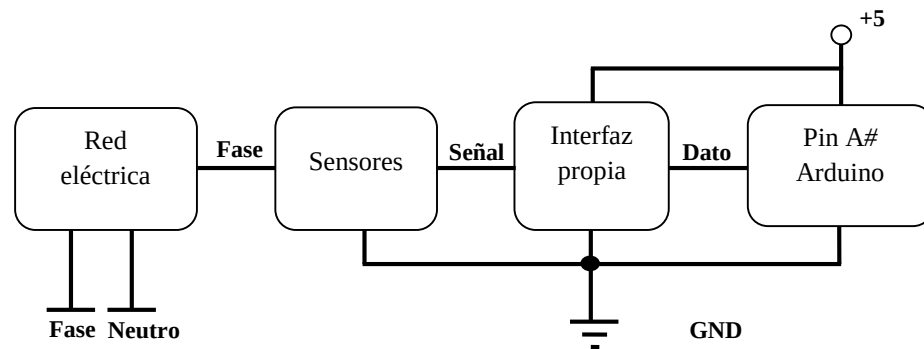


Figura 4.3: Diagrama de bloques de interconexiones para lecturas de consumo eléctrico.

Entonces, el sensor que se utilizará es el SCT-013-000, dicho de otra manera, es un transformador de corriente fabricado por Beijing YaoHuadechang Electronic Co. No contiene resistencia de carga (burden), más lo que conlleva es un supresor de tensión que limita la tensión en caso de una falla por parte de la carga (burden). Con este sensor se puede medir una corriente de hasta 100A, teniendo como salida máxima 50mA, es decir, una relación de 100A/50mA. El devanado interno consta de 2000 espiras y este número representa la relación entre la corriente que circula por el cable de la red del servicio eléctrico y la corriente que entrega el sensor.

4.3. Control y ajustes

Como se sabe el sensor SCT – 013 – 000 es un sensor analógico que entrega una señal de corriente, pues bien, como muestra la figura 4.4, la señal de corriente se convierte en una tensión con una resistencia de carga (Burden); tensión que es de suma importancia para la entrada análoga del Arduino. Entonces el rango que predispone el sensor para medir esta de 0 – 100A, ahora para proceder a calcular la resistencia Burden, se toma como corriente máxima los 100A.

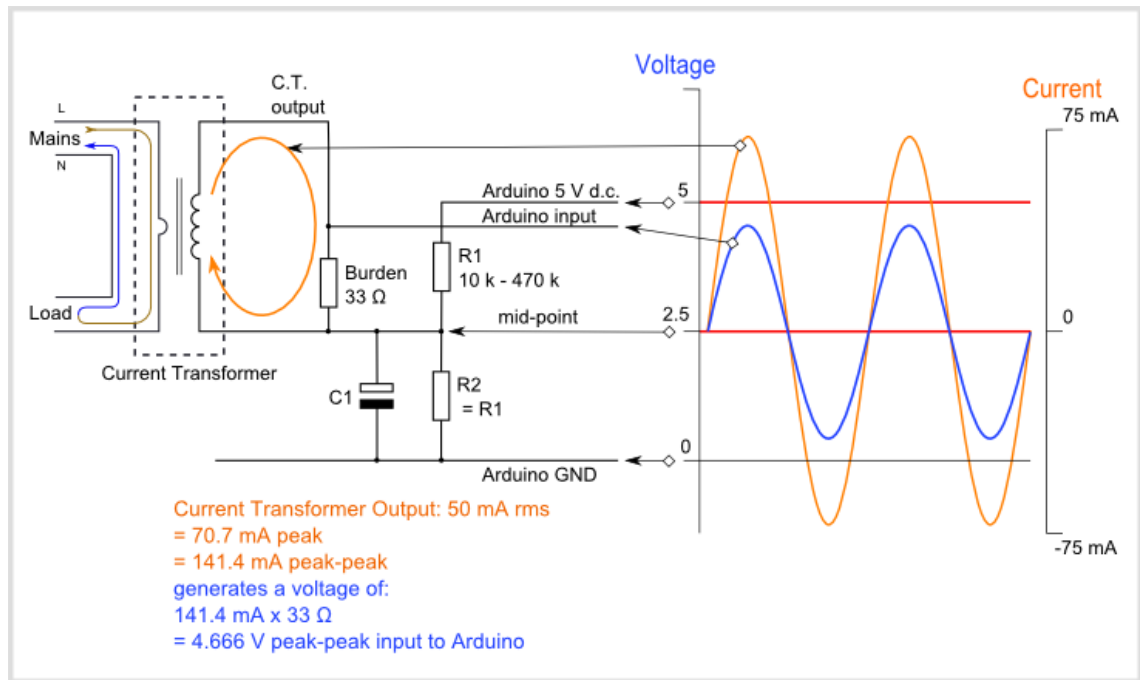


Figura 4.4: Solución para la adquisición de la señal de voltaje.

Para obtener la corriente pico se parte de la corriente RMS realizando el siguiente cálculo.

$$\text{corriente del primario} = I_{\text{RMS}} * \sqrt{2} \quad (4.1)$$

Para obtener la corriente del devanado secundario se basa en la relación de espiras con el siguiente cálculo.

$$\text{corriente del secundario p - p} = \frac{\text{corriente del primario}}{\text{número de espiras}} \quad (4.2)$$

Para el ajuste o calibración de la resolución de la medición de datos será en función a la tensión de referencia del Arduino (5V) como se muestra a continuación. En primera instancia, de acuerdo a los 5V del Arduino la referencia será la siguiente.

$$\text{Referencia} = \frac{\text{tension del Arduino}}{2} \quad (4.3)$$

Como siguiente lugar se tiene la carga (Burden) ideal para la resolución mencionada.

$$\text{Burden} = \frac{\text{Referencia}}{\text{corriente del secundaria p-p}} \quad (4.4)$$

Dado que los valores a obtener para “Burden” no siempre serán los comerciales por lo que se encontrará un valor alto y otro bajo referente al calculado; entonces se elegirá siempre el valor más pequeño, caso contrario la corriente de carga máxima creará una tensión superior a la de “Referencia” e incluso cuanto más lejos el valor, menor será la precisión. Sin duda alguna el valor exacto será lo óptimo. Y como paso final a la resolución de medición, se tiene la calibración de la librería “EmonLib.h”, dato que será de un cierto grado de importancia para la adquisición de datos y parte del siguiente calculo.

$$\text{calibración} = \frac{\text{número de espiras}}{\text{Burden}} \quad (4.5)$$

$$\text{calibración} = \frac{\frac{\text{corriente del primario}}{\text{corriente del secundario p - p}}}{\text{Burden}} \quad (4.6)$$

Como aporte a la reducción de consumo energético se acota lo siguiente; se debe utilizar valores de resistencias entre $10\text{K}\Omega$ a $470\text{K}\Omega$ que son valores estandarizados para mantener un consumo de energía mínimo, de este modo la vida útil de una batería se extiende a varios meses.

4.4. Red ZigBee

La red ZigBee planteada para el trabajo de grado constará de sensores, módulos de comunicación y una central que desempeña el papel de servidor con su respectiva base de datos; todo esto con el fin de adquirir información mediante los sensores que a su vez comunicándose con el módulo de comunicación; permitirán transmitir los datos de cada hogar e ir almacenando esta información en la base de datos, visualizando a tiempo real el consumo de energía eléctrica. En la figura 4.5 se aprecia el modelado de la red ZigBee sobre un sector de la ciudad.

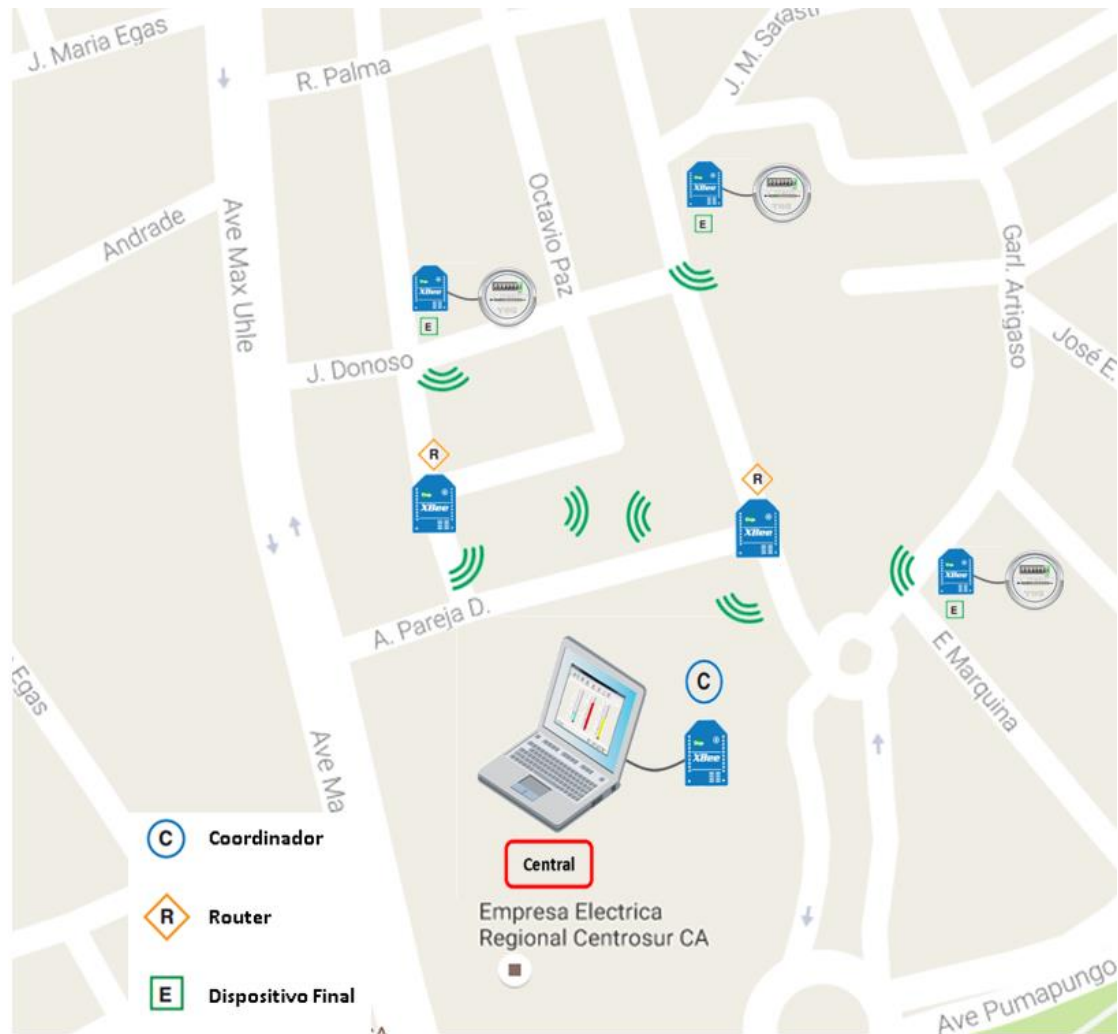


Figura 4.5: Modelado de la red en un sector de la ciudad.

4.4.1. Configuración del módulo XCore 2530

La configuración que se realiza para cada módulo es acorde al diseño prediseñado por los intereses de la red ZigBee. Los módulos desempeñarán diferentes roles según sea el punto de ubicación para la red, como decir un coordinador, diferentes enrutadores que darán el alcance necesario entre coordinador y los usuarios, por último, se tiene los dispositivos finales que serán el complemento de los sensores para la adquisición de información y transmitirlos inmediatamente con el objetivo de llegar al coordinador. Las características de los diferentes roles a configurar se especifican a continuación:

- **Coordinador**

- Selecciona un canal de comunicación y un ID PAN para construir una red.
- Permitir que otros enrutadores y dispositivos finales se unan a esta red.
- Direcciona los datos en la red.
- Debe mantenerse alimentado y no debe entrar en modo SLEEP.
- Conservar los datos de los dispositivos finales que entraron en el modo SLEEP hasta que se activen y recuperen los datos.

- **Enrutador**

- Debe unirse a una red de ZigBee antes de realizar la transmisión de datos.
- Permitir que otros enrutadores y dispositivos finales se unan a la red, después de unirse a uno.
- Direcciona los datos en la red al unirse a la red.
- Debe mantenerse alimentado y no debe entrar en modo SLEEP.
- Preservar los datos para los dispositivos finales que entraron en el modo SLEEP hasta que se activen y recuperen los datos.

- **Dispositivo final**

- Debe unirse a una red de ZigBee antes de realizar la transmisión de datos.
- No permiten que otros dispositivos se unan a la red.
- Transmite y recibe del nodo padre los datos.
- Necesita fuente de alimentación o batería de 3V.

Algunas de las características del XCore 2530 son:

- Alto rendimiento y baja potencia del núcleo del microcontrolador.
- Amplio rango de voltaje de suministro (2 V-3.6 V).
- 2 puertos USART.
- Máximo alcance alrededor de los 1500 metros.
- Comunicación estable alrededor de los 1300 metros.
- Comunicación automática alrededor de los 1000 metros.
- Diferentes velocidades de transmisión.

- Antena omnidireccional hasta 2.4GHz.
- Amplia gama de frecuencias.

El software ZBSCOMM es uno de los que se encuentran disponibles para trabajar con la PC conjuntamente con los módulos Core 2530 / XCore 2530. Con ZBSCOMM, se puede configurar de manera fácil cada módulo para la red ZigBee y a su vez leer las configuraciones actuales de dicho módulo todo mediante la interfaz de un PC por el puerto serial. Por otro lado, tenemos los comandos AT, que controla y configura de cierto modo cada uno de los módulos, en el caso de no utilizar el software para la configuración. A continuación, en la figura 4.6 se muestra la interfaz del software ZBSCOMM.

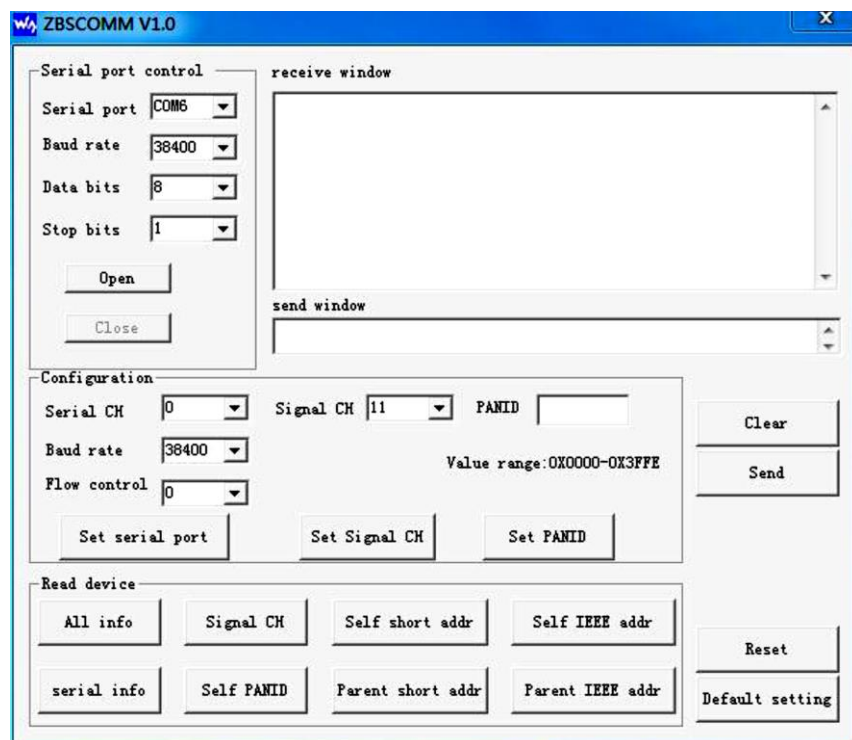


Figura 4.6: Interfaz grafica del software ZBSCOMM.

La red ZigBee exige parámetros de mucha importancia para la comunicación entre dispositivos finales, enrutadores y el coordinador. Los parámetros que se manejan para cada uno de los módulos se pueden observar mediante los comandos que se expondrán a continuación.

Comandos:

AT+GETPANID

AT+GETCHN

AT+GETUART

AT+GETCFG

AT+GETADDR

AT+GETIEEE

Los valores a devolver después de aplicar los comandos son los siguientes:

PANID:0xFFFF (aleatorio)

CANAL:11 / 2405MHz

UART:0 (COM 0)

Velocidad:38400 baudios

Control de flujo:0 (Ninguno)

4.4.2.Topología de la red ZigBee

En la figura 4.7 se observa la matriz principal de la topología de la red ZigBee que consta de tres conjuntos de sensores, tres dispositivos finales, dos enrutadores, un coordinador y una central con su respectiva base de datos. La red ZigBee transmite la información por medio de la comunicación UART que proviene desde los sensores con los módulos de transmisión y posterior a esto transmitir inalámbricamente por el canal 11 a una frecuencia de 2.405 GHz.

Como dispositivos finales se denomina al conjunto entre los sensores que permiten obtener los valores de voltaje y corriente, y un módulo de comunicación, siendo los que permiten medir los KWh de cada hogar, dicha información es captada inmediatamente por el módulo para transmitirla inalámbricamente a una frecuencia de 2.405 GHz. Los enrutadores son módulos de comunicación que desempeñan el papel de receptores de la información, estos direccionan hacia un nuevo módulo que hace el rol de coordinador. La parte de la red que genera un cierto grado de robustez es la de los enrutadores, los cuales forman una topología estrella con los dispositivos

finales y adyacente a otro enrutador realizan una red tolerante a fallas, incluso serán los que permitan generar grandes distancias. De manera inalámbrica se llega hasta el coordinador que será el encargado de entregar la información a la central para a su vez procesarla, almacenarla e incluso visualizarla, de modo que esta información esté vigente para uso de la empresa que brinda el servicio eléctrico.

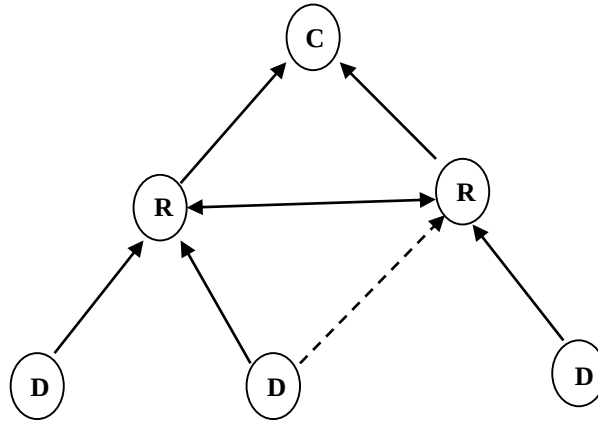


Figura 4.7: Topología de la red ZigBee.

Se sobresalta que una de las características programadas por el firmware, es la capacidad de vinculación inmediata de un dispositivo final (D) con un enrutador (R) y a su vez este con un coordinador (C), esta característica es de mucha ayuda para la red, incluso cuando surge un fallo en la red ZigBee (caso incierto de suceder), es decir, en el caso de surgir dicho fallo y algún módulo de la red pierda conexión, este módulo buscará a otro módulo de jerarquía superior para poder hacer llegar la información hacia el coordinador, es lo que se presenta con línea interlineada en la figura 4.7. Para más detalles sobre la implementación se expone el diseño de la red ZigBee con los parámetros establecidos en el anexo 1.

4.4.3. Capa de aplicación – Base de Datos

La capa de aplicación será la base de datos donde se podrá tener acceso a toda la información adquirida de los consumidores del servicio eléctrico. Mediante consultas se puede filtrar información según sea la conveniencia e interés de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR.

4.4.3.1. Gestión de Datos

Los datos de consumo de energía eléctrica que entrega la red ZigBee se administra en un Arduino Mega ADK, debido a que los datos que transmite la red se lo realiza mediante el puerto serial, al momento que recibe los datos, el dispositivo Arduino identifica la trama total de los datos de consumo de los tres hogares. Al momento que se identifica la trama total, se separa cada dato en una variable independiente, de tal manera que se determina el consumo de cada hogar, dando como consecuencia tres variables que pertenecen al consumo de los tres hogares independientemente en tiempo real.

Para enviar los datos de consumo de energía eléctrica en tiempo real al respectivo servidor base de datos, se utiliza el Arduino Ethernet Shield que se conecta al Arduino Mega ADK, accediendo a una conexión por cable Ethernet al enrutador utilizado para crear posteriormente una Red de Área Local (LAN) como se observa en la figura 4.8. La conexión que se realiza entre el dispositivo Arduino y el servidor base de datos es por TCP / IP, generando una administración y almacenamiento seguro de los datos de consumo de energía a la base de datos.



Figura 4.8: Arduino Ethernet Shield más Arduino Mega ADK.

4.4.3.2. Servidor Base de Datos

Para almacenar y administrar los datos de consumo de energía eléctrica, se utiliza el servidor MYSQL llamado Mysql Community Server que es una versión gratuita para base de datos de código abierto. En la figura 4.9 se observa el logo del servidor. (Mysql Community Server, s.f.).



Figura 4.9: Mysql Community Server.

Fuente: (Mysql Community Server, s.f.)

- **MySQL Workbench**

MySQL Workbench es una herramienta visual que utiliza los desarrolladores y administradores de base de datos. Este programa habilita un DBA (administrador de base de datos) con el objetivo de diseñar, generar y gestionar base de datos, incluye todo un modelador de datos necesarios para su respectiva creación. A continuación, se presenta la interfaz de MySQL Workbench en la figura 4.10. (Mysql Community Server, s.f.).

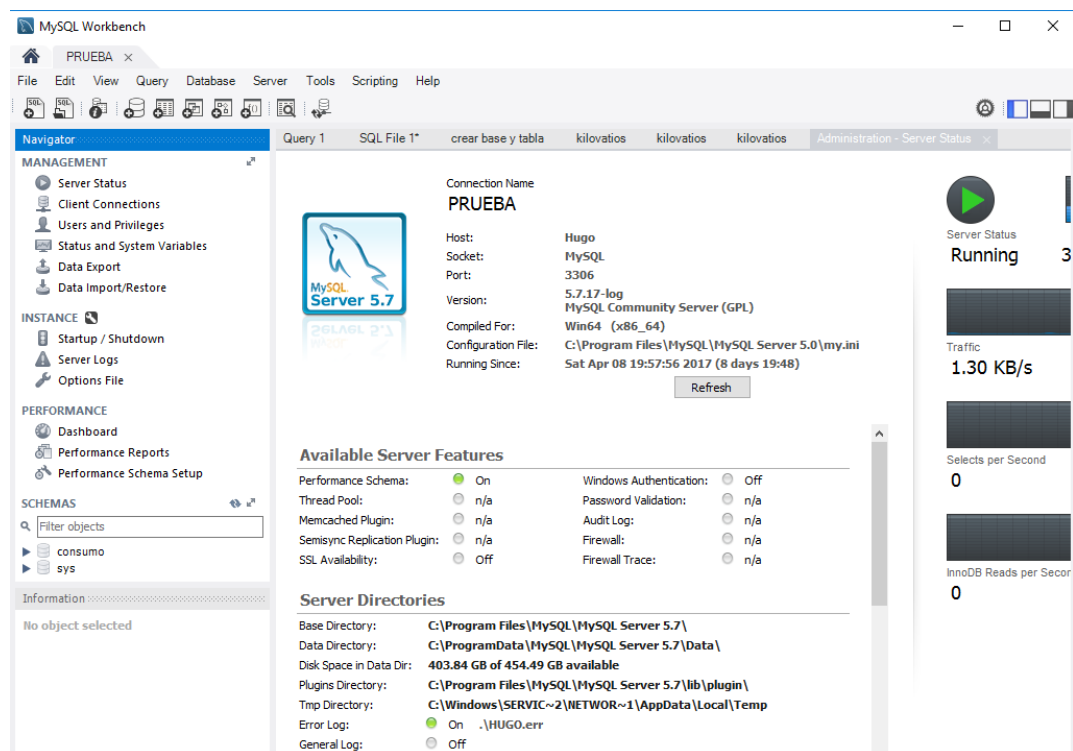


Figura 4.10: MySQL Workbench.

Para almacenar los datos de consumo de energía eléctrica que se gestiona en el Arduino Mega ADK con su shield Ethernet, se crea una base de datos llamado consumo, el cual a su vez se diseña la primera tabla denominado kilovatios que se observa en la tabla 4.1, colocando cuatro atributos que son: Id, Nombre, Número, Consumo, que se explican a continuación:

- Id. Almacena el número de orden que corresponde cada usuario.
- Nombre. Almacena el nombre de cada usuario.
- Número. En este ítem guarda el número que corresponde el medidor de cada usuario.
- Consumo. Almacena los datos de consumo de energía eléctrica que entrega la red ZigBee en tiempo real.

Tabla 4.1: Valores de la tabla kilovatios.

	Id	Nombre	Numero	Consumo
	1	Hugo Patricio Quito Tenesaca	2015010083	0
	2	Raul Antonio Ordoñez Hurtado	1000502317	0
	3	Rosa Margarita Quito Tenesaca	1000502318	0
▶▶	NULL	NULL	NULL	NULL

4.4.3.3. Servidor Web Apache

Para visualizar los datos de consumo de energía eléctrica en tiempo real en una página web, se utiliza XAMP dado que es un paquete de fácil instalación de las plataformas de software libre de Apache, MySQL, PHP y phpMyAdmin. Se implementa el servidor Apache debido a que es un servidor web HTTP de código abierto para las plataformas Linux, Microsoft Windows, entre otros, dado que es el servidor HTTP más usado. Su uso es destinado principalmente para enviar páginas web dinámicas y estáticas en la World Wide Web, también permite el manejo de las aplicaciones LAMP, MYSQL y lenguajes de programación como PHP, Perl, Python (Apache.org, 2017).

Al momento de implementar el servidor Apache, se crea una red LAN (red de área local), dando como consecuencia que solo se pueda acceder a la página web si el cliente se encuentra conectado a la red doméstica, debido a que la conexión es local

host. A continuación, se muestra en la figura 4.11 la conexión con el servidor Apache en tiempo real.

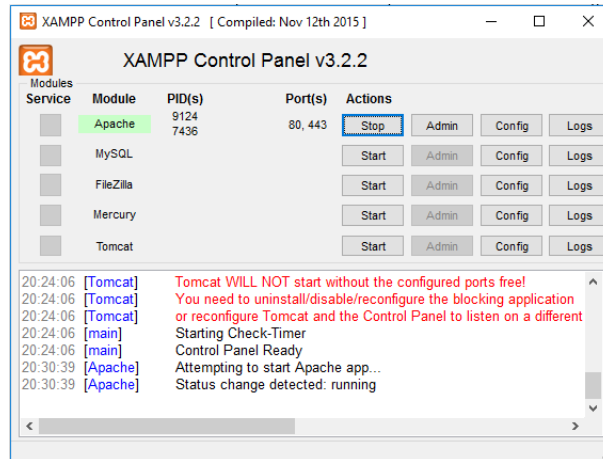


Figura 4.11: Conexión del servidor Apache.

- **Adobe Dreamweaver**

Adobe Dreamweaver es un editor HTML, el cual permite desarrollar páginas web de una manera fácil sin necesidad de conocimientos profundos de programación, dado que utiliza editores WYSIWYG, CSS, JavaScript y algunos frameworks. El editor WYSIWYG oculta el código HTML al usuario, permitiendo que personas que no tengan conocimientos profundos de programación pueda crear páginas y sitios web sin necesidad de escribir código.

Este editor HTML debido a su fácil manejo se utiliza para realizar la página web, creando una página PHP que se vincula con la base de datos creada con MYSQL Workbench, dando como resultado un sitio de consulta que se observa en la figura 4.12, la cual visualiza el consumo de energía eléctrica en tiempo real de una manera amigable y de fácil acceso en una red de área local.

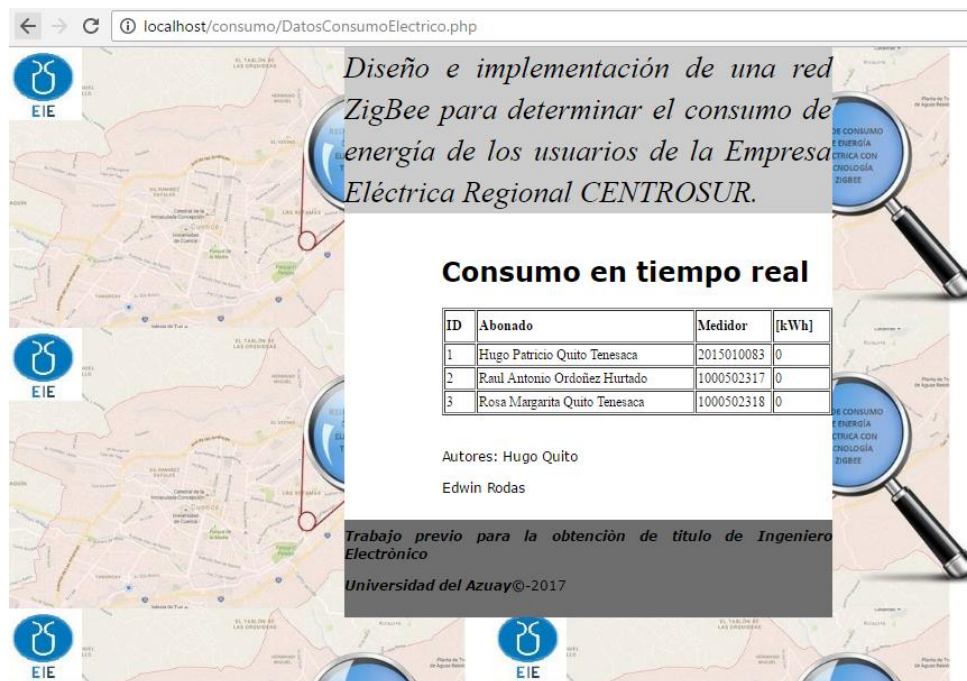


Figura 4.12: Página web para visualizar el consumo de energía eléctrica.

- **Reporte de consumo de energía eléctrica**

La edición de software TIBCO JasperSoft® estudio para TIBCO JasperReports® permite crear y diseñar plantillas de informes, contiene componentes visuales de diseño con más de 50 tipos de gráficos, mapas, tablas entre otras herramientas de diseño. Puede crear documentos de cualquier complicación y exportarlo como PDF (JasperSoft Studio, s.f.).

Se utilizó TIBCO JasperSoft® debido a que accede a la información de la base de datos para generar un reporte de consumo de energía eléctrica formal en PDF, que puede utilizar para comparar el consumo de energía eléctrica mensual. En la figura 4.13 se observa toda la información que se encuentra en el reporte PDF.



Diseño e implementación de una red ZigBee para determinar el consumo de energía de los usuarios de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

Reporte de consumo de energía eléctrica

Id	Abonado	Medidor	[kWh]
1	Hugo Patricio Quito Tenesaca	2015010083	0.00
2	Raul Antonio Ordoñez Hurtado	1000502317	0.00
3	Rosa Margarita Quito Tenesaca	1000502318	0.00

Figura 4.13: Reporte de consumo de energía eléctrica.

CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y RESULTADOS

Tratará de una breve síntesis de los aspectos más destacados de cada capítulo, principalmente los resultados del proyecto. Las recomendaciones son aspectos que se va adquiriendo según el avance del proyecto y a su vez generando sugerencias dentro de la investigación.

5.1. Hardware.

El hardware diseñado, ensamblado e implementado en una residencia, generó resultados exitosos; comprobados con instrumentos eléctricos para validar la captación de los mismos, siendo así un consumo eléctrico residencial como resultado final. Sabiendo que la tensión de corriente alterna es oscilatoria y variante, se vio la necesidad de construir el sensor de voltaje, debido a que no existen valores constantes por parte de la empresa que brinda el servicio eléctrico. A continuación, en la figura 5.1 se presenta el esquema de la tarjeta electrónica que se diseñó para los dispositivos finales, en donde se indicarán las etapas previas a la obtención de datos para ser procesada

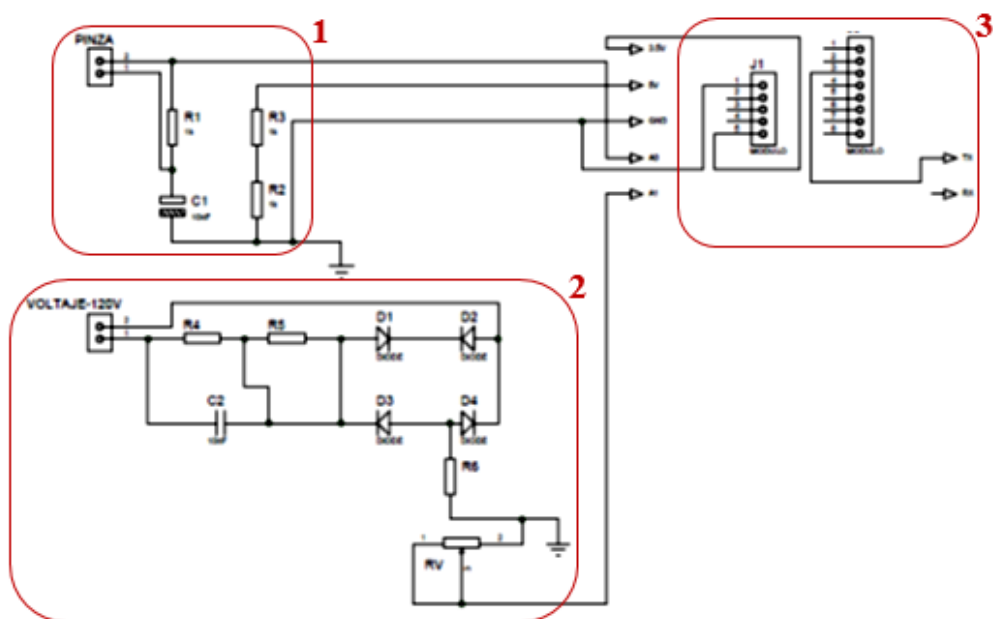


Figura 5.1: Esquema del dispositivo final.

En la etapa 1 se esquematiza el sensor de corriente, para este proceso de captación de la señal analógica de corriente proveniente de la pinza amperométrica, se ha obtenido como valor de una décima de margen de error en cuanto a la resolución de la adquisición de datos de consumo se refiere.

En la etapa 2 se esquematiza el sensor de voltaje, en el cual mediante unas borneras se introduce la tensión de la red eléctrica para procesarla y hacerla proporcional a rangos permisibles para el Arduino. El margen de error que maneja esta etapa es del 0.9% en relación a la toma principal de tensión. Esta etapa posee una calibración por parte de hardware que trata del potenciómetro azul que se presenta en la figura 5.2, dicha calibración está limitada para evitar el exceso de tensión a la entrada del Arduino.

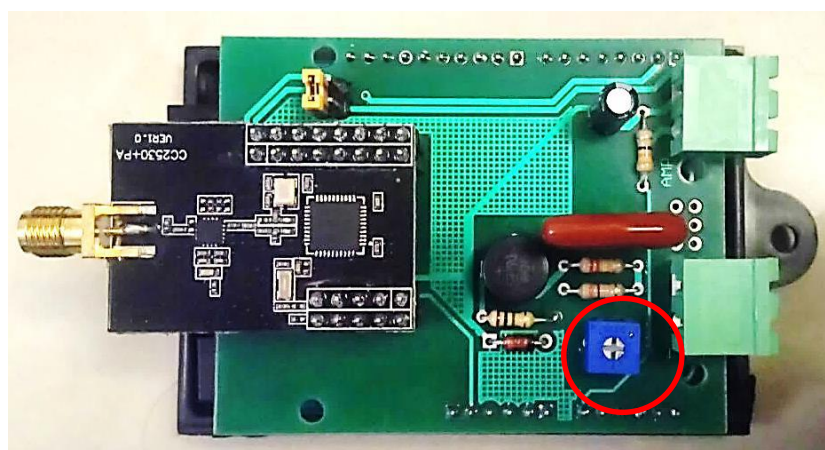


Figura 5.2: Dispositivo final, muestra de la calibración por medio del potenciómetro.

En la etapa 3 se esquematiza el campo de ubicación del módulo XCore 2530, aquí es donde se transmite inalámbricamente el resultado final del procesamiento de corriente y tensión para hallar el consumo eléctrico residencial. A continuación, se presenta en la figura 5.3 los datos emitidos por un dispositivo final, captados por el coordinador de la red ZigBee y corroborados por un multímetro y un amperímetro colocados en las líneas de tensión de un armario de breaker.

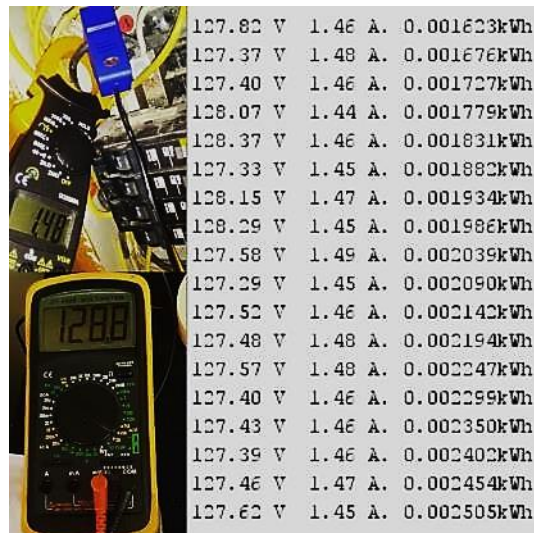


Figura 5.3: Resultados obtenidos y corroborados por instrumentos eléctricos.

Según las normas de un medidor eléctrico estandarizado, a estos se los clasifica por clases; estas clases están de acuerdo al sector residencial, al sector comercial incluso al sector industrial; pues bien, cada clase presenta un margen de error permisible a conveniencia de la empresa que brinda el servicio eléctrico. Por lo que se puede decir que el proyecto implementado entra en la clase de medidor residencial con una excelente lectura de consumo de energía eléctrica.

El PCB de la tarjeta electrónica del dispositivo final como producto terminado fueron diseñados con la ayuda del software “Altium Designer v16.0” como se muestra en las figuras 5.4 y 5.5.

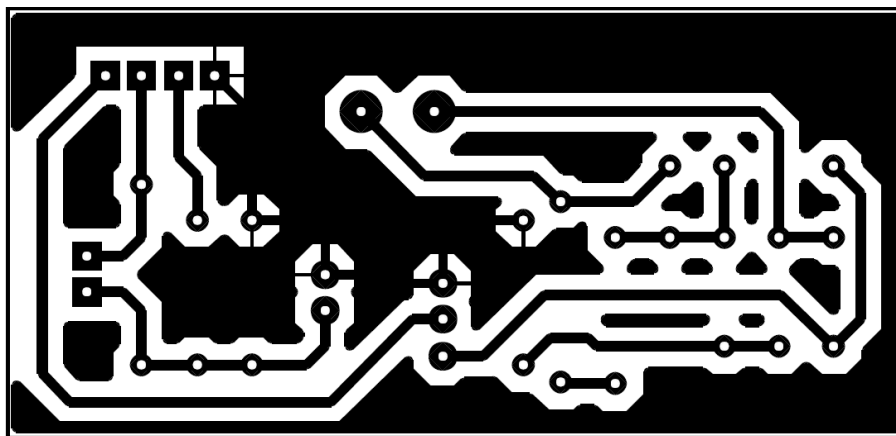


Figura 5.4: PCB de la tarjeta electrónica.

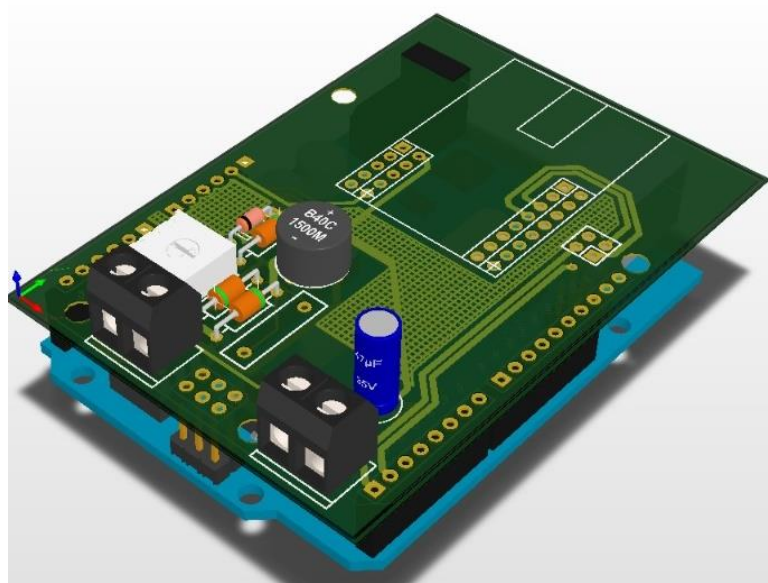


Figura 5.5: Diseño de la tarjeta electrónica.

Después del diseño, se procedió a la fabricación de la tarjeta electrónica, obteniendo así un medidor electrónico listo para la implementación de la red ZigBee como se presenta en las figuras 5.6 y 5.7.

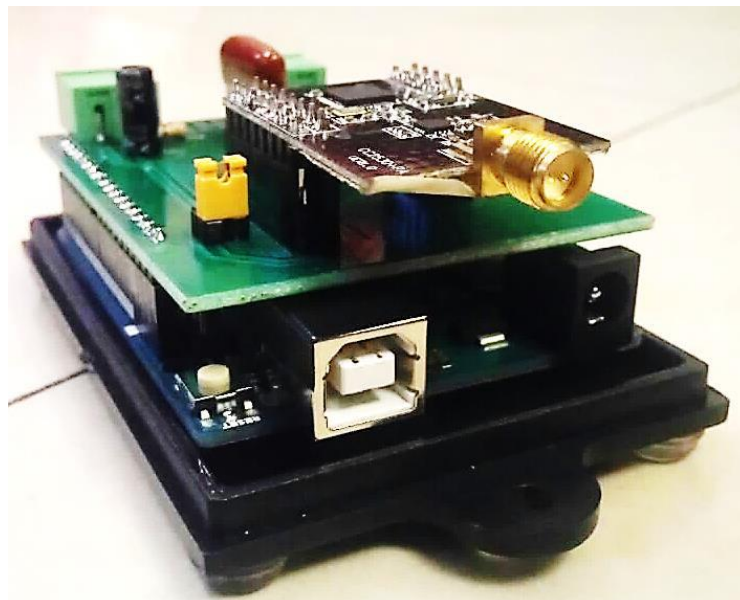


Figura 5.6: Interior del dispositivo final. Conexión de módulos.

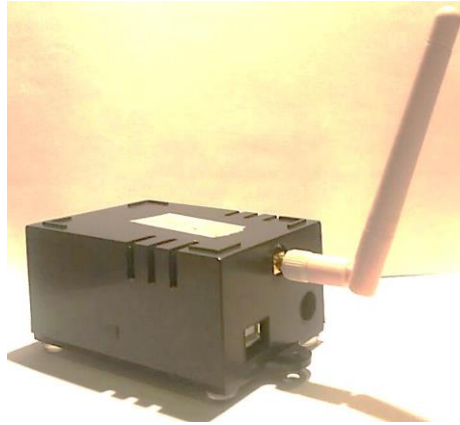


Figura 5.7: Dispositivo final. Vista externa.

5.2. Pruebas del dispositivo final.

La prueba que se realizó para corroborar datos recolectados del consumo eléctrico, se acudió a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, donde se pudo utilizar el laboratorio de medidores eléctricos en el cual con ayuda de equipos se pudo simular cargas de bajo y alto consumo de energía eléctrica dando un resultado exitoso. En la figura 5.8 se puede observar el equipo simulador de corrientes en el laboratorio de pruebas. Mediante dos conectores se alimenta al proyecto con fase y neutro, la pinza amperométrica se coloca en la fase y así simulamos diferentes corrientes con diversas cargas de tensión.

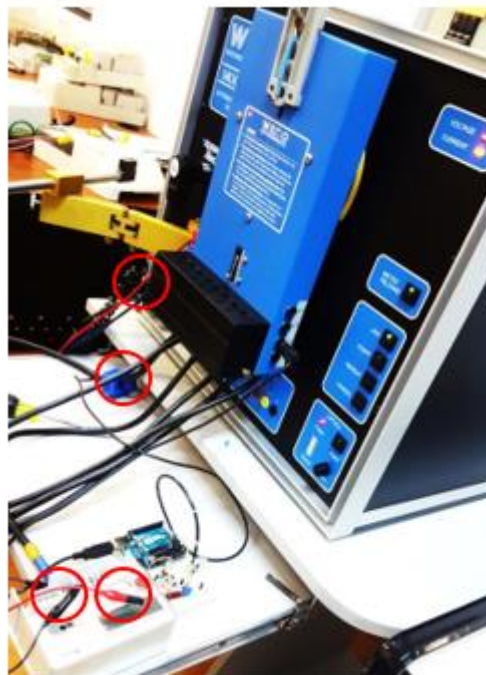


Figura 5.8: Laboratorio de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

Con ayuda del equipo de pruebas, se vio que se puede variar la tensión (V_a), la corriente (I_a), la frecuencia (Freq) y la potencia (P_a), incluso obtener el consumo en Watts. Después de varias pruebas, se capturó una prueba ejemplar emitida por el software del equipo. En la figura 5.9 se presentan los valores precargados en el software del equipo de pruebas.

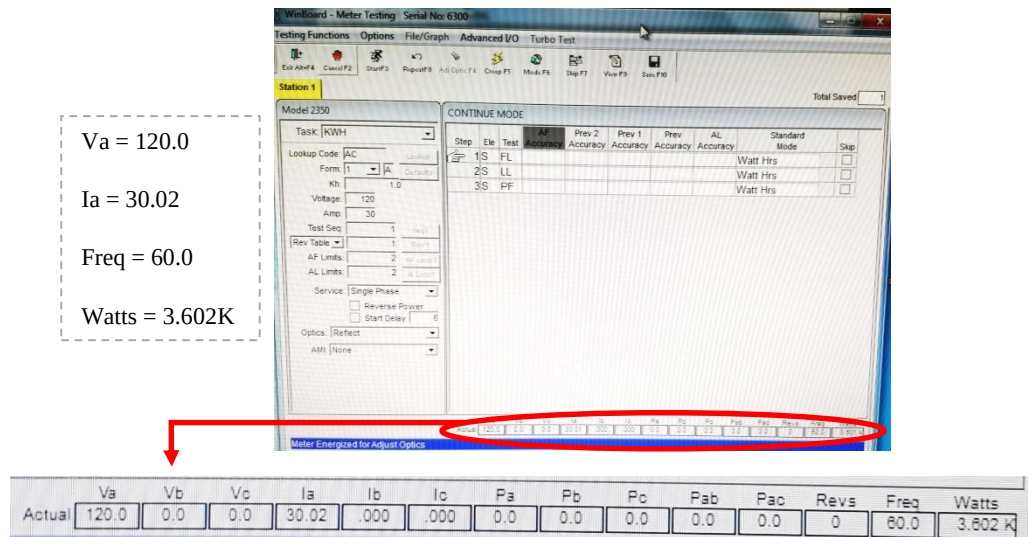


Figura 5.9: Software del equipo de pruebas, valores precargados.

A continuación, se presenta en la figura 5.10 una captura de pantalla de los datos obtenidos por el dispositivo final en nuestro computador, que son los datos previos a ser transmitidos por la red ZigBee. Como se puede observar los datos de tensión, de corriente y de consumo son de una medición aceptable, corroborando los datos con nuestros márgenes de error ya mencionados.

COM20 (Arduino Mega ADK)

120.5 V	30.15 A	3.63 Kw
119.87 V	29.98 A	3.59 Kw
120.77 V	30.03 A	3.62 Kw

Figura 5.10: Captura de los datos obtenidos por el Arduino.

5.3. Consumo del dispositivo final.

Para un mayor desempeño del proyecto presentado, se obtuvo el consumo del mismo, siendo un valor mínimo de consumo externo a la red eléctrica residencial, es decir, no habrá consumo que afecte la lectura propia del cliente, pues el consumo podrá ser por parte de la empresa que brinda el servicio eléctrico, todo con el fin de no alterar la lectura del consumo eléctrico actual. Esto aplica para los dispositivos finales, y para los enrutadores, ya que serán puntos estratégicos que extiendan la red ZigBee hasta alcanzar la cobertura de un coordinador. Como resultado del proyecto diseñado se presenta el consumo del mismo en la tabla 5.1:

Tabla 5.1: Consumo del dispositivo final.

<i>Dispositivo</i>	<i>Tensión</i>		<i>Corriente</i>		<i>Potencia</i>	
<i>Arduino</i>	9,00	V	46,00	mA	0,41	Watts
<i>XCore 2530</i>	3,30	V	20,00	mA	0,07	Watts
<i>Tarjeta Electrónica</i>	2,50	V	0,25	mA	0,00	Watts
<i>Total</i>					0,48	Watts

Por tanto, se dice que el consumo total del proyecto es de 0.48Watts en modo activo.

5.4. Alcances de la red ZigBee.

Dentro de las pruebas realizadas en el transcurso del desarrollo del proyecto se demostró el alcance de 1Km en línea de vista directa y para un radio de cobertura de 500m con obstáculos en la línea de vista, es decir, interposición de paredes, edificaciones, arboles, etc. Estos radios de cobertura son las distancias propicias para tener una conectividad satisfactoria.

Se tiene como resultado una conectividad entre dispositivos finales, enrutadores, hasta llegar a un coordinador con radio de 500m de cobertura para la red ZigBee implementada, como se puede apreciar en el anexo 1. En la figura 5.11 se presenta la prueba de alcance para la conexión entre nodos.



Figura 5.11: Pruebas de alcance en el parqueadero de la Universidad del Azuay.

5.5. Comunicación y transmisión.

Al momento que se implementa la red ZigBee (coordinador, enrutadores y dispositivos finales), es necesario esperar un tiempo estimado de 6.69 segundos para que puedan vincularse entre nodos y así tener una conectividad exitosa. Para realizar la transmisión de datos se realizaron varias pruebas en cuanto a la velocidad de transmisión se refiere, desde 9600 – 115200 baudios, para obtener una velocidad de transmisión adecuada para la necesidad del proyecto, estas pruebas se realizaron en una comunicación punto a punto (P2P) dentro de los laboratorios de la Universidad del Azuay.

La transmisión consiste en adquirir el valor del consumo conjuntamente con un indicador de trama, es decir, el dispositivo final envía el dato con el identificador del medidor, al momento que llega al receptor identifica la trama y almacena el valor que pertenece al usuario asignado en la base de datos mediante el protocolo TCP/IP. En las siguientes dos imágenes que conforman la figura 5.12 se muestra las pruebas de comunicación entre nodos.

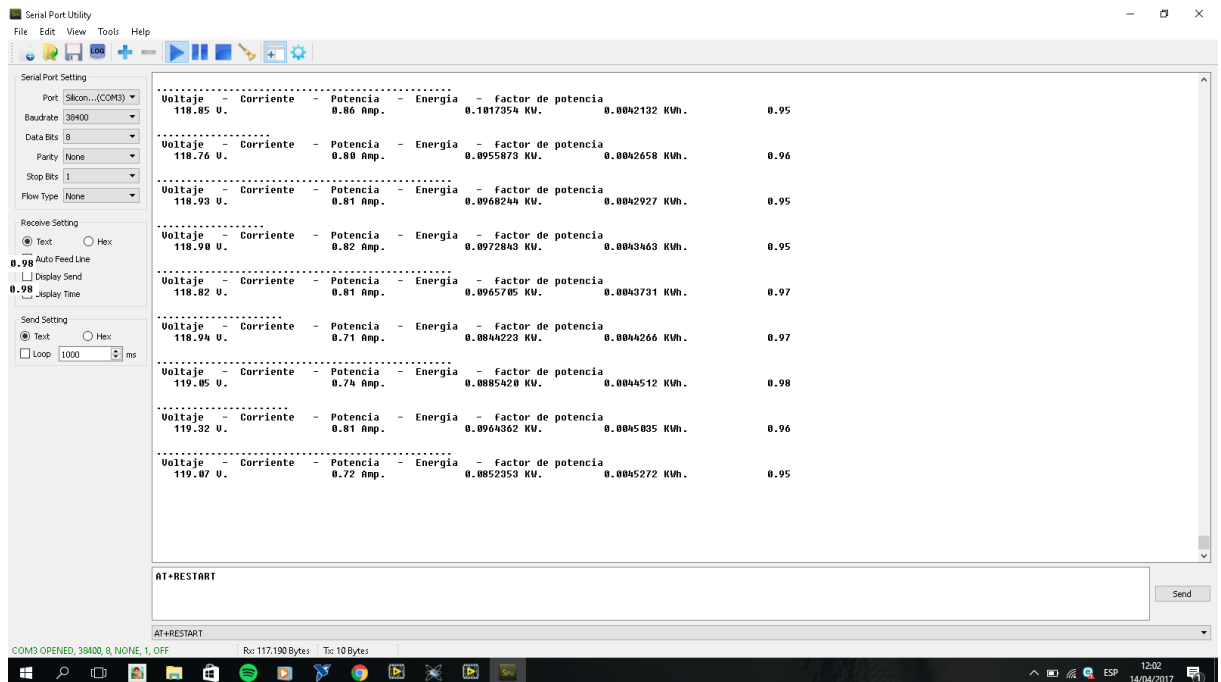
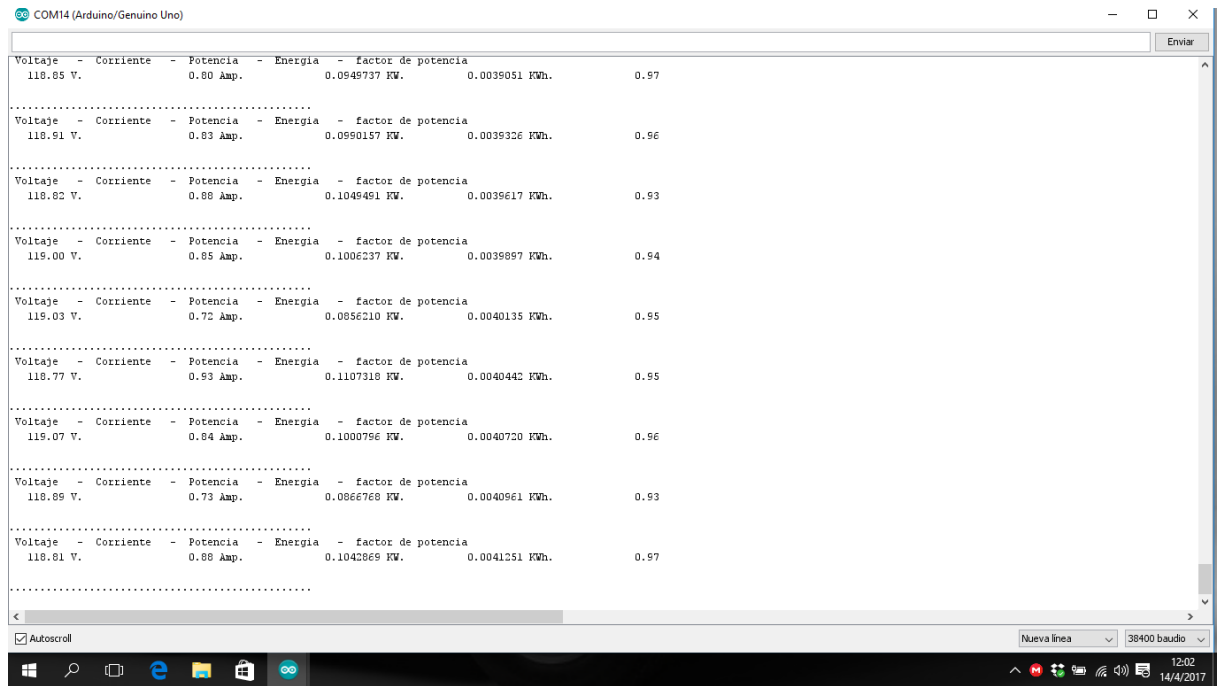
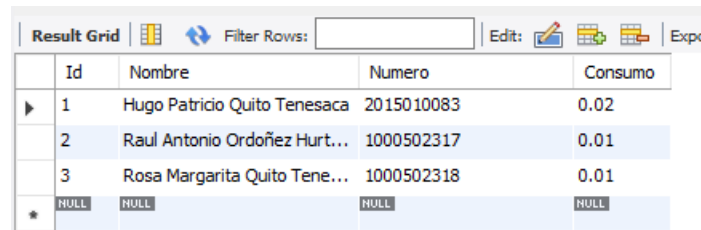


Figura 5.12: Transmisión y recepción entre nodos.

5.6. Capa de aplicación implementada.

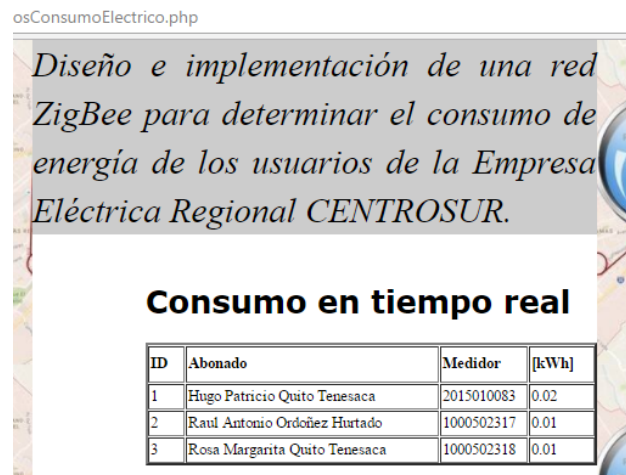
Las pruebas de la red ZigBee implementada fueron realizadas el día jueves, 18 de mayo de 2017 a partir de las 16h00 hasta el día jueves, 1 de junio de 2017; siendo un

consumo eléctrico de 15 días activos para las tres residencias. En la figura 5.13 y 5.14 se presenta la base de datos en cero, la interfaz web encendida previa a la adquisición de datos.



	Id	Nombre	Numero	Consumo
▶	1	Hugo Patricio Quito Tenesaca	2015010083	0.02
	2	Raul Antonio Ordoñez Hurt...	1000502317	0.01
	3	Rosa Margarita Quito Tene...	1000502318	0.01
★	NULL	NULL	NULL	NULL

Figura 5.13: Base de Datos con inicialización en cero.



osConsumoElectrico.php

Diseño e implementación de una red ZigBee para determinar el consumo de energía de los usuarios de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR.

Consumo en tiempo real

ID	Abonado	Medidor	[kWh]
1	Hugo Patricio Quito Tenesaca	2015010083	0.02
2	Raul Antonio Ordoñez Hurtado	1000502317	0.01
3	Rosa Margarita Quito Tenesaca	1000502318	0.01

Figura 5.14: Interfaz web previa a la adquisición de datos de consumo eléctrico.

Para verificar los datos de lectura con los medidores de la empresa eléctrica se adjuntan las fotografías de dichos medidores en la figura 5.15. Al finalizar la adquisición de datos de las pruebas, se llegó a obtener el consumo en la interfaz web de 125.40 kWh para la residencia 1, 105.25 kWh para la residencia 2, y 2.89 kWh para la residencia 3; que se presentan en la figura 5.16.



Figura 5.15: Fotografías de los medidores de las residencias con los consumos del 18 de mayo al 1 junio de 2017.

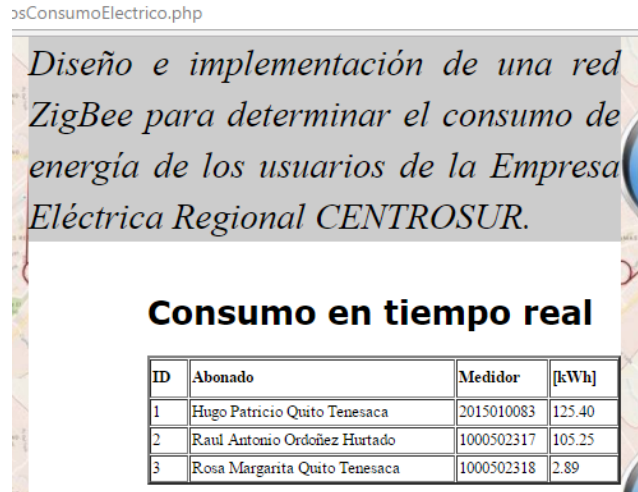


Figura 5.16: Interfaz web con datos obtenidos después de las pruebas realizadas.

Parte de las pruebas finales de la red ZigBee implementada fue capturar datos sobre el consumo eléctrico de una vivienda. Un consumo eléctrico de 5,22 kWh fue obtenido en un lapso de 50 000 segundos. Con esta información se generó la gráfica de consumo pertinente a los datos obtenidos, con un aproximado de 14 horas de modo activo de la red ZigBee (adquisición de datos); por motivos de una mejor lectura en la gráfica de consumo eléctrico, se realizó la captura de los datos dentro de este periodo (50000s) debido a la magnitud de información captada, en la figura 5.17 se observa la curva de consumo eléctrico. En el anexo 2 se puede observar una parte de los 50 000 datos (segundos) correspondientes a la figura 5.17.

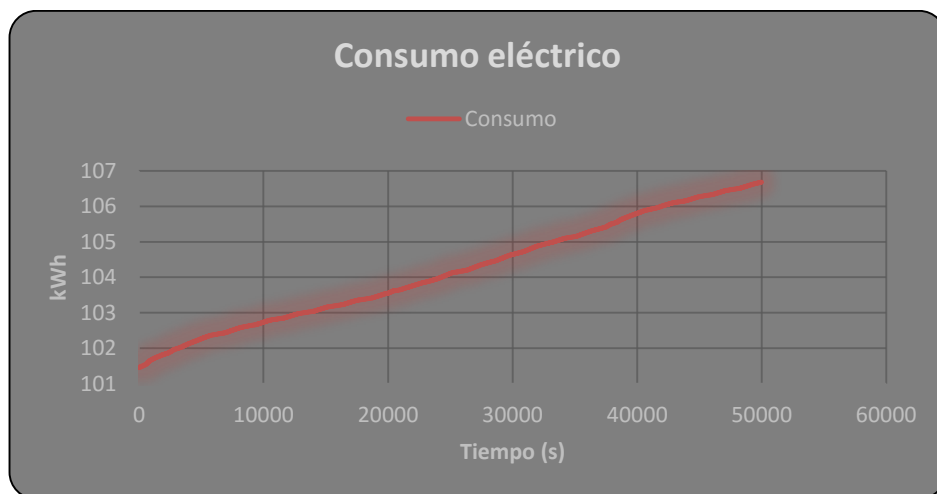


Figura 5.17: Curva de consumo eléctrico dentro de un tiempo de 50000seg.

CONCLUSIONES

Se vieron proyectos, ideas e incluso prototipos similares al trabajo de grado propuesto de “Diseño e implementación de una red ZigBee para determinar el consumo de energía de los usuarios del servicio eléctrico”, los cuales se estructuraban de diferentes características físicas, cualidades de sistema y objetivos particulares; pudiendo definir los alcances y limitaciones del presente trabajo.

En el desarrollo e investigación del protocolo ZigBee se vieron ventajas y desventajas para la implementación de redes. Las desventajas resultaron positivas para los objetivos del presente trabajo, debido a las características y necesidades que requiere la red, ya que es un protocolo óptimo para cumplir con la demanda de la red ZigBee y aún más sobresaltar con las ventajas que por protocolo brindan a la red. Dado que la cantidad de datos a transmitir es pequeña, el consumo del dispositivo ZigBee viene a ser relativamente bajo, si se sabe que uno de los objetivos de la red ZigBee implementada, es transferir una cadena de texto que representa el consumo eléctrico residencial, se puede decir que se está optimizando recursos en cuanto a eficiencia se refiere, por lo que se recomienda utilizar este conjunto de módulos inalámbricos.

Por parte de los sistemas de telegestión se observó que generan altos costos en los equipos y una gran cantidad de operadores, siendo así relativamente el costo más alto y su complejidad impiden la implementación en la ciudad; por lo que se descartó la idea de aplicar equipos o sistemas similares para el presente trabajo.

Los sensores utilizados e implementados en base a pruebas realizadas por ciertos períodos, generaron cierto margen de error con referencia al medidor de consumo eléctrico residencial de la vivienda. Como valor final promediado el error es de 0.48 kWh, con un porcentaje de 1.59% llegando a una medición aceptable.

Arduino al ser una de las plataformas de acceso libre, brinda compatibilidad de manera exitosa con los módulos RF escogidos para este proyecto, por lo que se puede decir que Arduino forma parte primordial al momento de realizar operaciones de cálculos, de comunicación con los dispositivos finales y con la base de datos creada.

Los módulos XCore2530 resultaron ser óptimos, al momento de explorar dispositivos cercanos y conectarse en un tiempo de 6.69 seg, siendo así beneficioso para la red ZigBee por que la convierte en una red tolerante a fallas siempre y cuando existan módulos dentro del radio de cobertura. En cuanto a la transmisión de datos no hubo mayor problema, ya que la trama era pequeña y única debido a su ID del medidor asignado.

Al momento de diseñar la topología de la red ZigBee, se estudiaron los radios de cobertura para poder geo-posicionarlos, y así evitar las jaulas de Faraday generadas por las pertenencias de los usuarios como son: armarios de lata, cerramientos de hierro, cubiertas de aluminio, entre otros. Por este motivo se vio la necesidad de ocupar una red malla que permite la conexión multipunto.

La base de datos trabaja con un dominio fijo, por lo que los parámetros del enrutador (LAN) se tuvieron que modificar y asignar un IP fijo, para permitir la conexión constante entre el coordinador a la base de datos por medio de un módulo Ethernet Arduino que permite una conexión TCP/IP.

Al momento de implementar y realizar las pruebas de funcionamiento en las tres residencias, se pudo garantizar la escalabilidad de la red ZigBee, debido a que se hizo una conexión y desconexión de los módulos en modo activo sin perjudicar el funcionamiento de la red.

RECOMENDACIONES

Como recomendación se debe tener cuidado al momento de grabar la programación de Arduino, debido a que si el módulo RF se encuentra conectado a los terminales Tx y Rx surge complicación de transmisión y recepción de impulsos de tensión que puede inhabilitar los módulos RF.

Se recomienda también utilizar un sistema independiente de alimentación a los dispositivos finales, para no generar lecturas erróneas. Incluso utilizar un módulo de memorias micro SD para llevar registros independientes a la base de datos, en caso de averías de sobre tensión que causen daños permanentes en cualquier módulo.

De preferencia colocar los módulos RF en línea de vista, que aseguran la conectividad; en caso de no poder hacerlo, mantener el límite de radio de cobertura menor a 500m.

Aislar el sistema de corriente alterna (AC) con el sistema de transmisión de datos (RF) y de las entradas analógicas del Arduino con un limitador de corriente.

Debido a que la red siempre está activa, se recomienda utilizar disipadores de calor para cada uno de los módulos de mayor procesamiento, y así prolongar la vida útil de los dispositivos.

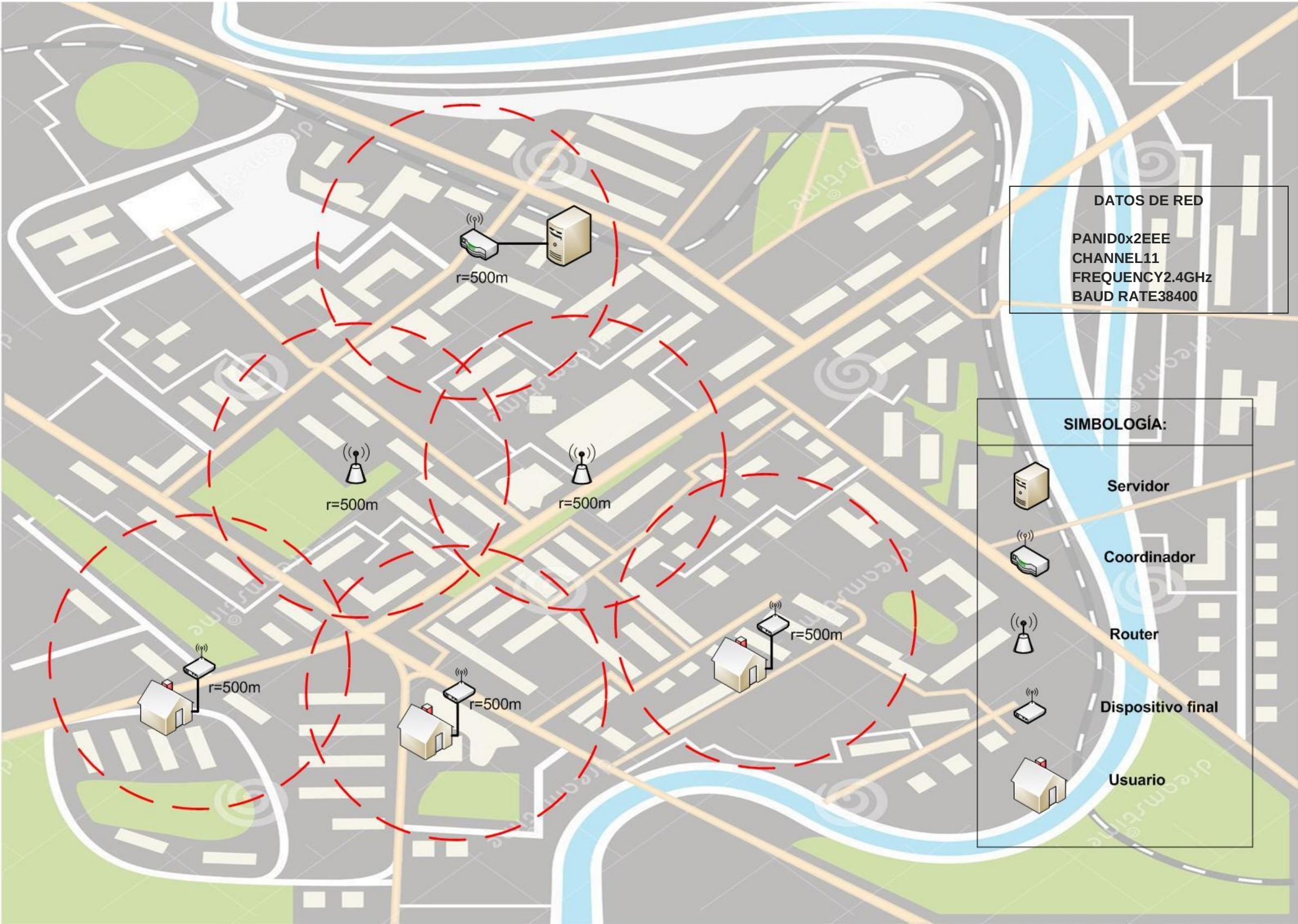
Para una mejor velocidad de transmisión se recomienda ocupar una tasa de 38400 baudios y por el canal 11 que es de una frecuencia de 2.405 GHz.

BIBLIOGRAFÍA

- Abouzar Shahraki Kia, . S. (2012). *Zigbee Wireless Mesh Network for Building Automation and Control*.
- Afinidad Electrica. (2007). Metering Central America & Caribbean 2007. *Afinidad Eléctrica*.
- Alliance, Z. (2007). *ZIGBEE HOME AUTOMATION: THE NEW GLOBAL STANDARD FOR HOME AUTOMATION* . California, USA.
- Alliance, Z. (2009). *ZigBee Wireless Sensor Applications for Health, Wellness and Fitness* .
- Alliance, Z. (Septiembre de 2016). *ZigBee for developers*. Obtenido de <http://www.zigbee.org>
- Alonso, G. G. (19 de 10 de 2015). *Medidor de consumo con arduino*. Recuperado el 5 de 3 de 2017, de www.gonzalogalvan.es/medidor-de-consumo-con-arduino/
- Anselm Strauss, J. C. (2013). *Bases de la investigacion cualitativa*. Antioquia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Apache.org. (2017). *Apache*. Recuperado el 14 de 4 de 2017, de www.apache.org
- Chonggang Wang, T. J. (2014). *ZigBee Network Protocols and Applications*.
- Chunlong Zhang, M. Z. (2012). Smart Home Design based on ZigBee Wireless Sensor Network. *IEEE*.
- Díaz, L. G. (2013). *Programación de Microcontroladores PIC+ZigBee*.
- Domenico Balsamo and Gianluca Gallo, D. B. (2015). Non-intrusive Zigbee Power Meter for load monitoring in Smart Buildings. *IEEE*.
- EcuRed. (s.f.). *ZigBee*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2016, de www.EcuRed.cu/ZigBee
- Empresa Eléctrica Regional Centro Sur. (1996). *Fichas e Informacion Tecnica para Sistemas de Distribucion*.
- Faludi, R. (2010). *Wireless Sensor Networks*.
- Gislason, D. (2008). *ZIGBEE WIRELESS NETWORKING*.
- Google Sites. (s.f.). *Mediciones e instrumentos de medida*. Recuperado el 15 de 3 de 2017, de www.sites.google.com/site/electblearning01/medidas
- Hill, J. L. (2003). *System Architecture for Wireless Sensor Networks*.
- Jaspersoft Studio. (s.f.). *Jaspersoft® Studio* . (2017) Recuperado el 14 de 4 de 2017, de <http://community.jaspersoft.com>
- Jawad LOTFI, M. F. (2015). Overview of Home Energy Management Systems Architectures and Techniques. *IEEE*.
- José Martín Gómez López, R. C. (2015). Aplicación de tecnologías de medición avanzada (AMI) como instrumento para reducción de perdidas. *Boletín IIE*.
- Likinormas. (04 de septiembre de 2014). *codensa*. (codensa) Recuperado el 07 de enero de 2017, de <http://likinormas.micodensa.com>

- Markus Krauß, . K. (2014). *Drahtlose ZigBee-Netzwerke: Ein Kompendium*.
- Montoya, J. A. (2016). Diseño de arquitectura para el control y monitoreo del consumo energético en hogares mediante una red de datos ZigBee. *IEEE*.
- Murillo, P. (2005). *Estudio sobre el Servicio de Energia Electrica en el Ecuador y su impacto en los consumidores*.
- Mysql Community Server. (s.f.). *MySQL*. Recuperado el 15 de 4 de 2017, de www.mysql.com
- NUÑEZ, I. H. (2011). *LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS II*.
- P. Corral, B. C. (2012). Design of Automatic Meter Reading based on Zigbee. *IEEE*.
- Ramyar Rashed Mohassel, A. F. (2014). Application of Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids. *IEEE*.
- Rios, I. F. (1999). *Electricista basico de redes electricas - Acometidas y Medidores* .
- Rogers, B. (2007). *The Reliability of Signal Strength for Localization of High-density ZigBee Wireless Networks*.
- Stevanovic, D. (2007). *Standard IEEE 802.15.4*.
- University of Texas. (1985). *Memoria y balance general*.
- Waileung Ha, Member, IEEE, Hongyi Sun, Senior Member, IEEE. (2012). Reusable Architecture for Embedded Software of Smart Energy HAN Devices. *IEEE*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2016, de www.zigbee.cu/ZigBee
- Wason Somkaew, S. T. (2014). Data Security Implementation over ZigBee Networks for AMI Systems. *IEEE*.

ANEXOS



Anexo 1: Descripción de la red ZigBee.

Anexo 2: Datos de la curva de consumo eléctrico obtenidos en periodos de 1min.

Tiempo (seg)	Consumo (kWh)
60	101,47
120	101,47
180	101,48
240	101,49
300	101,5
360	101,51
420	101,52
480	101,53
540	101,54
600	101,56
660	101,58
720	101,6
780	101,62
840	101,64
900	101,66
960	101,67
1020	101,68
1080	101,69
1140	101,7
1200	101,71
1260	101,72
1320	101,73
1380	101,74
1440	101,75
1500	101,76
1560	101,77
1620	101,78
1680	101,79
1740	101,79
1800	101,8
1860	101,81
1920	101,82
1980	101,82
2040	101,83
2100	101,84
2160	101,85
2220	101,85
2280	101,86
2340	101,87
2400	101,88
2460	101,89
2520	101,9
2580	101,91
2640	101,93
2700	101,94
2760	101,95
2820	101,96
2880	101,97
2940	101,98
3000	101,98
3060	101,99
3120	102
3180	102
3240	102,01
3300	102,02
3360	102,03
3420	102,04
3480	102,05

3540	102,06
3600	102,07
3660	102,08
3720	102,09
3780	102,1
3840	102,11
3900	102,12
3960	102,12
4020	102,13
4080	102,14
4140	102,15
4200	102,16
4260	102,17
4320	102,17
4380	102,18
4440	102,19
4500	102,2
4560	102,21
4620	102,21
4680	102,22
4740	102,23
4800	102,24
4860	102,25
4920	102,26
4980	102,26
5040	102,27
5100	102,28
5160	102,29
5220	102,3
5280	102,31
5340	102,31
5400	102,32
5460	102,33
5520	102,34
5580	102,34
5640	102,35
5700	102,36
5760	102,37
5820	102,37
5880	102,37
5940	102,38
6000	102,38
6060	102,38
6120	102,39
6180	102,39
6240	102,4
6300	102,4
6360	102,4
6420	102,41
6480	102,41
6540	102,41
6600	102,42
6660	102,42
6720	102,43
6780	102,43
6840	102,43
6900	102,44
6960	102,44
7020	102,45
7080	102,46
7140	102,46
7200	102,47
7260	102,48
7320	102,49
7380	102,49
7440	102,5

7500	102,51
7560	102,51
7620	102,52
7680	102,53
7740	102,54
7800	102,54
7860	102,55
7920	102,56
7980	102,56
8040	102,57
8100	102,58
8160	102,59
8220	102,59
8280	102,59
8340	102,6
8400	102,6
8460	102,61
8520	102,61
8580	102,61
8640	102,62
8700	102,62
8760	102,63
8820	102,63
8880	102,64
8940	102,64
9000	102,64
9060	102,65
9120	102,65
9180	102,65
9240	102,66
9300	102,66
9360	102,66
9420	102,67
9480	102,68
9540	102,68
9600	102,69
9660	102,7
9720	102,7
9780	102,71
9840	102,72
9900	102,72
9960	102,73
10020	102,74
10080	102,74
10140	102,75
10200	102,76
10260	102,76
10320	102,77
10380	102,78
10440	102,79
10500	102,79
10560	102,8
10620	102,8
10680	102,8
10740	102,81
10800	102,81
10860	102,81
10920	102,81
10980	102,82
11040	102,82
11100	102,82
11160	102,83
11220	102,83
11280	102,83
11340	102,84
11400	102,84

11460	102,84
11520	102,85
11580	102,85
11640	102,85
11700	102,86
11760	102,86
11820	102,87
11880	102,88
11940	102,88
12000	102,89
12060	102,9
12120	102,9
12180	102,91
12240	102,92
12300	102,92
12360	102,93
12420	102,94
12480	102,94
12540	102,95
12600	102,95
12660	102,96
12720	102,97
12780	102,97
12840	102,98
12900	102,98
12960	102,98
13020	102,99
13080	102,99
13140	102,99
13200	103
13260	103
13320	103
13380	103,01
13440	103,01
13500	103,01
13560	103,02
13620	103,02
13680	103,02
13740	103,03
13800	103,03
13860	103,03
13920	103,04
13980	103,04
14040	103,04
14100	103,05
14160	103,06
14220	103,06
14280	103,07
14340	103,08
14400	103,08
14460	103,09
14520	103,1
14580	103,1
14640	103,11
14700	103,12
14760	103,12
14820	103,13
14880	103,14
14940	103,14
15000	103,15
15060	103,16
15120	103,16
15180	103,17
15240	103,17
15300	103,17
15360	103,18

15420	103,18
15480	103,18
15540	103,19
15600	103,19
15660	103,19
15720	103,2
15780	103,2
15840	103,2
15900	103,2
15960	103,21
16020	103,21
16080	103,21
16140	103,22
16200	103,22
16260	103,22
16320	103,23
16380	103,23
16440	103,24
16500	103,24
16560	103,25
16620	103,26
16680	103,26
16740	103,27
16800	103,28
16860	103,28
16920	103,29
16980	103,3
17040	103,3
17100	103,31
17160	103,32
17220	103,32
17280	103,33
17340	103,34
17400	103,34
17460	103,35
17520	103,35
17580	103,35
17640	103,36
17700	103,36
17760	103,36
17820	103,37
17880	103,37
17940	103,37
18000	103,38
18060	103,38
18120	103,38
18180	103,39
18240	103,39
18300	103,39
18360	103,4
18420	103,4
18480	103,4
18540	103,41
18600	103,41
18660	103,41
18720	103,42
18780	103,42
18840	103,43
18900	103,44
18960	103,44
19020	103,45
19080	103,46
19140	103,46
19200	103,47
19260	103,48
19320	103,49

19380	103,49
19440	103,5
19500	103,51
19560	103,51
19620	103,52
19680	103,53
19740	103,53
19800	103,54
19860	103,54
19920	103,55
19980	103,55
20040	103,56
20100	103,57
20160	103,58
20220	103,58
20280	103,59
20340	103,6
20400	103,61
20460	103,62
20520	103,62
20580	103,62
20640	103,63
20700	103,63
20760	103,63
20820	103,64
20880	103,64
20940	103,64
21000	103,65
21060	103,66
21120	103,66
21180	103,67
21240	103,68
21300	103,69
21360	103,69
21420	103,7
21480	103,71
21540	103,71
21600	103,72
21660	103,73
21720	103,73
21780	103,74
21840	103,74
21900	103,75
21960	103,76
22020	103,76
22080	103,77
22140	103,78
22200	103,78
22260	103,79
22320	103,8
22380	103,8
22440	103,81
22500	103,82
22560	103,82
22620	103,83
22680	103,84
22740	103,84
22800	103,85
22860	103,85
22920	103,86
22980	103,86
23040	103,87
23100	103,87
23160	103,88
23220	103,88
23280	103,89

23340	103,89
23400	103,9
23460	103,9
23520	103,91
23580	103,92
23640	103,92
23700	103,93
23760	103,94
23820	103,95
23880	103,95
23940	103,96
24000	103,96
24060	103,97
24120	103,98
24180	103,99
24240	104
24300	104
24360	104,01
24420	104,02
24480	104,03
24540	104,04
24600	104,05
24660	104,06
24720	104,07
24780	104,07
24840	104,08
24900	104,09
24960	104,1
25020	104,11
25080	104,12
25140	104,13
25200	104,13
25260	104,14
25320	104,14
25380	104,14
25440	104,15
25500	104,15
25560	104,15
25620	104,16
25680	104,16
25740	104,16
25800	104,17
25860	104,17
25920	104,18
25980	104,18
26040	104,18
26100	104,19
26160	104,19
26220	104,19
26280	104,2
26340	104,2
26400	104,21
26460	104,22
26520	104,22
26580	104,23
26640	104,24
26700	104,25
26760	104,26
26820	104,26
26880	104,27
26940	104,28
27000	104,29
27060	104,3
27120	104,31
27180	104,31
27240	104,32

27300	104,33
27360	104,34
27420	104,35
27480	104,35
27540	104,36
27600	104,36
27660	104,37
27720	104,38
27780	104,38
27840	104,39
27900	104,39
27960	104,4
28020	104,41
28080	104,41
28140	104,42
28200	104,42
28260	104,43
28320	104,43
28380	104,44
28440	104,45
28500	104,45
28560	104,46
28620	104,46
28680	104,47
28740	104,48
28800	104,49
28860	104,49
28920	104,5
28980	104,51
29040	104,52
29100	104,53
29160	104,54
29220	104,55
29280	104,55
29340	104,56
29400	104,57
29460	104,58
29520	104,59
29580	104,6
29640	104,61
29700	104,61
29760	104,62
29820	104,62
29880	104,63
29940	104,64
30000	104,64
30060	104,65
30120	104,65
30180	104,66
30240	104,66
30300	104,67
30360	104,68
30420	104,68
30480	104,69
30540	104,69
30600	104,7
30660	104,7
30720	104,71
30780	104,71
30840	104,72
30900	104,73
30960	104,73
31020	104,74
31080	104,75
31140	104,76
31200	104,77

31260	104,78
31320	104,78
31380	104,79
31440	104,8
31500	104,81
31560	104,82
31620	104,83
31680	104,84
31740	104,85
31800	104,85
31860	104,86
31920	104,87
31980	104,88
32040	104,88
32100	104,89
32160	104,9
32220	104,9
32280	104,91
32340	104,91
32400	104,92
32460	104,92
32520	104,93
32580	104,93
32640	104,94
32700	104,95
32760	104,95
32820	104,96
32880	104,96
32940	104,97
33000	104,97
33060	104,98
33120	104,98
33180	104,99
33240	104,99
33300	105
33360	105,01
33420	105,01
33480	105,02
33540	105,03
33600	105,03
33660	105,04
33720	105,04
33780	105,05
33840	105,06
33900	105,06
33960	105,07
34020	105,08
34080	105,08
34140	105,09
34200	105,1
34260	105,1
34320	105,11
34380	105,11
34440	105,11
34500	105,12
34560	105,12
34620	105,12
34680	105,13
34740	105,13
34800	105,13
34860	105,14
34920	105,14
34980	105,14
35040	105,15
35100	105,15
35160	105,16

35220	105,16
35280	105,17
35340	105,18
35400	105,19
35460	105,2
35520	105,2
35580	105,21
35640	105,22
35700	105,23
35760	105,23
35820	105,24
35880	105,25
35940	105,26
36000	105,26
36060	105,27
36120	105,28
36180	105,29
36240	105,29
36300	105,3
36360	105,31
36420	105,31
36480	105,32
36540	105,32
36600	105,33
36660	105,34
36720	105,34
36780	105,35
36840	105,35
36900	105,36
36960	105,36
37020	105,37
37080	105,38
37140	105,38
37200	105,39
37260	105,39
37320	105,4
37380	105,4
37440	105,41
37500	105,42
37560	105,43
37620	105,44
37680	105,45
37740	105,47
37800	105,48
37860	105,49
37920	105,5
37980	105,51
38040	105,51
38100	105,52
38160	105,53
38220	105,53
38280	105,54
38340	105,55
38400	105,55
38460	105,57
38520	105,58
38580	105,6
38640	105,61
38700	105,62
38760	105,63
38820	105,64
38880	105,65
38940	105,66
39000	105,67
39060	105,68
39120	105,68

39180	105,69
39240	105,7
39300	105,71
39360	105,72
39420	105,72
39480	105,73
39540	105,74
39600	105,75
39660	105,76
39720	105,76
39780	105,77
39840	105,78
39900	105,79
39960	105,8
40020	105,8
40080	105,81
40140	105,82
40200	105,83
40260	105,83
40320	105,84
40380	105,85
40440	105,86
40500	105,87
40560	105,87
40620	105,88
40680	105,89
40740	105,89
40800	105,89
40860	105,9
40920	105,9
40980	105,91
41040	105,91
41100	105,92
41160	105,92
41220	105,93
41280	105,93
41340	105,94
41400	105,94
41460	105,95
41520	105,95
41580	105,95
41640	105,96
41700	105,97
41760	105,97
41820	105,98
41880	105,99
41940	106
42000	106
42060	106,01
42120	106,02
42180	106,03
42240	106,03
42300	106,04
42360	106,05
42420	106,05
42480	106,06
42540	106,06
42600	106,07
42660	106,08
42720	106,08
42780	106,09
42840	106,1
42900	106,1
42960	106,1
43020	106,1
43080	106,11

43140	106,11
43200	106,11
43260	106,12
43320	106,12
43380	106,12
43440	106,13
43500	106,13
43560	106,13
43620	106,14
43680	106,14
43740	106,14
43800	106,15
43860	106,15
43920	106,15
43980	106,16
44040	106,17
44100	106,17
44160	106,18
44220	106,19
44280	106,19
44340	106,2
44400	106,21
44460	106,21
44520	106,22
44580	106,23
44640	106,23
44700	106,24
44760	106,25
44820	106,25
44880	106,26
44940	106,27
45000	106,27
45060	106,28
45120	106,28
45180	106,28
45240	106,29
45300	106,29
45360	106,29
45420	106,3
45480	106,3
45540	106,3
45600	106,31
45660	106,31
45720	106,31
45780	106,32
45840	106,32
45900	106,32
45960	106,32
46020	106,33
46080	106,33
46140	106,34
46200	106,35
46260	106,35
46320	106,36
46380	106,36
46440	106,37
46500	106,38
46560	106,38
46620	106,39
46680	106,4
46740	106,4
46800	106,41
46860	106,42
46920	106,42
46980	106,43
47040	106,44

47100	106,44
47160	106,45
47220	106,45
47280	106,45
47340	106,46
47400	106,46