



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS
COMUNICACIÓN DE DATOS Y OPERACIÓN DE LA ENERGÍA EN UNA SMART
GRID

Que para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería Eléctrica

Presenta
Ing. Jonathan Miguel Rosado González
G00070333

Director de Tesis
Dr. Pedro Martín García Vite

Co-Director de Tesis
M.C. Aarón González Rodríguez



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cd. Madero, Tamps., a **27 de Noviembre de 2019**

OFICIO No.: U2.165/19
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS

C. JONATHAN MIGUEL ROSADO GONZÁLEZ
NO. DE CONTROL G00070333
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SECRETARIO:	GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
VOCAL:	RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
SUPLENTE:	AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

DIRECTOR:	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
CO-DIRECTOR:	AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"COMUNICACIÓN DE DATOS Y OPERACIÓN DE LA ENERGÍA EN UNA SMART GRID"

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica.
"Por mi patria y por mi bien" ®

JOSÉ AARÓN MELO BANDA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

c.c.p.- Archivo
Minuta

JAMB 'RGG' jar X



Av. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tam. .

Tel. 01 (833) 357 48 20, e-mail: posgrado@itcm.edu.mx
www.tecnm.mx | www.cdmadero.tecnm.mx

Dedicatorias

A mi querido papá: Miguel Ángel, que me enseñó el valor de la responsabilidad a través de su ejemplo, el amor al conocimiento a través de la observación y la práctica; a admirar la sabiduría que se obtiene de reflexionar de la vida y la experiencia que se gana con el tiempo, además de la paciencia para aprender nuevas ideas.

Con mucho cariño para mi madre: María Sofía, el regalo más grande que Dios me dio, de quien escuche las primeras palabras de amor y que cada día me fortalece en espíritu.

Para Trinidad Lozano, una gran amiga que refleja en sus ganas de ser y de vivir el vibrante y comprometido don de Dios, quien me muestra cada día la importancia de la Fe y la motivación por dar lo mejor de mí a los demás.

Finalmente a todas aquellas personas que me ayudaron y motivaron todos los días en la culminación de este proyecto, y a Dios por permitirme vivir este momento, seguir aprendiendo y cuestionar todo.

Agradecimientos

Justo es agradecer a muchos que me acompañaron y ayudaron a concretar este objetivo, parecía lejano el día que me sentaría a escribir esta página, pero llegó el momento y si bien es cierto que se trata de un esfuerzo personal, es importante brindar las gracias a cada uno.

A Dios primeramente porque sin Él no sería capaz de lograr este objetivo, la gracia y la gloria son de Él, me dio la fortaleza, la paciencia, la sabiduría y me brindó las herramientas para terminar este proyecto.

A mi familia por motivarme a seguir preparándome profesionalmente y a dar lo mejor de mí en cada actividad a emprender o realizar.

A la División de Estudios de Posgrado en especial al cuerpo académico: personal docente, administrativo y de servicios de la Maestría en Ingeniería Eléctrica, en particular al coordinador M.C. Rafael Castillo Gutiérrez por brindar siempre un trato amable, cordial, cálido y excelente en los procesos afines al área de investigación.

Al sistema de becas CONACYT-SENER por el apoyo brindado a través de la manutención económica para los gastos de investigación académica y personales.

Al Dr. Pedro Martín García Vite director de tesis, por estar siempre en la mejor disposición de asesorar y corregir, así como también compartir sus consejos y conocimientos científicos.

Al M.C. Aarón González Rodríguez codirector de tesis, por compartir su conocimiento a través de las sesiones en el aula, sus comentarios de vida, por las soluciones propuestas a incógnitas o problemas de gran reflexión.

Al M.C. Eduardo Nacu Salas Cabrera profesor de posgrado, quien compartió información relevante y asesoría en las asignaturas relacionadas al tema de investigación, por el apoyo incondicional y accesibilidad a lo largo del periodo de estancia de la maestría.

A Gladis Galiana Bravo maestra de inglés del posgrado, por su motivación al aprendizaje del idioma inglés así como compartir su estilo de vida, carisma y habilidad para trabajar.

A Víctor Domínguez amigo y compañero del posgrado, por el apoyo y estima a lo largo del tiempo de permanencia en la maestría, así como a todos los compañeros que compartieron conmigo un momento agradable dentro y fuera del instituto, por ser parte integral de mi desarrollo como persona.

A Juan José Palomo, José Luis Vargas, Jaime Gómez, Roberto Rodríguez y Mauricio Clemente por su apoyo durante este tiempo, por mostrarme una forma diferente de realizar el trabajo y mantener una actitud positiva ante los retos de la vida.

Comunicación de Datos y Operación de la Energía en una Smart Grid

Jonathan Miguel Rosado González

RESUMEN

En el presente trabajo, se plantea el desarrollo de un sistema de comunicación inalámbrica para el monitoreo de voltaje, corriente y potencia en un bus de corriente directa para fuentes distribuidas. Se propone una arquitectura para el monitoreo de energía en subsistemas de Smart Grid, específicamente en una Microgrid aislada. En este sentido, con el uso de la tecnología de redes de sensores inalámbricos se diseñó un prototipo de medición y transmisión basado en el protocolo Zigbee para establecer un enlace entre dos puntos distantes.

El sistema incluye como interfaz gráfica un software con lenguaje de programación visual y entorno amigable, además de la conexión virtual de instrumentos. El diseño del programa sigue un enfoque de conectividad inalámbrica, por lo que la potencia de transmisión es un factor importante en la distancia de alcance, así como los obstáculos o interferencias en la trayectoria del enlace. Finalmente, el usuario verifica la información en una base de datos donde se registran las variables de medición. Se expone el fundamento teórico y las etapas de cada una de las partes del sistema. Se presentan los resultados obtenidos para el análisis y muestreo de la red eléctrica de interés.

Data Communication and Operation of Energy in a Smart Grid

Jonathan Miguel Rosado González

ABSTRACT

In this paper, the development of a wireless communication system for monitoring voltage, current and power in direct current bus for distributed sources is proposed. An architecture for energy monitoring in Smart Grid subsystems is proposed, specifically in an isolated Microgrid. In this sense, with the use of wireless sensor network technology, a measurement and transmission prototype based on the Zigbee protocol was designed to establish a link between two distant points.

The system includes a graphical interface software with a visual programming language and a friendly environment, in addition to the virtual instrument connection. The program design follows a wireless connectivity approach, so transmission power is an important factor in the range of reach, as well as obstacles or interference in the link path. Finally, the user verifies the information in a database where the measurement variables are recorded. The theoretical foundation and stages of each part of the system are exposed. The results obtained about analysis and sampling in power grid of interest are presented.

Contenido

	<i>Página</i>
Dedicatorias.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Lista de Tablas.....	ix
Lista de Figuras	x
<i>Capítulo 1 Introducción</i>	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. HIPÓTESIS.....	5
1.5. OBJETIVOS	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos.....	5
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	6
1.6.1. Alcances	6
1.6.2. Limitaciones	6
<i>Capítulo 2 Smart grid</i>	7
2.1. SMART GRID	8
Figura 2.1. Topología de una SG.....	8
2.1.1. Infraestructura en general	9
2.2. COMUNICACIONES EN UNA SMART GRID	10
2.3. MICROGRID	11
2.4. REQUISITOS DE UNA MICROGRID	11
2.5. CLASIFICACIÓN DE UNA MICROGRID.....	12
2.5.1. Modo Aislado	13
2.5.2. Modo Conectado.....	14
2.6. SISTEMAS QUE COMPONEN UNA MICROGRID.....	17
2.7. TELECOMUNICACIONES PARA UNA MICROGRID	18
2.7.1. Topología en estrella	19
2.7.2. Topología en árbol.....	20
2.8. ARQUITECTURA DE RED EN UNA MICROGRID	21
2.8.1. Arquitectura HAN	22

2.8.2. Arquitectura NAN	22
2.8.3. Arquitectura WAN	23
2.9. TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS EN UNA MICROGRID	23
2.10. DESAFÍOS DE LA SMART GRID	25
<i>Capítulo 3 Comunicación de Datos</i>	27
3.1. SISTEMA DE COMUNICACIÓN	28
3.2. TOPOLOGÍAS DE RED	30
3.3. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	31
3.3.1. Protocolo IEEE 802.15.4	32
3.3.2. Protocolo Zigbee	33
3.4. XBEE	34
3.5. MODOS DE COMUNICACIÓN XBEE	36
3.5.1. Modo AT	36
3.5.2. Modo API	37
3.6. ARQUITECTURA DE UNA RED CON XBEE	37
3.6.1. Coordinador	38
3.6.2. Router	39
3.6.3. Dispositivo Final	39
3.7. ROUTING EN UNA RED ZIGBEE	40
3.8. DIRECCIONAMIENTO EN REDES ZIGBEE	41
3.9. TAMAÑO DE TRAMAS ZIGBEE	42
3.10. TIPOS DE TRAMAS ZIGBEE	43
3.11. SEGURIDAD EN REDES ZIGBEE	44
3.12. MÉTRICAS DE RENDIMIENTO EN REDES ZIGBEE	44
3.12.1. Delay	45
3.12.2. Throughput	45
3.12.3. Latencia	46
3.12.4. Bit Error Rate (BER)	46
<i>Capítulo 4 Diseño del Sistema</i>	47
4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	48
4.2. DATOS DE MONITOREO DE LA MICROGRID	50
4.2.1. Medición de voltaje	50
4.2.2. Medición de corriente	51
4.3. ADQUISICIÓN DE DATOS	53
4.3.1. Microcontrolador ATMEGA328P	54
4.3.2. LCD	55

4.4. MÓDULO XBEE	56
4.5. CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO XBEE	58
4.5.1. Módulo Xbee Coordinador	59
4.5.2. Módulo Xbee Router/End Device	63
4.5.3. Comandos AT y API	64
4.6. DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	65
4.6.1. Circuito Transmisor.....	65
4.6.1.1. Conexión Microcontrolador Sensores	66
4.6.1.2. Conexión Microcontrolador Xbee	67
4.6.1.3. Conexión Microcontrolador LCD	69
4.6.1.4. Programación de la Comunicación entre Microcontrolador y Sensores	70
4.6.2. Circuito Receptor.....	75
4.6.2.1. Acoplador Max 232	76
4.6.2.2. Conector DB9	76
4.6.2.3. Interfaz Gráfica Labview	78
4.7. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	81
4.7.1. Diseño Esquemático	81
4.7.2. Fabricación de PCB	83
<i>Capítulo 5 Análisis de Resultados</i>	86
5.1. MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS	87
5.2. PRUEBAS DE FUNCIONALIDAD.....	87
5.3. DIMENSIONAMIENTO	91
5.4. ALCANCE DEL SISTEMA	94
5.4.1. Latencia	95
5.4.2. Throughput	96
5.4.3. Seguridad.....	97
5.5. PROCESO DE TRANSMISIÓN DEL XBEE	98
5.6. CONEXIÓN DEL SISTEMA	99
5.7. REGISTRO DE VARIABLES.....	107
5.8. SERVIDOR WEB	107
5.9. APLICACIÓN FINAL	109
<i>Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones</i>	111
6.1. CONCLUSIONES.....	112
6.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	113
6.3. PUBLICACIONES Y PONENCIAS	114
<i>Referencias</i>	115

LISTA DE TABLAS

	<i>Página</i>
Tabla 2.1. Comparativa de algunas tecnologías de comunicación para SG.	10
Tabla 2.2. Comparación entre esquemas de control de una MG.	17
Tabla 2.3. Tipo de red y tecnología de comunicación en MG.	22
Tabla 2.4. Comparativa de requerimientos en tecnologías inalámbricas para MG.	24
Tabla 4.1. Parámetros de medición.	50
Tabla 4.2. Tabla de Configuración Nodo Coordinador.	59
Tabla 4.3. Descripción de pines conector DB9.	77
Tabla 4.4. Componentes del Circuito Transmisor.	82
Tabla 4.5. Componentes del Circuito Receptor.	82
Tabla 5.1. Valores de carga para la MG.	88
Tabla 5.2. Valores de medición con instrumento patrón.	90
Tabla 5.3. Valores de medición con sensores.	91
Tabla 5.4. Cálculo de tiempo de envío de datos.	96
Tabla 5.5. Voltajes empleados en la alimentación del sistema.	100

LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
Figura 2.1. Topología de una SG.....	8
Figura 2.2. Infraestructura de red en una SG.....	9
Figura 2.3. MG aislada sin sistema de almacenamiento.	13
Figura 2.4. MG aislada con sistema de almacenamiento.	14
Figura 2.5. MG con conexión a la red eléctrica sin sistema de almacenamiento.....	15
Figura 2.6. MG con conexión a la red eléctrica con sistema de almacenamiento.....	16
Figura 2.7. Modelo de sistemas que componen a una MG.	17
Figura 2.8. Topología en estrella.	20
Figura 2.9. Topología en árbol.	21
Figura 3.1. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación.....	29
Figura 3.2. Topologías de red de datos.	31
Figura 3.3. Espectro de Frecuencias 802.15.4 / 802.11 b/g.....	32
Figura 3.4. Bandas de Frecuencias en Redes Zigbee.	33
Figura 3.5. Pila del Protocolo IEEE 802.15.4/Zigbee.	34
Figura 3.6. Estructura de pines módulo Xbee.	35
Figura 3.7. Módulo Xbee S2.	35
Figura 3.8. Comunicación en una red Zigbee.....	38
Figura 3.9. Tipos de redes Zigbee.	40
Figura 3.10. Estructura de la trama en redes Zigbee.	41
Figura 3.11. Tamaño de tramas de datos en Redes Zigbee.	43
Figura 3.12. Tramas básicas en redes Zigbee.....	43
Figura 4.1. Diagrama a bloques del sistema.....	49
Figura 4.2. Divisor de voltaje.....	51
Figura 4.3. Conexión del sensor de corriente.....	52
Figura 4.4. Pines del Sensor ASC712.	52
Figura 4.5. Descripción de pines ATMEGA328P.....	55
Figura 4.6. Display LCD 20x4.	56
Figura 4.7. Descripción de pines de un módulo Xbee Serie 2.	57
Figura 4.8. Xbee Explorer Mini USB.....	58
Figura 4.9. Selección de dispositivo Xbee.	60
Figura 4.10. Reconocimiento del Xbee Explorer Mini USB.....	60

Figura 4.11. Detección del módulo Xbee.....	61
Figura 4.12. Configuración del puerto Xbee.....	61
Figura 4.13. Selección Coordinador.....	62
Figura 4.14. Configuración del módulo Coordinador.....	62
Figura 4.15. Selección Router/End Device.....	63
Figura 4.16. Esquema general de una trama API.....	64
Figura 4.17. Flujo de información del sistema.....	65
Figura 4.18. Diagrama a bloques de la unidad transmisora.....	66
Figura 4.19. Diagrama de conexión entre MCU y sensores.....	67
Figura 4.20. Diagrama de Flujo del programa para transmitir bytes de información. ..	68
Figura 4.21. Diagrama de conexión Xbee MCU.....	69
Figura 4.22. Conexión Xbee-Microcontrolador.....	70
Figura 4.23. Programador USBasp.....	71
Figura 4.24. Diagrama de conexión USBasp-MCU.....	71
Figura 4.25. Programa cargado al MCU.....	73
Figura 4.26. Diagrama de Flujo entre Xbee-MCU (ADC).....	74
Figura 4.27. Diagrama a bloques de la unidad receptora.....	75
Figura 4.28. Descripción de pines MAX232.....	76
Figura 4.29. Conector DB9.....	77
Figura 4.30. Configuración del puerto serie con VISA.....	78
Figura 4.31. Algoritmo de Labview para recepción de datos.....	79
Figura 4.32. Algoritmo de Labview para guardar datos en Excel.....	80
Figura 4.33. Diagrama eléctrico circuito Transmisor.....	81
Figura 4.34. Diagrama eléctrico circuito Receptor.....	82
Figura 4.35. Huellas de impresión Circuito Transmisor.....	83
Figura 4.36. Huellas de impresión Circuito Receptor.....	84
Figura 4.37. PCB del circuito Transmisor.....	85
Figura 4.38. PCB del circuito Receptor.....	85
Figura 5.1. Resistencia tubular ajustable de potencia.....	88
Figura 5.2. Fuente de voltaje QW-MS305D.....	89
Figura 5.3. Instrumentos patrón de medición.....	89
Figura 5.4. Conexión de módulos Xbee para prueba de comunicación.....	92
Figura 5.5. Prueba de Comunicación entre módulos Xbee.....	93
Figura 5.6. Formato de trama de datos.....	93

Figura 5.7. Medición de latencia en Xbee punto a punto.....	95
Figura 5.8. Medición de throughput en Xbee punto a punto.....	96
Figura 5.9. Diagrama de flujo para secuencia de transmisión.....	99
Figura 5.10. Medición de Bus de C.D. 24V.....	100
Figura 5.11. Forma de onda de Bus de C.D. 24V.	101
Figura 5.12. Valor de carga baja 35 Ω	102
Figura 5.13. Medición de carga a 35 Ω con sensores.....	102
Figura 5.14. Registro de variables en interfaz gráfica con 35 Ω	103
Figura 5.15. Valor de carga intermedia 20 Ω	104
Figura 5.16. Medición de carga a 20 Ω con sensores.....	104
Figura 5.17. Registro de variables en interfaz gráfica con 20 Ω	105
Figura 5.18. Valor de carga alta 10 Ω	105
Figura 5.19. Medición de carga a 10 Ω con sensores.....	106
Figura 5.20. Registro de variables en interfaz gráfica con 10 Ω	106
Figura 5.21. Registro de variables en Excel.	107
Figura 5.22. Herramienta para servidor web.	108
Figura 5.23. Herramienta para publicar la página web.	108
Figura 5.24. URL de panel remoto en la web.	109
Figura 5.25. Transmisor implementado.....	110
Figura 5.26. Receptor implementado.	110

Capítulo **1**

Introducción

En la actualidad, la recolección y el análisis de datos han adquirido un papel esencial en nuestras vidas, no sólo para otorgar una imagen certera de una situación concreta sino también para predecir actuaciones o posibilidades futuras. Los datos existen prácticamente en todo lo que usamos y hacemos. Éstos están en teléfonos, coches, líneas eléctricas y una cantidad innumerable de otros elementos, además de que sus posibilidades son inmensas.

Los datos pueden ayudar a predecir variables eléctricas tales como: voltaje, corriente y potencia; con lo cual se permite un acercamiento al estudio de los sistemas de energía renovable. Tal es el caso de un panel solar o en una celda de combustible, conocidos como fuentes distribuidas, que se encuentran esencialmente en una Microgrid [1]. Por este motivo se plantea el diseño de un sistema de comunicación inalámbrica, para facilitar el transporte de la información que permita mantener la correcta operación de la red eléctrica, así también garantizar una mayor confiabilidad en los componentes del sistema.

En este *Capítulo* se describe la metodología de la investigación referente a la comunicación de datos en forma inalámbrica basada en radiocomunicación, se presentan los elementos a seguir en el desarrollo del proyecto, con el objetivo de validar la hipótesis gracias a la experimentación de los dispositivos involucrados. Adicionalmente, se exponen los límites y la magnitud del proyecto a realizar.

1.1. ANTECEDENTES

En México, de acuerdo a la Reforma Energética emitida el 20 de diciembre de 2013 [2], actualmente en la fase 2, se espera tener un porcentaje del 35% de energía proveniente de fuentes renovables para el año 2024. Para el alcance de los objetivos propuestos en dicha reforma es importante tomar en cuenta la incorporación de tecnologías de Redes Eléctricas Inteligentes (REI), también llamada Smart Grid (SG) [3], como un elemento significativo para conseguir la reducción del costo total de provisión del suministro eléctrico. Al mismo tiempo se pronostica elevar la eficiencia, confiabilidad, calidad y seguridad del sistema eléctrico de forma económicamente viable. Uno de los componentes fundamentales de la SG son las telecomunicaciones, las cuales serán las que permitirán que la misma sea monitoreada en tiempo real. El monitoreo está presente a través de todas las partes de la SG: generación, transmisión, distribución y comercialización [4] [5].

Con la finalidad de garantizar la calidad de la energía y cubrir la demanda del cliente, se requiere monitorear la Generación Distribuida (GD) en la SG. A su vez, la GD hace referencia a la generación de energía mediante fuentes renovables. La incorporación de GD en los sistemas eléctricos tiene múltiples ventajas; un amplio rango de utilización de energía, se reduce la contaminación en las señales, bajas pérdidas de energía por efecto de transporte y flexibilidad en la ubicación de las instalaciones.

La naturaleza variable de las fuentes de generación de energía renovable es uno de los principales retos que se presentan para su incorporación en la SG. Para ser más específicos, problemas como la intermitencia, los cambios climatológicos y el tiempo de vida de los componentes ocasionan que la generación de energía eléctrica tenga variaciones abruptas e impredecibles. Por lo que se ha optado por aislar la GD en subsistemas conocidos como Microrredes o Microgrids (MG), de tal forma que las fuentes renovables puedan servir de apoyo energético a la red eléctrica pero que la variabilidad de los mismos no comprometa la confiabilidad y la calidad de la energía suministrada a los usuarios finales [8]. Desde el punto de vista de ahorro energético, este esquema es el ideal, ya que generar la energía lo más cerca del usuario deriva en disminución de pérdidas por transmisión.

En definitiva, el conocimiento de las condiciones de funcionamiento o de ciertos parámetros tales como: la corriente, el voltaje y la potencia eléctrica pueden brindar datos que proporcionen una estimación sobre la calidad y la cantidad de energía entregada por las fuentes mencionadas [4]. En efecto, para la correcta incorporación de fuentes alternas en una MG, es muy importante la adquisición y monitoreo sincronizado de datos que regulen el óptimo funcionamiento de los dispositivos de generación.

Con respecto al monitoreo de datos, se han aplicado diversas técnicas tales como: Sistema de Información Geográfica (GIS), Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), Sistema de Gestión de Cortes (OMS), Sistema Adquisición, Supervisión y Control de Datos (SCADA), Sistema de Distribución de Gestión (DMS) y Automatización de Distribución (DA), por mencionar algunas [5].

Es indiscutible que dichas comunicaciones inalámbricas presentan diversas ventajas, entre las principales se encuentran: conectividad de gran cantidad de dispositivos, gran alcance en distancia, facilidad de instalación, bajo costo y mayor movilidad [6].

Los sistemas de comunicaciones inalámbricas operadas bajo el esquema de módulos de Radiofrecuencia (RF) tienen una gran aceptación debido a su fácil uso y bajo costo [7].

En relación a los protocolos de comunicación para la adquisición de datos, Zigbee se ha perfilado como un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica, por lo que, los dispositivos que operan en este protocolo de comunicación presentan atributos que los hacen ideales para su implementación en la adquisición de datos de las MG [8].

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la demanda de energía eléctrica ha aumentado considerablemente. Para desahogar dicha demanda se ha implementado el uso de la SG. La mejora continua de estas redes se ha mermado por el poco monitoreo y control de las fuentes distribuidas que dan soporte al sistema eléctrico. Por otra parte, la mayoría de los medios que se utilizan para la transmisión de información son alámbricos y tienen ciertas desventajas en comparación con los sistemas inalámbricos.

Dentro de estos inconvenientes se puede presentar la pérdida de datos como una dificultad que acontece más en la transmisión por cable, debido a la poca sincronización entre los dispositivos. También existe una limitada flexibilidad dentro de la zona de cobertura y una insuficiente robustez a causa de eventos inesperados que podrían llegar a dejar inutilizada la red de comunicación.

Con el uso de tecnologías inalámbricas se pretende aminorar los problemas que surgen en la generación de energía eléctrica causadas por agentes externos o internos e implementar medidas preventivas y/o correctivas para el buen funcionamiento y confiabilidad del sistema eléctrico en general.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Una solución potencial para evitar la complejidad del uso de cables es basarse en las tecnologías inalámbricas, específicamente en los módulos de RF debido a su fácil instalación y a que ofrecen una rentabilidad en recursos tanto económicos, como materiales y hasta humanos.

La aspiración de esta investigación es desarrollar un sistema de comunicación inalámbrica para un monitoreo sincronizado, con el fin de proporcionar información a los usuarios acerca de los requerimientos energéticos que influyen en el correcto funcionamiento de la GD de C.D., con un enfoque en la medición de las variables eléctricas, para un análisis más detallado, eficiente y ordenado de los datos, con lo cual se pretende tener una mejora y control en una MG. Se toman como base fuentes de

alimentación monitoreadas pero la metodología se puede extender fácilmente a cualquier sistema de GD.

A pesar de que actualmente se están desarrollando trabajos referentes al sistema de monitoreo y control de SG, son pocas las empresas que lideran el mercado de dichas tecnologías. Además de sus altos costos de implementación, por ello se desea desarrollar este sistema con elementos de bajo costo y probar la eficiencia en la comunicación.

1.4. HIPÓTESIS

El sistema de comunicación inalámbrica con base en módulos de RF conocidos como Xbee permitirá informar adecuadamente al usuario sobre los datos de medición eléctrica, sin necesidad de realizar la medición manualmente. Esto con el fin de obtener resultados fiables del sistema de energía que continuamente entregará los valores de voltaje y corriente. Se podrá almacenar la información en una base de datos y se graficará el histograma de consumo de energía de la MG.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de comunicación inalámbrica con módulos Xbee que sea capaz de recabar y monitorear las variables eléctricas provenientes de GD en un bus de C.D. en una MG.

1.5.2. Objetivos específicos

- Simular una MG de fuentes renovables con un bus de C.D. de 24V.
- Diseñar y estructurar un sistema de comunicación inalámbrica utilizando tecnología Zigbee.

- Implementar un sistema de acondicionamiento de señales para medir el voltaje y corriente de salida.
- Obtener los datos de medición y concentrarlos.
- Enviar los datos obtenidos por protocolo TCP/IP.
- Aplicar un software avanzado para la interconexión a un servidor remoto.

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.6.1. Alcances

- Medición de voltaje y corriente de las fuentes de energía alternas.
- Implementación del sistema de comunicación inalámbrica.
- Concentración y cotejo de datos.
- Validación para corroborar el comportamiento de la comunicación inalámbrica.
- Sistema de adquisición de datos instrumentado.

1.6.2. Limitaciones

- Utilización de un medidor de instrumentación genérico.
- El análisis será únicamente en una MG en C.D. aislada.
- Compatibilidad del equipo con el software avanzado de aplicación.
- El ancho de banda y el ruido en el sistema de comunicación.
- Fuentes de generación distribuidas de baja potencia o a escala de laboratorio.
- Alcance de enlace (menor a 30 m).

Capítulo 2

Smart grid

En la gestión de la energía se está produciendo una transformación profunda, motivada por los desafíos que surgen de sostenibilidad del suministro eléctrico, competitividad y seguridad. Esta transformación requiere la gestión integrada de todos los recursos de la red: generación, demanda, almacenamiento y dispositivos de la red. El suministro eléctrico, especialmente el de baja tensión, está sometido a una evolución decisiva como consecuencia del nuevo modelo basado en SG [3].

Como proyección a largo plazo, la generación de energía eléctrica dejará de ser centralizada y pasará a ser GD, las comunicaciones unidireccionales se convertirán en bidireccionales, la supervisión de las redes de baja tensión se hará de manera totalmente remota y el restablecimiento del suministro será automático. En este contexto, será habitual el seguimiento remoto de la red y la automatización en la restauración del suministro eléctrico. Estos cambios, que a simple vista resultan naturales, son impulsados por el dinamismo de los nuevos entornos de la energía, la confiabilidad y la experiencia en la tecnología, por eso en este *Capítulo* se ha desarrollado una visión completa de la SG desde sus características principales hasta su infraestructura con el fin de centrar la atención en el estudio y comprensión del tema. También se discute la justificación para el estudio de la MG como una iniciativa que requiere comprensión para explorar algunas de las complejidades asociadas en contexto técnico dentro del área de comunicaciones, además de brindar énfasis para algunos de los intangibles, tales como seguridad, compatibilidad de sistemas y problemas alrededor de la misma.

2.1. SMART GRID

A partir de un enfoque globalizado, la SG se puede definir como la integración dinámica de los desarrollos de ingeniería eléctrica, el almacenamiento de energía y los avances de la tecnología de información y comunicación (TIC), con el fin de gestionar de forma eficiente, es decir, optimizar la producción y distribución de la electricidad para equilibrar mejor la oferta y la demanda entre consumidores y productores [2].

La red eléctrica tradicional es un sistema rígido, que carece de flexibilidad en la generación, transmisión y distribución. Además, es difícil crear un sistema configurable, que sea monitoreado en tiempo real y que permita mayor portabilidad de algunos de sus componentes a lo largo de la red eléctrica actual. Estos sistemas tradicionales tienen deficiencias para el auto-restablecimiento y requieren de redundancias en la topología de red. Por su parte, la SG cuenta con una topología más estable y ordenada para brindar mayor flexibilidad a la red. En la Figura 2.1 se observa la topología de una SG.

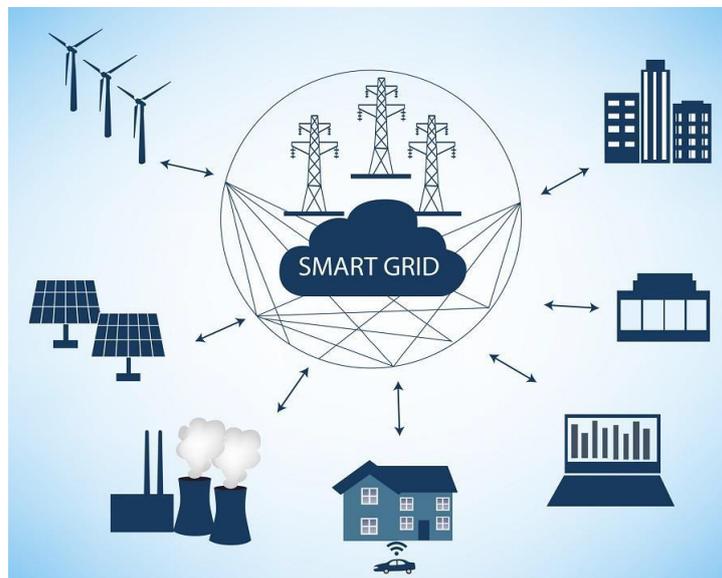


FIGURA 2.1. Topología de una SG.

En una SG se plantea que la carga refleje también la mejora y la eficiencia energética. En muchas propuestas se compara a la SG con el Internet por ser gestionado en dos vías, dado que circula la información de forma bidireccional, y porque está conformado por diferentes nodos dispersos que se gestionan de manera eficiente a lo largo de todo el sistema. Además, brinda al cliente servicios como ahorro de energía y reducción de costes por el consumo del suministro eléctrico. Para tener una manera de ver en forma transparente el incremento de la fiabilidad en la lectura del suministro y que pueda optar por prepago según lo que el usuario requiera. En resumen, facilitar al cliente herramientas que le ayuden a decidir cómo y cuándo consumir de forma responsable el suministro eléctrico [5].

2.1.1. Infraestructura en general

La SG podrá cambiar su diseño y topología de acuerdo a los avances tecnológicos, en este sentido es importante conocer las características básicas. En el esquema de red existen dos tipos de redes que la constituyen, la red eléctrica tradicional y la red de comunicaciones, como se ilustra en la Figura 2.2.

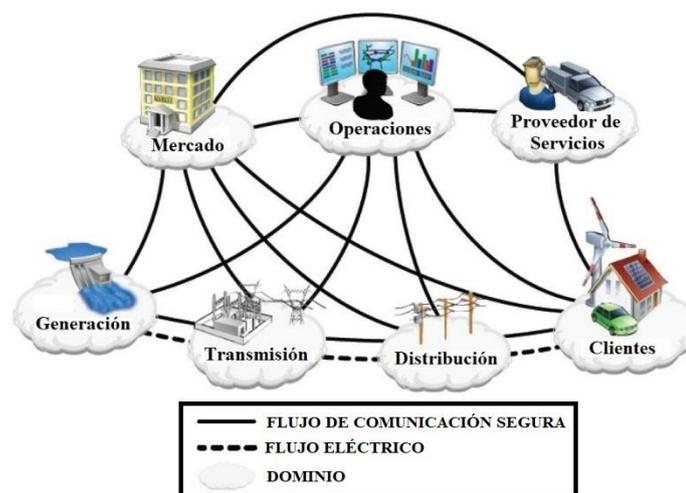


Figura 2.2. Infraestructura de red en una SG.

2.2. COMUNICACIONES EN UNA SMART GRID

El sistema de comunicaciones es uno de los factores más relevantes en el funcionamiento de una SG, pues permite tener un flujo de datos entre la GD y los sistemas de transmisión, distribución y consumo [11]. Debido a la existencia de fuentes renovables como la solar y la eólica, la potencia generada en las fuentes de energía puede incrementarse o disminuir dependiendo de la visibilidad del sol o la disponibilidad del viento. Estos cambios son del orden de milisegundos o inclusive minutos cuando hay ausencia total de sol y viento. De igual manera, la constante conexión y desconexión de cargas sin un adecuado conocimiento del recurso energético disponible genera inestabilidad en la red, por lo tanto los sistemas de comunicaciones en la SG toman un papel muy importante en la información de la GD.

En el ámbito relacionado a las comunicaciones existen diversas tecnologías que aportan grandes beneficios a la SG. La implementación de una u otra tecnología en la SG se basa en los requerimientos y las características de la misma, en la Tabla 2.1 se muestran las principales tecnologías de comunicación y sus principales atributos.

Tabla 2.1. Comparativa de algunas tecnologías de comunicación para SG.

Especificaciones	ZigBee	Wifi	WiMax	Bluetooth	Cellular
Bajo costo del dispositivo	•			•	
Baja complejidad	•			•	
Conexiones multipuntos	•	•	•		•
Conexión directa a sensores/medidores	•			•	
Bajo consumo	•			•	
Capacidad de expansión	•	•		•	
Código de encriptación	•	•	•		

2.3. MICROGRID

Una de las piedras angulares de una SG la compone una MG que se ubica en el área de media y baja tensión. Dicha MG tiene la capacidad de importar y exportar energía de forma flexible desde y hacia la red, controlar el flujo de potencia activa y reactiva, y gestionar el almacenamiento de energía. Por lo tanto, una MG es un sistema de generación, almacenamiento y distribución de energía eléctrica en área local, el cual tiene un control inteligente y eficiente [1].

Generalmente, la MG utiliza fuentes alternativas de generación eléctrica como las fuentes renovables y energías limpias que producen baja contaminación ambiental, lo que conlleva a una oferta energética más diversa, tiene opciones como la energía eólica, solar, biomasa renovable e hidrógeno entre otras más y se consideran a éstas las más viables a futuro porque producirán grandes cambios a nivel global.

2.4. REQUISITOS DE UNA MICROGRID

La MG debe cumplir con ciertos requisitos para garantizar un flujo confiable de energía como:

- Detectar, analizar y responder ante una falla.
- Ser altamente confiable para satisfacer las necesidades del consumidor.
- Actuar sobre los generadores, elementos almacenadores y cargas de acuerdo a las necesidades y estado del sistema.
- Capacidad de crecimiento y adaptación a nuevas tecnologías.
- Resistencia a ataques físicos y cibernéticos.

Estas características y requerimientos plantean nuevos retos tecnológicos ante los nuevos condicionantes en las operaciones, como la existencia de flujos bidireccionales de energía por la presencia de generación en media y baja tensión, los modos de operación en isla o conectado, cambios en la topología de la MG debido a las conexiones y desconexiones de generadores, dispositivos de almacenamiento y cargas, intermitencia de algunas fuentes de generación como los paneles fotovoltaicos que dependen del clima y la reducción de los tiempos máximos permisibles para despejar fallas tanto en la red de media tensión como en la de baja tensión, llevan a pensar en sistemas adaptativos de protección y gestión con el objeto de mantener la estabilidad en las MG[1].

2.5. CLASIFICACIÓN DE UNA MICROGRID

La clasificación más simple de una MG eléctrica se puede dar en términos de la forma de onda de la señal de voltaje generada, es decir, por el tipo de corriente que se maneja en el bus de distribución de energía, si es en C.D. o en C.A. La mayoría de las cargas usadas en zonas residenciales, aunque se conectan a la toma de C.A., son de C.D., tales como: computadoras, celulares, sistemas de sonido, sistemas de iluminación, por mencionar algunas.

El uso de una MG en C.D. en los lugares mencionados evita pérdidas en conversiones innecesarias mejorando la eficiencia entre un 10% y un 22% respecto a una MG de C.A. [12]. La desventaja de utilizar una MG de C.A., es que las fuentes de energía que producen una corriente de C.D. necesitan una conversión de C.A., y del bus de C.A. hacer una conversión de nuevo a C.D. para las cargas citadas anteriormente.

Una clasificación adicional de la MG en C.D. depende del nivel de voltaje con el que se trabaje. De esta manera es posible trabajar con voltajes producto de la rectificación de sistemas en C.A. monofásicos o trifásicos, o trabajar con voltajes en C.D. típicas, como por ejemplo, 24V o los 48 V utilizados en muchos esquemas y trabajos. Generalmente este nivel de voltaje es usado por razones de seguridad para el usuario.

Una MG en C.D. se puede clasificar por los elementos que la componen. Los elementos que siempre se presentan son las fuentes de generación distribuida y las cargas que consumirán la energía del sistema. Además de estos dos elementos, una MG en C.D. puede tener un sistema que la conecte con la red eléctrica para inyectar y/o consumir energía de ella y un sistema de almacenamiento para tener un respaldo de energía. Así, al combinar estos elementos se tienen cuatro tipos de MG que a continuación se describen por el modo de operación.

2.5.1. Modo Aislado

En el modo aislado, la MG está desconectada del sistema eléctrico y provee energía a partir de sus propias fuentes y sistemas de almacenamiento. Este tipo de operación usualmente se encuentra en áreas rurales que no disponen de un fácil acceso [13].

- a) **MG aislada sin sistema de almacenamiento:** En este tipo únicamente se tienen las fuentes de generación de energía y las cargas. En esta configuración solo es necesario controlar la potencia que suministran las fuentes [13]. A continuación se ilustra en la Figura 2.3 este tipo de MG.

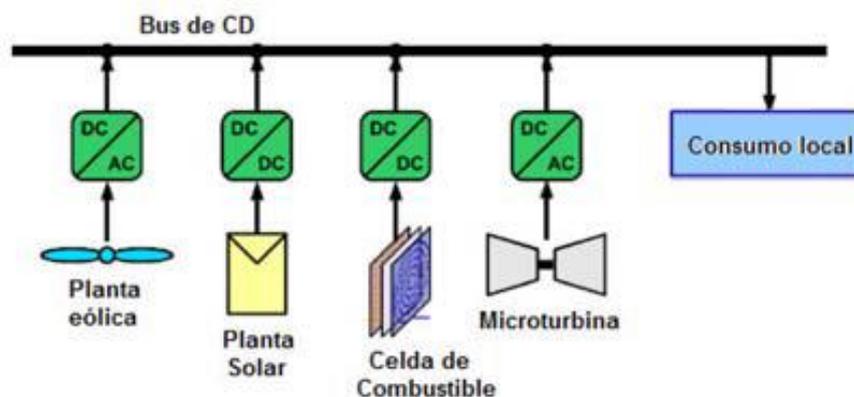


Figura 2.3. MG Aislada sin sistema de almacenamiento.

- b) **MG aislada con sistema de almacenamiento:** Es el tipo comúnmente modelado y simulado, se representa en la Figura 2.4. Este tipo de sistemas está conformado por fuentes de generación, un sistema de almacenamiento y cargas. Además del control de la energía proveniente de las fuentes de generación, es necesario controlar la carga y descarga del sistema de almacenamiento dependiendo del nivel de voltaje en el bus, por lo que no es necesario un sistema de comunicación [14].

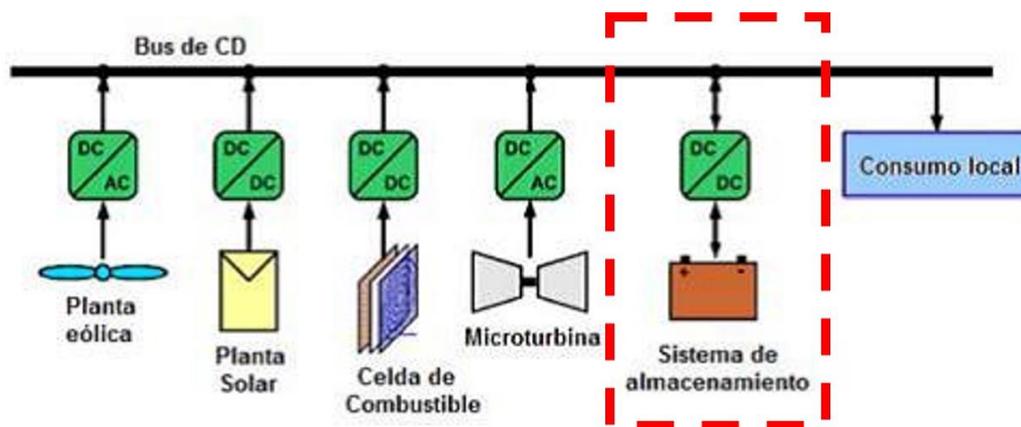


Figura 2.4. MG aislada con sistema de almacenamiento.

2.5.2. Modo Conectado

En este modo, la conexión del sistema principal de energía generalmente es a través de un transformador de potencia. Este modo satisface las demandas energéticas del área local donde está ubicada o por el contrario extrae energía de ésta.

La conmutación entre los modos aislado y conectado es la operación más crítica que tiene la MG, porque debe sincronizar de forma precisa sus fuentes de energía con la frecuencia y voltaje de la red eléctrica al pasar de un modo a otro y lograr estabilizarse.

- c) **MG con conexión a la red eléctrica sin sistema de almacenamiento:** Similar al tipo anterior, excepto que maneja un sistema de conexión a la red eléctrica en lugar del sistema de almacenamiento. El control utiliza el nivel de voltaje en el bus para determinar si se realiza una conversión de C.A. a C.D. de la red eléctrica hacia el bus, o una conversión de C.D. a C.A. del bus hacia la red [15]. Este tipo de MG se muestra en la Figura 2.5.

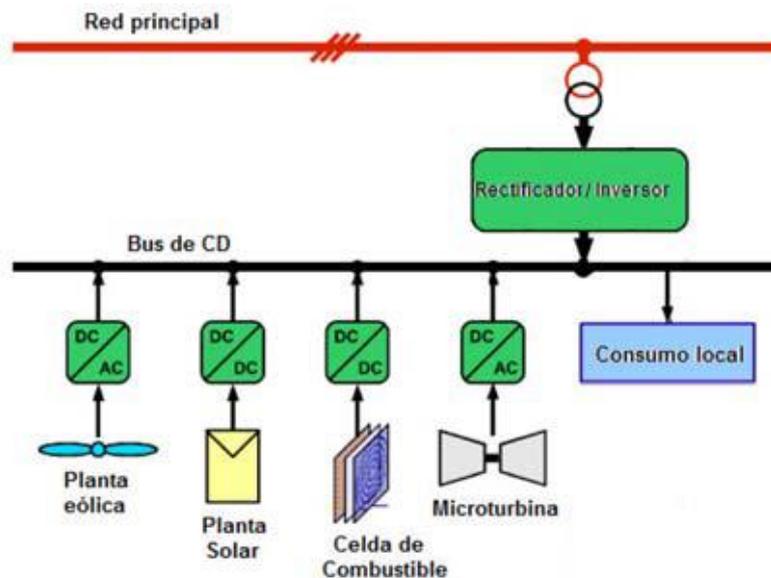


Figura 2.5. MG con conexión a la red eléctrica sin sistema de almacenamiento.

- d) **MG con conexión a la red eléctrica con sistema de almacenamiento:** El control del sistema es más complejo que los anteriores tipos debido a la cantidad de elementos adicionales que se tienen. Para éste tipo que se ilustra en la Figura 2.6 se propone un control centralizado con un sistema de comunicación con el que el sistema de control reúna información del estado del sistema y administra la energía de manera eficiente [16]. Para este caso el sistema utiliza un controlador central que coordina las interfaces de potencia en la MG para mantener el balance de potencia activa y reactiva en condiciones de estado estable [10].

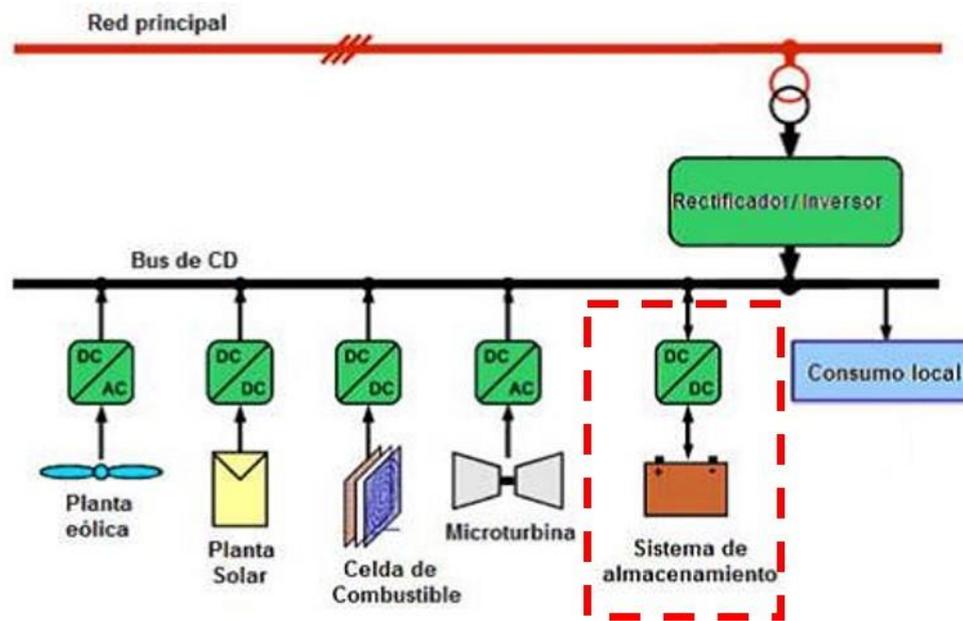


Figura 2.6. MG con conexión a la red eléctrica con sistema de almacenamiento.

Los sistemas de comunicaciones implementados en la MG se han realizado de acuerdo con las estrategias de control aplicado en la operación del sistema, en este sentido es primordial el uso de los protocolos de comunicación más relevantes empleados en estas estrategias para mantener el correcto funcionamiento de la operación. De acuerdo al tipo de MG se utilizan los aditamentos necesarios para la interconexión de los dispositivos de comunicación.

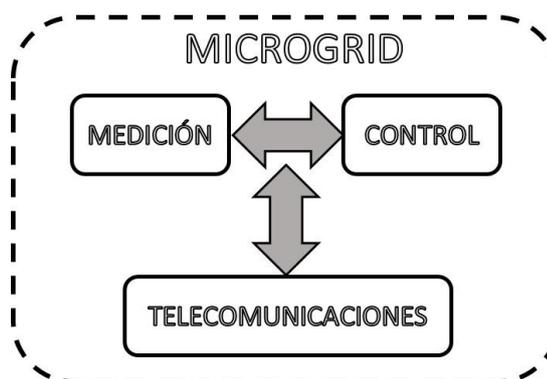
La efectividad del esquema de comunicaciones en la MG está ligada a su estructura y al sistema de control. En cuanto a la estructura, la MG puede tener un esquema centralizado o descentralizado y en cuanto a su sistema de control, éstos se pueden organizar en relación al uso de los enlaces de comunicaciones que permiten ajustar las consignas impuestas por los controladores a los diferentes módulos [9]. En la Tabla 2.2 se muestra la comparativa entre ambos esquemas de control para la MG.

Tabla 2.2. Comparación entre esquemas de control de una MG.

TIPO DE CONTROL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CENTRALIZADO	Fácil implementación	Alta habilidad computacional en el controlador central
	Fácil mantenimiento	Requiere de gran ancho de banda en enlaces de comunicación
	Bajo costo	La falla de la unidad central es crítica
	Amplio control en todo el sistema	Nodo central en congestión
DESCENTRALIZADO	Expansión más fácil	Necesidad de sincronización
	Baja habilidad computacional en cada unidad	Necesita tiempo para tomar una decisión
	Robustez para falla simple	Varios puntos requieren mantenimiento
	Adecuado para mayor escala compleja, sistema heterogéneo	Necesidad de una nueva estructura de comunicación.

2.6. SISTEMAS QUE COMPONEN UNA MICROGRID

Para lograr ciertas funcionalidades en la MG, se hace necesaria la interacción entre diferentes sistemas o entidades como un sistema de medición, un sistema de control o gestión y un sistema de telecomunicaciones sobre la MG. El diagrama de bloques de la Figura 2.7 representa el modelo de los sistemas que componen a una MG.

**Figura 2.7.** Modelo de sistemas que componen a una MG.

El sistema de medición está conformado por sensores, medidores inteligentes y recolectores de información encargados de obtener información a partir de las variables relevantes de la red como voltaje, corriente, potencia, entre otros.

Para el sistema de control o gestión cuya función es coordinar las interfaces de potencia de la MG, se plantean tres posibles arquitecturas [14]:

- **Un control centralizado**, donde existe un elemento central que recibe toda la información del estado actual de la red y con base en esta información toma decisiones sobre los equipos de protección.
- **Un control distribuido**, en el que no es necesario un elemento central y la toma de decisiones se realiza de forma autónoma por cada uno de los elementos teniendo en cuenta la información de su propio estado y la de los demás.
- **Un híbrido entre las dos arquitecturas anteriores**, donde las funciones de control y gestión son compartidas y designadas a cada uno de acuerdo a ciertas prioridades y respuesta en la ejecución.

El intercambio de información entre las diferentes entidades que conforman la red eléctrica con los puntos de gestión y control, se encuentran soportados por el sistema de telecomunicaciones, que debe tener ciertas características para cumplir con los requerimientos impuestos a la MG sin comprometer la confiabilidad y eficiencia del sistema, dentro de sus límites y restricciones ambos deben estar optimizados. El modelo de este proyecto se encuentra situado dentro de este sistema, es decir, los sistemas inalámbricos para el soporte de las telecomunicaciones.

2.7. TELECOMUNICACIONES PARA UNA MICROGRID

Las MG varían de acuerdo a la arquitectura, escala física y estrategias de control; y dada la gran variedad de algoritmos, sensores y tecnologías que se pueden emplear para su construcción, los requerimientos del sistema de telecomunicaciones pueden diferir de una MG a otra, por lo que varios autores [17] concuerdan en las características principales que son:

- a) **La seguridad:** Esto afianza que el sistema realizará su función por un período de tiempo especificado y bajo las condiciones indicadas.

- b) **La robustez:** Añade redundancia al sistema.

- c) **La escalabilidad:** Permite el ingreso de nuevos nodos a la red, que soporte comunicación bidireccional y con un retraso máximo de la información en toda su infraestructura.

En un esquema de telecomunicaciones para una MG con su modelo de control, se observa la incidencia que tienen algunos parámetros del sistema de comunicaciones como el retardo promedio (delay) en el desempeño y respuesta de los sistemas frente alguna actividad, por ejemplo en el cambio del modo aislado a conectado.

Entre los parámetros más importantes a tener en cuenta en las telecomunicaciones de una MG son: el retardo promedio (delay); la frecuencia de envío de datos o tasa de muestreo; la pérdida de paquetes; la tasa promedio de éxito en la entrega del mensaje (throughput); el medio con la potencia de transmisión, la tasa de error e interferencia; el protocolo de acceso al medio; la topología, donde también se realiza una comparación entre tecnologías y por último el tamaño de los datos que debe manejar el sistema [17].

Otro dato importante en un sistema de telecomunicaciones para una MG es la topología de la red, que es la representación geométrica de los enlaces y la configuración de conexiones entre nodos. Para redes alámbricas es posible encontrar cinco tipos de topologías: en malla, en estrella, en árbol, en bus y en anillo. Para el caso de redes inalámbricas las topologías se reducen a la de estrella, árbol y malla.

2.7.1. Topología en estrella

Es una arquitectura centralizada, en la cual los nodos están conectados únicamente a un nodo central o concentrador. Los nodos no están conectados entre sí y toda comunicación se establece únicamente con el nodo central. Un ejemplo de esta topología se muestra en la Figura 2.8.

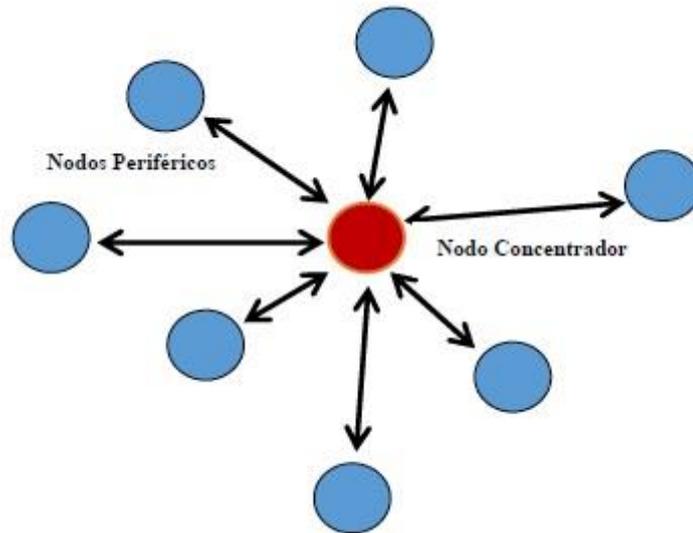


Figura 2.8. *Topología en estrella.*

2.7.2. Topología en árbol

Es una arquitectura jerarquizada que consiste en la unión de varias topologías en estrella. Existe un concentrador único pero los nodos en árbol no están directamente conectados a éste, la mayoría se conectan a un concentrador secundario, que a su vez, se conecta al concentrador central como se muestra en la Figura 2.9. Esta topología se compone por varias ramas, que son las extensiones de la red generados por los concentradores secundarios, que corresponden a los puntos amarillos.

Cada concentrador secundario que extienda la red, genera una mayor profundidad en la rama, la profundidad de la red para este caso es de dos. Por último, los nodos que están conectados a los concentradores secundarios en cualquier profundidad se dice que corresponden a las hojas de las ramas.

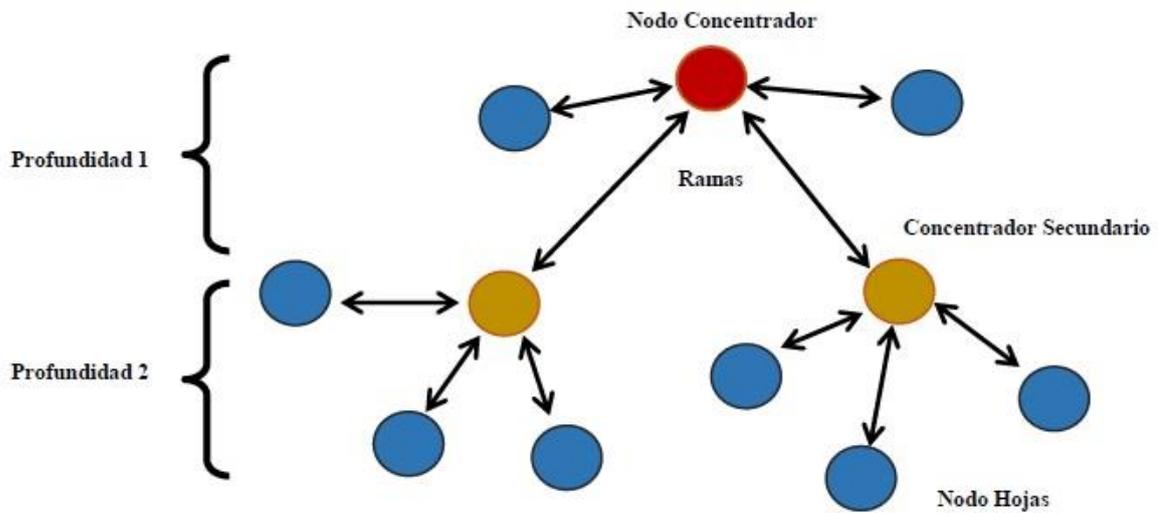


Figura 2.9. Topología en árbol.

2.8. ARQUITECTURA DE RED EN UNA MICROGRID

Con el fin de describir la arquitectura de red de comunicaciones en una MG, se debe realizar una clasificación en función de su cobertura. Dentro de las alternativas se encuentran las redes HAN (del inglés, Home Area Network), NAN (del inglés, Neighborhood Area Network) y las redes WAN (del inglés, Wide Area Network) [18].

Las potenciales tecnologías a utilizar en estas redes de comunicaciones se resumen en la Tabla 2.3, las cuales son de gran significancia para la transmisión y recepción de datos. El flujo de información requiere de una gran cobertura, por este motivo los diferentes tipos de redes se acoplan a la demanda de los usuarios en un área determinada. La mayoría de las redes deben ser de cobertura amplia aunque la elección de cada una difiere del uso que se tenga planeado. Por ejemplo, a nivel global o mundial la red WAN es una excelente opción para reducir costos de operación.

Tabla 2.3. Tipo de red y tecnología de comunicación en MG.

TIPO DE RED	DISTANCIA	REQUERIMIENTOS DE TASA DE TRANSMISIÓN DE DATOS	TECNOLOGÍAS POTENCIALES
HAN	10 m	Depende de la aplicación, generalmente baja tasa para información de control	Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, Ethernet, PLC
NAN	100 m	Depende de la densidad de nodos sobre la red	Wi-Fi, Radioenlaces, GPRS/EDGE, PLC
WAN	10 km	Dispositivos de alta capacidad como enrutadores o conmutadores de alta velocidad (unos 100 Mbps a pocos Gbps)	Ethernet, Microondas, Wimax, 3G/LTE, Enlaces Fibra óptica

2.8.1. Arquitectura HAN

Las redes HAN proveen enlaces bidireccionales entre equipos, con un bajo ancho de banda del orden de 10-100 kbps por dispositivo. La información transmitida normalmente corresponde al consumo de energía desde los medidores inteligentes.

Además, en este tipo de redes las conexiones son flexibles y de bajo costo debido a que la latencia es baja y no necesaria. Las tecnologías inalámbricas más utilizadas en este tipo de redes son Zigbee, Bluetooth y Wi-Fi. De éstas se destaca Zigbee, gracias a su bajo consumo de energía y sus prestaciones para monitorear dispositivos por medio inalámbrico [19]. En las cableadas se destacan PLC y Ethernet.

2.8.2. Arquitectura NAN

En este tipo de red, los enlaces de comunicaciones son bidireccionales entre las estaciones. Provee conexión externa con el resto de la red para el acceso a la información de la medición y las funciones de respuesta a la demanda.

Para este tipo de arquitectura es necesario tomar en cuenta que los factores ambientales afectan el rendimiento de la red de comunicaciones así como la ubicación geográfica, la densidad de nodos y la interferencia de la señal. Las tecnologías que pueden usarse son Wi-Fi, radioenlaces, Wi-MAX, GPRS/EDGE y PLC/BPLC.

2.8.3. Arquitectura WAN

Cualquier red más allá de una NAN o del último punto de agregación de información de medición pertenece a una WAN. Estos esquemas son de anchos de banda superiores a los de una NAN, de dos vías para distancias largas que tienen aplicaciones de monitoreo efectivo y aplicaciones de sensado.

Esta red es crítica, en cuanto a la respuesta en tiempo real y cambio de modo seguro, especialmente cuando la MG opera en modo interconectado a través del punto de acoplamiento común.

2.9. TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS EN UNA MICROGRID

La topología de la infraestructura del sistema de comunicaciones en la MG debe permitir adaptarse a sus condiciones de operación. Siendo esta operación dinámica y cambiante, los nodos de una red NAN y HAN deben contar con funcionalidades que les facilite su reconfiguración.

En redes inalámbricas, este esquema requiere del uso de protocolos de encaminamiento que se adapten a los cambios de fuentes y conexiones de cargas que tiene la MG para así garantizar la transmisión de los datos con los requerimientos necesarios de ancho de banda y latencia.

En entornos de las redes de sensores inalámbricos WSN (del inglés, Wireless Sensor Networks) se han desarrollado algoritmos de encaminamiento con diferentes categorías para SG [20]. Dado que en la actualidad no existen algoritmos de encaminamiento aplicado a las WSN en MG, aún se están estandarizando las capas de red

y transporte del modelo OSI [21]. Estos protocolos deben ser compatibles con los requerimientos de la red según sus aplicaciones para la SG mostrados en la Tabla 2.4. Los protocolos más usados en la MG son:

- a) **Wi-Fi:** Es una tecnología aplicada para comunicaciones inalámbricas pero puede ser usada para mejorar cobertura, ancho de banda o velocidad y conseguir así los datos desde cualquier dispositivo electrónico, es decir es usado para medición inteligente.
- b) **Bluetooth:** Es una especificación industrial para redes inalámbricas WPAN que hace posible la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por RF en la banda ISM de la frecuencia de 2.4 GHz.
- c) **Zigbee:** Está basada en el IEEE estándar 802.15.4, tiene una velocidad de 250 kbps, su rango de transmisión es limitado y se combina con tecnologías de comunicación de mayor rango como las del estándar IEEE 802.11 (Wi-Fi) y Home Plug.

Tabla 2.4. Comparativa de requerimientos en tecnologías inalámbricas para MG.

REQUERIMIENTOS	WIFI	BLUETOOTH	ZIGBEE
Velocidad	<50 Mbps	<1 Mbs	<250 kbps
No. de nodos	32	8	255/65,535
Duración de batería	horas	días	Años
Consumo en transmisión	400 mA	40mA	30mA
Consumo en reposo	20 mA	0.2 mA	3 μ A
Precio	alto	medio	Bajo
Configuración	Compleja	Compleja	Simple

Se observa que el empleo de enlaces inalámbricos en el diseño de la red de comunicaciones en una MG simplifica en gran medida la interconexión de los medidores inteligentes, permite mayor flexibilidad y escalabilidad en el momento en que la red crece.

Sin embargo, es necesario considerar la calidad del servicio, ancho de banda y latencia al realizar el despliegue cuando aumenta la cantidad de nodos. La baja latencia en la transmisión permite la transferencia de valores de referencias e instrucciones a los controladores que operan en la MG en tiempos cortos sin que se afecte el funcionamiento, con lo cual se logra realizar una adecuada gestión de los recursos.

2.10. DESAFÍOS DE LA SMART GRID

Dentro de diferentes líneas de investigación en las redes de comunicaciones en SG se encuentran diversos puntos en común que permitirán advertir ciertos desafíos que se deben analizar, entre ellos están los siguientes [22]:

- Crear una infraestructura de comunicación para lograr la operación de toda el área y su manejo dinámico en el mercado eléctrico.
- Desarrollar conexiones eficientes para el máximo aprovechamiento de energía solar, eólica, geotérmica, biomasa, por mencionar algunas.
- Asegurar que exista capacidad de transmisión para interconectar las fuentes de energía, especialmente las renovables al mismo tiempo que el impulso para su implementación.
- Desarrollar arquitecturas descentralizadas habilitando sistemas de suministros de energía de menor magnitud con el fin de que operen con facilidad junto al resto del sistema.
- Utilizar beneficios de almacenamiento de energía y asegurar el correcto uso de las centrales de generación.
- Considerar las limitaciones del sistema teniendo en cuenta el impacto ambiental.
- Proponer mejoras políticas y regulatorias sobre redes eléctricas inteligentes.

En la actualidad la empresa eléctrica dispone en sus inicios de automatización de las subestaciones al utilizar sistemas inalámbricos que proporcionan beneficios tales como [24]:

- Mejoran la calidad del servicio al responder a las interrupciones con prontitud.
- Aumentan la capacidad del operador para supervisar y controlar el sistema de alimentación, en condiciones normales, anormales y de emergencia, proporcionan los datos en tiempo real, de forma confiable y adecuada.
- Aumentan la eficiencia del sistema de alimentación al reducir pérdidas.
- Ayudan a los equipos de mantenimiento y protección, al ofrecer registros más fiables, significativos y oportunos de los históricos del funcionamiento.
- Mejoran el análisis y planificación del sistema de alimentación, proporcionan un mayor acceso a los datos de las operaciones y sus aplicaciones.

Como conclusión general, en este Capítulo se observaron los conceptos referentes a la SG principalmente en la MG con un enfoque a las comunicaciones, este tema es pieza clave en el desarrollo de esta tesis por el análisis de las tecnologías inalámbricas como marco de referencia para una mayor cobertura y monitoreo en la GD. Sin duda, el control y monitoreo de una MG es hoy en día uno de los intereses más grandes en investigación, por lo que, la información analizada en este Capítulo brinda una perspectiva más clara de cómo operan las comunicaciones en la SG.

Capítulo 3

Comunicación de Datos

El propósito de un sistema de Comunicación de Datos es permitir la transmisión de información en forma digital de un punto en el espacio-tiempo a otro o más. Por lo general, se forman redes de comunicación a partir de esta referencia. Es importante explorar las ideas básicas de qué es la información y cómo puede ser medida, también cómo estas ideas se relacionan con el ancho de banda, la capacidad del canal, la relación señal a ruido, la velocidad del bit error y demás conceptos.

A pesar de que una gran variedad de información es movida y del hecho de que el tipo de información tiene sus propias condiciones para inteligibilidad, la red ha evolucionado dentro de un sistema altamente complejo. Los avances en la Comunicación de Datos han evolucionado ampliamente desde la forma de la red telefónica pública. Sin embargo, el diseño en los tipos de redes, como Internet, está lejos de madurar quizás por la proliferación de las formas en que son usadas. La integración de los dos tipos de redes es la culminación de la tecnología de las telecomunicaciones. En este *Capítulo*, se verá una introducción a los aspectos fundamentales de la teoría de la información, con particular atención a la Comunicación de Datos. Esto seguido de una explicación de las propiedades del tipo de comunicación inalámbrica así como los sistemas de redes de telecomunicaciones que son el objeto de esta investigación.

3.1. SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Independientemente de cuál sea la aplicación en particular, para que exista una comunicación de datos deben involucrarse tres subsistemas principales:

- **Transmisor:** Es el dispositivo que procesa la señal de entrada de la fuente de origen para transmitir o enviar un mensaje, código o señal a través de un medio hacia un destino a cierta distancia. El procesamiento de la señal por lo general involucra modulación o codificación.
- **Receptor:** Es el dispositivo que recibe la señal de salida y la reconstruye mediante un proceso de filtrado, amplificación y demodulación o descodificación.
- **Canal:** Es el medio por el cual viaja la información desde el origen hasta su destino; generalmente la información está en forma binaria, por lo que, es común escuchar términos como bit, byte, trama o paquete para el envío del mensaje.

Otro término que se involucra en el proceso de comunicación es el ruido o interferencia, este es un efecto indeseado que surge en el curso de la transmisión y altera la forma de la señal. Las causas se deben principalmente por procesos naturales internos o externos al sistema de manera estocástica.

Los sistemas de comunicación están diseñados para transmitir información y para su diseño existen cuatro intereses principales:

1. La selección de la forma de onda que contendrá la información.
2. El ancho de banda y la potencia de la forma de onda.
3. El efecto del ruido en la información recibida.
4. El costo del sistema.

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques mediante el cual pueden describirse los sistemas de comunicación.

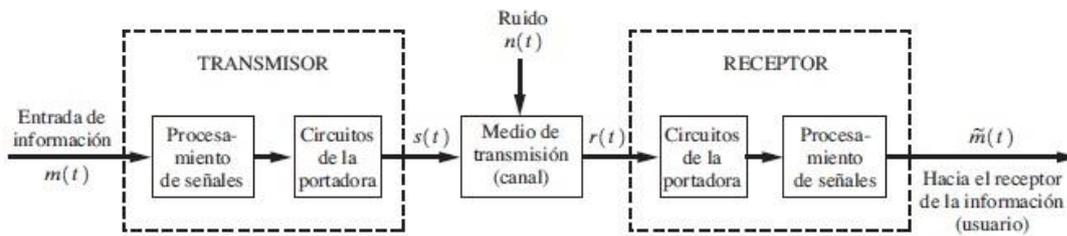


Figura 3.1. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación.

El mensaje de la fuente está representado por la forma de onda de información de entrada $m(t)$. El mensaje entregado por el receptor utiliza la notación $\tilde{m}(t)$. El símbolo $[\sim]$ indica que el mensaje recibido puede no ser el mismo que fue transmitido. Esto es, el mensaje en el receptor, $\tilde{m}(t)$ puede distorsionarse por el ruido en el canal, o pueden existir otros impedimentos en el sistema como un filtro indeseado o características no lineales indeseadas.

La información en el mensaje puede ser analógica o digital, dependiendo del sistema en particular, y puede representar cualquier tipo de información. En los sistemas multiplexados pueden existir múltiples fuentes de entrada y salida. Los espectros (o frecuencias) de $m(t)$ y $\tilde{m}(t)$ están concentradas alrededor de $f = 0$; por consecuencia, éstas se consideran señales de banda base, es decir, sin pasar por un proceso de modulación.

El bloque de procesamiento de señal en el transmisor condiciona a la fuente para que ésta genere una transmisión más eficiente. Por ejemplo, en un sistema analógico el procesador de señal puede ser un filtro pasabajas que restringe el ancho de banda de $m(t)$. En un sistema híbrido, el procesador de señal puede ser un convertidor analógico a digital (ADC), el cual produce una “palabra digital” que representa muestras de la señal analógica de entrada y provee una codificación de fuente de la señal de entrada, también puede añadir bits de paridad a la palabra digital para que el receptor pueda utilizar la detección y corrección de errores con el fin de reducir o eliminar errores de bit causados por el ruido en el canal.

Los canales pueden clasificarse en dos categorías: alámbricos e inalámbricos. Algunos ejemplos de canales alámbricos son las líneas telefónicas de par trenzado, los cables coaxiales, guías de onda y cables de fibra óptica. Algunos canales inalámbricos típicos son el aire, el vacío y el agua de mar. Los principios generales de la modulación digital y analógica se aplican a todos los tipos de canales.

En general, el medio del canal atenúa la señal de manera tal que el ruido del canal o el que introduce un receptor imperfecto causa un deterioro en la información enviada \tilde{m} en comparación con el de la fuente. El ruido del canal puede originarse por perturbaciones eléctricas naturales o por fuentes artificiales. El canal puede también proveer múltiples trayectorias entre su salida y su entrada.

El receptor toma la señal distorsionada a la salida del canal y la convierte a una señal que el procesador en el receptor puede manipular. Éste “limpia” esta señal y envía una estimación de la información fuente a la salida del sistema de comunicación. La meta es el desarrollo de sistemas de comunicación que transmitan información al receptor con el mínimo deterioro posible, al tiempo que se satisfacen las restricciones del diseño como la energía transmitida permitida, el ancho de banda permitido para cada señal y el costo.

3.2. TOPOLOGÍAS DE RED

Los circuitos de comunicación de datos se pueden clasificar, en general, como de dos o de varios puntos, estos últimos también llamados multipuntos. La topología o arquitectura de un circuito de comunicación de datos define la forma en que se interconectan los distintos lugares dentro de la red y el flujo de información entre ellos. Las topologías que más se usan son: de punto a punto, estrella, bus o multisalida, anillo o lazo y de malla. Son configuraciones entre varios puntos, excepto la primera. La Figura 3.2 ilustra las diversas topologías de circuito para redes de comunicación de datos.

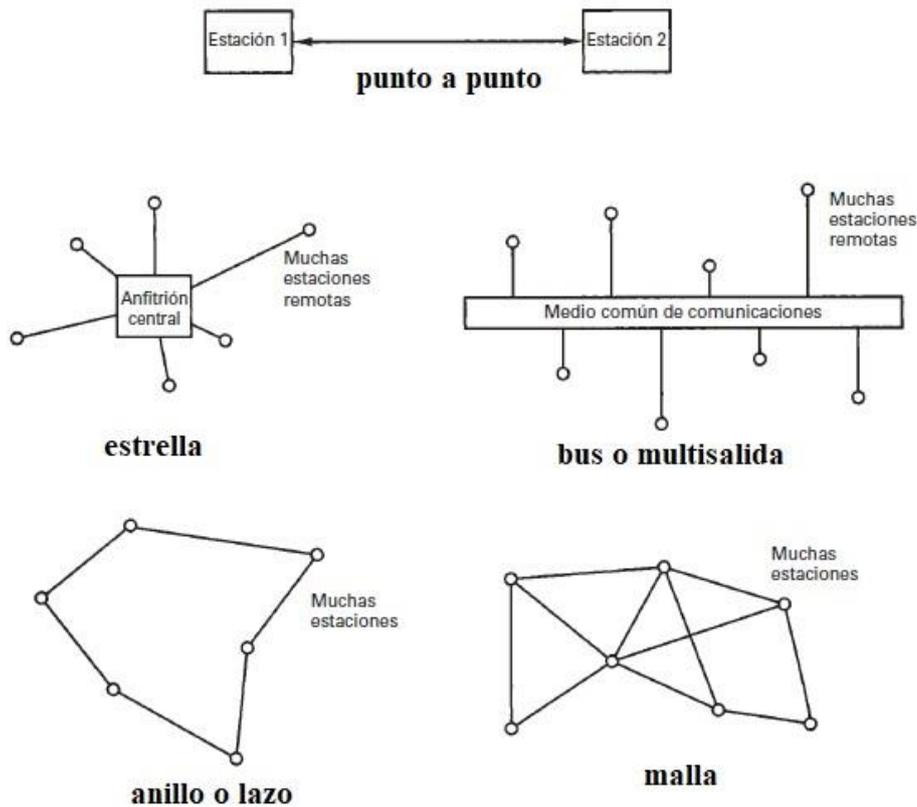


Figura 3.2. Topologías de red de datos.

3.3. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Una **arquitectura de red** describe la forma en que se estructura una red de comunicación de datos y, en general, incluye el concepto de niveles o capas de red. Cada nivel dentro de la red consiste en protocolos específicos, es decir, reglas de comunicación que desempeñan un conjunto dado de funciones. En esencia, un protocolo de red de comunicación de datos es un conjunto de reglas que gobierna el intercambio ordenado de datos dentro de la red.

3.3.1. Protocolo IEEE 802.15.4

Basado en el modelo conocido como proyecto 802, el IEEE (del inglés, Institute of Electrical and Electronic Engineers) creó un grupo de trabajo llamado IEEE 802.15 especializado en redes inalámbricas de área personal WPAN (del inglés, Wireless Personal Area Network) que se divide en 10 áreas, dentro de las cuales surge el protocolo IEEE 802.15.4 que define las características físicas para acceder al medio de transmisión en una red inalámbrica de área personal de baja velocidad LR-WPAN (del inglés, Low-Rate Wireless Personal Area) y para el enlace de datos.

Este protocolo se divide principalmente en dos subniveles: el MAC (del inglés, Medium Access Control) que define la forma del acceso al medio físico empleado en la red para el intercambio de datos y el LLC (del inglés, Logical Link Control) que maneja la comunicación de enlace de datos y define el uso de puntos de interfaz lógico, llamado SAP (del inglés, Service Access Points).

La capa física usa espectro disperso con secuencia directa DSSS (del inglés, Direct Sequence Spread Spectrum) se halla dividido en 16 canales espaciados cada 5MHz en la banda de 2.4 GHz y modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con offset O-QPSK (del inglés, Offset Quadrature Phase Shift Keying) [22]. En la Figura 3.3 se observan las divisiones del espectro de frecuencias en comparación con el protocolo 802.11 b/g (Wi-Fi).

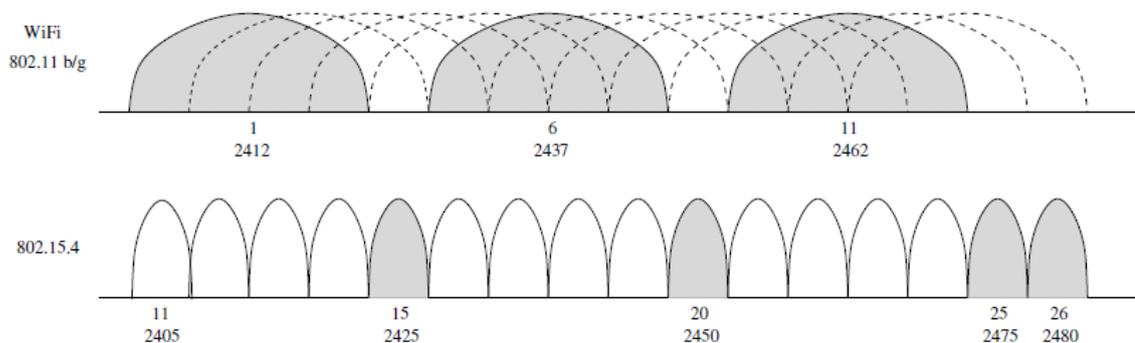


Figura 3.3. Espectro de Frecuencias 802.15.4 / 802.11 b/g

3.3.2. Protocolo Zigbee

Es un stack de protocolos que se apoya sobre IEEE 802.15.4 para la comunicación entre dispositivos cercanos, es decir, el acceso al medio y el intercambio de mensajes para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transferencia.

Una red Zigbee trabaja en las bandas de 2.4 GHz, 915 MHz y 868 MHz como se muestra en la Figura 3.4, permite que los dispositivos con funcionalidad de router puedan transportar mensajes para otro destinatario, extendiendo el alcance total de la red con un esquema que permite comunicación entre diversas aplicaciones mediante un identificador de red [22].

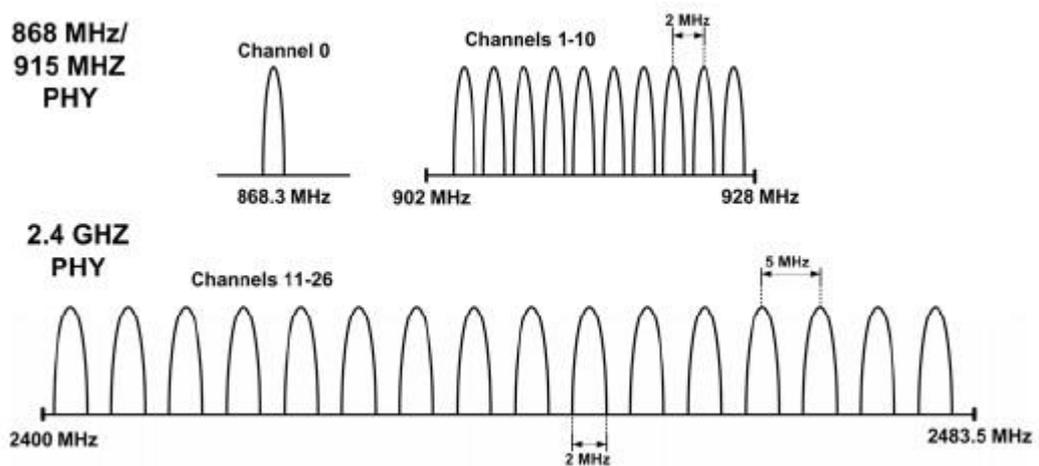


Figura 3.4. Bandas de Frecuencias en Redes Zigbee.

Un PHY es una abreviatura de *physical layer*, en español, capa física, se utiliza para los circuitos que implementan una capa física, es decir, conecta un dispositivo de capa de enlace de datos con un medio físico como por ejemplo, los cables metálicos o fibra óptica. En la Figura 3.5 se menciona como referencia del enlace que hay entre los canales de comunicación con los medios físicos.

Zigbee Alliance se encuentra desarrollando la actualización 2.0 del perfil dedicado para SG conocido como *Zigbee Smart Energy*. Su propósito principal es establecer una topología de red (jerarquía) que permita que un número indefinido de dispositivos se comuniquen entre ellos y, al mismo tiempo, establecer funciones de comunicación adicionales tales como: autenticación, encriptación, asociación y servicios de aplicación en las capas superiores [23]. Esta estructura para la pila del protocolo Zigbee se muestra en la Figura 3.5.

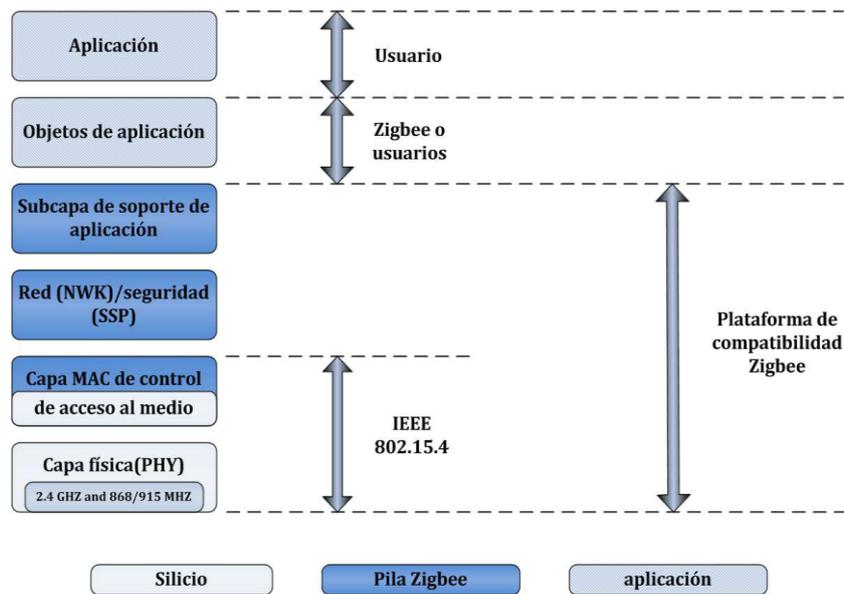


Figura 3.5. Pila del Protocolo IEEE 802.15.4/Zigbee.

3.4. XBEE

Xbee es el nombre comercial de la familia de módulos de radio frecuencia compatible de Digi International. Estos módulos transmiten y reciben datos sobre el aire usando señales de radio, utilizan el protocolo de red IEEE 802.15.4 para crear redes punto a multipunto o punto a punto.

Dichos módulos fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible. La capacidad inalámbrica es esencial cuando se quieren instalar sensores en lugares donde no se deseen cables. En la Figura 3.6 se muestra la estructura de pines y en la Figura 3.7 la forma física de un módulo Xbee.

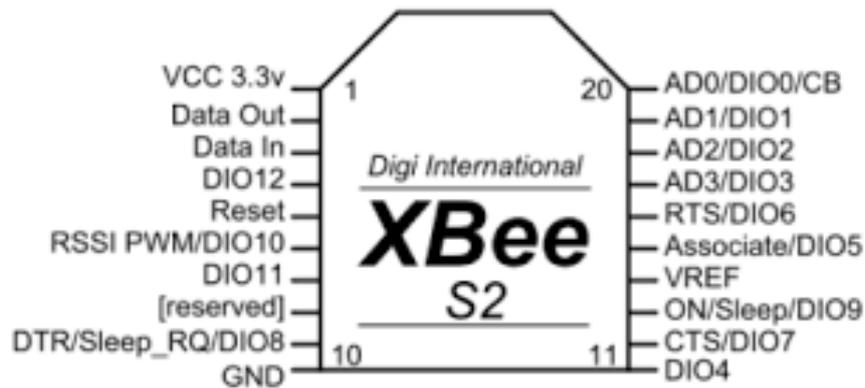


Figura 3.6. Estructura de pines módulo Xbee.



Figura 3.7. Módulo Xbee S2.

Cada módulo Xbee tiene una dirección única de 64 bits que viene grabada de fábrica.

Por otro lado, la red Zigbee, utiliza para sus algoritmos de ruteo direcciones de 16 bits. Por eso el número máximo teórico de elementos que puede haber en una red Zigbee es de $2^{16} = 65,535$, que es el número máximo de direcciones de red que se pueden asignar. Es decir, el protocolo está preparado para poder controlar en la misma red esta cantidad enorme de dispositivos [22].

Las comunicaciones Zigbee se realizan en la banda libre de 2.4GHz. A diferencia de Bluetooth, no utiliza la modulación de espectro ensanchado por salto de frecuencia FHSS (del inglés, Frequency Hooping Spread Spectrum), sino que realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia, es decir, de un canal.

Normalmente puede escogerse un canal de entre 16 posibles. El alcance depende de la potencia de emisión del dispositivo, así como el tipo de antenas utilizadas. El alcance normal con antena dipolo en visión directa suele ser aproximadamente de 100m y en interiores de unos 30m. La velocidad de transmisión de datos de una red Zigbee es de hasta 256 kbps.

3.5. MODOS DE COMUNICACIÓN XBEE

Los módulos Xbee soportan dos métodos de configuración: Uno es el modo Transparente que se comunica a través de comandos AT (modo de interfaz) y el otro es el modo API (del inglés Application Programming Interface) para entablar comunicación por medio de aplicación.

3.5.1. Modo AT

Es un modo de transmisión serial transparente, en el cual la comunicación se asemeja a lo que sería una transmisión a través de un puerto serial, ya que el dispositivo se encarga de crear la trama y el dato que llegue al pin Tx será enviado de forma inalámbrica, por lo cual se considera como el modo más sencillo para utilizar estos nodos. Su principal desventaja es que para enviar información a distintos nodos es necesario entrar constantemente al modo configuración para cambiar la dirección de destino.

3.5.2. Modo API

En este modo de comunicación, un microcontrolador externo se debe encargar de crear una trama específica al tipo de información que se va a enviar, este modo es recomendado para redes muy grandes donde no se puede perder tiempo entrando y saliendo del modo configuración de los dispositivos. Para redes con topología en malla este es el modo a utilizar.

3.6. ARQUITECTURA DE UNA RED CON XBEE

Una red Zigbee la forman básicamente 3 tipos de elementos. Un único dispositivo Coordinador (*Coordinator*), dispositivos enrutadores (*Routers*) y dispositivos finales (*End Devices*) como se muestra en la Figura 3.8, donde se aprecia que existe comunicación entre todos los nodos a través de uno siempre y cuando esté dentro del alcance; si está fuera del alcance se comunica a través de un Router [22].

A la hora de transmitir información, los nodos deben conocer la ruta más adecuada para llegar a su destino. Por eso, cada nodo construye una tabla creada por un protocolo de enrutamiento de vector-distancia por demanda, que le permite establecer el costo de todos los enlaces basado en la calidad de cada uno de ellos.

Este tipo de redes es altamente confiable y segura, de fácil instalación, pues no requieren cableado ni ductos y es de muy bajo costo. Cada uno de los elementos es fundamental en la composición de la red, su arquitectura depende del acomodo de cada uno y la función que realiza para entablar la comunicación de forma rápida y efectiva. Independientemente de la posición que ocupe el elemento siempre habrá un Coordinador que apertura el inicio de la red y este a su vez activará a los demás elementos que apoyarán en el trayecto de la información.

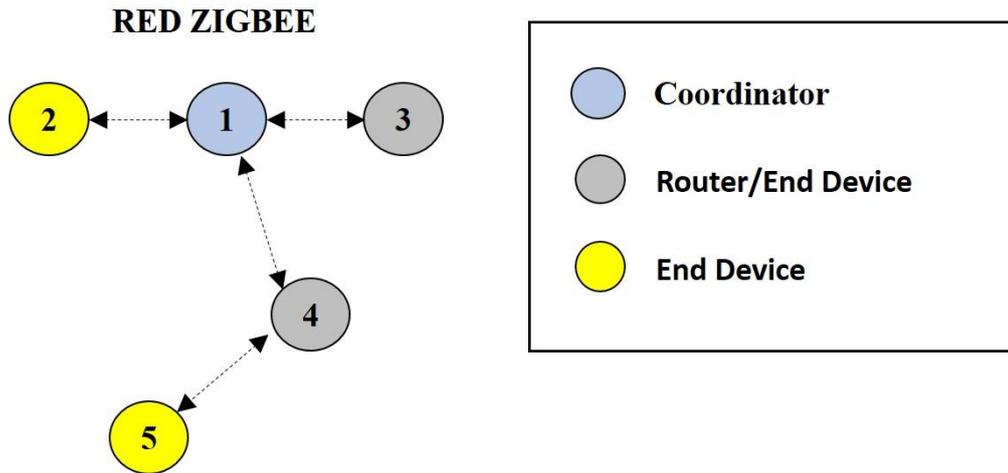


Figura 3.8. Comunicación en una red Zigbee.

3.6.1. Coordinador

Es el nodo de la red que tiene la única función de formar una red. Es el responsable de iniciar la red Zigbee y establece el canal de comunicaciones a través del PAN (Personal Area Network) ID (identificador de red) para toda la red.

Lo primero que hace al ser activado es medir la energía en cada uno de los canales, elige el más silencioso y después emite tramas; elabora una lista de los dispositivos encontrados a fin de elegir un identificador no utilizado, o utiliza el que se le haya configurado, si corresponde.

Una vez establecidos estos parámetros, puede formar una red, permitiendo unirse a él dispositivos Router y End Device, también puede participar en el enrutado de paquetes y ser origen y/o destinatario de información cuando se establece la red.

El orden de los elementos no altera el flujo de información, siempre inicia con la apertura del nodo Coordinador y posteriormente cada elemento apoya en el trayecto de la información y recepción del mensaje.

3.6.2. Router

Es un nodo que crea y mantiene información sobre la red para determinar la mejor ruta para enviar un paquete de información. Lógicamente un Router debe unirse a una red Zigbee antes de poder actuar como Router retransmitiendo paquetes de otros Routers o de End Devices.

Los Routers son dispositivos capaces de actuar como búferes (del inglés, buffer) para otros, y pueden ser coordinadores de un pequeño grupo de éstos. Son los encargados de derivar las tramas hacia otros Routers para que puedan llegar a su destino final. Al iniciar el proceso de asociación, el Router recibe una dirección corta (16-bits), la cual retiene almacenándola en memoria no volátil y no repite este proceso si se resetea, dado que ya pertenece a una red de área personal.

3.6.3. Dispositivo Final

Los dispositivos finales o End Devices no tienen capacidad de enrutar paquetes. Deben interactuar siempre a través de su nodo padre (un Coordinador o un Router) el cual recibe una dirección corta (16 bits) y no puede enviar información directamente a otro End Device. Si es reiniciado, se declara huérfano e inmediatamente el Router que lo tenía en su lista u otro en su defecto contesta indicando su dirección corta para que puede operar nuevamente. Si este proceso falla, realiza el proceso de asociación otra vez y emite una trama al despertar.

Los End Devices siempre entregan los mensajes a su Coordinador o un Router de la red Zigbee, el cual a su vez almacena los mensajes para éstos hasta que despierten y lo contacten, momento en el cual se los entrega. Normalmente estos equipos van alimentados por baterías. El consumo es menor al no tener que realizar funciones de enrutamiento por lo cual periódicamente entran en bajo consumo.

3.7. ROUTING EN UNA RED ZIGBEE

Los módulos Xbee son versátiles a la hora de establecer diversas topologías de red, dependiendo la serie de Xbee seleccionada se pueden crear redes: Punto a punto, en estrella, malla, árbol o mixtas. En la Figura 3.9 se ilustran los tipos de redes formadas en dispositivos Xbee en el estándar Zigbee.

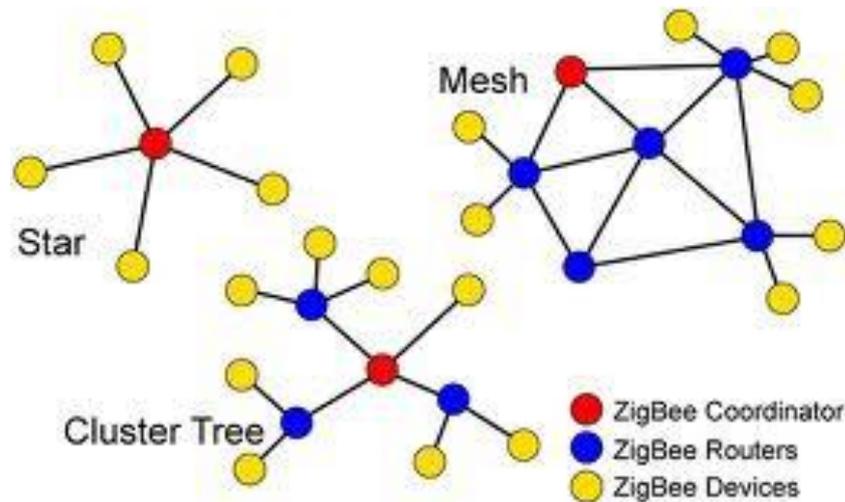


Figura 3.9. Tipos de redes Zigbee.

En una red estrella, el coordinador atiende a un número de End Devices, de modo similar a una red 802.15.4.

En una red árbol hay presencia de Routers, y se pueden armar pequeñas estrellas (*cluster tree*). La información se distribuye de forma jerárquica a lo largo del árbol hasta llegar al destino.

En una red *mesh* o de malla, los Routers y el Coordinador “descubren” la ruta hacia el destinatario del mensaje mediante una serie de mensajes para respuesta. Si no hay comunicación directa, los mensajes viajan de router en router hasta llegar al destinatario.

De acuerdo al análisis de cada una de las topologías, depende del uso y requerimientos que el usuario o usuarios dispongan para una mejor operación en la red de datos.

3.8. DIRECCIONAMIENTO EN REDES ZIGBEE

Un nodo está formado por un transceptor de radio compatible con el estándar 802.15.4 donde se implementan dos mecanismos de acceso al canal y una o más descripciones de dispositivo que son colecciones de atributos que pueden consultarse o asignarse, o se pueden monitorear por medio de eventos. El transceptor es la base del direccionamiento, mientras que los dispositivos dentro de un nodo se identifican por medio de un End Device numerado entre 1 y 240 [22].

Por otra parte, el direccionamiento es, a su vez, parte del nivel de aplicación. En algunos casos es posible omitir la dirección si está implícita en el tipo de mensaje. En otros es posible utilizar una versión reducida para economizar espacio y minimizar bits adicionales de sincronización y control (*overhead*). Existe un espacio dentro del encabezado (*header*) de la trama que indica si ésta está utilizando direccionamiento extendido (*extended addressing*) o corto (*short addressing*), tanto para el origen como para el destino del mensaje; o si la información de direccionamiento se ha omitido. Existe además un número de secuencia que permite relacionar una trama con su acuse de recibo ACK (del inglés, *acknowledgement*). En la Figura 3.10 se observa la estructura de la trama de una red Zigbee donde se muestra el direccionamiento implícito.

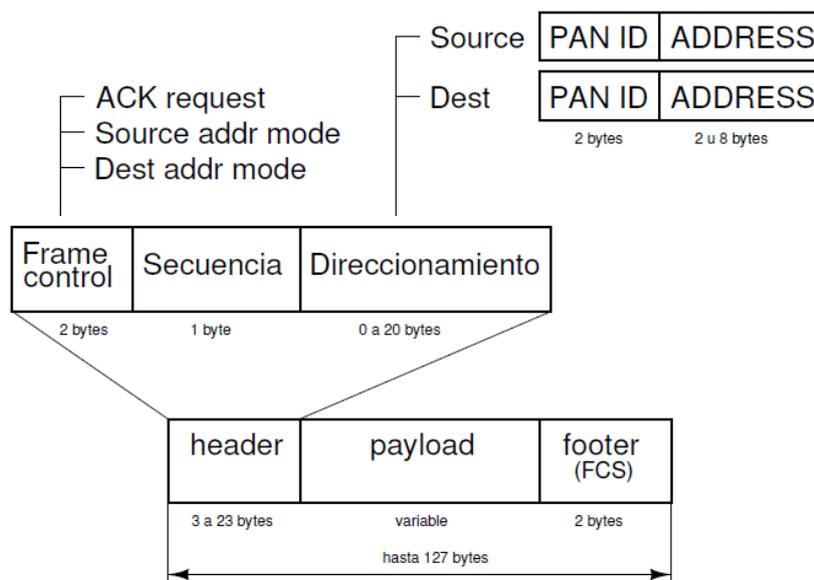


Figura 3.10. Estructura de la trama en redes Zigbee.

Los dispositivos se direccionan empleando una dirección extendida (*extended address*) de 64 bits y una dirección corta (*short address*) opcional de 16 bits. Esta dirección es como un número de serie que lo identifica de forma única de cualquier otro. También conocida como dirección IEEE o comúnmente como dirección MAC (del inglés, Media Access Control) en sistemas Ethernet. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos, necesarios para operar punto a punto. Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red.

Por ejemplo, en redes con coordinador una dirección de 16 bits es asignada por el mismo, lo cual indica que debe tener una tabla de direcciones asignadas, esto implica asignar memoria RAM. Para evitar esto, el coordinador puede asignar una dirección corta especial (0xFFFFE) que instruye a utilizar la dirección extendida. También existe un campo dentro de la trama que identifica en qué red se origina este mensaje, y otro que indica a qué red está destinado, este identificador se le conoce como PAN ID (del inglés, Personal Area Network Identifier) y es único para cada red. A fin de evitar repetición, existe una bandera (*flag*) que identifica el tráfico de mensajes dentro de una misma red y se utiliza sólo el PAN ID de destino [22].

3.9. TAMAÑO DE TRAMAS ZIGBEE

Es necesario un cierto tiempo para procesar los datos recibidos, se debe dejar como mínimo un espacio entre tramas denominado IFS (del inglés, Inter Frame Spacing), el cual depende de la longitud de la trama que lo precede.

En las tramas cuya longitud no supere la constante recomendada por IEEE los bytes tendrán un espaciado corto SIFS (del inglés, Short Inter Frame Spacing). Caso contrario, se empleará un espaciado largo LIFS (del inglés, Long Inter Frame Spacing) de símbolos. En 2.4GHz, esto corresponde a 192 μ s y 640 μ s, respectivamente [22]. Se ilustra en la Figura 3.11.

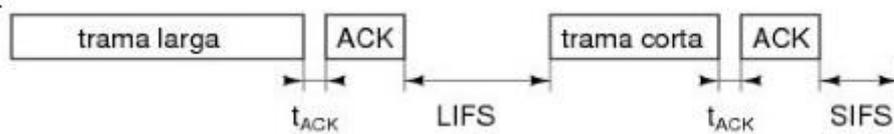


Figura 3.11. Tamaño de tramas de datos en Redes Zigbee.

3.10. TIPOS DE TRAMAS ZIGBEE

En redes Zigbee, existen cuatro tipos de tramas básicas las cuales son: Datos, ACK, MAC y Baliza (*Beacon*) [23]. En la Figura 3.12 se presenta la distribución de cada tipo de trama.

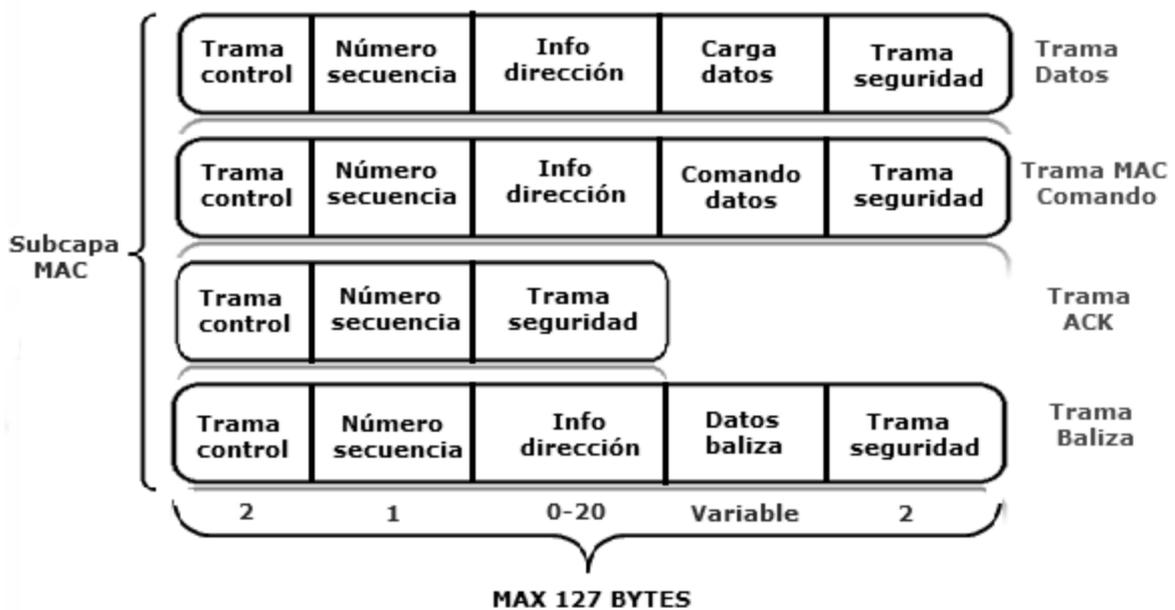


Figura 3.12. Tramas básicas en redes Zigbee.

- **Trama de datos:** Tiene una carga de datos de hasta 104 bytes, está numerada para asegurar que todos los paquetes lleguen a su destino. Un campo asegura que el paquete se ha recibido sin errores. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión.

- **Trama ACK:** Llamada también trama de reconocimiento, es donde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede incluir un tiempo de silencio entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.
- **Trama MAC:** Se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de tramas para configurar la red a distancia.
- **Trama Beacon:** Se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estas tramas son importantes para mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.

3.11. MÉTRICAS DE RENDIMIENTO EN REDES ZIGBEE

El sistema de acceso al medio tiene una particularidad: no es posible predecir el tiempo que tarda en transmitirse una trama dado que no se sabe cuándo se dispondrá del medio para transmitir.

Sin embargo, al existir un esquema de acuse de recibo y retransmisiones con tiempos cortos, es posible acotar un tiempo máximo más allá del cual se sabe si se envió con éxito o no, en cuyo caso se puede optar por intentar transmitir nuevamente.

Para ello existen parámetros o métricas de una red de comunicaciones que miden la calidad y disponibilidad del sistema para el tiempo de entrega exitosa del mensaje. Algunos de estos parámetros se muestran a continuación. Cabe destacar que dependiendo de la aplicación un parámetro puede resultar más relevante que otro.

3.11.1. Delay

Es el espacio de tiempo entre el envío de un paquete o mensaje y su recepción por parte del destinatario también llamado retardo promedio, para su correcta medición se deben sumar todos los tiempos en que el mensaje tarda en ser procesado por los nodos intermedios en la transmisión y para calcularlo se utiliza (3.1). En (3.2) se hace referencia al *delay* promedio de la red, al tener en cuenta el *delay* de todos los paquetes recibidos correctamente [24].

$$Delay_{paquete} = Tiempo_{transmitido} - Tiempo_{recibido} \quad (3.1)$$

$$Delay_{promedio} = \frac{\Sigma \text{Delay de los paquetes recibidos}}{\text{Número total de paquetes recibidos}} \quad (3.2)$$

3.11.2. Throughput

Es la tasa media de éxito de la entrega de mensajes en un canal de comunicaciones. Está definido como el número total de bits de información exitosamente enviados sobre el tiempo que tardó el sistema en transmitir esa información [25], como se muestra en (3.3).

$$Throughput = \frac{TIP * \Sigma PEE}{TDS} \quad (3.3)$$

donde:

PEE = Paquete exitosamente enviado.

TIP = Tamaño de la información de cada paquete, sin tener en cuenta los bits de encabezado que añade los protocolos del modelo OSI.

TDS = Tiempo de simulación.

3.11.3. Latencia

Corresponde a la suma de retardos temporales, producidos por la demora en la propagación y transmisión de paquetes u otros factores como el tamaño de los paquetes a transmitir o de los búferes dentro de los equipos de conectividad [22].

3.11.4. Bit Error Rate (BER)

Se define como el número de bits recibidos de forma incorrecta respecto al total de bits enviados durante un intervalo de tiempo, se calcula con (3.4) [26].

$$BER = \frac{\Sigma \text{ Bits errneos}}{\Sigma \text{ Bits transmitidos}} \quad (3.4)$$

Si bien no es posible garantizar un tiempo de retardo, en condiciones acotadas es posible disponer de tiempos razonables. Por lo que se puede concluir que la comunicación de datos brinda innumerables beneficios en la transmisión de información, mediante su continuo flujo y velocidad se abre camino a grandes mejoras con el uso de diversas tecnologías que la encaminan a una autonomía e inteligencia superior. Por lo tanto, los dispositivos como los módulos de RF Xbee junto con el protocolo Zigbee dan una gran confianza, soporte y versatilidad en los enlaces de comunicación de datos.

Como conclusión general de este *Capítulo* se observaron los conceptos básicos que conforman a la Comunicación de Datos, se toma en consideración los fundamentos relacionados al protocolo Zigbee. Esta información proporciona herramientas para el desarrollo del proyecto y el análisis de los módulos de comunicación Xbee basados en RF para la transmisión de datos en una MG.

Capítulo 4

Diseño del Sistema

En el presente *Capítulo*, se presenta el procedimiento experimental propuesto, que tendrá un diseño de tipo experimental puro, pues es el que mejor se adapta a las necesidades del estudio, este consiste en la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica basado en módulos de RF que operan bajo el protocolo Zigbee con la capacidad de adquirir datos de las variables eléctricas en GD, conectados a un bus de C.D. en una MG aislada, con el propósito de transmitir dicha información en forma remota entre dos puntos distantes.

Siguiendo esta discusión, se da una descripción del sistema empleado y se presentan de manera secuencial las etapas involucradas, el funcionamiento, los dispositivos y las herramientas utilizadas en el diseño del proyecto para su correcta operación. Además, se muestran los resultados recabados en las pruebas experimentales.

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

La MG para la cual se modela el sistema de telecomunicaciones aquí propuesto, se plantea en C.D. con un bus de 24V, con el fin de validar el sistema propuesto constituido por dos paneles solares como fuentes distribuidas y debido a las condiciones de espacio del laboratorio se optó por simular directamente el voltaje del bus de C.D. Para fines prácticos se utilizaron cargas puramente resistivas con el objetivo de obtener resultados concretos y poder compararlos en el sistema.

El sistema de comunicaciones se modela a través de la tecnología inalámbrica en estrella, se elige esta topología porque la MG es aislada y se propone un control centralizado de los datos. Por otro lado, la topología en malla no se tiene en cuenta porque este estudio se modela únicamente en la capa física y la de enlace para la topología implementada, de modo que la de malla implicaría el modelado de capa de red, que está fuera del alcance del proyecto.

Una red de comunicaciones se modela por tres bloques: la capa física, el enlace y la propagación. La configuración y características del modelo de la capa física y enlace se establecen de acuerdo a la tecnología de comunicación a utilizar. Por otra parte, la aplicación que requiere soporte del sistema de comunicación establece ciertos requerimientos de entrada al modelo de la capa de enlace como el número de nodos, el tamaño del paquete de datos y su frecuencia de envío, y de acuerdo a las características del entorno en el que se llevará a cabo la comunicación será el modelo de propagación.

Cada bloque del modelo determina un conjunto de variables internas, según las entradas establecidas por las tecnologías de comunicaciones, aplicación y entorno, que interactúan con los demás bloques dando como resultado un análisis de la cobertura. Además, se elige una tasa intermedia de 100 ms en el envío de datos sensados para el modelo de red propuesto aquí, debido a que ya se ha probado en diferentes MG.

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama a bloques del sistema de comunicación inalámbrica para el monitoreo del bus de C.D. de la MG aislada. Las variables de interés son el voltaje y la corriente en el bus de C.D. las cuales se extraen mediante dispositivos sensores, estos a su vez, se encuentran conectados a un circuito microcontrolador que se encarga de procesar y convertir los datos, la información capturada se muestra en una pantalla LCD para corroborar el registro de los datos, posteriormente se inyectan a un circuito transmisor que consiste en un módulo de radiofrecuencia basado en el protocolo Zigbee para el envío de la información a la etapa receptora donde aguarda un sistema con interfaz gráfica para visualizar las variables y el alcance del enlace está propuesto a una distancia pequeña en términos experimentales. Si el usuario lo desea la información está disponible en un servidor web para mayor aplicación.

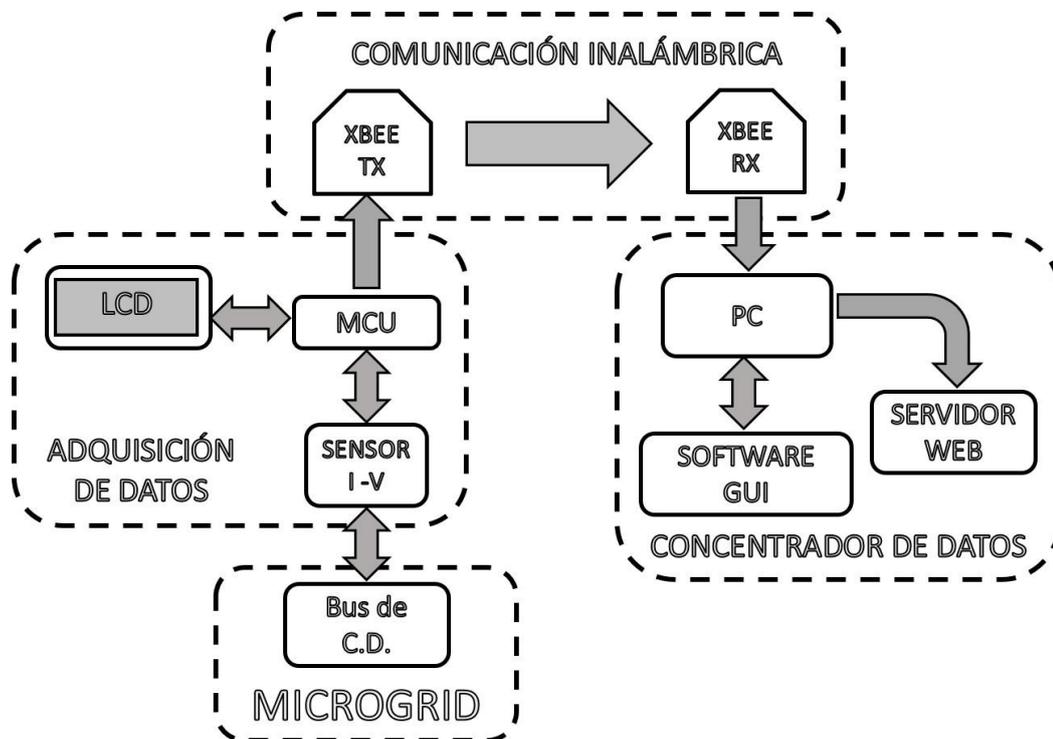


Figura 4.1. Diagrama a bloques del sistema.

A continuación se describen los dispositivos y aditamentos que se utilizaron para el desarrollo del sistema, la metodología de la configuración, los componentes y el diseño a seguir.

4.2. DATOS DE MONITOREO DE LA MICROGRID

Como se mencionó en un inicio el objetivo de la MG es proveer a la red eléctrica de confiabilidad, calidad y eficiencia. Para lograr este cometido, se basa en el sistema de comunicaciones que entrega información crucial de la red al nodo final, de manera que se gestionen eficientemente los recursos disponibles. Los parámetros que se van a transmitir mediante el sistema de comunicaciones están codificados en ASCII y se ilustran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. *Parámetros de medición.*

DATOS	FORMATO/RESOLUCIÓN	TAMAÑO (BITS)
Magnitud Voltaje	XX.XX	40
Magnitud Corriente	XX.XX	40
Magnitud Potencia	XX.XX	40
Marca de Tiempo	XX:XX:XX	64
Total		184

Los datos que se observan en la Tabla 4.1 son aquellos que la unidad transmisora va a informar al usuario de la MG, dentro del cual se encuentra el voltaje y la corriente del bus de C.D. así como la potencia y las marcas de tiempo en las que se toman los datos de medición. Se componen de un valor entero y una parte decimal de dos dígitos y a partir de ellos se arma la trama que se enviará en el protocolo implementado, por lo que el cuerpo del paquete será de 184 bits.

4.2.1. Medición de voltaje

Debido a las características eléctricas del sistema, se optó por utilizar un acondicionamiento para la medición de voltaje, basado en un divisor de voltaje con impedancias puramente resistivas como se muestra en la Figura 4.2, esto con la finalidad de adecuar los valores a medir de las características de entrada de la fuente de C.D. y que no sufra algún daño durante su funcionamiento.

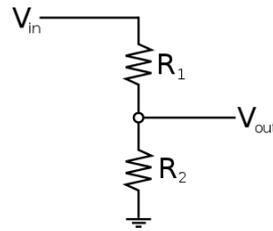


Figura 4.2. *Divisor de voltaje.*

Para la determinación del voltaje de salida (V_{out}) del divisor fue necesario aplicar (4.1) que es la fórmula del divisor de voltaje:

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_{IN} \quad (4.1)$$

En este trabajo se utilizaron resistencias de 1 watt, para que su valor fuera más estable a cambios de temperatura mientras que el voltaje a medir fue tomado de la fuente de C.D. considerando un valor de voltaje máximo de 28 V mientras que en condiciones normales su valor fijo es de 24V. En caso de un sobre voltaje mayor, el circuito planteado no permitirá que el exceso de voltaje se presente en la fuente.

4.2.2. Medición de corriente

Después de adquirir el voltaje, obtener la corriente fue el siguiente paso, esto se llevó a cabo con un sensor pequeño para medir la corriente del circuito. Como el microcontrolador solamente puede medir voltajes, entonces se optó por usar un sensor que pudiera convertir la corriente consumida por la carga en voltaje. En este caso fue necesario abrir el circuito y acoplar el sensor de corriente, para posteriormente realizar la medición de voltaje en sus terminales de interconexión, como se presenta en la Figura 4.3.

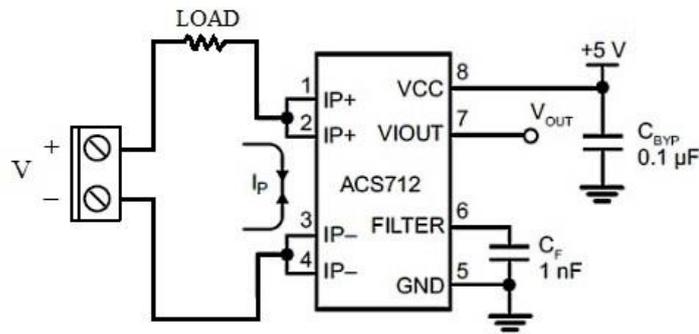


Figura 4.3. Conexión del sensor de corriente.

El sensor de corriente que se utilizó fue el ACS712, internamente trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula por la línea que se está midiendo, es de bajo costo y tamaño pequeño. En la Figura 4.4 se describen los pines del circuito sensor de corriente ASC712.

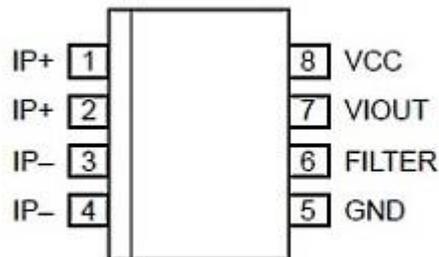


Figura 4.4. Pines del Sensor ASC712.

El sensor entrega una salida de voltaje proporcional a la corriente, de acuerdo a la aplicación existen diferentes modelos, se eligió el modelo ACS712-20A, para un rango de 20 amperios. La sensibilidad se maneja de 100 mV/A y el rango de operación es hasta +/- 20 A. El sensor entrega un valor de 2.5 V para una corriente de 0 A y a partir de allí, se incrementa proporcionalmente de acuerdo a la sensibilidad, por lo que se tiene una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente. Dicha relación es una línea recta en una gráfica voltaje contra corriente donde la pendiente es la sensibilidad y la intersección en el eje vertical es de 2.5 V. En (4.2) se representa a dicha recta, la cual es la siguiente:

$$V = m I + 2.5 \quad (4.2)$$

Donde la pendiente es m y equivale a la sensibilidad. Al despejar se obtiene (4.3) para hallar la corriente a partir de la lectura del sensor:

$$I = \frac{V - 2.5}{\text{sensibilidad}} \quad (4.3)$$

Con (4.2) es posible realizar una lectura de corriente, simplemente se necesita leer la entrada analógica y con ella se obtiene la corriente. Para ajustar la sensibilidad del sensor el fabricante entrega un valor establecido para cada uno. El valor establecido para este sensor es: 100 mV/A (0.100V/A), este es el factor de ajuste pero no es exacto ni tampoco ideal. Para ello es necesario obtener el valor con las condiciones reales con el uso de (4.3).

Existen varios tipos de corrientes parasitas que ocasionan ruido o interferencia en la corriente que se mide. Para ello es necesario aplicar un filtro, existen varios tipos de filtros. Para no desperdiciar memoria en el microcontrolador se mide el número de interacciones y se divide entre el número de muestras. La cantidad de muestras es el promedio dependiendo del nivel de ruido. Si hay un error constante en la medición, se debe recalibrar y hallar los valores reales que se comparan con los valores que da el fabricante.

4.3. ADQUISICIÓN DE DATOS

En la adquisición de datos, se inicia la importación de la información del voltaje y corriente proveniente de la carga que se utiliza en el bus de C.D. para ser enviada al microcontrolador. La información recabada se procesa para obtener el valor real que se desea medir, quitando la atenuación de la medición por software y además quitando un voltaje de *Offset* que se presenta en el sensor de corriente utilizado.

Además, se realiza el cálculo del valor promedio obtenido y su desviación estándar. El microcontrolador es pieza fundamental para la toma de los valores medidos, ya que es el encargado de realizar el procesamiento de conversión analógico-digital para que el módulo transmisor pueda realizar el envío de información.

4.3.1. Microcontrolador ATMEGA328P

Un microcontrolador (MCU) es un circuito integrado que contiene en el mismo encapsulado las tres unidades funcionales básicas de un ordenador: la unidad central de procesamiento (CPU), memoria y periféricos de entrada-salida. Se fabrican para reducir el costo económico y de consumo de energía en un sistema particular, acotando las características del mismo a las necesidades del sistema donde se va a utilizar.

El MCU incide de manera significativa en el diseño del dispositivo porque posee un conversor análogo-digital que recibe la información de los sensores, un módulo de comunicación serial USART para enviar la información de las variables al dispositivo inalámbrico, se destaca que al usar el microcontrolador este solo se dedica a dos tareas: recibir y enviar la información al módulo transmisor, lo cual optimiza el proceso.

Pese que en la actualidad existen multitud de fabricantes de MCU en el mercado, en el ámbito educativo y aficionado los MCU más utilizados son los AVR de Atmel y los PIC de la empresa Microchip. Su costo es muy accesible, y la plataforma Arduino, basada en el MCU ATMEGA328P, tiene relación directa, puesto que, no es necesario programar en ensamblador ya que el entorno de desarrollo permite programarlos en un lenguaje de alto nivel. El prototipado es, hoy en día, mucho más sencillo y barato gracias a estas nuevas plataformas, por lo que para este trabajo, el MCU que se usará es el “ATMEGA328P”, el cual tiene características ideales para el desarrollo del proyecto.

De acuerdo a los puertos que se utilizaran en el diseño, éstos serán los pines de TX y RX para la transmisión y recepción de datos y un canal análogo para recibir los datos procedentes de los sensores. En la Figura 4.5 se muestra la descripción de pines del circuito integrado ATMEGA328P, típicamente este circuito dispone de 28 pines. Para que este dispositivo opere se requiere conectar los pines 7 y 20 a una alimentación de 5V

de C.D. (VCC) y los pines 8 y 22 a tierra (GND). Aunque este MCU puede funcionar con su reloj interno de 8MHz, sin bootloader no es posible activarlo, así que se utiliza uno externo a 16MHz que se conecta a los pines 9 y 10, con sus correspondientes capacitores cerámicos de 22pF, aunque con un cristal oscilador a 16MHz no es necesario el uso de los capacitores.

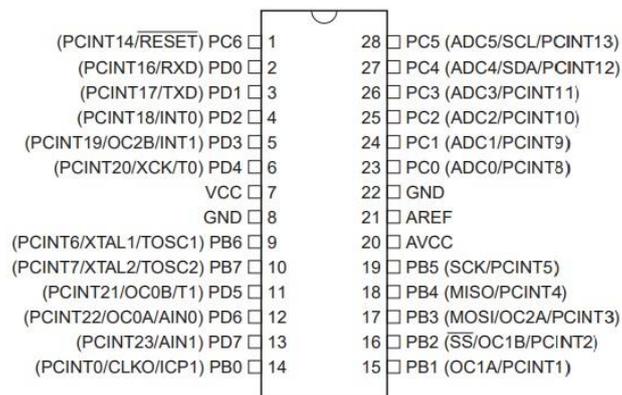


Figura 4.5. Descripción de pines ATMEGA328P.

4.3.2. LCD

Es un dispositivo electrónico formado por una pantalla de cristal líquido, también conocido como LCD (del inglés, Liquid Crystal Display) que permite visualizar caracteres o símbolos a través de una pantalla delgada y plana. Se encuentra formado por un cierto número de píxeles en color o monocromos (un solo color), mismos que se encuentran ubicados delante de una fuente de luz reflectora.

Existe una gran variedad de pantallas LCD en el mercado, en este proyecto se eligió una de 20x4, es decir, dispone de cuatro filas y 20 caracteres cada una y cada carácter se encuentra formado por una matriz de 5x7 puntos o píxeles.

Además, este dispositivo cuenta con un MCU interno, el cual mediante una serie de comandos permite la presentación de distintos tipos de caracteres. En la Figura 4.6 se observa el dispositivo mencionado.



Figura 4.6. *Display LCD 20x4.*

4.4. MÓDULO XBEE

De acuerdo a la naturaleza del sistema, los módulos de comunicación inalámbrica que más se ajustan a las necesidades del prototipo son los módulos Xbee serie 2 fabricados por DIGI International porque poseen protocolo Zigbee, el cual es un estándar soportado por IEEE 802.15.4 creado para comunicaciones inalámbricas de sensores, espacios inteligentes, etc. Además es un protocolo abierto y compatible con muchos dispositivos, también porque es de los más económicos que se encuentran en el mercado. El objetivo primordial de Zigbee es cortar el alambreado tradicional, por lo que los módulos Xbee emplean una interface UART, la cual permite a cualquier MCU o microprocesador inmediatamente usar los servicios del protocolo Zigbee.

Todo el hardware de Zigbee está diseñado para hacer más seguro los niveles lógicos del puerto serie del anfitrión con los niveles lógicos del Xbee de 2.8 a 3.4 V para mayor compatibilidad. La conversión de nivel lógico puede ser desarrollada usando un estándar RS-232 o con un convertidor de nivel lógico. La Figura 4.7 detalla la conexión

eléctrica de pines de los módulos Xbee serie 2. Para el caso de la aplicación del prototipo es necesario utilizar los pines TX y RX (DIN y DOUT).

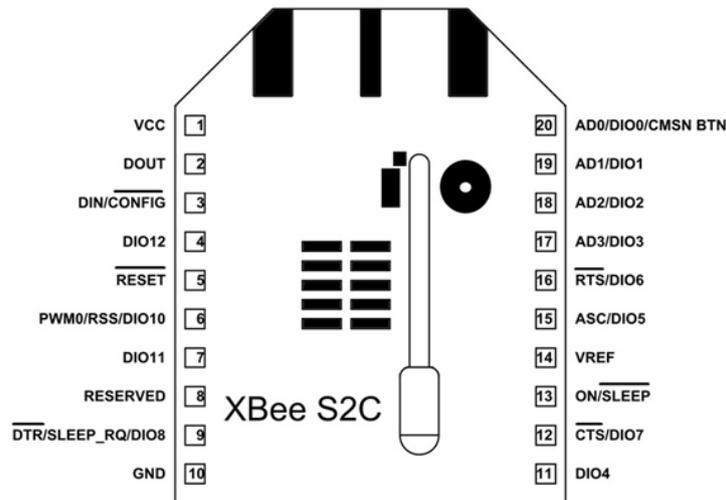


Figura 4.7. Descripción de pines de un módulo Xbee Serie 2.

La función de un módulo Xbee es permitir una comunicación inalámbrica entre aquellos módulos que contengan la misma configuración de red, entendiéndose como configuración de red a los siguientes parámetros:

- **PAN ID** (Identificador de red): Es el nombre que se le dará a la red formada por los módulos Xbee, dicho nombre se encuentra expresado por cuatro dígitos hexadecimales y puede ir desde 0 a FFFF.
- **MY** (Dirección del módulo en la red): Es el nombre que tomará el módulo en la red formada, dicho nombre es expresado por cuatro dígitos que forman 16 o 64 bits.
- **DL y DH** (Dirección del módulo de destino dentro de la red): Indica el nombre del módulo con el que se establecerá la comunicación dentro de la red.
- **SL y SH** (Número de Serie): Indica el nombre de la serie de fábrica que viene por defecto en el módulo.

4.5. CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO XBEE

Para la configuración de los módulos de radiofrecuencia Xbee se utiliza el programa X-CTU, desarrollado por la empresa DIGI, este software permite configurar los módulos Xbee que fabrica dicha empresa, entre ellos la serie 2 (S2), también brinda una interfaz gráfica amigable para los usuarios debido a que cuenta con herramientas que permiten configurar los módulos de una manera fácil y rápida.

A continuación, se explica el proceso de la instalación y configuración del software X-CTU: El primer paso es descargar el ejecutable del software X-CTU, el cual se descarga en la página de DIGI (<https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/xctu-software/xctu>). Una vez que se instala el X-CTU la manera más sencilla de tener comunicación entre el Xbee y la computadora es usar una tarjeta Xbee Explorer Mini USB como se muestra en la Figura 4.8, por medio de uno de los puertos USB y un cable se conecta a la computadora para posteriormente configurarlo.



Figura 4.8. *Xbee Explorer Mini USB.*

4.5.1. Módulo Xbee Coordinador

Siguiendo el proceso anterior, se describe brevemente como se configura un Xbee en modo Coordinador, ya instalado el X-CTU se ejecuta y aparece su interfaz mostrada en la Figura 4.9. Se busca el dispositivo Xbee, una vez detectado el módulo se selecciona y está listo para ser configurado. Para tener claro los puntos a configurar, se muestra en la Tabla 4.2 los parámetros a editar en el dispositivo.

Tabla 4.2. *Tabla de Configuración Nodo Coordinador.*

INDICADOR	VALORES
DH	13A200
DL	40620CC1
MY	0
SH	13A200
SL	1FFE
PAN ID	1234

En base a la tabla 4.3 se configura al módulo en modo transparente o conexión punto a punto para operar en una frecuencia de 2.4 GHz. Se establece el valor 1234 para el identificador de red de área personal PAN ID, con el cuál se asegura que únicamente los módulos que contengan este valor pertenecerán a la red Zigbee.

Con el software X-CTU instalado, se abre el programa y se realiza la conexión del Xbee a configurar por medio del Explorer Mini USB para verificar que lo reconoce en el puerto asignado. En la Figura 4.9 se observa la interfaz del programa X-CTU donde se selecciona el Xbee y en la Figura 4.10 se indica el reconocimiento del dispositivo conectado.

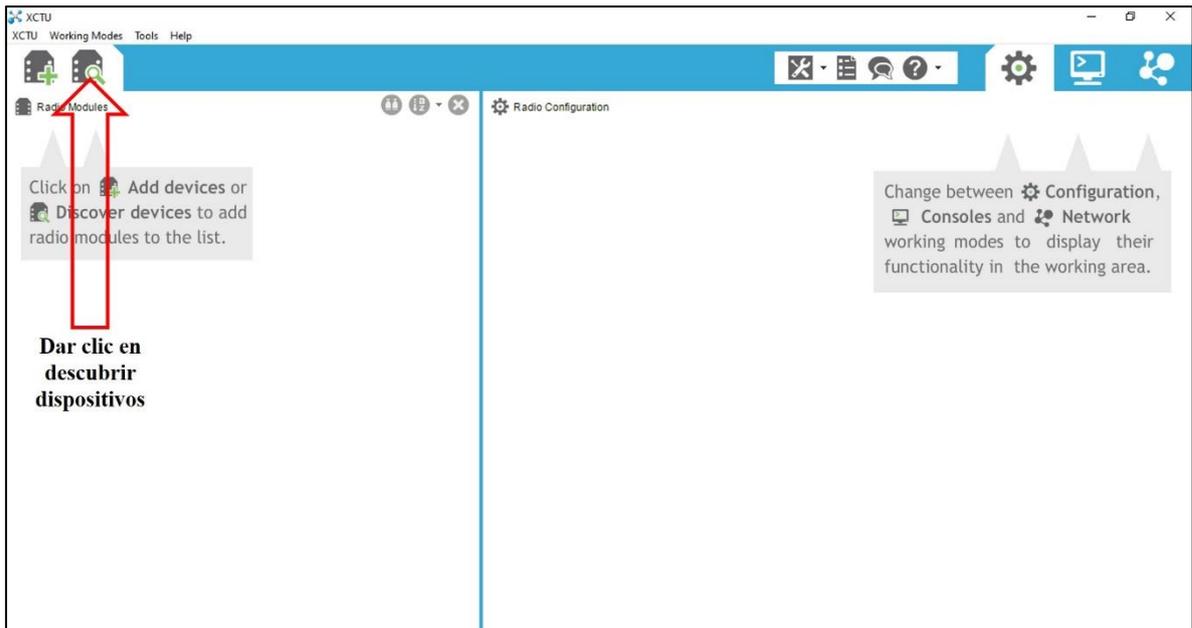


Figura 4.9. Selección de dispositivo Xbee.

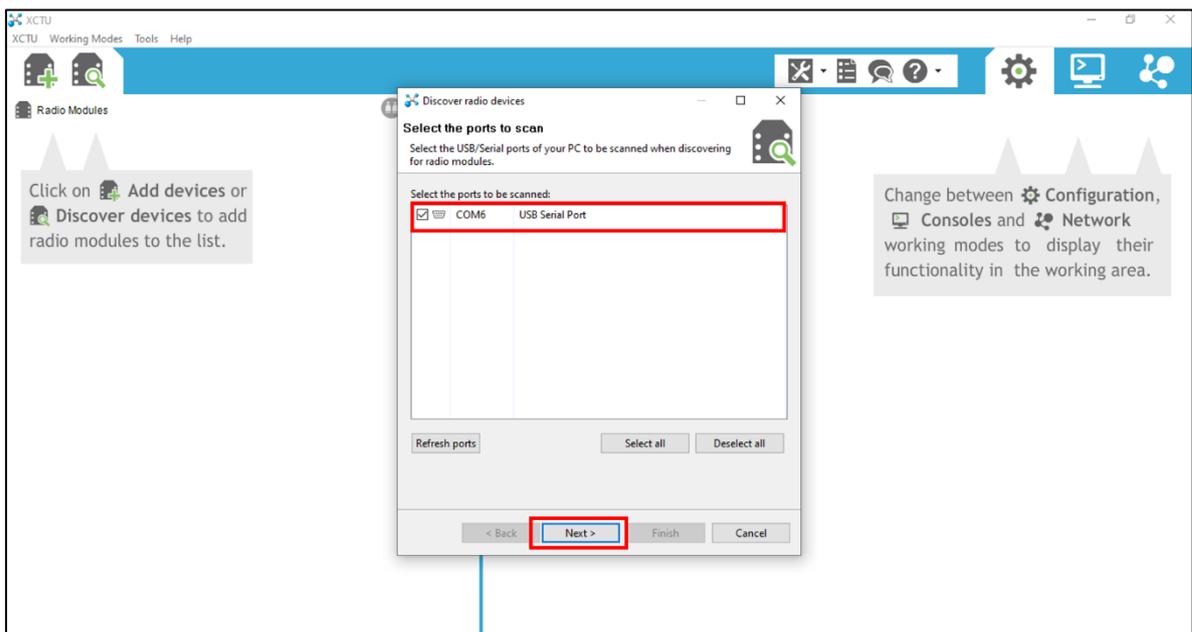


Figura 4.10. Reconocimiento del Xbee Explorer Mini USB.

Después de la detección del módulo Xbee como se representa en la Figura 4.11, se verifican los parámetros de configuración que estén correctos y si existe algún cambio se pueden hacer modificaciones a los mismos. Se observa en la Figura 4.12 estos detalles.

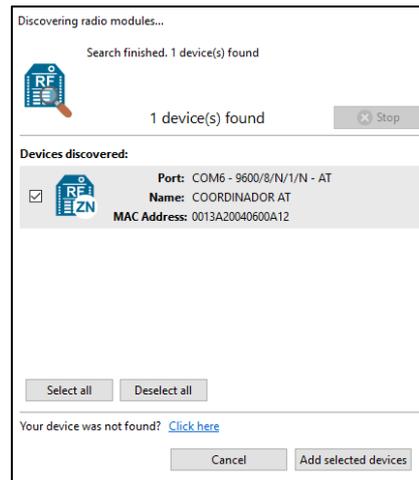


Figura 4.11. *Detección del módulo Xbee.*

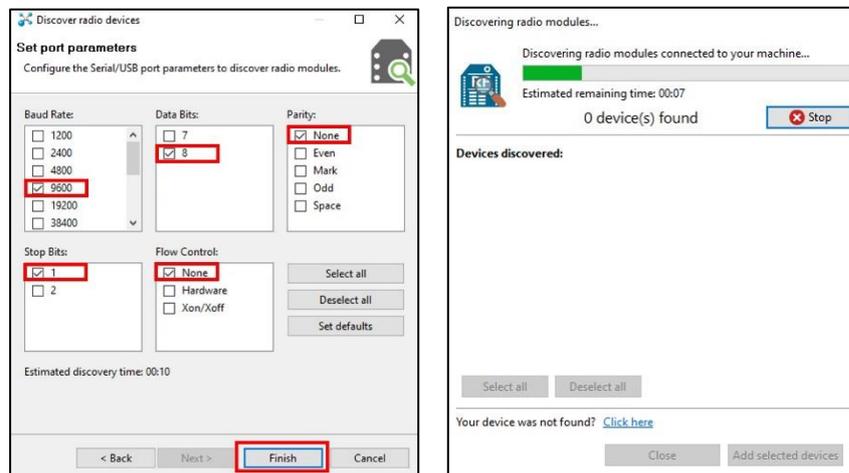


Figura 4.12. *Configuración del puerto Xbee.*

Después de establecer comunicación entre la computadora y el módulo que será configurado como coordinador, se inicia con la configuración del módulo Xbee. Para ingresar al proceso de configuración, dentro de la interfaz se le da doble clic al módulo detectado y aparecerán las opciones establecidas en la Tabla 4.3. Primeramente se da clic en Read para leer la configuración almacenada en el módulo, posteriormente a Update que es la parte donde se elige el modo en que operará el módulo dentro de la red Zigbee, en este caso se escoge el de Coordinador AT como se muestra en la Figura 4.13.

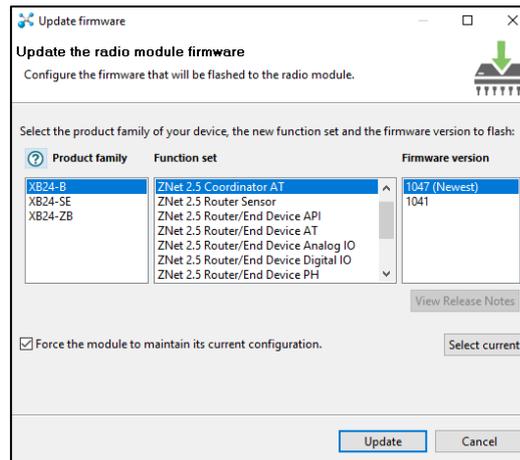


Figura 4.13. Selección Coordinador.

Siendo el módulo Coordinador el elemento principal dentro del sistema, al dar clic en la opción MY el valor 0 determina su nombre en la red, debido a que la topología de la red del sistema es punto a punto, se establece que al módulo Router/End Device se le denomine 7AA9, esta información se ingresa en la opción DH que hace referencia al terminal con el que se comunica el módulo Coordinador y finalmente se da clic en “Write” una vez determinado los parámetros de configuración como se observa en la Figura 4.14.

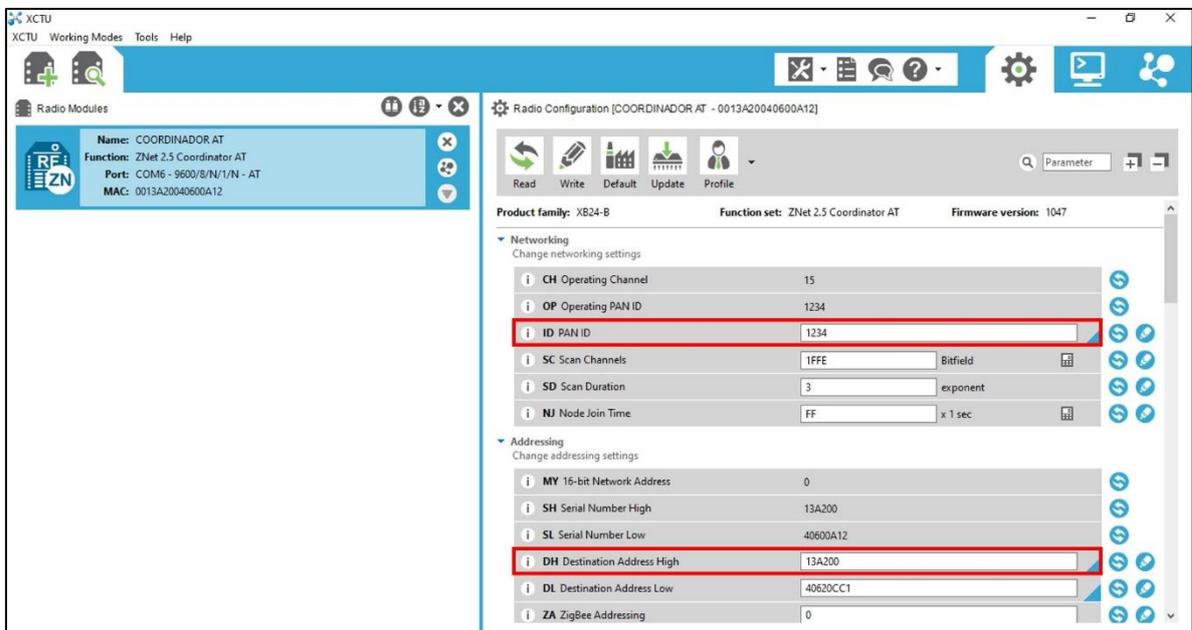


Figura 4.14. Configuración del módulo Coordinador.

4.5.2. Módulo Xbee Router/End Device

Para configurar un Xbee en modo Router/End Device se utilizan pasos similares a la configuración del módulo Coordinador. Primero se lee la configuración del módulo Xbee en la interfaz X-CTU y se modifican los mismos parámetros de la Tabla 4.3, pero con los valores determinados anteriormente para este módulo.

El modo en que funcionará el módulo dentro de la Red Zigbee será seleccionado desde Update con el modo Router/End Device AT como se muestra en la Figura 4.15 para utilizarse en una transmisión transparente, es decir, punto a punto. El nombre o dirección que tomará el módulo dentro de la red, opción MY, debe llevar el valor 7AA9.

El nombre o dirección del módulo con el que se comunicará dentro de la red, opción DH, debe tener el valor 13A200, este valor hace referencia al nombre del Coordinador. Finalmente para que los cambios se guarden en los módulos se selecciona “Write” para terminar la configuración.

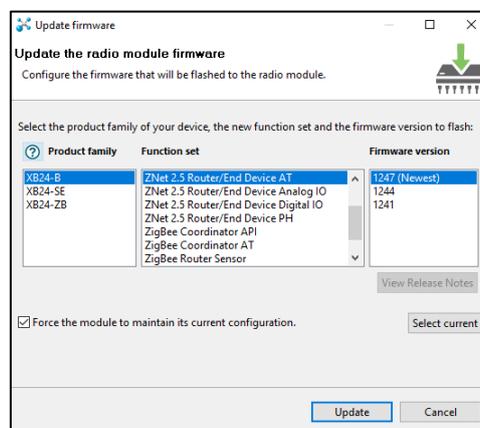


Figura 4.15. Selección Router/End Device.

4.5.3. Comandos AT y API

Una de las ventajas de utilizar los comandos AT es que se maneja de forma simple transparente, es decir, se recibe lo que se envía; pero tiene varias desventajas como lentitud, no indica el origen del mensaje en la recepción, para cambiar un destino se debe entrar en modo comando AT y por ende solo se puede configurar usando comandos AT, por lo que, lo hace tedioso en su desempeño. Trabajar con comandos AT es muy sencillo, pero no ofrece las posibilidades de hacer un sistema a escala debido a sus limitaciones, para ello la tramas API ofrecen más posibilidades y opciones de configuración que se ajustan a las necesidades de implementación.

En el caso de utilizar tramas API solo tiene una desventaja, la cual es por la complejidad de armar dichas tramas. En contraste, tiene ventajas como la configuración remota y el monitoreo. Los datos pueden contener comandos AT, estos indican el origen y el destino de los mismos.

Las tramas API detallan mucho más la información que se transmite y recibe, adicionalmente se pueden realizar tareas más especializadas tales como acceso remoto, monitorización automática de variables, chequeos de estados de una entrada y envío de información carácter a carácter, la Figura 4.16 ilustra la distribución de una trama API.

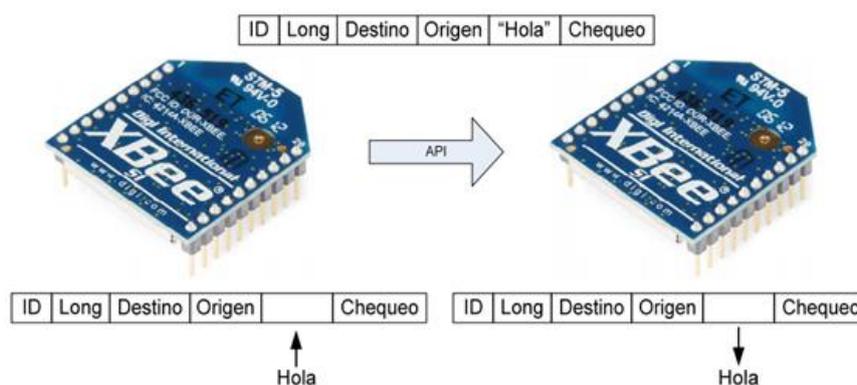


Figura 4.16. Esquema general de una trama API.

De la información de las tramas API la más importante es la dirección origen de donde proviene la trama y la información del sensor, estos datos se constituyen en el eje central de la base de datos que se encuentra en el nodo Coordinador o Receptor.

4.6. DISEÑO DEL PROTOTIPO

La propuesta de diseño está constituida por dos bloques fundamentales los cuales son secuenciales, por lo tanto, no existe retroalimentación, es decir, el flujo de información se hace en un solo sentido tal como se observa en la Figura 4.17.

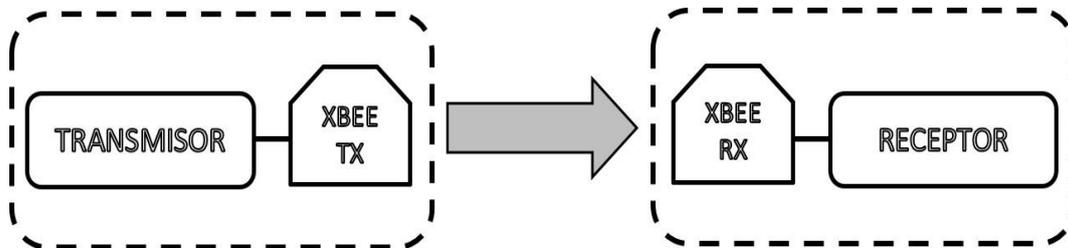


Figura 4.17. Flujo de información del sistema.

El primer bloque está constituido por el circuito Transmisor (nodo Coordinador), el cual se encarga de enviar diferentes datos (voltaje o corriente) en forma inalámbrica hacia el circuito Receptor (nodo Router/End Device).

El tipo de comunicación entre el nodo Coordinador y el Router/End Device es inalámbrico a través del protocolo Zigbee, el nodo Router/End Device se comunica a través del puerto USB a una computadora o laptop. Adicionalmente por medio de la conexión a un router o modem con acceso a internet, por protocolo TCP/IP se envía la información a una página web disponible para cualquier usuario. A continuación se describirán algunos elementos de estos bloques.

4.6.1. Circuito Transmisor

El diseño del transmisor lo constituyen tres elementos: el primero los sensores de voltaje y corriente que toman las muestras de las variables y las suministran al segundo elemento, que es el MCU ATMEGA328P, el cual es el encargado de convertir esas señales analógicas en señales digitales y al mismo tiempo transmitir las de forma serial a través de su pin TX.

El último elemento es el módulo Xbee serie 2 (configurado como Coordinador) el cual recibe la señal del MCU en su pin RX para luego ser transmitida en forma inalámbrica al nodo Router/End Device. La Figura 4.18 representa el diagrama a bloques de los dispositivos del circuito transmisor.

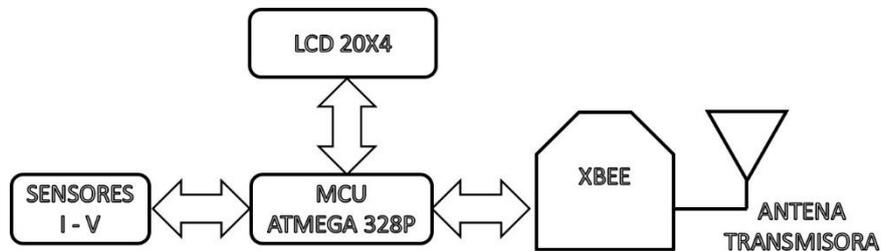


Figura 4.18. Diagrama a bloques de la unidad transmisora.

4.6.1.1. Conexión Microcontrolador Sensores

De acuerdo al sistema, uno de los elementos importantes en el circuito transmisor es el microcontrolador, en el cual se conectan dos módulos sensores utilizados para esta aplicación.

El MCU ATMEGA328P tiene que ver con la conversión analógica digital (ADC), el cual es configurable a través de las entradas A0 y A1 para la recepción de la señal analógica de los sensores de corriente y voltaje, el proceso se hace a través de los puertos controlados por el registro ANSEL y el resultado digital de la conversión es el registro ADRESL y ADRESH.

La Figura 4.19 muestra la conexión MCU-Sensores donde se observan las uniones de cada uno de los componentes electrónicos y el cableado eléctrico, así como la alimentación de cada elemento.

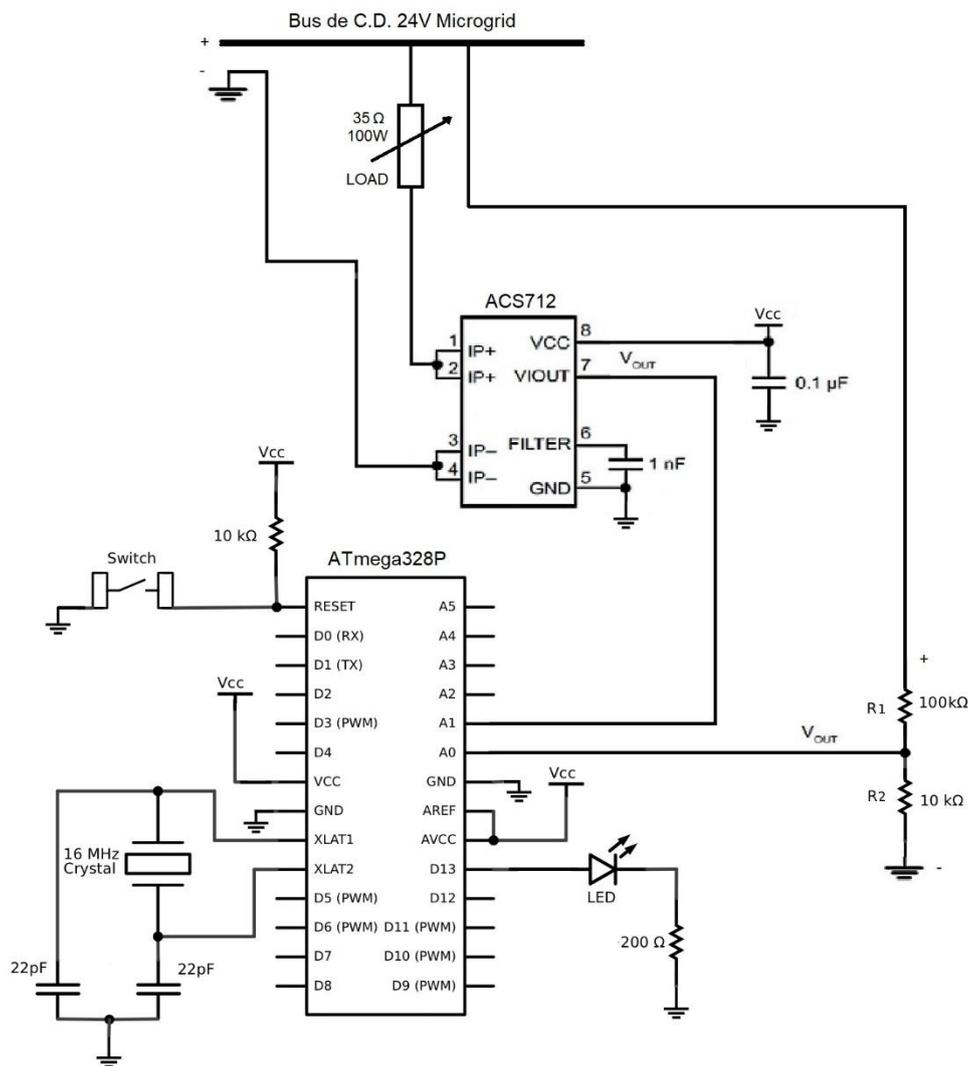


Figura 4.19. Diagrama de conexión entre MCU y sensores.

4.6.1.2. Conexión Microcontrolador Xbee

El programa configurado en el MCU simplemente envía caracteres (bytes) de información y los transmite de vuelta a la terminal Xbee. Utiliza el programa cargado en el bootloader de la memoria interna del MCU. El Xbee de acuerdo a su configuración recibe la información y empieza a transmitir los datos al destino. El diagrama de flujo de la Figura 4.20 muestra cómo funciona el programa.

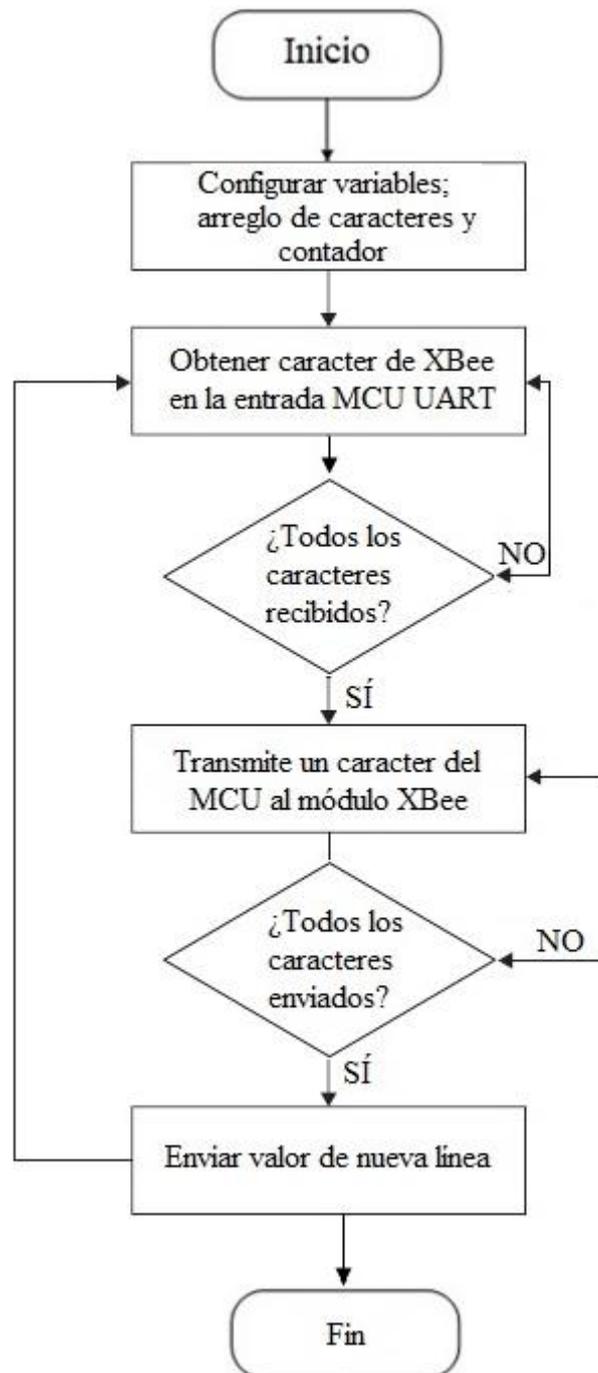


Figura 4.20. Diagrama de Flujo del programa para transmitir bytes de información.

El módulo Xbee de acuerdo al diseño debe comunicarse con el MCU a través de sus pines TX y RX tal como se describe en la Figura 4.21, el módulo de RF Xbee requiere de una alimentación de 3.3 V y el MCU de 5V para el manejo de su lógica interna.

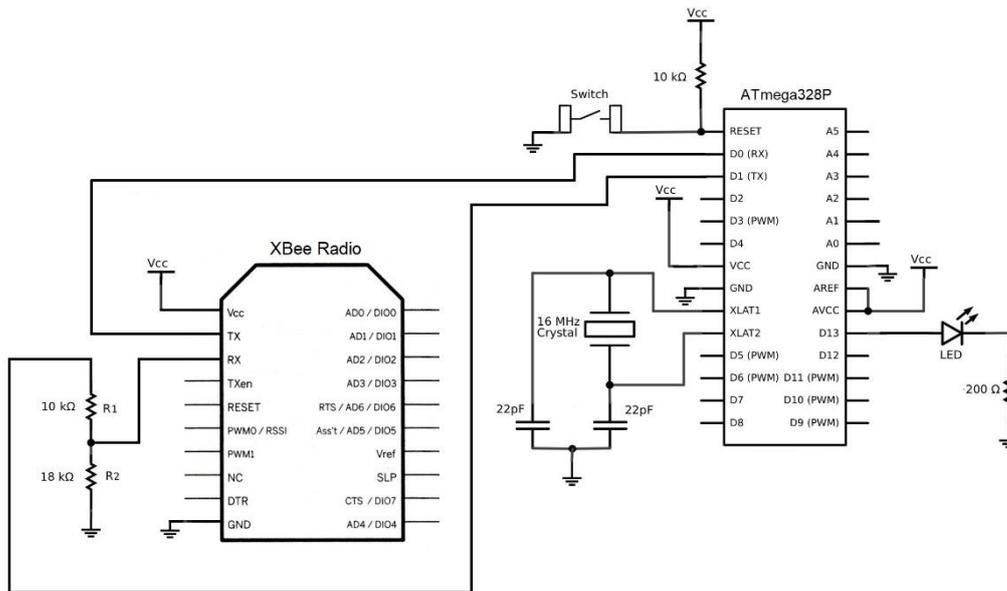


Figura 4.21. Diagrama de conexión Xbee MCU.

Por lo tanto, el último elemento del circuito transmisor es el módulo Xbee serie 2 para la transmisión de los datos hacia el circuito receptor. Éste aguarda a las señales de los elementos sensores que constantemente toman muestras de las variables de medición del bus de C.D. dentro de la MG aislada. Todo esto es posible gracias al protocolo Zigbee a través del enlace de radiocomunicación que realizan los módulos Xbee en la banda de 2.4 GHz, considerada como una vía de comunicación libre que utilizan los sistemas de microondas.

4.6.1.3. Conexión Microcontrolador LCD

Otro elemento adicional que forma este circuito es la pantalla LCD, en la cual se observan los datos de medición de los sensores para corroborar que efectivamente se esté realizando el proceso de muestreo de las variables. A continuación se observa la conexión del MCU ATMEGA328P con la pantalla LCD en la Figura 4.22.

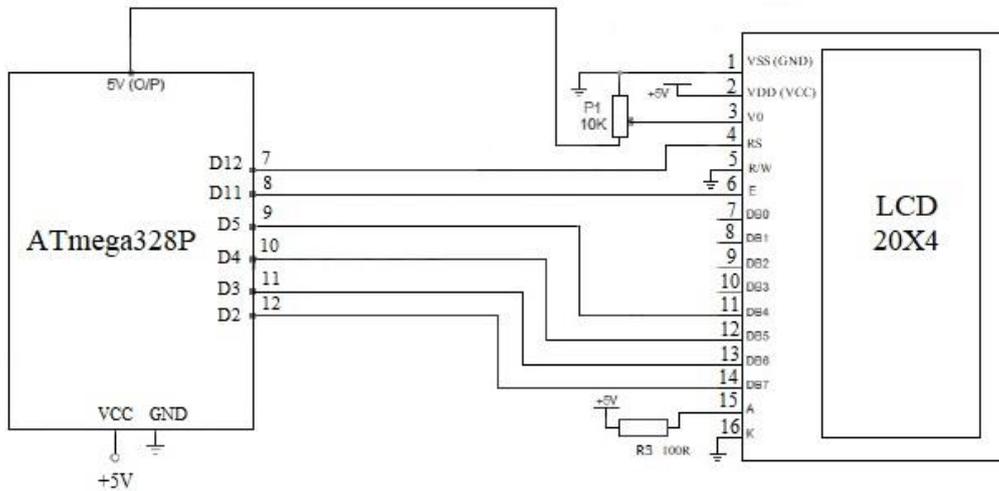


Figura 4.22. Conexión Xbee-Microcontrolador.

4.6.1.4. Programación de la Comunicación entre Microcontrolador y Sensores

Como se mencionó en un inicio, el MCU utilizado es el ATMEGA328P, para gestionar la carga del programa principal desde el punto de vista del hardware, es necesario utilizar algún dispositivo que comunique a la computadora, donde se desarrolla el programa con el MCU, que está ubicado en el circuito diseñado para soportar la programación. Por lo que se requiere de un programador que utilice la tecnología ISP o programación por puerto serie, se elige un grabador del tipo USBasp como se muestra en la Figura 4.23, el cual se basa en hardware y software libre.

También, para realizar la programación en el sistema se requiere de una aplicación que envíe los datos al MCU con el uso de un dispositivo programador, la aplicación a utilizar es el AVRDUDE porque es el más conveniente para los MCU con arquitectura AVR de ATMEL [10].

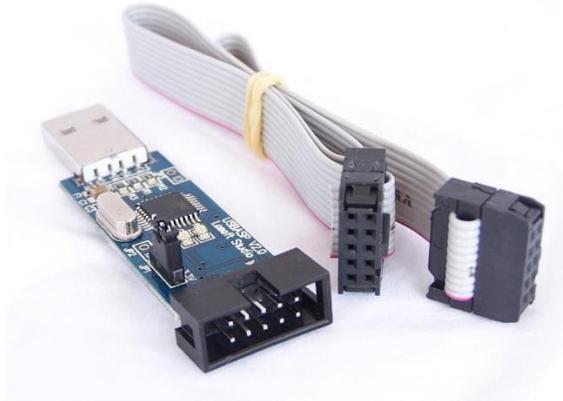


Figura 4.23. Programador USBasp.

De acuerdo a este dispositivo el programador USBasp se conecta al MCU ATMEGA328P para programarlo. Un extremo se conecta a la computadora, con esta conexión se transfiere el programa compilado de la computadora al USBasp. El otro extremo del USBasp se conecta a un cable de 10 pines, por medio de este cable se conecta fácilmente a la placa donde se encuentra el ATMEGA328P. A continuación se muestra el diagrama esquemático para conectar el USBasp al MCU en la Figura 4.24.

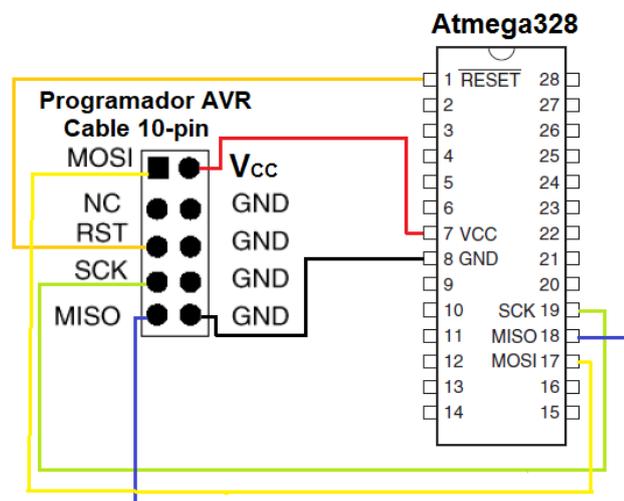


Figura 4.24. Diagrama de conexión USBasp-MCU.

Una vez realizada la transferencia del programa por medio de la conexión USBasp al MCU, se procede a realizar la prueba de muestreo de señales analógicas de los dispositivos de medición para corriente y voltaje. A continuación se explica brevemente el funcionamiento del programa cargado por medio del sketch IDE en la memoria interna del ATMEGA328P.

El programa dentro del MCU inicia estableciendo la configuración inicial que consiste en declarar los parámetros iniciales de la sensibilidad del sensor de corriente y los valores de las resistencias del divisor de voltaje, además de las características a manejar en la comunicación del microcontrolador, después se prepara para leer información por el puerto ADC y se establece la comunicación con la rutina de sensado, en esta rutina se leen 2 canales del puerto ADC donde llegan las señales de los sensores de corriente y voltaje al MCU y se guarda la información en un registro temporal. El tamaño del ADC es de $n = 10$, el cual permite obtener los valores de sensibilidad R , tanto para el voltaje como para la corriente, según se indican en (4.4) y (4.5), respectivamente.

$$R_V = \frac{V_{\text{máx}}}{2^n - 1} = \frac{24}{2^{10} - 1} = 23.5 \frac{\text{mV}}{\text{bit}} \quad (4.4)$$

$$R_I = \frac{I_{\text{máx}}}{2^n - 1} = \frac{3}{2^{10} - 1} = 2.93 \text{ mA/bit} \quad (4.5)$$

Esto quiere decir que cada bit es capaz de detectar un cambio desde 23.5 mV y 2.93 mA, en la medición de voltaje y corriente, respectivamente. Es importante hacer notar que, en la fuente distribuida, el voltaje máximo suele ser mayor que el nominal de operación, por consiguiente, se estableció como valor máximo el voltaje de circuito abierto. Mientras que el valor de corriente máxima no se aleja mucho respecto al valor nominal.

Una vez obtenida la información del sensor de corriente y voltaje la información es comparada con los parámetros establecidos por el usuario. Después, el programa del MCU ejecuta la orden para iniciar la impresión de datos en la pantalla LCD con las características del nombre del sistema “MICRO GRID” y los indicadores para cada una de las variables de medición. En la Figura 4.25 se describe el código del programa cargado al MCU para el sensado de las variables eléctricas.

```

#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 9, 11 , 12, 13, 7);
int analogInput = A0;
float vout = 0.0;
float vin = 0.0;
float R1 = 100000.0;
float R2 = 10000.0;
int value = 0;
int currentPin = A1;
int sensitivity = 150;
int adcValue= 0;
int offsetVoltage = 2500;
double adcVoltage = 0;
double currentValue = 0;
float potencia = 0;
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode(analogInput, INPUT);
    pinMode(currentPin, INPUT);
    lcd.begin(20, 4);
}
void loop()
{
    value = analogRead(analogInput);
    vout = (value * 5.0) / 1024.0;
    vin = vout / (R2/(R1+R2));
    if (vin<0.09)
    {
        vin=0.0;
    }
    adcValue = analogRead(currentPin);
    adcVoltage = (adcValue / 1024.0) * 5000;
    currentValue = ((adcVoltage - offsetVoltage) /
sensitivity);
    potencia=vin*currentValue;
    lcd.setCursor(4, 0);
    lcd.print("MICRO GRID");
    lcd.setCursor(1, 1);
    lcd.print("V= ");
    lcd.print(vin);
    Serial.println(vin);
    lcd.setCursor(1, 2);
    lcd.print("I= ");
    lcd.print(currentValue);
    Serial.println(currentValue);
    lcd.setCursor(1, 3);
    lcd.print("P= ");
    lcd.print(potencia);
    Serial.println(potencia);
    delay(500);
}

```

Figura 4.25. Programa cargado al MCU.

Finalmente para tener un análisis más directo en la ejecución del circuito Transmisor, se presenta el diagrama de flujo del trabajo que realiza el módulo Xbee para enviar los datos al circuito Receptor, desglosando la función del ADC del MCU a través de la comunicación directa con el dispositivo Coordinador. Esta secuencia se observa en la Figura 4.26 mostrada a continuación.

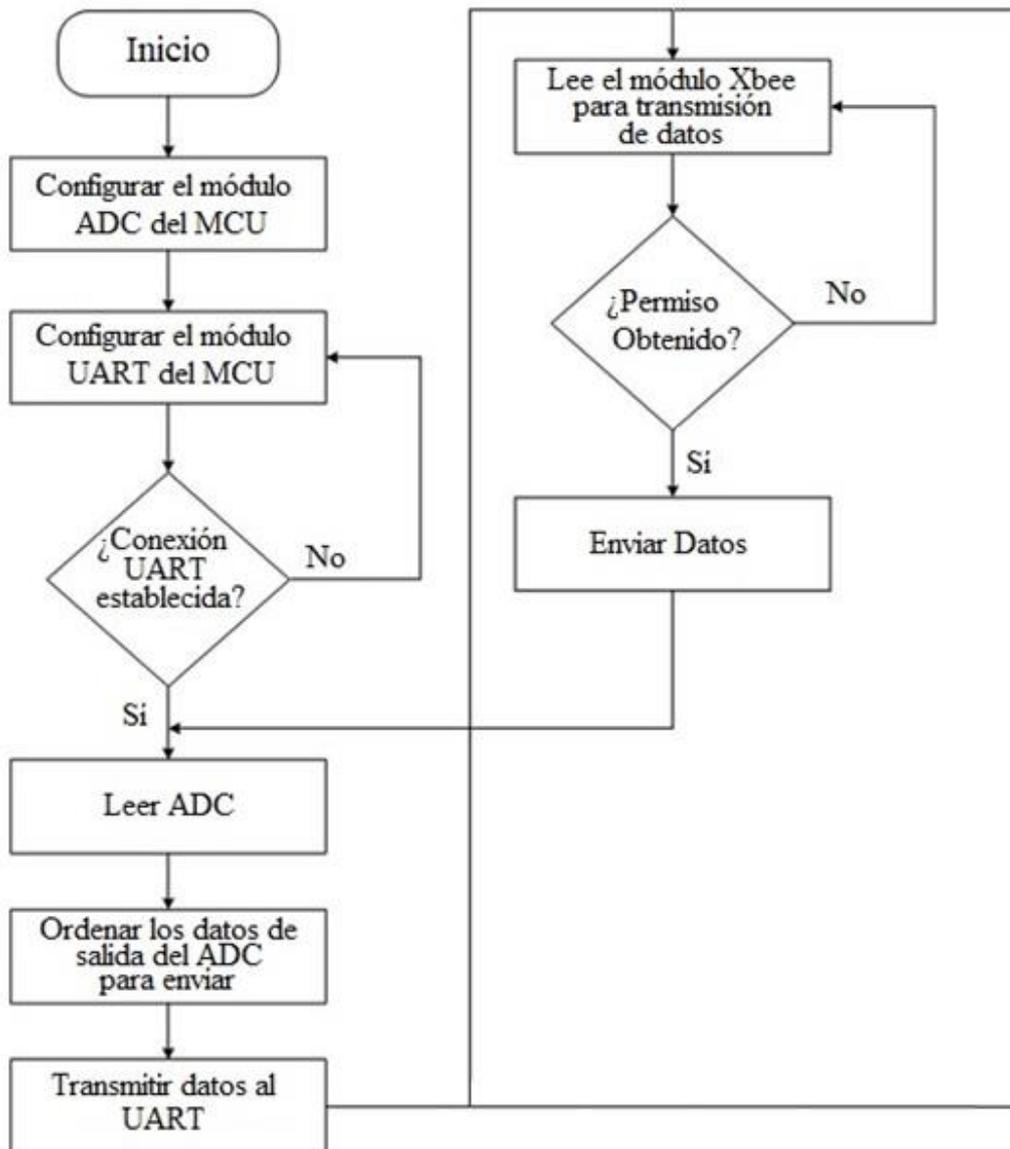


Figura 4.26. Diagrama de Flujo entre Xbee-MCU (ADC).

4.6.2. Circuito Receptor

El diseño del receptor de datos resultaría de la siguiente forma: El módulo Xbee serie 2 (configurado como Router/End Device) conectado a una computadora personal. Este dispositivo se encarga de la recepción de datos por medio del protocolo Zigbee. Una vez que el módulo Xbee recibe la trama emitida por el nodo Coordinador, éste la transmite en su pin TX y es recibida por el pin RX.

La conversión que sigue para conectarse al puerto USB de la computadora se respalda mediante un circuito MAX232 para entablar conexión por el conector DB9 y terminar la secuencia del protocolo de recepción de datos. El diagrama a bloques del circuito receptor se presenta en la Figura 4.27.

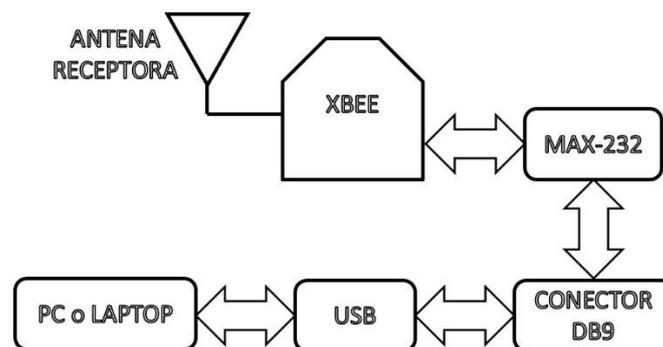


Figura 4.27. Diagrama a bloques de la unidad receptora.

Una vez recibidos los datos en la terminal de la computadora a través de su puerto USB, la información será procesada por el sistema operativo y posteriormente a través de un algoritmo en Labview se pueden visualizar los datos por medio de su interfaz gráfica, además con dicho software se puede realizar un registro para formar una base de datos local y si el usuario lo requiere la información estará disponible en un servidor web por medio de la conexión de una interfaz Ethernet con el protocolo TCP/IP.

4.6.2.1. Acoplador Max 232

Es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa. Lo interesante es que sólo necesita una alimentación de 5V, ya que genera internamente algunos voltajes que son necesarios para el estándar RS232. Otros integrados que manejan las líneas RS232 requieren dos voltajes, +12V y -12V. En este proyecto se eligió el MAX232 porque soluciona la conexión necesaria para lograr comunicación entre el puerto serie de la PC y cualquier otro circuito con funcionamiento en base a señales de nivel TTL/CMOS, debido a que posee dos convertidores de nivel TTL a RS232 o viceversa. Estos convertidores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie de la PC, que son TX, RX, RTS y CTS. El TX es la señal de transmisión de datos, RX es la de recepción, y RTS y CTS se utilizan para establecer el protocolo para el envío y recepción de los datos. En la Figura 4.28 se muestra la descripción de pines del circuito integrado MAX232.

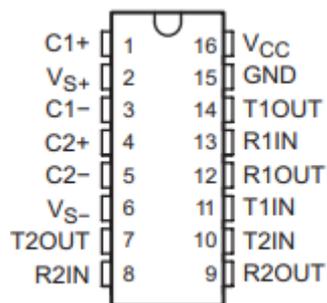


Figura 4.28. Descripción de pines MAX232.

4.6.2.2. Conector DB9

Es un conector analógico de 9 pines de la familia de conectores D-Subminiature (D-Sub o Sub-D), en la Figura 4.28 se muestra la forma de los pines del conector y en la Tabla 4.3 la descripción de cada uno. En el circuito receptor de este proyecto se utiliza para la conexión en serie con la PC y también permite una transmisión asíncrona de datos según lo establecido en la norma RS-232 (RS-232C).



Figura 4.29. Conector DB9.

Tabla 4.3. Descripción de pines Conector DB9.

NÚMERO DE PIN	NOMBRE	DESIGNACIÓN
1	CD (<i>Carrier Detect</i>)	Detector de transmisión
2	RXD (<i>Receive Data</i>)	Recepción de datos
3	TXD (<i>Transmit Data</i>)	Transmisión de datos
4	DTR (<i>Data Terminal Ready</i>)	Terminal de datos listo
5	GND (<i>Signal Ground</i>)	Señal de tierra
6	DSR (<i>Data Set Ready</i>)	Ajuste de datos listo
7	RTS (<i>Request To Send</i>)	Solicitud de envío
8	CTS (<i>Clear To Send</i>)	Listo para enviar
9	RI (<i>Ring Indicator</i>)	Indicador de llamada

Finalmente después de elegir los elementos que formarán el sistema receptor, se plantea el diseño para las conexiones eléctricas, con el fin de mantener un adecuado orden en el flujo de recepción hasta llegar a la computadora y posteriormente pasar al análisis de la interfaz gráfica. Dentro de la interfaz gráfica se adecuan las herramientas necesarias para que el usuario tenga la capacidad de observar las mediciones de las variables. Dentro del algoritmo de dicha interfaz, existen diferentes formas de análisis e importación de datos.

4.6.2.3. Interfaz Gráfica Labview

Es un sistema de desarrollo basado en programación gráfica orientado en aplicaciones para instrumentación que integra una serie de librerías para comunicación con tarjetas de adquisición de datos y acondicionamiento, comunicaciones en redes TCP/IP, UDP, GPIB, RS232 o RS485, o en los estándares de software COM, DDE, DLL o ActiveX para Windows.

Los programas realizados en LabVIEW (del inglés, Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) se llaman instrumentos virtuales “VI” ya que tienen la apariencia de los instrumentos reales, sin embargo, poseen analogías con funciones provenientes de lenguajes de programación convencionales.

Para asegurar la comunicación del puerto USB con la computadora se utiliza un controlador de instrumentos de NI (del inglés, National Instrument) que es una implementación del estándar E/S de la arquitectura de software de instrumentos virtuales VISA. Por medio de NI VISA se puede configurar, programar y solucionar problemas en los sistemas de instrumentación que usan interfaces Ethernet, GPIB, puerto serie RS232 o RS485 y USB entre otras más; también incluye utilidades, funciones de control de bajo nivel y ejemplos para crear una aplicación. Se requiere configurar los parámetros de lectura del puerto en el controlador VISA para que exista la interfaz con Labview. En la Figura 4.30 se muestra los parámetros de configuración del puerto serie en Labview.

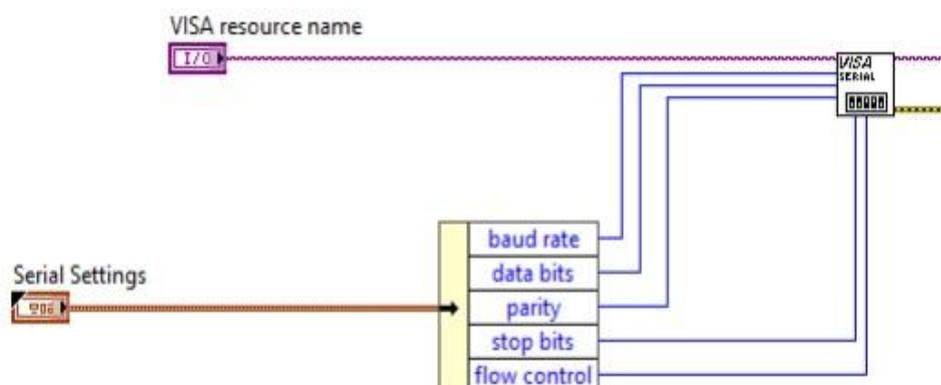


Figura 4.30. Configuración del puerto serie con VISA.

El algoritmo empleado en la interfaz gráfica para el monitoreo de las variables que se reciben del circuito transmisor se realiza de la siguiente manera: Primeramente se conecta el VI de VISA para poder comunicar el puerto USB a través del hardware de la computadora, conectado con el módulo Xbee receptor.

Enseguida se leen los datos, este proceso se conoce como evento de tipo carácter y entra a una matriz que su función es la de ordenar todo lo que entra en formato string (cadena de caracteres) [%;%f] y la cadena se separa con comas (,) de ahí pasa a otro bloque conocido como *index* que tiene la tarea de organizar lo que viene de la matriz en columnas y filas; después se extraen esos datos en formas separadas como voltaje y corriente, enseguida se envía a graficar cada uno.

Por último los datos separados se pasan por un bloque multiplicador para obtener la variable de potencia y se envía a graficar. El diseño del algoritmo para la recepción de datos se presenta en la Figura 4.31.

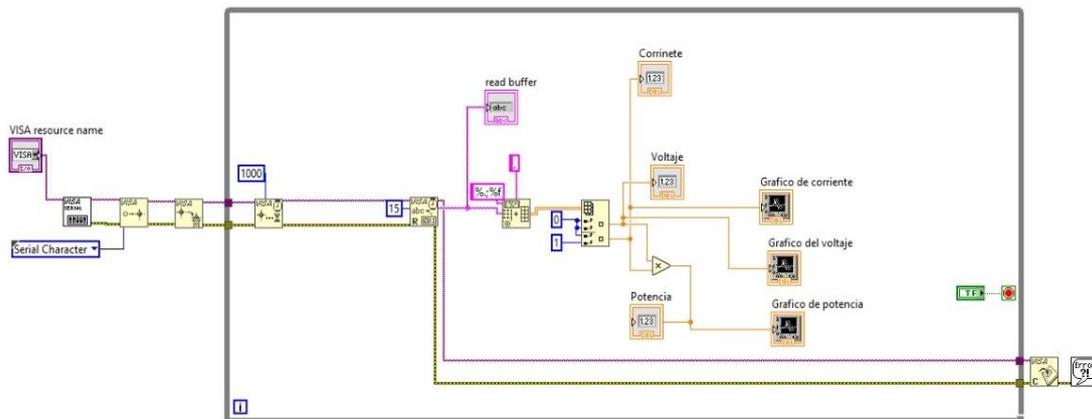


Figura 4.31. Algoritmo de Labview para recepción de datos.

Es importante notar que visualizar los datos que envía el módulo Coordinador permite al usuario saber el estado de la información de las variables en los sensores, por lo que la información obtenida se almacena en un archivo de Excel para tener una base de datos del monitoreo de las variables de interés.

Gracias a la versatilidad del software Labview por medio de un arreglo o *Array* se manda llamar a un bloque para escribir la medición en un archivo, con esto se tiene la posibilidad de guardar los datos en el formato xls de Excel de Microsoft y también, el usuario dispone de un control para habilitar o deshabilitar la lectura de los datos para el registro en el archivo por día y hora dependiendo de la cantidad de muestras a tomar. La programación realizada para este cometido se presenta en la Figura 4.32.

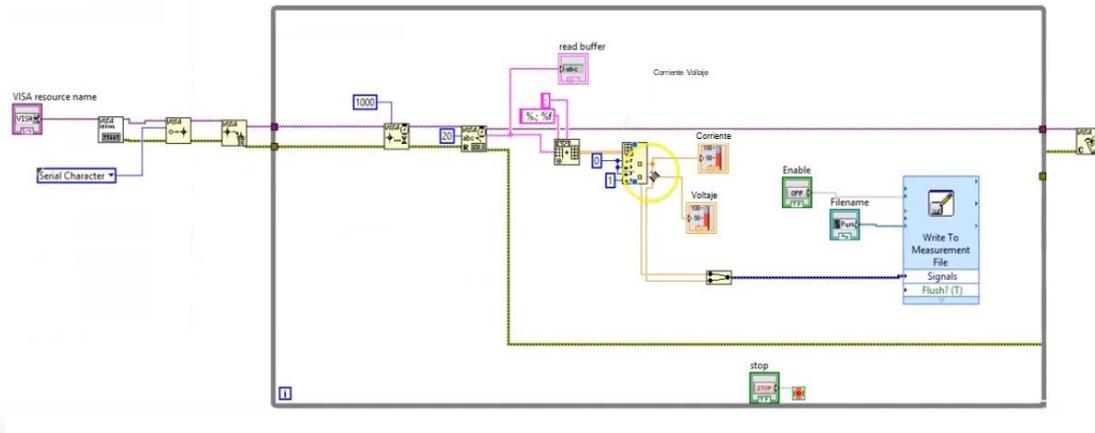


Figura 4.32. Algoritmo de Labview para guardar datos en Excel.

Labview tiene la opción también de intercambiar datos de los VIs a través de la red por medio de un servidor web con otras computadoras, por medio de un kit de herramientas llamado *Database Connectivity*, con este aditamento se busca la opción de *web server* y se activa la pestaña *web publishing* en donde se configura el VI que se va a mostrar en una página HTML. Labview es capaz de trabajar con estas páginas siempre y cuando esté alojado en un servidor que trabaje con los *web services* y cualquier cliente HTTP como por ejemplo: Chrome, Firefox, Internet Explorer, etc., a través de un URL puede invocar los VIs para intercambiar información, por lo que, da la posibilidad de monitoreo de datos desde otra computadora, tablet o celular conectado por protocolo TCP/IP.

4.7. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Una vez definidos los requerimientos y analizado los componentes del sistema de comunicación inalámbrica, el prototipo propuesto se desglosa en dos partes: Circuito Transmisor y Circuito Receptor. Primeramente se experimentó con todos los componentes en circuitos de prueba llamados tablillas de experimentos o *protoboard*, se instalaron todos los aditamentos y posteriormente se pasaron a placas de circuito impreso PCB (del inglés, Printed Circuit Board).

4.7.1. Diseño Esquemático

Para generar la placa PCB se necesita el diagrama esquemático del circuito completo. Para esta tarea se utilizó el software NI MULTISIM 14.0, con el cual se diseñó el circuito eléctrico del Transmisor y el Receptor. En la Figura 4.33 se observa el diagrama del circuito Transmisor y en la Figura 4.34 se observa el diagrama del circuito Receptor.

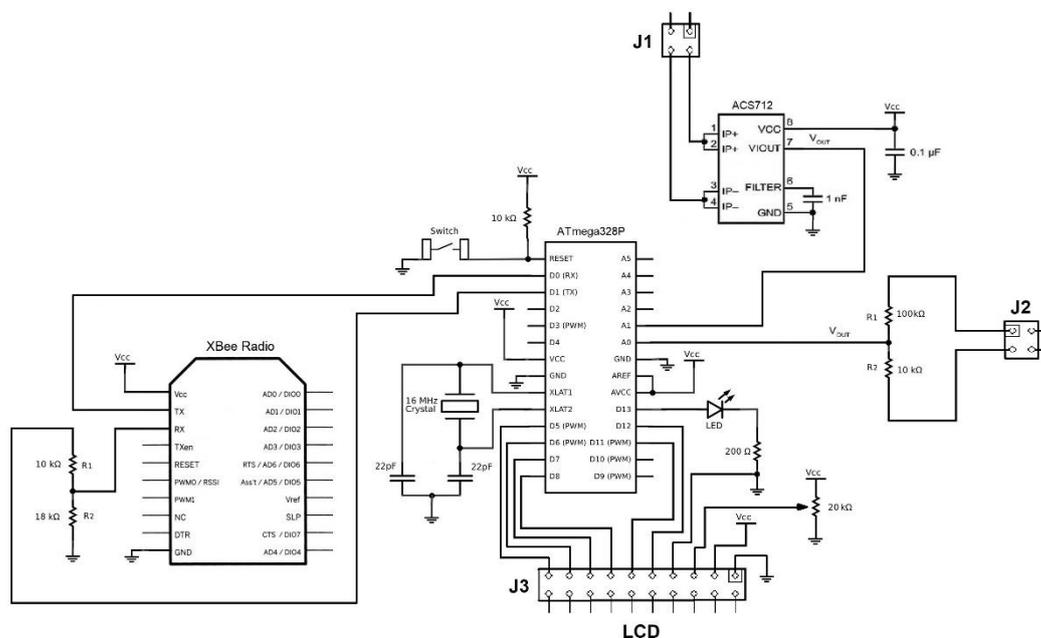


Figura 4.33. Diagrama eléctrico circuito Transmisor.

Los componentes utilizados para el circuito transmisor se describen en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Componentes del Circuito Transmisor.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Módulo RF Zigbee	Xbee Serie 2
Microcontrolador	ATMEGA328P
Display Cristal Liquido	LCD 20x4
Sensor para corriente	ACS712-30
Oscilador de Cristal	16 MHz
Resistencias	100k,20k,18k,10k, 200, 20 (Ω)
Capacitores Cerámicos	22nF, 1nF,0.1nF

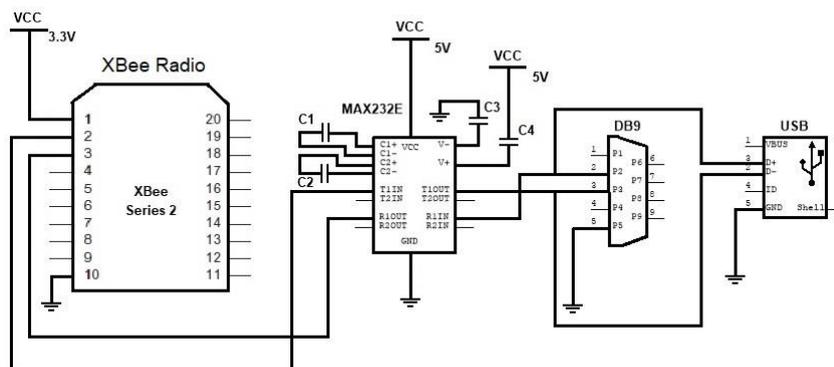


Figura 4.34. Diagrama eléctrico circuito Receptor.

Los componentes utilizados para el circuito receptor se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Componentes del Circuito Receptor.

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Módulo RF Zigbee	Xbee Serie 2
Circuito Integrado 16 pins	MAX232
Capacitores Cerámicos	10 nF
Cable Conector Adaptador	DB9-USB

4.7.2. Fabricación de PCB

Se utilizó el software NI ULTIBOARD 14.0 para generar el PCB, gracias a este software es posible realizar el diseño de las pistas para colocar los componentes en su tamaño original y que pueda haber interconexión entre ellos. Una vez revisados los errores en el esquemático para verificar que las conexiones son adecuadas, se plantea el plano a tierra a lo largo del circuito y se generan las huellas de las pistas de cobre para los empaquetados específicos como resistencias, circuitos integrados, capacitores, bases para módulos RF y clemas de conexión de cables.

El método utilizado para la elaboración de los PCB fue el de transferencia térmica, con este método es posible colocar el diseño en la placa de cobre para posteriormente soldar los componentes. En la Figura 4.35 y 4.36 se muestran las huellas de impresión de los PCB para el Transmisor y Receptor respectivamente.

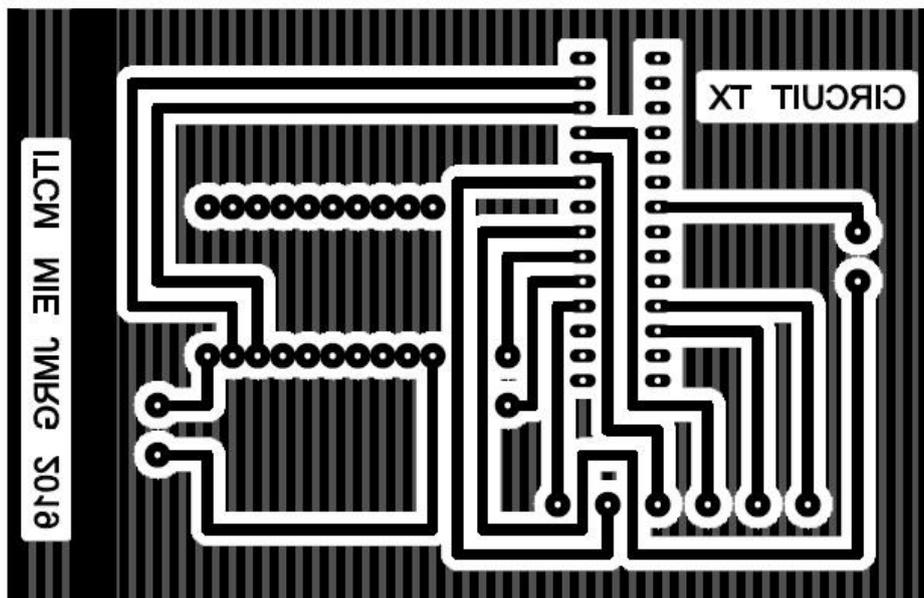


Figura 4.35. Huellas de impresión Circuito Transmisor.

Para el caso de los sensores solamente se dejaron los espacios para la conexión por clemas ya que estos aditamentos se conectan en el bus de C.D. y el display LCD se conecta también por clemas adicionalmente al circuito. El uso de las clemas facilita la conexión de las fuentes de alimentación para los dispositivos del sistema.

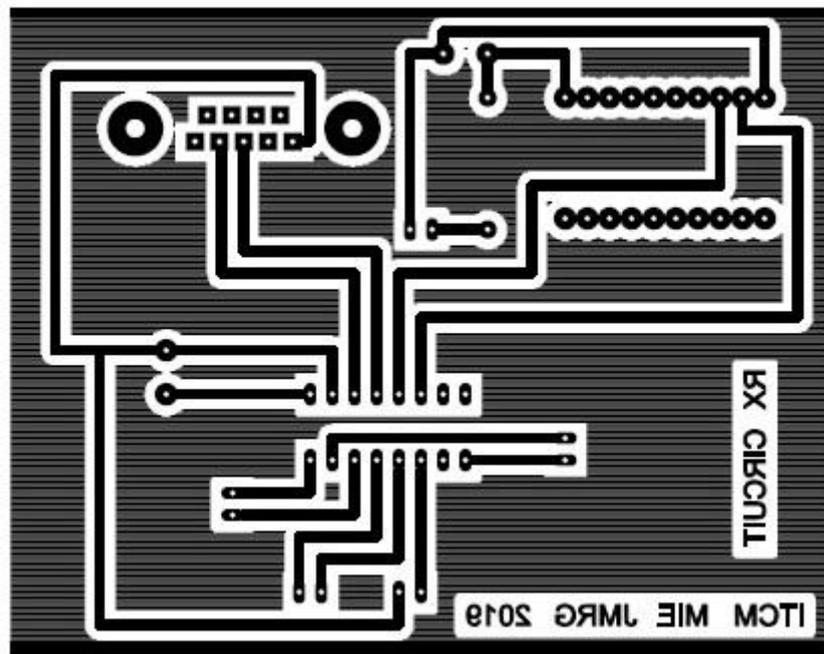


Figura 4.36. *Huellas de impresión Circuito Receptor.*

Por último se realiza el procedimiento de colocación de componentes sobre la placa de circuito impreso diseñado, por medio de soldadura de estaño se unen los puntos de conexión para garantizar la circulación de corriente entre los diferentes componentes del circuito. En las Figuras 4.37 y 4.38 se muestran las imágenes que presentan como quedan los circuitos impresos ya con los componentes implementados del Transmisor y Receptor respectivamente.

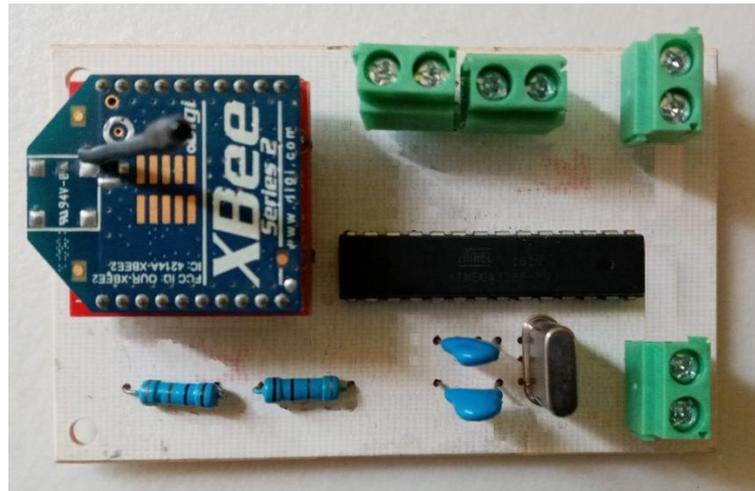


Figura 4.37. PCB del circuito Transmisor.

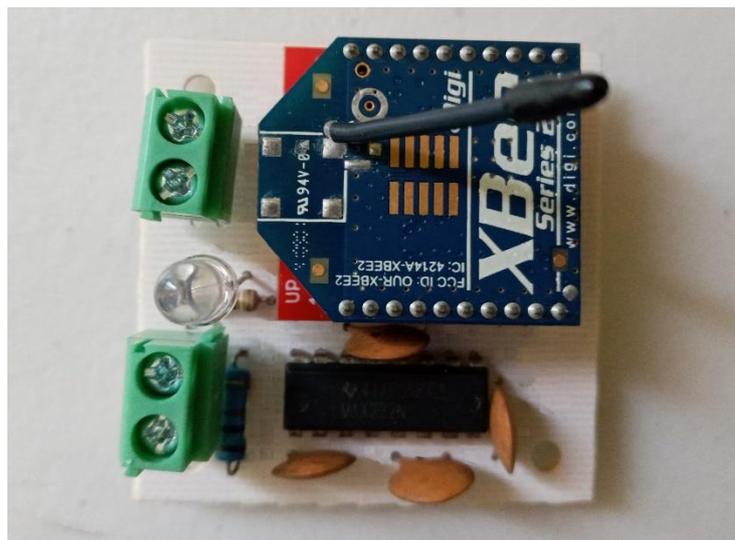


Figura 4.38. PCB del circuito Receptor.

Para concluir, en este *Capítulo* se realizó el diseño del sistema de comunicación inalámbrica formado por módulos Xbee de RF en conjunto con los circuitos complementarios de cada etapa del prototipo para su buen funcionamiento y posteriormente realizar la prueba experimental final.

Capítulo 5

Análisis de Resultados

De acuerdo con la implementación del sistema diseñado en este trabajo de investigación, se describen las condiciones del experimento realizado, así como los parámetros utilizados en las mediciones y la confiabilidad de los resultados.

Con el fin de lograr los objetivos planteados al inicio de esta tesis, en el presente *Capítulo*, se presentan los resultados obtenidos del procedimiento experimental propuesto donde se realiza un análisis profundo de la información, se presentan los logros alcanzados y algunos planteamientos al respecto.

5.1. MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS

El presente reporte breve aporta los primeros hallazgos preliminares sobre la medición de voltaje y corriente de la MG mediante los sensores conectados en los puntos de referencia. Originalmente, esta estrategia de medición fue elaborada en este sentido, al ser evaluada, se presentan las mediciones en un periodo de tiempo corto como experimentación.

De acuerdo a los estudios referentes a las variables eléctricas se han obtenido resultados favorables sobre su validez con instrumentos patrones y con criterios de verificación. Los resultados de este estudio preliminar dan los primeros soportes empíricos para descartar errores en las mediciones, los cuales traen implicancias prácticas, ya que mediante el uso de sensores tradicionales en evaluación se podría desarrollar un prototipo modelo.

5.2. PRUEBAS DE FUNCIONALIDAD

La funcionalidad del sistema en la transferencia de información depende de la conexión inalámbrica a través del enlace punto a punto, por ello es necesario asegurar que se pueda garantizar una conexión estable y una transmisión fiable de datos, mientras el sistema en conjunto sea capaz de realizar una transmisión de información a una tasa de transferencia razonable y con pérdida mínima de información. Para ello, con base en los conceptos de diseño habrá que realizar la prueba de enlace basado en la distancia y ubicación del nodo Coordinador. Esta prueba deberá de garantizar una transferencia de información e intensidad de señal óptima.

Para comprobar la hipótesis planteada en este proyecto, se propuso realizar la medición de carga en el bus de C.D. de la MG por medio de una resistencia variable de potencia con el fin de tomar diversas lecturas de las variables de corriente y voltaje, para ello en la Tabla 5.1 se muestran los valores de resistencia así como los cálculos obtenidos manualmente de corriente y potencia; debido a que la alimentación del bus es fija se propone que la MG siempre este entregando 24 V. Por medio de la ley de Ohm con (5.1)

se obtiene el valor de corriente y con la ley de Watt (5.2) se calcula la potencia de consumo de la carga en el circuito de prueba.

$$I = \frac{V}{R} \quad (5.1)$$

$$P = V \cdot I \quad (5.2)$$

Tabla 5.1. Valores de carga para la MG.

RESISTENCIA (Ω)	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)
10	2.5	24.0	60.0
15	1.6	24.0	38.4
20	1.2	24.0	28.8
25	0.9	24.0	21.6
30	0.8	24.0	19.2
35	0.6	24.0	14.4

Los valores de resistencia que se observan en la Tabla 5.1 se utilizaron como cargas que representan la cantidad de potencia demandada de forma variable. El tipo de resistencia que se propuso fue de tipo bobinado de potencia industrial recubierta de vítreo con forma tubular ajustable, este tipo de resistencia presenta gran estabilidad y tolerancia a cambios de temperatura debido a su recubrimiento vítreo de alta temperatura. En la Figura 5.1 se observa el tipo de resistencia de potencia.



Figura 5.1. Resistencia tubular ajustable de potencia.

El requerimiento de tener un voltaje constante implicó el uso de una fuente de C.D. para simular el bus de la MG, debido al interés de adquirir las variables eléctricas para su monitoreo se empleó un modelo de fuente de voltaje regulable QW-MS305D de 0 a 30V con amperaje de 0 a 5A, que se observa en la Figura 5.2. Como instrumento patrón se utilizaron dos multímetros marca *Fluke* para mayor confiabilidad en las mediciones. Uno de ellos es el modelo 117 y el otro de tipo gancho es el modelo 337, los cuales se ven en la Figura 5.3.



Figura 5.2. Fuente de voltaje QW-MS305D.



Figura 5.3. Instrumentos patrón de medición.

Inicialmente se conectó la resistencia de potencia directamente al bus de voltaje de 24 V, se posicionó la escala ajustable en las medidas de resistencias propuestas en la Tabla 5.1, enseguida se tomaron las lecturas de las variables eléctricas corriente y voltaje con los instrumentos patrón. Las lecturas que arrojaron los multímetros se observan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valores de medición con instrumento patrón.

RESISTENCIA (Ω)	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)
10.0	2.3	24.0	55.2
14.8	1.5	24.0	36.0
19.7	1.1	24.0	26.4
25.0	0.8	24.0	19.2
29.4	0.7	24.0	16.8
35.3	0.6	24.0	14.4

Siguiendo el análisis de la Tabla 5.2 para cada valor de resistencia existe una corriente que fluye a través de la carga y se nota como el valor de voltaje es constante, entonces el valor de potencia se establece de acuerdo al consumo de energía que hay en la carga del bus, en este caso la potencia solo se calcula de forma manual con 5.2 ya que no se cuenta con un medidor o instrumento para medir dicha variable, lo interesante del monitoreo es observar cuando ocurre un cambio en la carga del sistema de alimentación y así poder analizar el comportamiento del voltaje y la corriente.

El siguiente paso es realizar la medición por medio de los sensores de voltaje y corriente, para esta etapa se requiere del uso del circuito transmisor donde se aloja el MCU el cual es el encargado de la adquisición de datos a través de los sensores.

De acuerdo al lineamiento correspondiente se debe medir primeramente una corriente cero para corroborar el ajuste de sensibilidad del sensor. Para el sensor de voltaje no hay inconveniente ya que su estructura va de acuerdo al cálculo realizado para soportar la respectiva medición. Se colocan los sensores y se procede a realizar las mediciones.

Como se mencionó anteriormente la ventaja del sistema es que se tiene un monitoreo de las variables gracias a un display LCD conectado al MCU, en el cual se observan las mediciones. El registro de medición realizado por los sensores está ordenado en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Valores de medición con sensores.

RESISTENCIA (Ω)	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)
10	2.2	24.0	52.8
15	1.4	24.1	33.7
20	1.1	24.7	27.4
25	0.8	24.7	21.7
30	0.7	24.0	14.4
35	0.6	24.2	14.1

Después de obtener los valores con los sensores, se procede a realizar la transmisión de los datos con los módulos de RF configurados para el enlace de punto a punto, a una distancia promedio con línea de vista para el alcance de la red. Experimentalmente se prueba con una distancia no mayor a 100 m ya que el modelo S2 de Xbee maneja un alcance normal de 100 m y debido a su potencia de transmisión de 1mW con la antena tipo Whip o de alambre permite una comunicación simple y confiable en las redes punto a punto.

5.3. DIMENSIONAMIENTO

El sistema diseñado está incrustado o embebido dentro de un enlace de red punto a punto, para ello se debe estimar cuál es el alcance o dimensión de la red, sobre la cual su puesta en marcha no altera sus funciones originales, es decir, disminuye la probabilidad de error, son cortos los tiempos de latencia en la entrega de paquetes y tampoco pierde sus funciones naturales de implementación.

Para ello, se realiza una prueba de enlace entre los módulos de RF Xbee a través del software X-CTU para estimar la cantidad de datos, tramas o símbolos que viajan a través del canal, en el estándar IEEE 802.15.4 sobre el cual se basa el protocolo Zigbee.

Para verificar que los módulos están listos para el enlace se hace una prueba de envío de datos simulada en el software X-CTU para corroborar que realmente están listos para la ejecución y se pueda transmitir las tramas de datos efectivamente. Siguiendo esta línea, se conectan ambos módulos tanto el Coordinador como el Router/End Device a la computadora por medio del adaptador USB y se verifica en la interfaz que ambos estén habilitados, posteriormente se da clic en la ventana de enlace para hacer una prueba de comunicación con ambos dispositivos como se observa en la Figura 5.4.



Figura 5.4. Conexión de módulos Xbee para prueba de comunicación.

Se da clic en la pestaña de la consola o terminal del X-CTU para habilitar el puerto serial donde están conectados cada uno de los módulos Xbee, entonces se procede al análisis de los datos donde aparecen las tramas del mensaje que se envía, como se observa en la Figura 5.5.

5.4. ALCANCE DEL SISTEMA

La determinación con que se reciben los mensajes de los módulos Xbee ofrece una idea del alcance esperable. Para analizar la recepción de los mensajes se utiliza un osciloscopio TEKTRONIX para medir la forma de onda del ciclo de trabajo del pin PWM0/ RSSI, aunque también para tener certeza del envío y confirmación de recepción del arribo a destino de la información se puede verificar con el valor del parámetro EA antes y después del envío.

Para considerar una buena tasa de envío de los datos para la gestión y monitoreo de una MG se estima un rango de 10 ms a 1 s, sin embargo, en muchos de ellos se escoge una tasa intermedia de 100 ms. Es por esta razón que para el modelo de la red propuesta, se elige una tasa de envío de los datos sensados por el Xbee de 100 ms.

Una vez determinado el alcance de la red inalámbrica se determina la potencia de la antena del dispositivo de transmisión, de acuerdo a las características técnicas del modelo Serie 2 de Xbee con antena tipo *Whip* se tiene una salida de potencia en transmisión de 1.25 mW a 2 mW, lo que da como resultado un rango de distancia entre dispositivos en interiores de 40 m y en exteriores con línea de vista hasta 120 m. La gran ventaja de trabajar con estos dispositivos está en que se logra tener una sincronización de datos más efectiva que con otros, además de utilizar diferentes arquitecturas o topologías de red.

También, en algunos casos los dispositivos Xbee se complementan con la conexión de una antena con mayor potencia, es decir, con más rango de cobertura. Este tipo de antena generalmente es de tipo *Yagui* y está calculada para ofrecer mayores coberturas en transmisión. Cada módulo Xbee ofrece distintos rangos de alcance de acuerdo al tipo de modelo que se va a utilizar. A mayor potencia de cobertura el dispositivo requiere de más energía, por lo que se debe tomar en consideración para la alimentación, el consumo y el tiempo de vida de las baterías.

5.4.1. Latencia

La latencia observada atribuible al estándar IEEE 802.15.4 y demoras de procesamiento del Xbee es de unos 35 ms. El módulo Xbee espera un tiempo equivalente al número de caracteres de envío antes de armar el paquete a transmitir. A modo de prueba se envía un mensaje de 32 bytes para medir la latencia entre los dos módulos Xbee. Incluyendo el tiempo de la velocidad de transmisión serie a 9600 bps en ambos extremos, la latencia total es de 72 ms. Finalmente la latencia observada se muestra en la Figura 5.7.

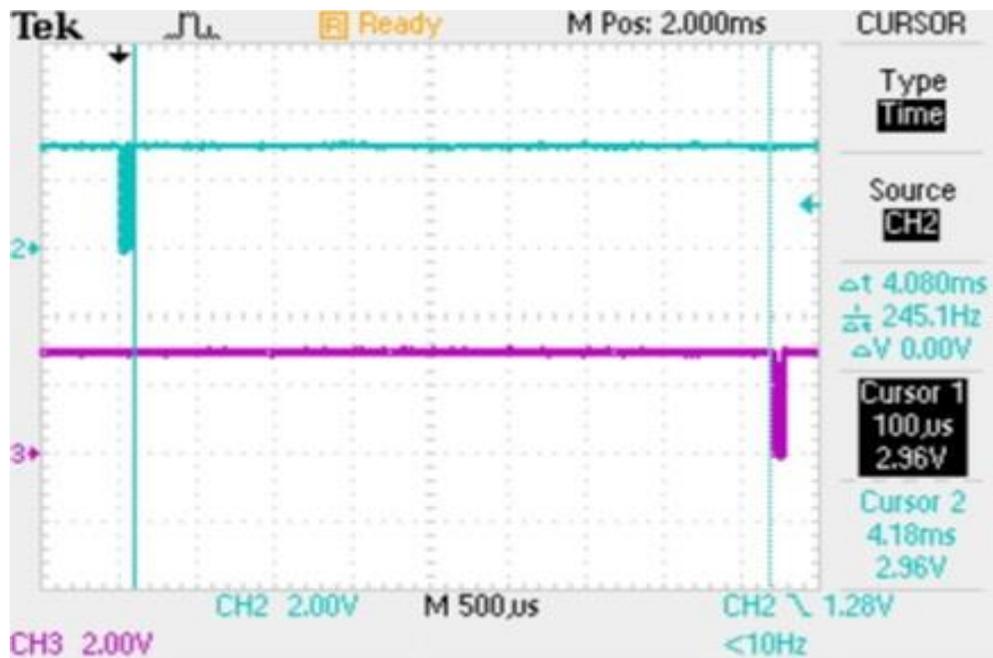


Figura 5.7. Medición de latencia en Xbee punto a punto.

De acuerdo al análisis del módulo Xbee referente al tiempo de envío de datos con una velocidad de transmisión de 9600 bps, se describe en la Tabla 5.4 el cálculo del tiempo de acuerdo al número de bytes que se transmite en un canal de comunicación, como ejemplo se analiza un paquete de 32 bytes para corroborar la medición hecha anteriormente.

Tabla 5.4. Cálculo de tiempo de envío de datos.

DESCRIPCIÓN	9600 BAUD RATE (PAQUETE DE 32 BYTES)	9600 TIMING (B= NÚMERO DE BYTES)
Latencia del tiempo de los datos desde que se transmite hasta que se recibe.	72.0 ms	Para $0 < B < 40$ $T = 46.27 + (0.73 * B)$ ms Para $B \geq 39$ bytes, $T = 74.80$ ms
Tiempo que el pin TX/PWR tiene baja conducción.	16.8 ms	Para $0 < B < 14$, $T = 6.50 + (0.8 * B)$ ms Para $B > 13$ $T = 16.80$ ms
Tiempo en el que el pin LED RX tiene alta conducción.	25.6 ms	Para $0 < B < 37$, $T = 1.63 + (0.794 * B)$ Para $B > 36$, $T = 30.2$ ms
Tiempo de Inicialización del Canal.	35.0 ms	35.0 ms

5.4.2. Throughput

El Xbee realiza internamente doble buffer en la transferencia de datos, esto permite el comienzo de la transmisión y que la recepción del paquete sea completo, lo que da acceso a recibir un nuevo paquete. El módulo tiene control de flujo cuando corresponda si no puede albergar más información en su buffer.

En la red en la cual los módulos están a una cierta distancia, dado que el BER (del inglés, Bit Error Rate) es función de la SNR (del inglés, Signal to Noise Ratio), se debe retransmitir una determinada cantidad de paquetes, lo cual baja el rendimiento. El tiempo de retransmisión es similar al original, por lo que al estimar un porcentaje de retransmisiones el *throughput* baja en similar proporción. Se configuran los dos módulos Xbee con PAN ID y canal únicos, colocados en puntos distantes. Se configura cada módulo a una velocidad de 9600 bps con una transferencia en modo *streaming* de un archivo de texto de 18768 bytes que demora unos 6.2 s, por lo que se estima un *throughput* estable aproximado de unos 35 Kbps. La medición del *throughput* en los Xbee se muestra en la Figura 5.8.

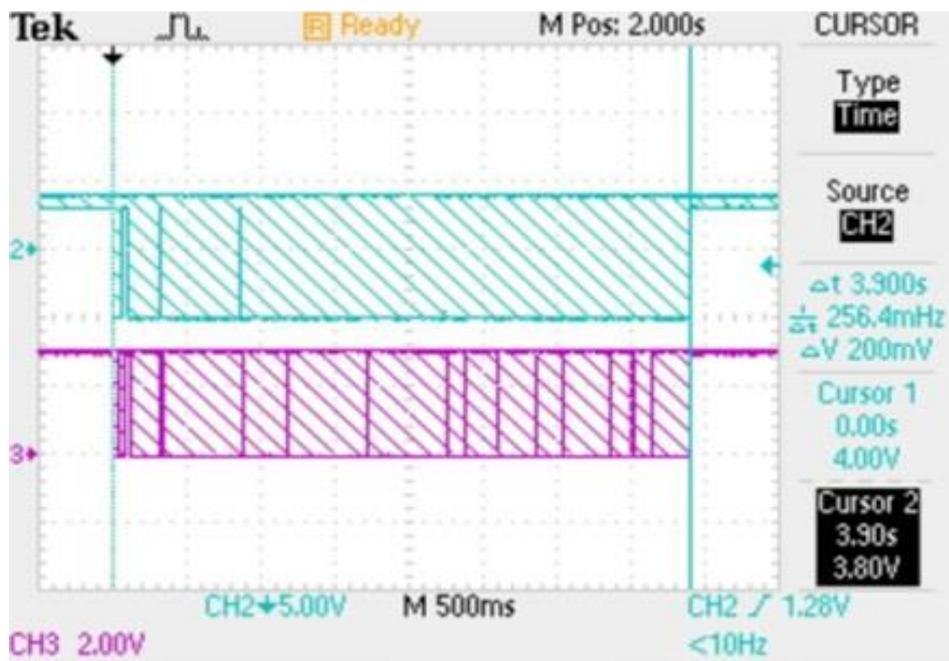


Figura 5.8. Medición de throughput en Xbee punto a punto.

5.4.3. Seguridad

En el caso de la seguridad y resguardo de la información, el módulo Xbee tiene cifrado con AES 128-bits. La clave se ingresa manualmente en cada módulo por medio del software X-CTU y no es posible leerla, sólo ingresarla, en realidad, la clave permanece a la vista una vez que ha sido ingresada y se puede operar normalmente; no se muestra la clave al leer los parámetros del módulo, por lo que no es posible extraerla. De este modo, sólo tiene acceso a la clave quien la ingresa al módulo.

Una vez habilitado el modo seguro, sólo se transmiten y reciben tramas seguras. La clave es la misma para todos los módulos que intervienen en la comunicación. El parámetro para habilitar la seguridad es EE (*Encryption Enable*), y la clave se aloja en el parámetro KY. Un detalle a tener en cuenta es que la latencia es algo mayor con seguridad habilitada. Lo cual incrementa aproximadamente al doble la latencia en la transmisión de caracteres.

5.5. PROCESO DE TRANSMISIÓN DEL XBEE

Cuando no recibe ni transmite datos, el módulo RF está en modo inactivo (IDLE). El módulo cambia a los otros modos de operación bajo las siguientes condiciones:

- Modo de transmisión (los datos en serie en el búfer de recepción están listos para ser empaquetados).
- Modo de recepción (se reciben datos de RF válidos a través de la antena).
- Modo de suspensión (solo dispositivos finales).
- Modo de comando (se emite la secuencia del modo de comando).

Cuando se reciben datos en serie y están listos para la paquetización, el módulo RF saldrá del modo inactivo e intenta transmitir los datos, por lo que entra en modo de transmisión. La dirección de destino determina qué módulo recibe los datos. Antes de transmitir los datos, el módulo garantiza que una dirección de red de 16 bits y una ruta al destino se ha establecido.

Si no se conoce la dirección de red de 16 bits de destino, se realiza el descubrimiento de la dirección de red. Si una ruta no es conocida, el descubrimiento de la ruta da lugar para establecer una ruta a su destino. Si un módulo con una dirección de red coincidente no se descubre, el paquete se descarta. Los datos serán transmitidos una vez que se establece una ruta. Si el descubrimiento de ruta no puede establecer una ruta, el paquete se descarta.

Cuando los datos se transmiten de un módulo a otro, se transmite un reconocimiento de nivel de red a través de la ruta establecida al origen. Este paquete de confirmación indica a la fuente que el destino recibió el paquete de datos. Si no se recibe un acuse de recibo de la red, el origen vuelve a transmitir los datos. El ciclo que lleva el proceso de transmisión del sistema se desglosa en el diagrama de flujo de la Figura 5.9 donde se muestra la secuencia del modo de transmisión.

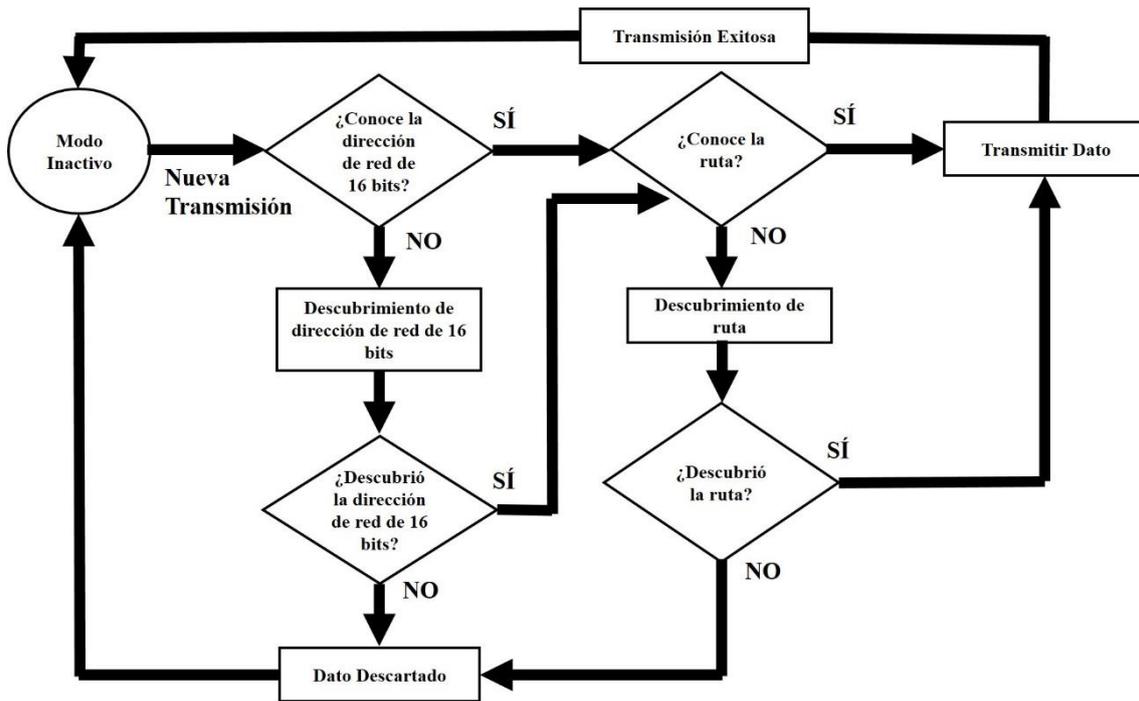


Figura 5.9. Diagrama de flujo para secuencia de transmisión.

5.6. CONEXIÓN DEL SISTEMA

Ahora bien, después de probar que realmente los módulos están listos para el enlace, se procede a conectar el equipo del circuito Transmisor con los sensores, donde se toma el valor del bus de C.D. de la MG aislada. Se conecta el circuito Receptor a través del puerto USB a la computadora. Al abrir la interfaz de Labview se habilita el puerto donde se recibe la información con ayuda de VISA y se accesa a la interfaz creada con el algoritmo antes mencionado para la medición visual y gráfica de las variables de interés.

Entre el Transmisor y Receptor no existen nodos intermedios, la distancia entre los puntos de conexión es a 10m de separación. Uno de los factores importantes en la transmisión de datos son las fuentes de energía que alimentan al sistema.

En este proyecto se utilizan dos fuentes de voltaje para la alimentación de la lógica TTL/CMOS de los circuitos integrados como el MAX232 y el ATMEGA328P, al considerar que los módulos Xbee se alimentan a 3.3V se emplean dos reguladores 7833 y 7805 para repartir el suministro de energía en cada dispositivo.

Todo esto independientemente de la fuente que simula a la MG de C.D. En la Tabla 5.4 se muestran los valores de voltaje fijo utilizado en las fuentes de alimentación del sistema.

Tabla 5.5. Voltajes empleados en la alimentación del sistema.

CONCENTRADO DE VOLTAJES DEL SISTEMA		
SUBSISTEMA		VALOR VCC
TRANSMISOR	MCU - XBEE	+12V
	SENSOR I	+5V
RECEPTOR	XBEE	+3.3V
	MAX232	+5V
MICROGRID		+24V

En condiciones iniciales el bus de C.D. entrega 24 V puros sin conexión de carga, por lo que, no se está consumiendo energía ni se genera corriente eléctrica. En la imagen de la Figura 5.10 se observa la medición de la fuente con el instrumento patrón y en la Figura 5.11 la medición con el osciloscopio.

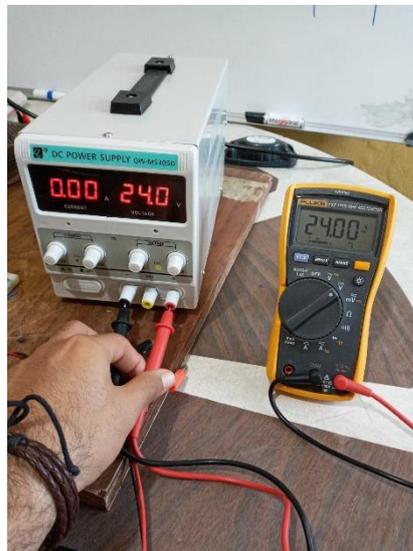


Figura 5.10. Medición de Bus de C.D. 24V

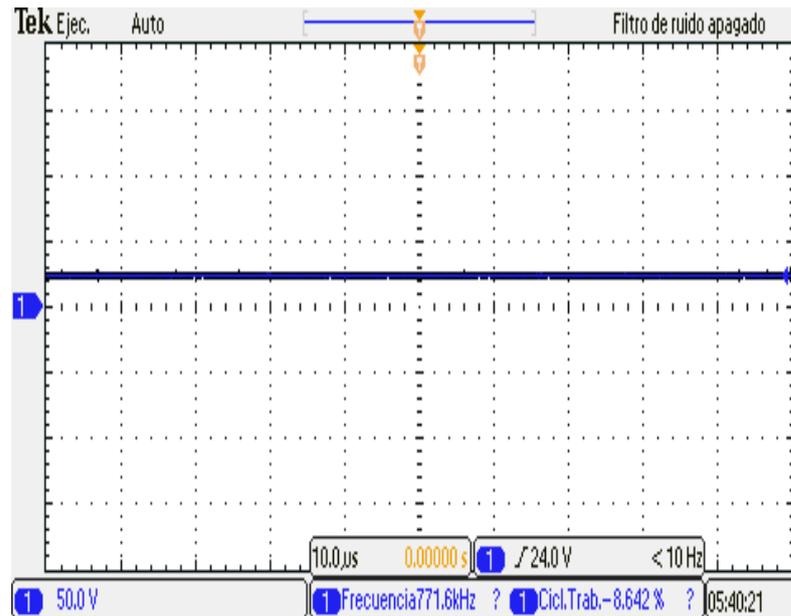


Figura 5.11. Forma de onda de Bus de C.D. 24V.

Con el fin de comprobar las mediciones experimentales se consideran tres posibles resultados, los cuales se subdividen en el tamaño de la carga, es decir, del valor de la resistencia variable. Para clasificar dichas mediciones se toma el valor más alto, el intermedio y el más bajo para la potencia consumida en el sistema de acuerdo a la Tabla 5.1.

La primera medición de prueba se realiza con el valor de carga a 35Ω como se observa en la Figura 5.12, se conectaron los sensores I y V a la resistencia variable, se enciende el circuito Transmisor y se reconocen las variables en el display, enseguida ya conectado el receptor a la computadora se empezaron a registrar los valores que envía el Xbee en la conexión punto a punto.

En la Figura 5.13 se muestra la medición en el display LCD. En la figura 5.14 se observa en la interfaz gráfica de Labview el muestreo de los valores para un tiempo de 100 s. En ambas figuras se muestran los resultados de la primera prueba realizada con carga al bus de C.D. de la MG para monitorear las variables de interés.



Figura 5.12. Valor de carga baja 35Ω .

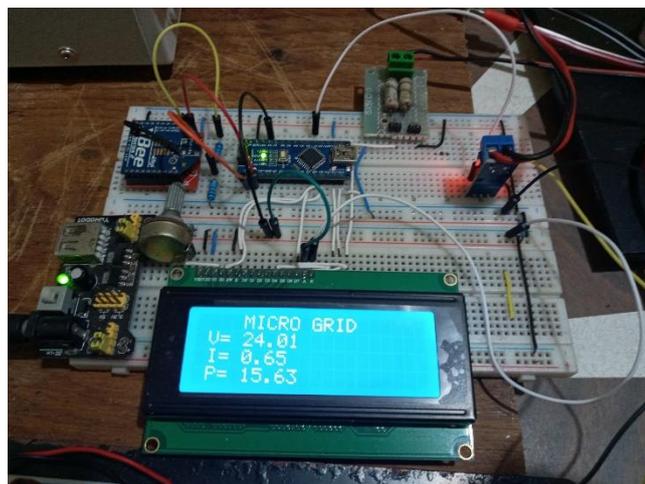


Figura 5.13. Medición de carga a 35Ω con sensores.



Figura 5.14. Registro de variables en interfaz gráfica con 35Ω .

Al realizar la comprobación del sistema se lleva a cabo con las gráficas en operación que están funcionando correctamente. La información obtenida se almacena y se grafica en la interfaz de usuario para observar el comportamiento cuando se añade carga al sistema de alimentación y así ver el comportamiento del voltaje y la corriente.

Se observa que el registro de las variables coincide en un 90 % del valor que se obtuvo con el instrumento patrón. La transmisión de información fluctuó en un lapso de tiempo sincronizado sin mayor retardo del propuesto en un inicio.

La siguiente medición de prueba se toma como valor intermedio con la resistencia de $20\ \Omega$, la cual se muestra en la Figura 5.15. La conexión del sistema de adquisición entrega los valores desplegados por el display LCD mostrada en la Figura 5.16. En la figura 5.17 se observa la interfaz gráfica con un muestreo de los valores en un lapso de 60 s.



Figura 5.15. Valor de carga intermedia 20Ω .

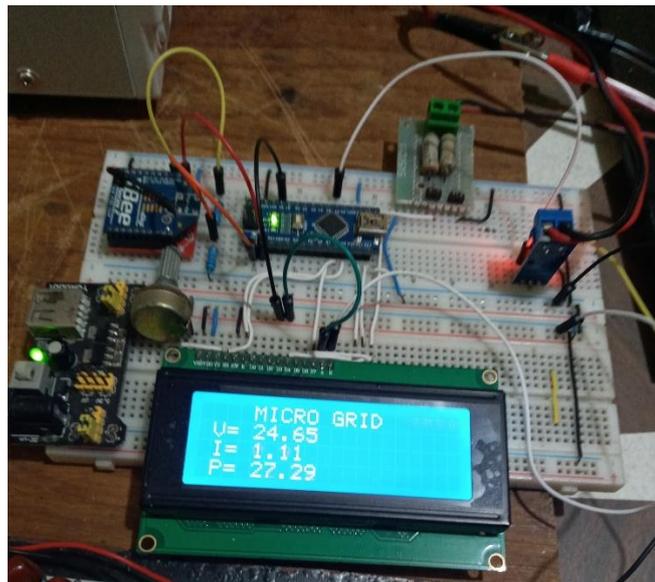


Figura 5.16. Medición de carga a 20Ω con sensores.

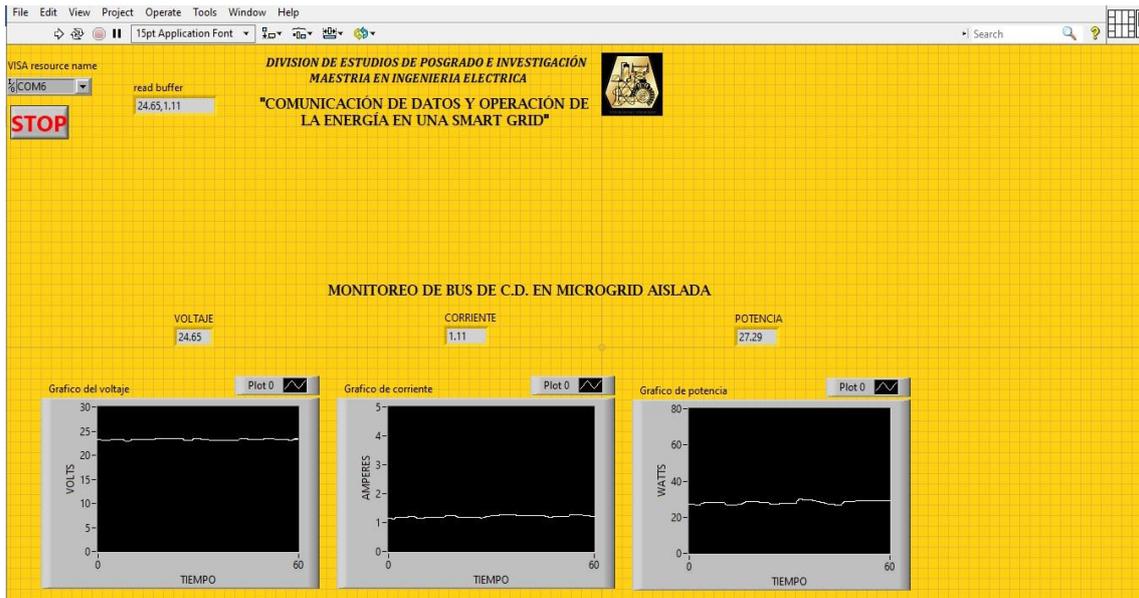


Figura 5.17. Registro de variables en interfaz gráfica con 20Ω .

La última prueba se realiza con el valor de resistencia a 10Ω para comprobar el consumo de energía que se genera en el bus de C.D., el valor de ajuste se muestra en la Figura 5.18. Enseguida se conecta el sistema transmisor y se observa la medición de variables en el display LCD referido en la Figura 5.19. El proceso de transmisión comienza a generarse y se verifica en la interfaz gráfica de usuario que está en la Figura 5.20.



Figura 5.18. Valor de carga alta 10Ω .

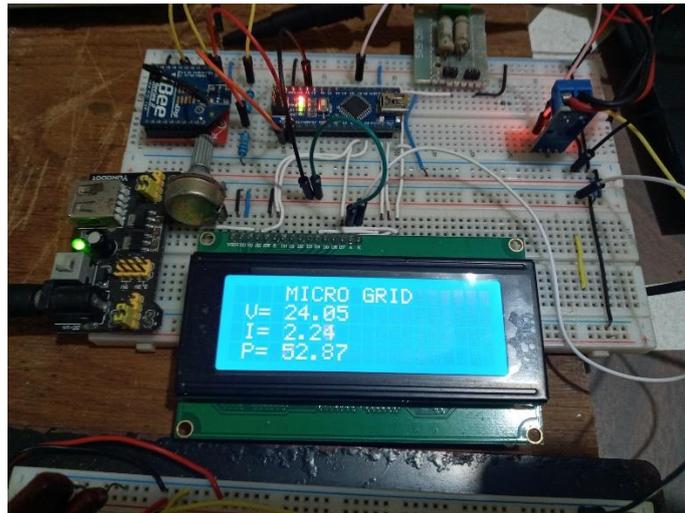


Figura 5.19. Medición de carga a 10Ω con sensores.

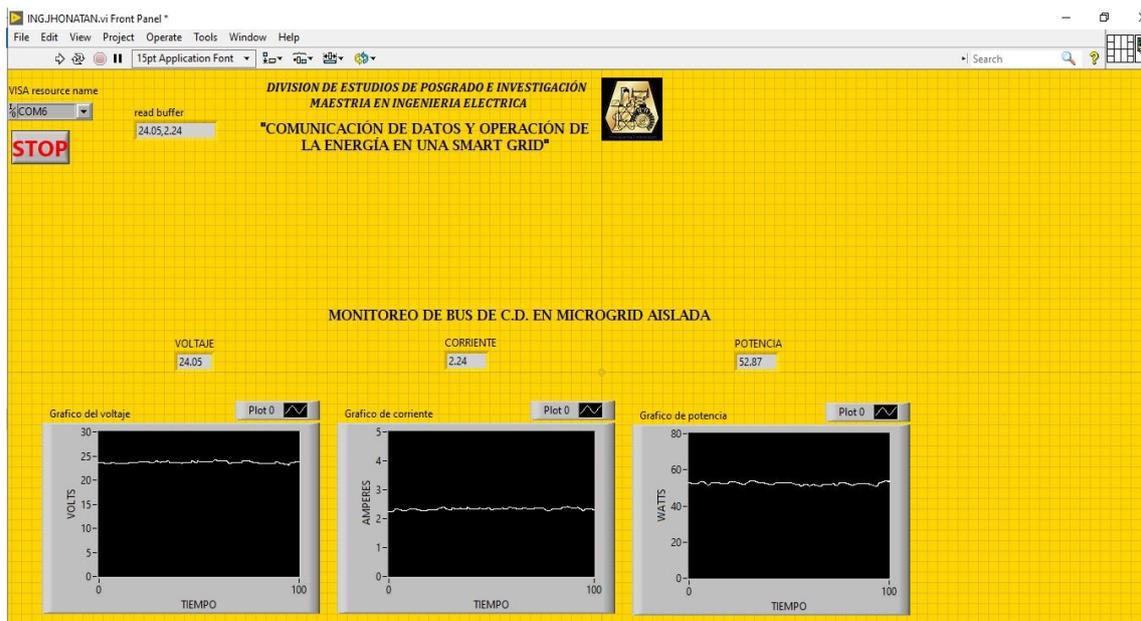


Figura 5.20. Registro de variables en interfaz gráfica con 10Ω .

El modo de adquisición de datos es manual ya que el usuario lo debe seleccionar, a partir de la habilitación del puerto serie se establece la comunicación con el sistema de interfaz de usuario para su representación y graficación. Se programó un modo de adquisición automático, donde el usuario puede configurar el día, la hora y la cantidad de muestras a tomar.

5.7. REGISTRO DE VARIABLES

Las mediciones realizadas se almacenan en un archivo en formato Excel para que puedan ser analizadas posteriormente. En la Figura 5.21 se presentan algunos datos guardados en formato xls donde se observa el tiempo de registro de las variables.

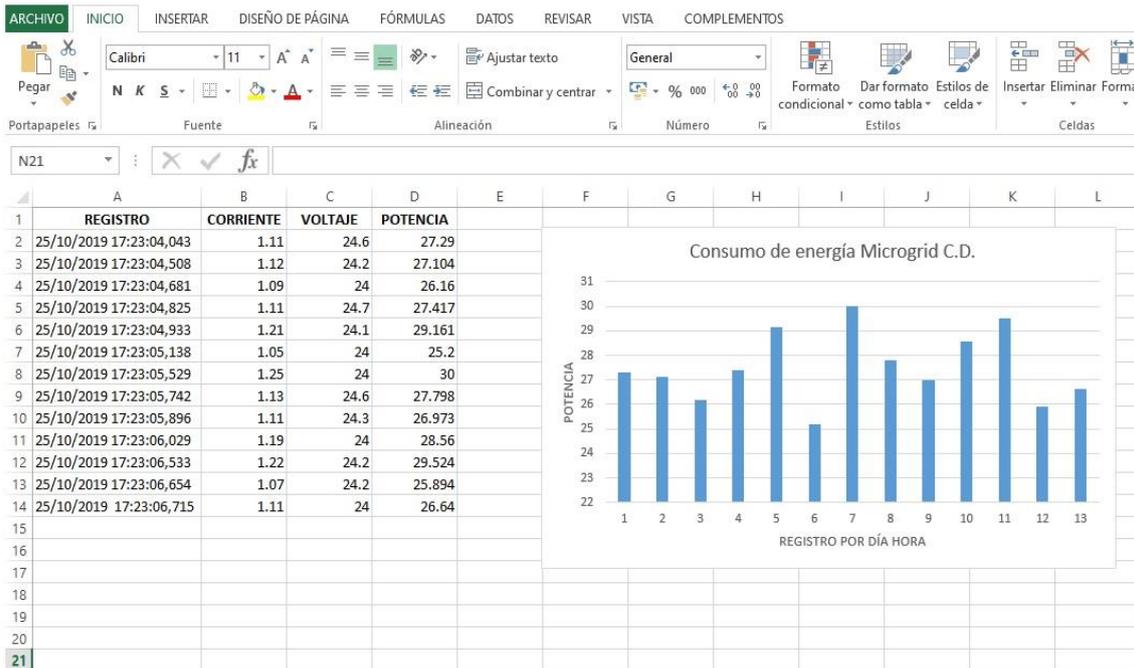


Figura 5.21. Registro de variables en Excel.

5.8. SERVIDOR WEB

Además del registro de las variables, como complemento el usuario puede realizar el monitoreo de las variables desde una página web en un navegador de Internet. En las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24 se observa la habilitación de la extensión HTML para tener acceso a la interfaz gráfica por medio de un servidor web.

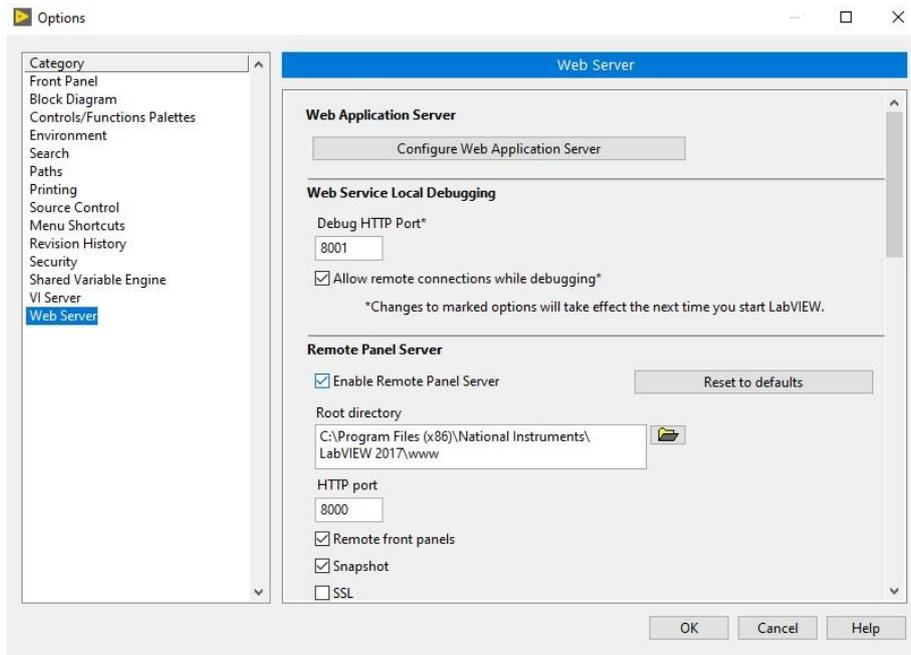


Figura 5.22. Herramienta para servidor web.

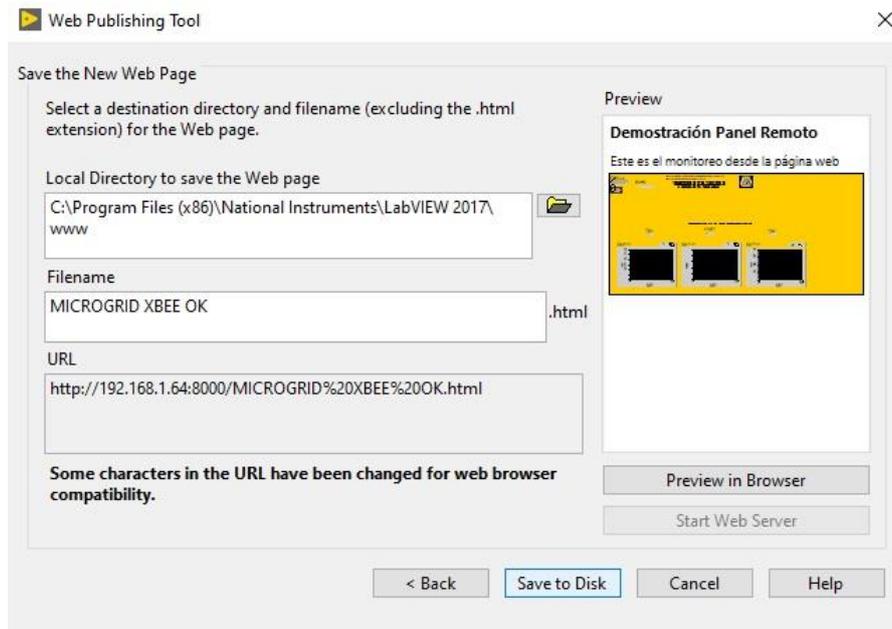


Figura 5.23. Herramienta para publicar la página web.



Demostración de panel remoto

Este es el monitoreo desde la página web

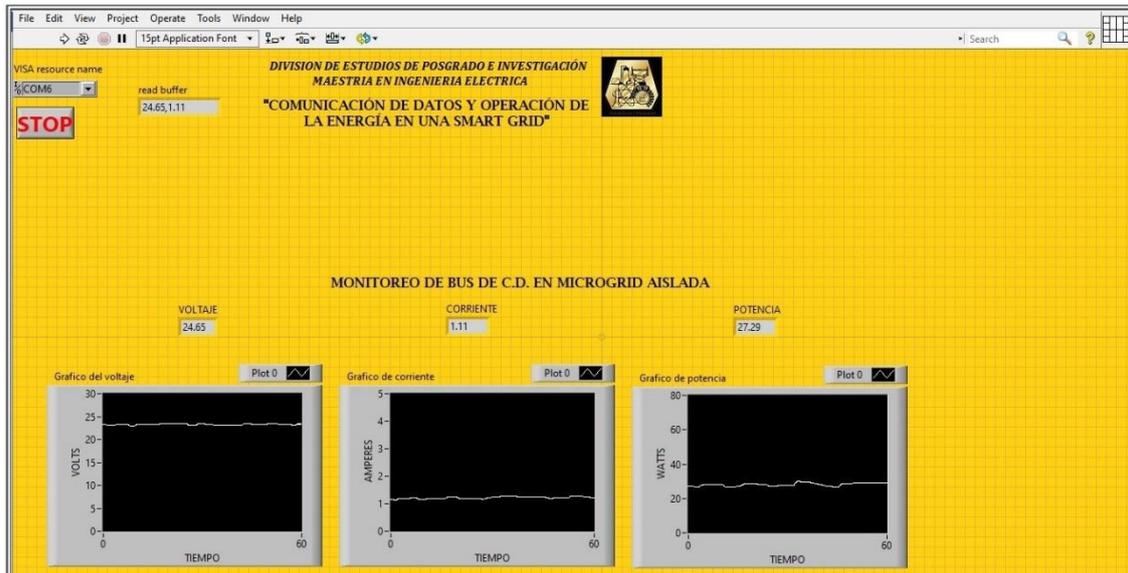


Figura 5.24. URL de panel remoto en la web.

5.9. APLICACIÓN FINAL

En aplicaciones reales en una MG de C.D. es indispensable llevar a cabo una coordinación efectiva para el correcto balance de energía, porque el peor de los escenarios se presenta cuando la demanda es máxima y la generación mínima; de ahí la gran importancia del monitoreo y la comunicación del subsistema.

Este sistema no solo optimiza el flujo de datos sino que es escalable y elimina parte del retardo en la entrega de datos. La solución en este trabajo de tesis es presentar alternativas de implementación y análisis técnico que disminuya la latencia y aumente la escalabilidad en la red inalámbrica a través de la arquitectura de red compuesta por elementos de bajo costo comercialmente encontrados en el mercado.

Finalmente en la Figuras 5.25 y 5.26 se muestra como evidencia el Transmisor y Receptor en su circuito terminado para concluir con las pruebas de enlace del sistema.

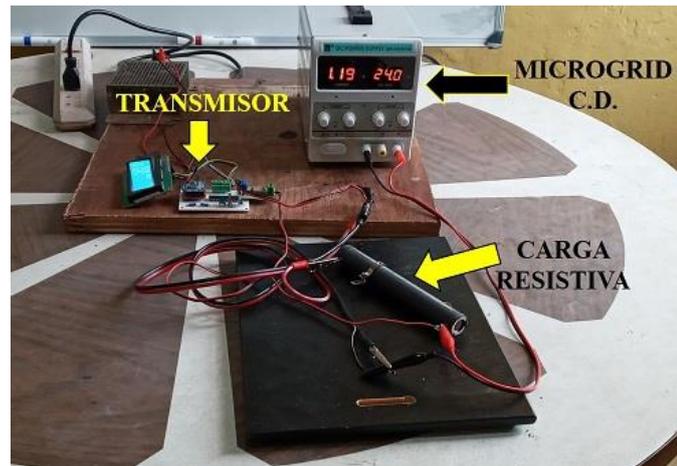


Figura 5.25. *Transmisor implementado.*



Figura 5.26. *Receptor implementado.*

Se concluye en este *Capítulo* que los dispositivos de comunicación inalámbrica Xbee son plataformas que poseen protocolos abiertos y de bajo consumo. El diseño de software es a través de plataformas de código abierto de tal manera que si se desea realizar una implementación en ambientes aplicados, no hay necesidad de preocuparse del tema del licenciamiento, también el diseño posee algoritmos con altos niveles de abstracción de tal manera que es entendible y claro. Se realizaron las pruebas correctamente y se tomaron los resultados fiables, con esto se respalda la hipótesis propuesta en el inicio de la investigación.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Para concluir con el presente trabajo, en este *Capítulo* se hace referencia a la importancia que tiene la investigación como proceso de aprendizaje, ya que posee una gama de características fundamentales que se unen de manera muy compacta para poder obtener la información y lograr el objetivo propuesto. También se dan las recomendaciones para trabajos futuros en pro de la mejora continua de la investigación, con el fin de ampliar el conocimiento científico y cumplir la meta a seguir con la consigna de ayudar a la toma de decisiones en una teoría que permita generalizar y resolver problemas semejantes.

6.1. CONCLUSIONES

Para este proyecto de investigación, se diseñó e implementó un sistema de comunicación inalámbrica a partir de módulos de RF que utilizan el protocolo Zigbee, para transmitir la información obtenida de fuentes distribuidas específicamente en un bus de C.D. simulando una MG de manera remota, es decir, entre dos puntos distantes. Se realizaron mediciones de las variables eléctricas con un instrumento patrón para tener una base específica y tener confiabilidad en los resultados.

Se utilizaron sensores de corriente y voltaje para la adquisición, mediante un MCU que permite a los dispositivos de comunicación inalámbrica operen con funcionalidad para que puedan transportar los datos al destinatario, extendiendo el alcance de la red. Debido al espacio para la toma de mediciones y las condiciones del área, se optó por simular una plataforma MG con un bus de C.D. de 24 V creando una alternativa para la red de GD en C.D. (paneles solares), con el fin de evitar intermitencias en las lecturas debido a la naturaleza de las celdas fotovoltaicas, la radiación solar y las características ambientales del terreno.

Una vez que se obtuvieron los datos de voltaje, corriente y potencia; se procedió a implementar la interfaz gráfica virtual con el software Labview donde se mostraron los resultados esperados de medición de cada una de las variables. El registro de datos se mostró en gráficas y también se incluyó en tablas de Excel para facilitar su análisis. Además, por medio de una herramienta integrada en el software, se procedió a la exportación de datos en una página web a través del protocolo TCP/IP de internet donde cualquier usuario con la contraseña de acceso era capaz de supervisar el estado de las variables de medición.

Este proyecto logró la transmisión de información de forma exitosa en el caso experimental, aunque esta investigación partió del estudio de las redes inalámbricas, el circuito desarrollado se podría utilizar con cualquier sistema de energía, por lo que, este sistema tiene la posibilidad de trabajar con diversos tipos de fuentes distribuidas. La distancia de transmisión está en proporción al tipo de dispositivo que se utiliza porque cada modelo varía en potencia para el alcance de la red.

6.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Con base en los conceptos descritos en esta tesis se pueden considerar las alternativas para extender la red y realizar pruebas en el entorno. Cabe señalar que este trabajo es la primera etapa de un proyecto más ambicioso y complejo, pero la solidez de su desarrollo proporciona la plataforma de comunicación de una red inalámbrica de sensores capaz de capturar, recopilar y concentrar la información requerida para el monitoreo eficaz de fuentes distribuidas. Con el fin de mejorar y progresar en los resultados obtenidos se mencionan algunas de las posibles líneas de investigación para trabajos futuros:

- **Sensores.** Una vez que se establece la plataforma de comunicación de red, se puede proceder al desarrollo e incorporación de elementos sensores con un valor de impedancia mínimo para evitar errores en el conteo del ADC y así obtener una mejor resolución de la medición de la variable deseada en un entorno más real.
- **Energía.** Se propone experimentar con diversas fuentes distribuidas de energía así como diferentes tipos de convertidores estáticos de potencia, en razón del funcionamiento del sistema. También un aspecto muy importante en la operación de las redes de sensores es el del suministro de energía a los nodos remotos. Se requiere desarrollar e implementar sistemas que capturen energía a partir del medio en que operan, en este caso de las mismas fuentes que son monitoreadas, para garantizar la autonomía del sistema y hacerlo sustentable. Otra sugerencia es hacer uso de reguladores de voltaje para evitar el ruido en la alimentación del módulo de RF.
- **Escalabilidad.** Como sugerencia se plantea el uso de una antena Yagui para obtener una mayor potencia en la ganancia de salida y así lograr una transmisión de mayor alcance de acuerdo a los intereses del usuario. Entonces la red se puede extender mediante la incorporación de más nodos remotos, y contando también con la evolución del protocolo Zigbee, será posible aumentar el alcance entre nodos de la red inalámbrica y por ende tener un mayor encadenamiento entre ellos, robusteciendo la misma.

- **Inteligencia.** Una de las áreas con más posibilidades de desarrollo es la que corresponde a la inteligencia de los sistemas de monitoreo. Las oportunidades que aquí se presentan están principalmente en el diseño de circuitos y software que integren la información obtenida por la red a los sistemas de supervisión y control de los equipos eléctricos, por lo que el investigador puede realizar pruebas con diferentes plataformas de adquisición de datos y con varios instrumentos.
- **Interfaz web.** Es necesario el desarrollo de la interfaz de administración web de acuerdo a la escalabilidad de la red. No solo se podrá monitorear y solicitar información de estado en los nodos remotos, sino también tener el control de los mismos.

6.3. PUBLICACIONES Y PONENCIAS

- Congreso Internacional de Sistemas y Tecnologías de la Información (EMPRÉNDETE) Monterrey, Nuevo León. 16, 17 y 18 de Mayo de 2019. Artículo: “Desarrollo de un sistema inalámbrico para adquisición y monitoreo de datos en una Smart grid”.

Referencias

- [1] Michael J Hyland, PE “Microgrids: Back to the Future?” American Public Power Association, 2019
- [2] ESTA International, LLC. “*Smart Grid Regulatory Framework for Mexico*”, ESTA International, 2018
- [3] Secretaría de Energía. “Programa de Redes Eléctricas Inteligentes”, CDMX, 2016.
- [4] Efthymiou C. and Kalogridis G., “*Smart Grid Privacy via Anonymization of Smart Metering Data*,” 2010 First IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun., pp. 238–243, 2010.
- [5] Güngör et al., “*Smart grid technologies: Communication technologies and standards*,” IEEE Trans. Ind. Informatics, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2011.
- [6] Lara, M. “*Ahorro de energía en maquinaria e instalaciones*”, CDMX, 2011.
- [7] Inga, E. “*Redes de Comunicación en Smart Grid*”, INGENIUS N° 7 (enero/junio), pp 36-55., 2018.
- [8] Gaona, E. and Trujillo L. “Communication Infrastructure in Microgrid”, *Redes de Ingeniería* , vol. 5, pp. 28-38, 2018.
- [9] J. M. Guerrero, S. Member, J. C. Vásquez, J. Matas, M. Castilla, and L. G. De Vicuña, “Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions* ,vol. 56, no. 3, pp. 726–736, 2009.
- [10] A. Engler, O. Osika, M. Barnes, N. Jenkins, and A. Arulampalam, “DB1 Local Micro Source controller strategies and algorithms,” *Eur. Comm. Brussels, Belgium.[Online]. Available: www.microgrids.eu/micro2000*, 2004.
- [11] S. Safdar, B. Hamdaoui, E. Cotilla-Sanchez, and M. Guizani, “A survey on communication infrastructure for micro-grids,” presented at the *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2013.
- [12] S. Anand, B. G. Fernandes, “Optimal voltage level for DC microgrids”. in Proc. 36th IEEE IECON, Noviembre 2010. 3034–3039 pp.
- [13] S. Anand, B. G. Fernandes, "Reduced-Order Model and Stability Analysis of Low-Voltage DC Microgrid". *Industrial Electronics, IEEE*. Vol. 60. No. 11. Noviembre 2013. 5040, 5049 pp.

- [14] J. Zhou, Y. Chen, M. Huang, Y. Tong, "Study on Energy Control Strategies in Microgrid-Modeling and Simulation". Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific. Marzo 2012. 1, 4, 27-29 pp.
- [15] K. Rouzbehi, A. Miranian, A. Luna, P. Rodriguez, "A generalized voltage droop strategy for control of multi-terminal DC grids". Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE. Septiembre 2013. 59, 64, 15-19 pp
- [16] S. Sikkabut, N. H. Fuengwarodsakul, P. Sethakul, P. Thounthong, S. Pierfederici, M. Hinaje, B. Nahid-Mobarakeh, B. Davat, "Control strategy of solar/wind energy power plant with supercapacitor energy storage for smart DC microgrid". Power Electronics and Drive Systems (PEDS), IEEE 10th International Conference. Abril 2013. 1213, 1218, 22-25 pp.
- [17] R. Mao, Y. Xu, H. Li, C. Science, and O. Ridge, "Wireless Communication for Controlling Microgrids: Co-simulation and Performance Evaluation," no. Mccc, 2013.
- [18] Z. Fan, P. Kulkarni, S. Gormus, and C. Efthymiou, "Smart grid communications: Overview of research challenges, solutions, and standardization activities," *Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 21–38, 2012.
- [19] K. De Craemer and G. Deconinck, "Analysis of state-of-the-art smart metering communication standards," presented at the *Proceedings of the 5th Young Researchers Symposium*, 2010.
- [20] N. Saputro, K. Akkaya, and S. Uludag, "A survey of routing protocols for smart grid communications," *Computer Networks*, vol. 56, no. 11, pp. 2742–2771, Jul. 2012.
- [21] S. Bukowski and S. Ranade, "Communication network requirements for the Smart Grid and a path for an IP based protocol for customer driven microgrids," presented at the *Energytech, 2012 IEEE*, 2012.
- [22] M. B. and G. M., "Ahorro energético y Telecomunicaciones, Convergencia con la Red Eléctrica y Desarrollo Sostenible," *LM Data Communications S.A. Spain*, no. 1, Marzo - 2007.
- [22] Caprile, Sergio R.. *Equisbí: Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4 (Spanish Edition)*, 2017.
- [23] "Zigbee Alliance," *Smart Energy 2. [Online]. Available:* <http://www.zigbee.org/Standards/ZigBeeSmartEnergy/Version20Documents.aspx>
- [24] W. Wang, Y. Xu, and M. Khanna, "A survey on the communication architectures in smart grid," *Comput. Networks*, vol. 55, no. 15, pp. 3604–3629, Oct. 2011.
- [25] D. E. Lopez and W. D. Rodriguez, "Acondicionamiento de un algoritmo de encaminamiento al sistema de comunicaciones en una microrred," 2015.
- [26] W. Stallings, *Comunicaciones y Redes de Computadores*, Séptima. Pearson Prentice Hall, 2004.