

**SISTEMA ELECTRÓNICO CON TECNOLOGÍA INALÁMBRICA ZIGBEE PARA
EL ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS ELECTRODOMÉSTICOS, LA
VISUALIZACIÓN Y MEDICIÓN DE LA ENERGÍA CONSUMIDA.**

**JUAN ANDRÉS CASTAÑO GONZÁLEZ
DAVID ANDRÉS TORO GARZÓN
JUAN PABLO PALACIO GUZMÁN**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA DE ENVIGADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ENVIGADO
2010**

**SISTEMA ELECTRÓNICO CON TECNOLOGÍA INALÁMBRICA ZIGBEE PARA
EL ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS ELECTRODOMÉSTICOS, LA
VISUALIZACIÓN Y MEDICIÓN DE LA ENERGÍA CONSUMIDA.**

**JUAN ANDRÉS CASTAÑO GONZÁLEZ
DAVID ANDRÉS TORO GARZÓN
JUAN PABLO PALACIO GUZMÁN**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electrónico

Asesor

Gerardo Zapata Jiménez

Ingeniero Electrónico

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA DE ENVIGADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ENVIGADO
2010**

Nota: _____

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por darme la perseverancia para terminar mi carrera, a mis padres en especial a mi madre por brindarme todo su apoyo y darme muchos ánimos, a todos mis hermanos por creer en mí durante todo este tiempo, a mis compañeros que junto a ellos recorrí este duro camino, y a todas las personas que estuvieron a mi lado y me ayudaron de uno u otra forma alcanzar esta meta. De corazón gracias.

Juan Andrés Castaño González

Primero que todo este triunfo se lo dedico a un amigo que valoro y estimo mucho y es Dios, que si no hubiera sido por sus muchas ayudas no hubiera llegado donde estoy el día de hoy y convertirme en la persona que soy. A mis papas igualmente les hago un reconocimiento muy grande porque me acompañaron todo este tiempo en mí batallar para salir adelante. A toda mi familia por los valores que han inculcado en mí, como el ejemplo de lucha y compromiso con los objetivos que nos trazamos en nuestra vida, sabiendo que un triunfo que se goza y se valora es aquel que es más complicado, pero al final el reconocimiento se hace visible. A todos los compañeros y demás personas que hicieron parte de este proceso formativo, con los cuales se vivieron momentos de triunfo y de derrota, pero que lo más importante es que todos estuvimos ahí para ayudarnos.

David Andrés Toro Garzón

Dedico este trabajo primeramente a Dios por darme la oportunidad de cumplir con mis metas a lo largo de toda mi carrera. A mis padres y familiares que sin su apoyo no hubiera sido posible cumplir con este sueño, por haber estado a mi lado en todos los momentos de tristeza y en los de felicidad durante todo mi proceso de formación, por esos valores que desde pequeño me inculcaron y me enseñaron con su ejemplo y me llevaron a ser la persona que hoy en día soy y que me servirán para ser mejor cada día. A mi novia por darme su apoyo incondicional durante este proceso, a mis compañeros con los que compartí la gran parte de mi proceso de formación, por los buenos y los malos momentos que pasamos y el apoyo que siempre nos dimos.

Juan pablo Palacio Guzmán

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecemos a Dios por permitirnos cumplir con la meta que nos trazamos el primer día de universidad, y por qué nos dio la fortaleza para luchar en momentos de dificultad y la humildad para vivir los momentos de felicidad.

Al profesor Gerardo Zapata Jiménez, por su gran apoyo y colaboración con la asesoría del proyecto de grado, sumándole la experiencia y el conocimiento que nos brindó durante los últimos semestres de la carrera.

Queremos dar un agradecimiento y un reconocimiento a la excelente labor del docente Durlandy Chaverra Muñoz por todo lo que aportó a nuestra formación personal y académica, no solo como docente sino como una excelente persona y con una gran calidad humana.

A todos los profesores que de cierta manera aportaron a nuestra vida personal y profesional para ser mejores cada día, teniendo más actitud para luchar por nuestros ideales. Y teniendo como experiencia que de los buenos momentos se aprende y se goza y de los que dicen ser malos queda la madurez y el conocimiento para corregirnos y ser mejores.

Adicional, es meritorio dar gracias a todos aquellos que en con su aporte nos brindaron su tiempo y espacio para que este sueño se convirtiera en una realidad.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	25
1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO	26
1.1 PLANTEAMIENTO DE LA NECESIDAD	26
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	27
1.3 OBJETIVOS	27
1.3.1 Objetivo general	27
1.3.2 Objetivos específicos	27
1.4 JUSTIFICACIÓN	27
1.5 DISEÑO METODOLÓGICO	29
1.5.1 Estrategias Metodológicas	29
1.5.2 Modalidad del Trabajo de Grado	30
1.5.3 Método de Investigación Aplicado	30
1.6 CRONOGRAMA	31
1.7 PRESUPUESTO	32
2. PROTOCOLO ZIGBEE Y MEDIDORES DE ENERGÍA	37
2.1 DOMÓTICA	37
2.2 ANTECEDENTES	37
2.3 SISTEMAS DOMÓTICOS	39
2.3.1 Arquitectura	40
2.3.1.1 Arquitectura Centralizada	40

2.3.1.2 Arquitectura Descentralizada	40
2.3.1.3 Arquitectura Distribuida	41
2.3.2 Elección del Sistema de Domótica	42
2.4 PROTOCOLO ZIGBEE	42
2.4.1 Características del protocolo Zigbee.	42
2.4.2 Pila del protocolo ZIGBEE	43
2.4.2.1 Capa de aplicación	44
2.4.2.2 Capa de red (NWK)	44
2.4.2.3 Capa de acceso al medio (MAC)	46
2.4.2.4 Capa física	47
2.5 MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA	48
2.5.1 Principios de medición de la energía eléctrica	48
2.5.2 Clasificación de los medidores	48
2.5.2.1 Medidores de inducción (Electrónicos)	48
2.5.2.2 Medidores estáticos (Electrónicos)	48
2.5.2.3 Medidores de energía inteligentes (Smart meter)	49
3. DISEÑO DEL MEDIDOR DE ENERGÍA	50
3.1 MEDICIÓN DE LA POTENCIA	51
3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE MEDIDA	53
3.2.1 Transductores de señales	53
3.2.1.1 Transductor de corriente	53
3.2.1.2 Transductor de voltaje	55
3.2.2 Circuitos de medida de señal	56

3.2.2.1 Circuito para la medición de corriente	56
3.2.2.2 Circuito para la medición de voltaje	57
3.2.3 Acondicionamiento de la señal	58
3.3 ELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR MSP430F4 PARA LA MEDICIÓN	59
3.3.1 Adquisición de datos	60
3.3.1.1 Periodo de muestreo	60
3.3.1.2 Escala de la medida	60
3.3.2 Especificaciones del sistema	62
3.3.2.1 Voltaje máxima medible	62
3.3.2.2 Corriente máxima soportada	62
3.3.2.3 Especificaciones de frecuencia	63
3.3.2.4 Especificaciones de potencia	63
3.3.3 Procesamiento de datos	64
3.3.3.1 Calculo de los valores RMS de voltaje y corriente	64
3.3.3.2 Calculo del factor de escala	64
3.3.3.3 Calculo de la potencia activa	65
3.3.3.4 Cálculo de la potencia aparente	66
3.3.3.5 Cálculo de la potencia reactiva	67
3.3.3.6 Cálculo del factor de potencia	67
3.3.3.7 Calculo de la energía	67
3.3.3.8 Cálculo de la frecuencia	68
3.3.4 Software de programación del integrado	68

3.4 SISTEMA DE ENCENDIDO Y APAGADO	69
3.4.1 Circuito de potencia	69
3.4.1.1 Disipador térmico	71
3.4.1.2 Diseño del disipador de calor	74
3.4.2 Comunicación con el módulo Zigbee	76
3.4.2.1 Comunicaciones RS232	76
3.4.2.2 Características de la comunicación	76
3.5 FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL DISPOSITIVO	77
3.5.1 Requisitos para el diseño de la fuente	77
3.5.2 Fuente de alimentación con transformador	78
3.5.2.1 Cálculo de la corriente necesaria de entrada	78
3.5.2.2 Cálculo del transformador T1	79
3.5.2.3 Cálculo de los puentes rectificadores (P1 y P2)	80
3.5.2.4 Cálculo de los condensadores de filtro C1 y C4	81
3.5.2.5 Cálculo del regulador de tensión de 3.3V	82
4. EL ESTÁNDAR ZIGBEE	84
4.1 ¿QUÉ ES ZIGBEE?	84
4.2 ARQUITECTURA ZIGBEE	86
4.2.1 Capas de red	87
4.2.2 Capa física	88
4.2.3 Capa de enlace de datos (data link layer, DLL)	90
4.3 Formato general de tramas MAC	91
4.3.1 La estructura de las súpertramas	92

4.3.2 Otras características MAC	93
4.4 CANALIZACIÓN	94
4.5 MODULACIÓN	95
4.6 SENSIBILIDAD Y RANGO	96
4.7 INTERFERENCIA DE Y PARA OTROS DISPOSITIVOS	97
5. PROGRAMACIÓN, PLANOS Y DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DE VISUALIZACIÓN	98
5.1 COMPARACIÓN DE DIFERENTES DISPOSITIVOS ZIGBEE	99
5.2 CONTENIDO Y DESCRIPCIÓN DEL KIT CC2530ZDK	101
5.3 MEDIDOR DE LA ENERGÍA	101
5.4 PROGRAMACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS	103
5.4.1 Funciones de inicialización del dispositivo	104
5.4.2 Funciones para la transmisión de paquetes TX	106
5.4.3 Funciones para la Recepción de paquetes RX	107
5.4.4 Funciones globales para la medición	108
5.4.5 Funciones específicas para realizar las medidas	109
5.4.6 Rutinas de interrupción	110
5.5 Interfaz gráfica en LABVIEW	111
5.5.1 Lenguaje de programación grafico	111
5.5.2 LabView	112
5.5.3 Manejo de puertos	113
5.5.4 Visualización y Almacenamiento de variables	115
5.5.4.1 Visualización	115

5.5.4.2 Toma de datos	117
5.5.5 Selector de opciones	118
5.5.5.1 Configuración del sistema	119
5.5.5.2 Cálculo de la potencia promedio consumida y valor en la moneda actual	120
5.5.5.3 Control de encendido y apagado de los electrodomésticos	122
5.6 ESQUEMAS FINALES DEL PROTOTIPO	123
5.6.1 Diagrama de la programación del prototipo	123
5.6.2 Esquema del circuito del medidor de energía	125
5.6.3 Esquema del circuito de la red Zigbee	126
6. CONCLUSIONES	127
7. RECOMENDACIONES	129
BIBLIOGRAFÍA	130
ANEXOS	134

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de arquitectura de Sistema Domótica Centralizada	40
Figura 2. Esquema de arquitectura de sistema domótica descentralizada	41
Figura 3. Esquema de arquitectura de sistema domótica distribuida	41
Figura 4. Pila del protocolo ZIGBEE	43
Figura 5. Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee	46
Figura 6. Diagrama en bloques del sistema de medición	50
Figura 7. Triangulo de potencia	52
Figura 8. Transductores de corriente con aislamiento	54
Figura 9. Transductores de corriente sin aislamiento	54
Figura 10. Transductores de voltaje	55
Figura 11. Configuración con transformador de corriente y divisor de voltaje resistivo	56
Figura 12. Circuito de medida de corriente	56
Figura 13. Circuito de medida de voltaje	57
Figura 14. Acondicionamiento de una señal	58
Figura 15. Circuito de filtrado anti-aliasing	59
Figura 16. Aproximación discreta de la integral	65
Figura 17. Entorno de programación del IAR Embedded Workbench KickStart	69
Figura 18. Circuito de potencia con TRIAC	70

Figura 19. Modelo eléctrico de la transferencia de calor en Un semiconductor	73
Figura 20. Disipador de calor S561/B/75	76
Figura 21. Diagrama de la fuente de alimentación	78
Figura 22. Rendimiento en función de la tensión de entrada del Microcontrolador	79
Figura 23. Dimensiones del transformador	80
Figura 24. Rectificadores superficiales	80
Figura 25. Filtrado de señal rectificadas	81
Figura 26. Circuito del regulador de voltaje	82
Figura 27. Logotipo Zigbee	84
Figura 28. Aplicaciones de ZigBee	85
Figura 29. Pila de protocolos (ZigBee Stack)	87
Figura 30. Topologías de red Zigbee	88
Figura 31. Relación del IEEE 802.15.4 con el sistema OSI	90
Figura 32. Forma general de la trama MAC	91
Figura 33. Estructura de las supertramas	93
Figura 34. Frecuencia de los canales IEEE 802.15.4	94
Figura 35. Estructura de canales del IEEE 802.15.4	95
Figura 36. Diseño esquemático del circuito impreso (PCB)	99
Figura 37. CC2530ZDK ZigBee Development Kit	100
Figura 38. Microcontrolador MSP430	102
Figura 39. Iniciación de la red	105
Figura 40. Trasmisiones de paquetes	106

Figura 41. Recepción de paquetes RX	108
Figura 42. Diagrama en bloques del sistema de Visualización	111
Figura 43. Herramientas de labview	113
Figura 44. Configuración de puerto bloque de diagramas	114
Figura 45. Configuración de puerto panel frontal	114
Figura 46. Herramienta de lectura de puerto	115
Figura 47. Elementos para procesar los datos y visualizar posteriormente	115
Figura 48. Elementos para visualizar los datos del puerto	116
Figura 49. Visualizador de datos en forma gráfica	116
Figura 50. Caso por “default”	117
Figura 51. Herramienta “ <i>Write to measurement file</i> ”	118
Figura 52. Selector de opciones	118
Figura 53. Seleccionador de opciones; interfaz usuario	119
Figura 54. Menú de Labview	120
Figura 55. Opción de “ <i>Tab</i> ”	120
Figura 56. Herramienta “ <i>Read</i> ”	121
Figura 57. Variable tipo “ <i>indicador</i> ”	121
Figura 58. Variable tipo “ <i>control</i> ”	121
Figura 59. Herramienta “ <i>Delete From Array</i> ”	122
Figura 60. Herramienta “ <i>Delete From Array</i> ”	122
Figura 61. Herramienta para enviar datos al dispositivo	123
Figura 62. Botones del panel de usuario	123
Figura 63. Panel Frontal o de Usuario	124

Figura 64. Diagrama de bloques o Panel de programación	124
Figura 65. Esquema recomendado para MSP430	125
Figura 66. Esquema recomendado para CC2530	126

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Cronograma de actividades	31
Tabla 2. Presupuesto global del trabajo de grado	32
Tabla 3. Descripción de los gastos de personal	32
Tabla 4. Descripción de materiales y suministros	33
Tabla 5. Descripción de las salidas de campo	34
Tabla 6. Descripción bibliografía	34
Tabla 7. Descripción equipos	35
Tabla 8. Descripción publicaciones	36
Tabla 9. Parámetros técnicos según las frecuencias	47
Tabla 10. Comparativa entre transductores de corriente	53
Tabla 11. Comparativa entre transductores de voltaje	55
Tabla 12. Características de la familia MSP430F4	60
Tabla 13. Características del IAR Embedded Workbench KickStart	69
Tabla 14. Ventajas e inconvenientes del TRIAC	70
Tabla 15. Analogía entre la ley de ohm y la propagación térmica	72
Tabla 16. Resistencias térmicas de aisladores	75
Tabla 17. Consumo de energía del circuito	77
Tabla 18. Propiedades del IEEE 802.15.4	89
Tabla 19. Parámetros de modulación	96
Tabla 20. Comparación de diferentes dispositivos Zigbee	100

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
ECUACIÓN 1.	48
ECUACIÓN 2.	51
ECUACIÓN 3.	51
ECUACIÓN 4.	51
ECUACIÓN 5.	51
ECUACIÓN 6.	51
ECUACIÓN 7.	51
ECUACIÓN 8.	52
ECUACIÓN 9.	52
ECUACIÓN 10.	52
ECUACIÓN 11.	57
ECUACIÓN 12.	57
ECUACIÓN 13.	57
ECUACIÓN 14.	57
ECUACIÓN 15.	58
ECUACIÓN 16.	58
ECUACIÓN 17.	60
ECUACIÓN 18.	60
ECUACIÓN 19.	60
ECUACIÓN 20.	60

ECUACIÓN 21.	60
ECUACIÓN 22.	61
ECUACIÓN 23.	61
ECUACIÓN 24.	61
ECUACIÓN 25.	61
ECUACIÓN 26.	61
ECUACIÓN 27.	61
ECUACIÓN 28.	61
ECUACIÓN 29.	61
ECUACIÓN 30.	61
ECUACIÓN 31.	62
ECUACIÓN 32.	62
ECUACIÓN 33.	62
ECUACIÓN 34.	62
ECUACIÓN 35.	63
ECUACIÓN 36.	63
ECUACIÓN 37.	63
ECUACIÓN 38.	63
ECUACIÓN 38.	63
ECUACIÓN 40.	63
ECUACIÓN 41.	63
ECUACIÓN 42.	64
ECUACIÓN 43.	64

ECUACIÓN 44.	64
ECUACIÓN 45.	64
ECUACIÓN 46.	65
ECUACIÓN 47.	65
ECUACIÓN 48.	65
ECUACIÓN 49.	65
ECUACIÓN 50.	66
ECUACIÓN 51.	66
ECUACIÓN 52.	66
ECUACIÓN 53.	66
ECUACIÓN 54.	66
ECUACIÓN 55.	66
ECUACIÓN 56.	67
ECUACIÓN 57.	67
ECUACIÓN 58.	67
ECUACIÓN 59.	68
ECUACIÓN 60.	68
ECUACIÓN 61.	68
ECUACIÓN 62.	68
ECUACIÓN 63.	73
ECUACIÓN 64.	73
ECUACIÓN 65.	75
ECUACIÓN 66.	75

ECUACIÓN 67.	75
ECUACIÓN 68.	75
ECUACIÓN 69.	75
ECUACIÓN 70.	78
ECUACIÓN 71.	78
ECUACIÓN 72.	78
ECUACIÓN 73.	79
ECUACIÓN 74.	79
ECUACIÓN 75.	80
ECUACIÓN 76.	80
ECUACIÓN 77.	81
ECUACIÓN 78.	81
ECUACIÓN 79.	81
ECUACIÓN 80.	81
ECUACIÓN 81.	82
ECUACIÓN 82.	83
ECUACIÓN 83.	83

GLOSARIO

ACKNOWLEDGEMENT (ACK): En comunicaciones, es un mensaje que se envía para confirmar que un mensaje o un conjunto de mensajes han llegado. Si el terminal de destino tiene capacidad para detectar errores, el significado de ACK es "ha llegado y además ha llegado correctamente", de lo contrario no envía una respuesta, esto indica al emisor que el mensaje no fue recibido por el receptor.

ADQUISICIÓN DE DATOS: Consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital).

ALIASING: Es el efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se les muestrea digitalmente. Cuando esto sucede, la señal original no puede ser reconstruida de forma unívoca a partir de la señal digital.

APLICACIÓN GRAFICA: Es un tipo de programa informático diseñado como herramienta para permitir a un usuario realizar uno o diversos tipos de trabajo.

CAD: Es un dispositivo electrónico capaz de convertir una entrada analógica de voltaje en un valor binario.

DIAGRAMA DE BLOQUES: Es el ambiente de programación que maneja el labview para desarrollar el código que cumplirá las funciones lógicas y aritméticas.

END DEVICE: Dispositivo final de una red Zigbee.

FACTOR DE POTENCIA: El factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo. El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo.

INTERFACE GRAFICA: Es un programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz.

LATENCIA: Es la suma de retardos temporales dentro de una red. Un retardo es producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red.

MICROCONTROLADOR: Un microcontrolador es un circuito integrado que nos ofrece las posibilidades de un pequeño computador. En su interior encontramos un procesador, memoria, y varios periféricos.

PANEL FRONTAL: Ambiente de programación de LabVIEW que permite ver en tiempo real como va a quedar organizada la visualización del usuario.

PROTOCOLOS: es la relación que se reconoce en la comunicación o la transferencia de información.

RMS: El valor RMS de una señal AC es el valor de tensión DC que deberíamos aplicar a una carga resistiva para que produzca la misma disipación de energía que si conectásemos esa misma carga resistiva a la señal AC en cuestión.

SUPERFRAMES: Consiste en dieciséis ranuras de la igual longitud, que se pueden dividir más a fondo en una parte activa y una parte inactiva, durante las cuales el coordinador puede entrar en el modo del ahorro de energía, no necesitando controlar su red.

TRANSCEIVER: Dispositivo que recibe la potencia de un sistema mecánico, electromagnético o acústico y lo transmite a otro, generalmente en forma distinta.

TRANSDUCTORES DE SEÑALES: Es un dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta a una magnitud física, propiedad o condición específica que se desea medir. Generalmente se trata de un dispositivo utilizado para convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica.

ZIGBEE STACK: Es la estructura del modelo OSI para el estándar 802.15.4.

RESUMEN

En este trabajo de grado se desarrolla el diseño de un medidor de energía integrado a una red inalámbrica Zigbee, que permite monitorear, visualizar y cuantificar la energía eléctrica consumida por los electrodomésticos que integren este dispositivo, y a su vez actuar sobre el electrodoméstico, encendiéndolo o apagándolo. Para esto se desarrolla una aplicación en el software LabView.

El dispositivo utiliza un microcontrolador de la familia MSP430 de la Texas instruments para la medición, siendo este el encargado del procesamiento y cuantificación de los datos. Para la red inalámbrica se utiliza el circuito integrado CC2530 el cual se encarga de la conformación de la red y el enrutamiento de la información hacia el computador.

ABSTRACT

In this paper develops the design level of integrated power meter to a Zigbee wireless network, which allows you to monitor, visualize and quantify the energy consumed by appliances that integrate this device, and in turn act on the appliance, lighting or turning it off. For this you develop an application in LabView software.

The device uses an MSP430 microcontroller family from Texas Instruments for the measurement, this being the responsibility of processing and data quantification. For wireless networking integrated circuit is used when CC2530 is responsible for the shaping of the network and routing information into the computer.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en el planeta la situación que se presenta sobre el calentamiento global y estudios que lo confirman, dan a entender que parte de su crecimiento desmedido se debe al excesivo consumismo humano que ha originado una crisis ambiental, por lo tanto es necesario tomar medidas para evitar una crisis.

En la actualidad los Smart Meter están marcando la diferencia con los medidores mecánicos, logran alertar al consumidor sobre la situación actual de su consumo energético de los electrodomésticos, incluso se puede lograr el control de estos, dando mayor eficiencia y confort a los usuarios.

Una de las ventajas de usar tecnologías nuevas es lograr un mejor rendimiento, generando menor pérdida energética, lo cual se traduce a un consumo mucho menor. Por esto también es necesario para el proyecto aplicar todas estas iniciativas de ahorro y confort para los usuarios, trayendo la tecnología inalámbrica Zigbee como una solución a la reducción de costos y aprovechar el innovador desarrollo de los Smart Meter para mejorar el consumo de energía.

Se pretende con este proyecto indicar a los usuarios de electrodomésticos cual es el consumo real de cada uno de ellos y que puedan llevar un control correctivo cuando vean que alguno este fallando. A su vez se pretende aplicar la tecnología Zigbee, que actualmente se usa en domótica para evitar cableados y debido a su bajo consumo utilizarlo para el ahorro de energía.

1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

1.1 PLANTEAMIENTO DE LA NECESIDAD

Un estudio realizado a nivel mundial por el ex Vicepresidente de los Estados Unidos Al Gore y conjunto de científicos, el cual fue publicación en un DVD nombrado "An Inconvenient Truth"¹, revelo que actualmente en el planeta se ha diagnosticado un problema de magnitud mundial, conocido como calentamiento global, debido a la emisión de gases que produce el efecto de invernadero, producto del ineficiente consumo de la energía eléctrica, la explotación inadecuada de derivados del petróleo y el mal uso de los recursos naturales.

En consecuencia a estos hechos muchas agencias a nivel mundial se han preocupado por buscar soluciones a este problema, aprovechando de forma más eficiente la energía eléctrica, tal como lo es el programa ENERGY STAR de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), han propuesto soluciones más eficientes en el uso de electrodomésticos ya que dicen que: "la casa promedio puede ser responsable por casi el doble de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero que un automóvil promedio."²

Según la encuesta "Investigación del mercado domótico colombiano" realizada por el grupo de investigación GIDATI de la Universidad Pontificia Bolivariana, entre ciudades puede variar el nivel de tenencia de los sistemas domóticos. Se observa que en Bogotá de un total de 350 muestras solo el 13%, seguido por Medellín de un total de 300 muestras, solo el 10% y Barranquilla con un total de muestras de 300, solo el 8%, la encuesta fue realizada solo en estratos 4,5 y 6³.

De lo anterior, se entiende que en Colombia no existe una implementación masiva de los sistemas domóticos que permitan la regulación, medición y visualización del consumo de la energía eléctrica en los electrodomésticos de manera eficiente, y por esto las personas no tienen un conocimiento preciso del consumo individual de cada uno de estos, por lo tanto no son conscientes del mal uso que en algunos casos se les da.

En consecuencia delo anterior se presenta la necesidad de implementar sistemas domóticos que permitan una mejor utilización, gestión y control de todos los aspectos relacionados con la vivienda, entre ellos el consumo de la energía eléctrica de los electrodomésticos

¹ GORE, Albert Arnold. An Inconvenient Truth [documental]. Producida por Lawrence Bender, Estados Unidos: Paramount Home Entertainment, 2006. 1 DVD. 96 minutos. Color.

² ENERGY STAR. Recursos en Español [citado: 10 oct. 2009] [online]

³ GIDATI. Grupo de investigación de la UPB. [citado: 30 septiembre 2009] [citado:30 septiembre 2009, pag 90]

Esta tecnología en el medio local tiende a un desarrollo futuro de múltiples usos y soluciones a la medida del mercado nacional según GIDATI⁴, igualmente se puede sustituir importaciones de bienes terminados, en tanto que se desarrolle la capacidad de nuevos productos.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo, regular, medir y visualizar el consumo de la energía eléctrica en los electrodomésticos de manera eficiente?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Diseñar un prototipo de un sistema inalámbrico, para el encendido o apagado de los electrodomésticos, la medición y visualización de la cantidad de energía consumida.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Indagar acerca del protocolo Zigbee y los medidores electrónicos de energía eléctrica.
- Diseñar un sistema de acondicionamiento para un medidor de energía eléctrica y el control remoto de encendido y apagado.
- Aplicar una red inalámbrica bajo el estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee) para el monitoreo y control remoto.
- Implementar una interface de visualización con la ayuda de software LabView.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Las tecnologías en comunicación inalámbrica, se han adoptado con el fin de mejorar el confort en todos los ámbitos de la vida cotidiana. En este desarrollo se implementara la tecnología inalámbrica Zigbee, como protocolo de comunicación inalámbrica, debido a sus características técnicas, como bajo consumo energético,

⁴ GIDATI. op.cit Pág. 93

costo y con posibilidad de formar su propia red con gran número de dispositivos; todo basado en un estándar público global que permita a cualquier fabricante crear productos que sean compatibles entre ellos⁵.

El acercarse a un tema de interés como lo es la tecnología Zigbee, es una invitación a moverse por una temática de demanda mundial (lo inalámbrico) desde concepciones teóricas, metodológicas y procedimentales que requieren ser apropiadas en nuestras comunidades académicas e investigativas del medio regional y nacional, porque permite prescindir del cableado, su fácil instalación y es atractivo al mercado, por su bajo costo.

Con el desarrollo de este dispositivo se tendrá un control eficiente de los electrodomésticos y visualización del valor del consumo de energía eléctrica de estos de manera individual. El usuario podrá tener acceso a esta información de modo virtual debido a que el dispositivo tiene la capacidad de comunicarse con el computador personal mediante el uso de la tecnología inalámbrica Zigbee, esto será útil en los hogares, ya que las personas podrán tomar decisiones basadas en la información obtenida del medidor de energía y ser más conscientes en el uso de los electrodomésticos, regulando los tiempos de funcionamiento y su forma de emplearlos, lo que beneficia al medio ambiente.

Otras de las funciones que posee el dispositivo es permitir a los habitantes del hogar encender o apagar los electrodomésticos de forma remota, utilizando un computador o un control móvil o fijo ubicado en cualquier lugar del hogar sin importar si el electrodoméstico se encuentra visible por el control remoto o computador debido a que los dispositivos Zigbee tiene la capacidad de funcionar en una red con topología en malla* permitiendo de esta forma que la señal viaje hasta el dispositivo final sin ninguna interferencia de paredes u otros objetos que se encuentran en el hogar.

En el mercado hay empresas como GOOGLE trabajando en el ahorro de la energía que consumen los electrodomésticos en los hogares. “Con el proyecto Google Power Meter , que consiste en unos *medidores especiales* instalados en los electrodomésticos del hogar, que permiten conocer cuánta electricidad consume cada uno.

Estos pequeños medidores, registran a cada segundo la cantidad de electricidad que “*devora*” cada uno de nuestros aparatos eléctricos. Toda esa información es recogida por el ordenador de casa (*que también tendrá uno de estos trastos incorporado*) y enviada a los servidores de Google. Luego el usuario podrá entrar

⁵ VALVERDE REBAZA. Jorge Carlos. El Estándar Inalámbrico ZigBee. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo – Perú – 2007. [online]

* Entiéndase por topología en malla. Los dispositivos están conectado en muchas interconexiones redundantes entre nodos de la red.

a un sitio Web diseñado específicamente para esto y ver, segundo a segundo, sus estadísticas de consumo.”⁶

1.5 DISEÑO METODOLÓGICO

1.5.1 Estrategias Metodológicas. El proyecto estará dividido por fases de esta manera.

Fase I. Rastreo bibliográfico y empírico. En esta fase del proyecto se realizara el proceso de documentación y análisis de la información correspondiente al protocolo inalámbrico Zigbee y a las técnicas de medición de energía eléctrica

Posteriormente se llevara a cabo el proceso de búsqueda de proveedores de los dispositivos necesarios para el diseño y el producto final, y el estudio de los manuales en formato digital y físico.

En esta fase también se irán alternado las actividades anteriores con las salidas de campo que complementaran la información teórica, y ayudaran a darle un enfoque más real y aplicativo al producto final.

Fase II. Diseño de dispositivos. Se buscaran proveedores para la adquisición de los elementos para el desarrollo del los dispositivos.

En esta fase del proyecto se llevara a cabo el proceso de diseño construcción y pruebas de una red de comunicación inalámbrica utilizando el protocolo Zigbee que servirá para realizar la comunicación entre los dispositivos de mando y los de visualización.

También se llevara a cabo el diseño y construcción del medidor inteligente de energía eléctrica y será necesario realizar pruebas y ajustes durante el tiempo de desarrollo de la fase.

Fase III. Diseño del sistema final. En esta fase del proyecto se llevara a cabo la integración del medidor de energía eléctrica y control a la red inalámbrica.

Fase IV. Desarrollo de la aplicación de visualización. En esta fase del proyecto se realizaran el diseño de la aplicación en el software LabView, donde se podrá visualizar el consumo de energía de los electrodomésticos que se encuentren conectados a la red mediante el circuito de medición, y a su vez se podrá actuar sobre la carga, encendiendo o apagando los electrodomésticos.

⁶ PALAZZESI, Ariel Google Power Meter. [citado:11 de febrero de 2009] [online]

1.5.2 Modalidad del Trabajo de Grado.

Tipo de proyecto. Este es un proyecto de desarrollo tecnológico de enfoque cuantitativo, ya que en este se realizaran mediciones y cálculos.

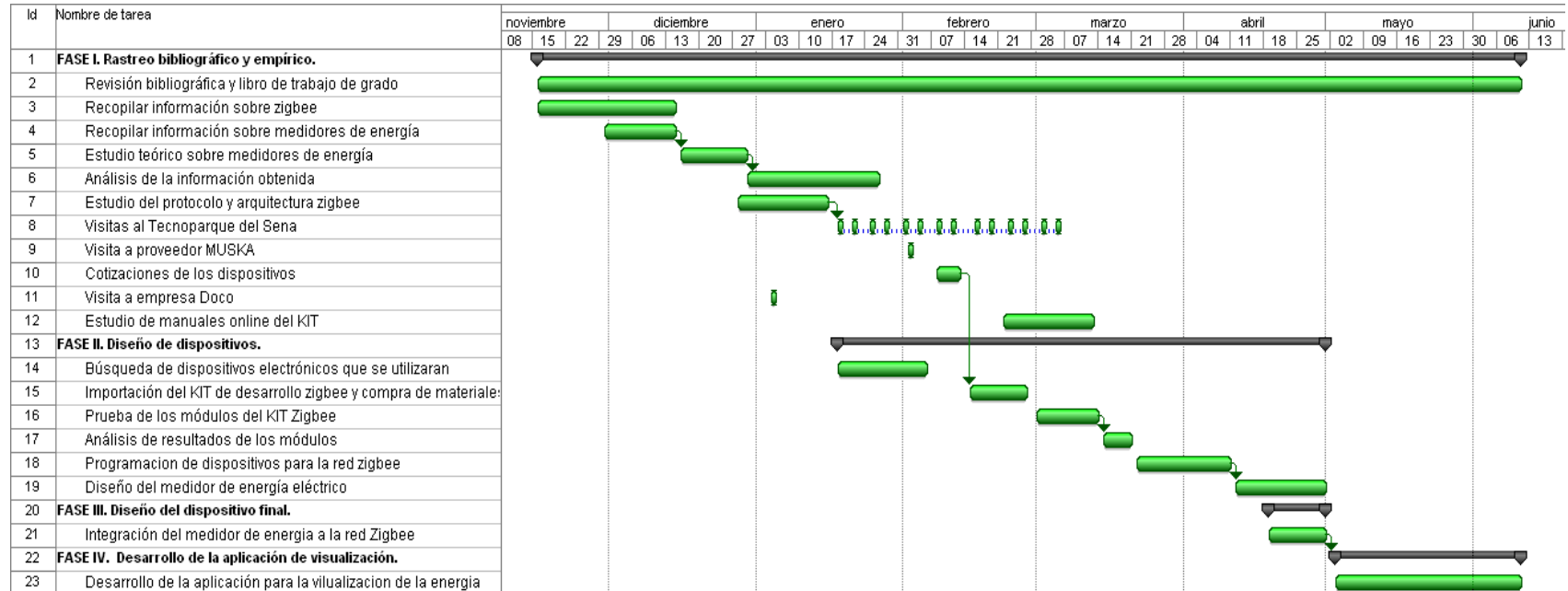
Tipo de Trabajo. El tipo de investigación a realizar será de tipo exploratoria, ya que el objetivo de esta es examinar un tema de investigación poco estudiado en el ámbito nacional. Se identifica una necesidad o tipo de variable como lo es implementar un dispositivo con tecnología inalámbrica, que permita la regulación, medición y visualización del consumo de la energía eléctrica en los electrodomésticos de manera eficiente, lo cual será resuelto mediante el proceso de investigación que dará como resultado la respuesta a la pregunta o problema planteado.

1.5.3 Método de Investigación Aplicado. El método de investigación aplicado en el desarrollo del presente proyecto es el *deductivo*, debido que se parte de la necesidad del contribuir con el cuidado y mejoramiento del medio ambiente, enfocándose en una de las variables causantes de su deterioro como lo es el mal uso de la energía eléctrica consumida en los hogares, y de la diversidad de métodos que existen en cuanto al buen uso y recuperación de esta se refiere, teniendo presente los procesos necesarios para lograr un ahorro eficiente.

Se presenta un proyecto que utilizara uno de los protocolos inalámbricos mas nuevos y más adecuados para el tema, permitiendo a las personas que utilizan los electrodomésticos del hogares, tener un control de estos dispositivos y conociendo el gasto de energía eléctrica mensual, teniendo de esta manera como resultado el aprovechamiento y regulación en los hogares de este recurso que es tan necesario, pero tan dañino para el medio ambiente cuando no se utiliza de manera adecuada.

1.6 CRONOGRAMA

Tabla 1. Cronograma de actividades



1.7 PRESUPUESTO

Tabla 2. Presupuesto global del trabajo de grado.

PRESUPUESTO GLOBAL DEL TRABAJOS DE GRADO				
RUBROS	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Personal	8'100.000	640.000		8'740.000
Material y suministros	1'007.140			1'007.140
Salidas de campo	446200			446200
Bibliografía	278200			278200
Equipos	2'494.800	2695300	1'306.650	6'496.750
Otros	100.000			100.000
TOTAL	12'426.340	3'335.300	1'306.650	17'068.290

Tabla 3. Descripción de los gastos de personal.

DESCRIPCIÓN DE LOS GASTOS DE PERSONAL						
Nombre de Estudiantes	FUNCIÓN en el trabajo	DEDICACIÓN horas/semana	FUENTES			TOTAL
			Estudiantes	IUE	Externa	
Juan Pablo Palacio Guzmán	Investigador	10/4/4	2'700.000			2'700.000
Juan Andrés Castaño Gonzales	Investigador	10/4/4	2'700.000			2'700.000
David Andrés Toro Garzón	Investigador	10/4/4	2'700.000			2'700.000
Gerardo Zapata Jiménez	Asesor Temático	2		640.000		640.000
TOTAL			8'100.000	640.000		8'740.000

Tabla 4. Descripción de materiales y suministros.

DESCRIPCIÓN DEL MATERIALES Y SUMINISTROS				
Material	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Resma de papel	21000			31500
Lapiceros, lápiz	26620			26620
Libretas	4350			4350
USB	42900			42900
Cartucho	426000			426000
CD's	29900			29900
Cosedora	10320			10320
Ganchos	4050			4050
Cassettes	38000			38000
Carpetas	4000			4000
Refrigerios	400000			400000
TOTAL	1'007.140			1'007.140

Tabla 5. Descripción de las salidas de campo

DESCRIPCIÓN DE LAS SALIDAS DE CAMPO				
DESCRIPCIÓN DE LAS SALIDAS DE CAMPO	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Visita a empresa DOCO	27800			27800
Visita a proveedor MUSKA	12800			12800
Visitas al tecnoparque del SENA, con motivos de investigación	124800			124800
Reuniones en la IUE	280800			280800
TOTAL	446200			446200

Tabla 6. Descripción bibliografía.

DESCRIPCIÓN BIBLIOGRAFIA				
DESCRIPCIÓN BIBLIOGRAFIA	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Libros	218200			218200
Revistas	60000			60000
TOTAL	278200			278200

Tabla 7. Descripción equipos.

DESCRIPCIÓN EQUIPOS				
DESCRIPCIÓN EQUIPOS	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Portátil	1.500.000			1.500.000
Teléfono	20.000			20.000
Sillas	80.000			80.000
Escritorio	100.000			100.000
Grabadora	120.000			120.000
Cámara	399.000			399.000
Impresora	80.000			80.000
Plancha eléctrica	50.000			50000
Kit de desarrollo Zigbee, marca Texas Instruments			1'306.650	1'306.650
Multímetro digital fluke		699.200		699.200
Osciloscopio marca Bk precision		1' 734.000		1' 734.000
Fuente de voltaje Bk precision		662.100		662.100
10 m de clave UTP	14.300			14.300
Kit de pinzas	35.700			35.700
Soldador	45.800			45.800
Otros	50.000			50.000
TOTAL	2'494.800	2695300	1'306.650	6'496.750

Tabla 8. Descripción publicaciones

DESCRIPCIÓN PUBLICACIONES				
DESCRIPCIÓN PUBLICACIONES	FUENTES			TOTAL
	Estudiantes	IUE	Externa	
Trabajo para biblioteca	100.000			100.000
TOTAL				100.000

2. PROTOCOLO ZIGBEE Y MEDIDORES DE ENERGÍA

2.1 DOMÓTICA

El concepto domótica se refiere a la automatización y control (encendido / apagado, apertura / cierre y regulación) de aparatos y sistemas de instalaciones eléctricas y electrotécnicos (iluminación, climatización, persianas y toldos, puertas y ventanas motorizados, el riego, etc.) de forma centralizada y/o remota. El objetivo del uso de la domótica es el aumento del el confort, el ahorro energético y la mejora de la seguridad personal y patrimonial en la vivienda.⁷

2.2 ANTECEDENTES

- Trabajo de grado de la Institución Universitaria de Envigado, “Control De Luces Y Electrodomésticos Del Hogar Mediante Tecnología Zigbee” que consiste en el desarrollo de una aplicación para controlar los dispositivos electrónicos y la iluminación de la vivienda tales como encender y apagar luces, enfocado al ahorro de la energía, utilizando tecnología inalámbrica Zigbee. También se hace un estudio en el sector doméstico colombiano, con el fin de comercializar el producto y ver cuál es el impacto de la domótica a futuro en el país.

Trabajo desarrollado por Edwin Kammerer Orcasita, Jhon Freddy Herrera Ortiz. Realizado el 2007 Envigado.

- Trabajo de grado de la Universidad pontificia Bolivariana (Medellín), “Control De Iluminación Inalámbrico Utilizando El Protocolo De Comunicación IEEE 802.15.4 (Zigbee)”,

En este trabajo se diseño y construyo un sistema de iluminación controlado en forma inalámbrica, que consta de un módulo central y 3 módulos controladores de lámpara.

La idea surgió de hacer un trabajo en el que se integren la automática, los microcontroladores, y las comunicaciones. En la domótica convergen estas áreas. La tendencia actual es tener control sobre varios dispositivos desde un solo punto en forma remota e inalámbrica, basándose en la última tecnología disponible de comunicaciones inalámbricas (Zigbee) de monitoreo y control que ha salido a la luz pública.

⁷ CASADOMO.COM. Domótica Introducción [Online],[06 de Octubre de 2009]

Además Ante la necesidad de optimizar los recursos actuales tal como la energía eléctrica surgió la idea de desarrollar un control de iluminación que reduce su consumo, además proporciona confort y seguridad en el hogar.

- Anteproyecto de grados de la Universidad Pedagógica Nacional, “prototipo de sistema de telemetría para el monitoreo de signos vitales en actividades de montaña”, En este trabajo se propone el diseño de un prototipo de sistema de telemetría que monitoree los signos vitales, proporcionando al montañista más seguridad lo cual permitirá tomar decisiones, e incluso usar esta información para propósitos investigativos, se utilizara protocolo Zigbee, por su gran versatilidad y su bajo consumo de energía.
Trabajo desarrollado por Edwar Alonso Rojas Blanco, Cesar Eduardo Velandia Puentes.
Realizado en mayo de 2009 Bogotá.
- Trabajo de grado de la Corporación Universitaria De Investigación Y Desarrollo” Diseño, construcción y evaluación de una red inalámbrica de sensores zigbee 802.15.4” en este trabajo se estudio el protocolo Zigbee y se construyo una topología Zigbee(malla) y se hicieron pruebas de su funcionamiento.
Trabajo desarrollado por Jhon Jairo Calderón Arboleda, Carlos Mantilla
Realizado Septiembre de 2006 Bucaramanga.
- Trabajo de grado de la Pontificia Universidad Católica Del Perú, “Diseño del sistema de iluminación automatizado para una oficina en un edificio inteligente, basado en tecnología inalámbrica Zigbee”.

De acuerdo a un estudio realizado sólo las nuevas construcciones tienen cierto grado de automatización y normalmente está orientado al control de la temperatura (aire acondicionado). Prácticamente ninguna oficina cuenta con automatización en la iluminación y, las que lo hacen, lo limitan al encendido y apagado automático de las luces de los baños, cuando el mayor consumo de la energía está en la oficina.

En este trabajo se implemento un sistema domótico en oficinas, utilizando tecnología inalámbrica más concretamente Zigbee, para el control de iluminación y ahorro de energía, ya que en estos lugares es demasiada la energía que se consume en iluminación y que en muchos casos no es necesario.

Trabajo desarrollado por Miguel Eduardo Hidalgo Alcalá. Realizado el 2007, lima Perú.

- Documento “Proyecto y Construcción de Equipos Electrónicos”, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura - UNNE. Dto. de Ingeniería Eléctrica. El trabajo fue realizado como Práctica Profesional de la carrera de Ingeniería Electricista y consistió en el diseño e implementación de un medidor electrónico de energía activa empleando tecnología de última generación. El sistema está basado en el circuito integrado CI ADE7756 de Analog Devices salido al mercado recientemente, el cual es capaz de medir potencia y energía monofásica, contando con recursos internos para el muestreo de las señales de tensión y corriente, filtrado, compensación de errores, etc. El funcionamiento de todo el dispositivo está supervisado por un microcontrolador PIC16F84 de Microchip Inc. El instrumento permite la programación del CI para adecuarlo a los requerimientos del usuario, utilizando un mínimo de pulsadores, facilitando su puesta en funcionamiento inmediato. La presentación de las mediciones se realiza en un display de cristal líquido de 2 filas por 16 caracteres alfanuméricos.
- Grupo de investigación en telecomunicaciones GITELIUE, Institución Universitaria de Envigado, se referenciará en uno de sus semilleros que están trabajando actualmente sobre tecnologías inalámbricas y protocolo Zigbee.
- Grupo de investigación en domótica GIDATI, Universidad Pontificia Bolivariana, de este grupo se tomara documentación técnica relacionada con casas y edificios inteligentes. Servicios y productos ofrecidos por empresas en el país.

2.3 SISTEMAS DOMÓTICOS

La amplitud de una solución de domótica puede variar desde un único dispositivo, que realiza una sola acción, hasta amplios sistemas que controlan prácticamente todas las instalaciones dentro de la vivienda. Los distintos dispositivos de los sistemas de domótica se pueden clasificar en los siguientes grupos:

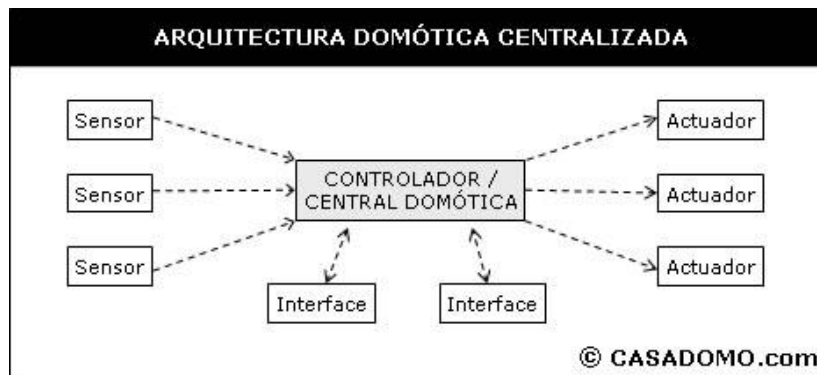
- **Controlador:** Los controladores son los dispositivos que gestionan el sistema según la programación y la información que reciben. Puede haber un controlador solo, o varios distribuidos por el sistema.
- **Actuador:** El actuador es un dispositivo capaz de ejecutar y/o recibir una orden del controlador y realizar una acción sobre un aparato o sistema (encendido/apagado, subida/bajada, apertura/cierre, etc.).

- **Sensor:** El sensor es el dispositivo que monitoriza el entorno captando información que transmite al sistema (sensores de agua, gas, humo, temperatura, viento, humedad, lluvia, iluminación, etc.).
- **Bus:** Es bus es el medio de transmisión que transporta la información entre los distintos dispositivos por un cableado propio, por la redes de otros sistemas (red eléctrica, red telefónica, red de datos) o de forma inalámbrica.
- **Interface:** Los interfaces refiere a los dispositivos (pantallas, móvil, Internet, conectores) y los formatos (binario, audio) en que se muestra la información del sistema para los usuarios (u otros sistemas) y donde los mismos pueden interactuar con el sistema.⁸

2.3.1 Arquitectura. La Arquitectura de los sistemas de domótica hace referencia a la estructura de su red. La clasificación se realiza en base de donde reside la “inteligencia” del sistema domótico.

2.3.1.1 Arquitectura Centralizada. En un sistema de domótica de arquitectura centralizada, un controlador centralizado, envía la información a los actuadores e interfaces según el programa, la configuración y la información que recibe de los sensores, sistemas interconectados y usuarios.⁹ Ver figura 1.

Figura 1. Esquema de Arquitectura de Sistema Domótica Centralizada



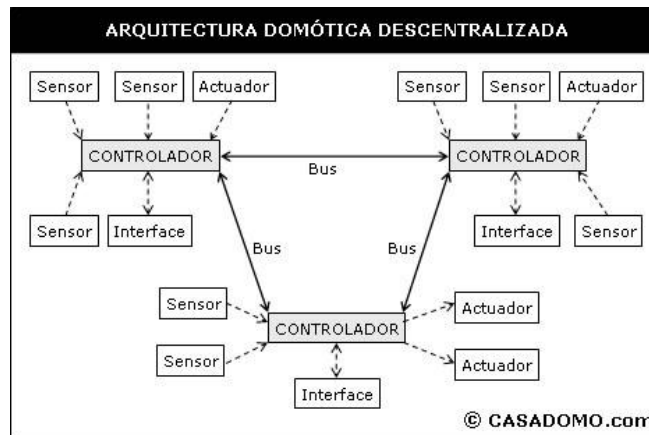
Fuente. <http://www.casadomo.com/noticiasDetalle.aspx?c=14>

2.3.1.2 Arquitectura Descentralizada. En un sistema de domótica de Arquitectura Descentralizada, hay varios controladores, interconectados por un bus, que envía información entre ellos y a los actuadores e interfaces conectados a los controladores, según el programa, la configuración y la información que recibe de los sensores, sistemas interconectados y usuarios. Ver figura 2.

⁸ lbit..., casadomo.com.

⁹ CASADOMO.COM. Domótica Introducción [Online],[10 de Octubre de 2009]

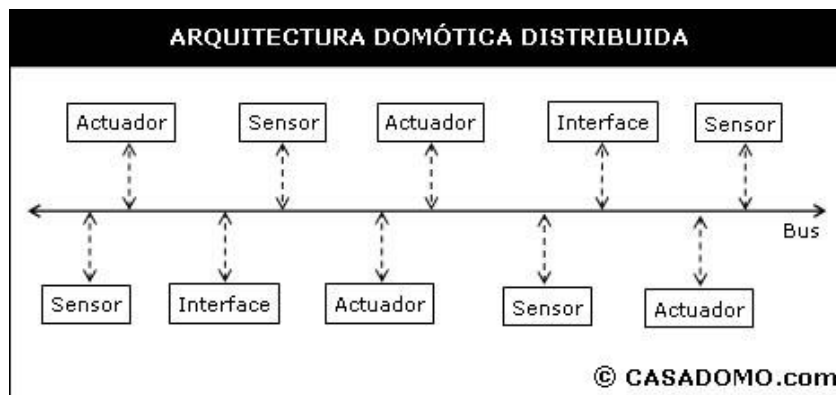
Figura 2. Esquema de arquitectura de sistema domótica descentralizada



Fuente. <http://www.casadomo.com/noticiasDetalle.aspx?c=14>

2.3.1.3 Arquitectura Distribuida. En un sistema de domótica de arquitectura distribuida, cada sensor y actuador es también un controlador capaz de actuar y enviar información al sistema según el programa, la configuración, la información que capta por sí mismo y la que recibe de los otros dispositivos del sistema.

Figura 3. Esquema de arquitectura de sistema domótica distribuida



Fuente. <http://www.casadomo.com/noticiasDetalle.aspx?c=14>

2.3.2 Elección del Sistema de Domótica. Para la elección del sistema domótico adecuada es preciso tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Topología y Tamaño:** La tipología del proyecto arquitectónico (apartamento, adosado, vivienda unifamiliar), y su tamaño.
- **Estado de la vivienda:** Si la vivienda no se ha construido todavía hay prácticamente libertad total para incorporar cualquier sistema, pero si la vivienda está ya construida, hay que tener en cuenta la obra civil que conllevan los distintos sistemas.
- **La Integración:** Además de los aparatos y sistemas que se controla directamente con el sistema de domótica hay que definir con que otros sistemas del hogar digital que se quiere interactuar.
- **Las Interfaces:** Hay una gran variedad de interfaces, como pulsadores, pantallas táctiles, voz, presencia, móvil, Web, computadores, etc. para elegir e implementar. Los distintos sistemas disponen de distintas interfaces.¹⁰

2.4 PROTOCOLO ZIGBEE

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la ZigBee Alliance. No es una tecnología, sino un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante. ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.¹¹

2.4.1 Características del protocolo Zigbee. Algunas de las características de ZigBee son:

- ZigBee opera en las bandas libres ISM de 2.4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos).
- Tiene una velocidad de transmisión de 250 Kbps y un rango de cobertura de 10 a 75 metros.
- A pesar de coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes como WiFi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado, esto debido a su baja tasa de transmisión y, a características propias del estándar IEEE 802.15.4.
- Capacidad de operar en redes de gran densidad, esta característica ayuda a aumentar la confiabilidad de la comunicación, ya que entre más nodos existan

¹⁰ CASADOMO.COM. Domótica Introducción [Online],[10 de Octubre de 2009]

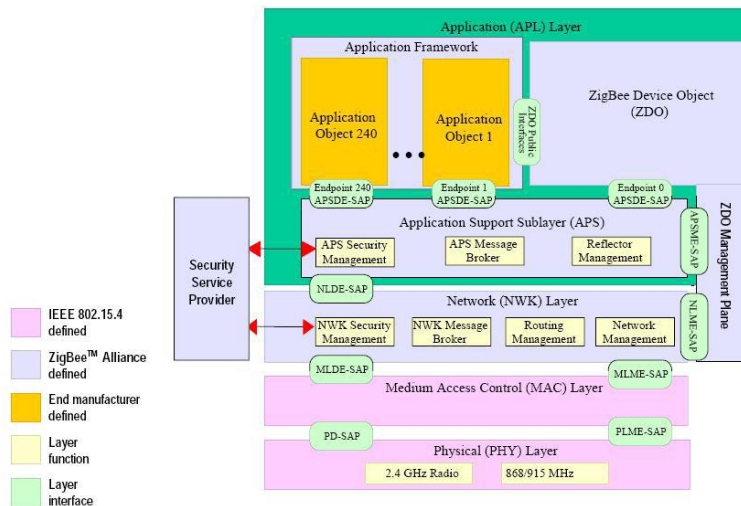
¹¹ VALVERDE REBAZA, Jorge Carlos. El Estándar Inalámbrico ZigBee. [online]. [Citado 7 oct., 2009].

dentro de una red, entonces, mayor número de rutas alternas existirán para garantizar que un paquete llegue a su destino.

- Cada red ZigBee tiene un identificador de red único, lo que permita que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema. Teóricamente pueden existir hasta 16 000 redes diferentes en un mismo canal y cada red puede estar constituida por hasta 65 000 nodos, obviamente estos límites se ven truncados por algunas restricciones físicas (memoria disponible, ancho de banda, etc.).
- Es un protocolo de comunicación multi-salto, es decir, que se puede establecer comunicación entre dos nodos aún cuando estos se encuentren fuera del rango de transmisión, siempre y cuando existan otros nodos intermedios que los interconecten, de esta manera, se incrementa el área de cobertura de la red.
- Su topología de malla (MESH) permite a la red auto recuperarse de problemas en la comunicación aumentando su confiabilidad.¹²

2.4.2 Pila del protocolo ZIGBEE. La pila del protocolo Zigbee está dividida en cuatro capas, la capa de aplicación, la capa de red, la capa de acceso al medio (MAC) y la capa física, estas dos últimas descritas en el estándar IEEE 802.15.4.

Figura 4. Pila del protocolo ZIGBEE



Fuente. <http://rua.ua.es/dspace/bitstream>

¹² VALVERDE, op.cit. Pág. 1

2.4.2.1 Capa de aplicación. La capa de aplicación de ZigBee se subdivide en la subcapa APS, la capa ZDO (Zigbee Device Objects) y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.¹³

- *Application framework*: Es el ambiente en el cual se encuentran los objetos aplicación, mismos que envían y reciben datos a través del APSDE service access point (APSDE-SAP).
Un objeto aplicación está definido por el fabricante que implementa esta aplicación. El stack de protocolos ZigBee soporta hasta 30 objetos de aplicación que pueden ser ejecutados al mismo tiempo.
- *Application Supports (APS)*: provee un interfaz entre la capa de red (NWK) y la capa de aplicación (APL) a través de servicios utilizados por ZDO y objetos de aplicación. El servicio lo proveen dos entidades:
 - APS *data entity* (APSDE) a través del APSDE *service access point* (APSDE-SAP).
 - APS *management entity* (APSME) a través del APSME *service access point* (APSME-SAP).

Las funciones de la subcapa APS incluyen: establecer la comunicación entre dos o más dispositivos según sus servicios y necesidades; y enviar mensajes entre ellos.

El APSDE provee el servicio de transmisión de datos entre dos o más dispositivos localizados en la misma red. El APSME provee servicios de descubrimiento y unión de dispositivos y mantiene una base de datos del manejo de objetos, conocido como el APS *information base* (AIB).

- *Zigbee device object (ZDO)*: La función de esta subcapa es definir el rol del dispositivo dentro de la red (ya sea de coordinador o de dispositivo final), iniciando o respondiendo a las peticiones y estableciendo una conexión segura entre los dispositivos de la red.¹⁴

2.4.2.2 Capa de red (NWK). La capa red se construye sobre las características de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.4, para permitir una mayor cobertura de la red con lo que nuevas redes podrán ser adicionadas para consolidarse o dividirse según la aplicación que se requiera. Debido a que el *stack* de protocolos de *ZigBee* es relativamente simple comparado con otros *stacks* de protocolos de comunicaciones.¹⁵

¹³ Anexo I. Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4) [online] [10 febrero 2010]
rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf

¹⁴ ZIGBEE ALLIANCE. Descripción del estándar de comunicaciones de área personal ieee 802.15.4 "zigbee".[Online][10 febrero 2010].

¹⁵ Ibit., ZIGBEE ALLIANCE.

Tipos de dispositivos: Se definen tres tipos diferentes de dispositivos ZigBee según su papel en la red:

- **Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator, ZC):** El tipo de dispositivo más completo. Puede actuar como director de una red en árbol así como servir de enlace a otras redes. Existe exactamente un coordinador por cada red, que es el nodo que la comienza en principio. Puede almacenar información sobre la red y actuar como su centro de confianza en la distribución de claves de cifrado.
- **Router ZigBee (ZR):** Además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario, puede actuar como router interconectando dispositivos separados en la topología de la red.
- **Dispositivo final (ZigBee end device, ZED):** Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

En base a su funcionalidad puede plantearse una segunda clasificación:

- **Dispositivo de funcionalidad completa (FFD):** es capaz de recibir mensajes en formato del estándar 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar, puede funcionar como coordinador o router o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios.
- **Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD):** tiene capacidad y funcionalidad limitadas (especificada en el estándar) con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.¹⁶

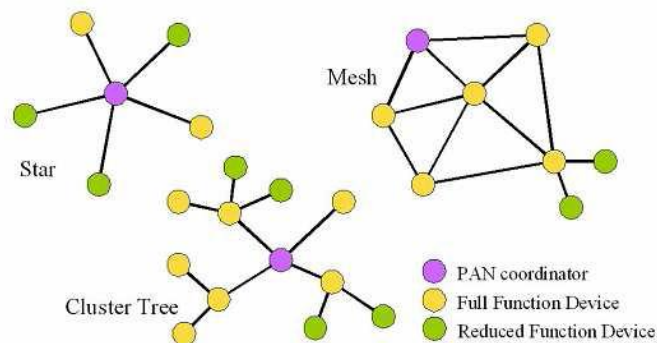
Topologías: En ZigBee existen tres tipos de topologías: estrella, árbol, y en red mallada, las cuales pueden observarse en la figura 5. Siempre hay un nodo de red que asume el papel de coordinador central encargado de centralizar la adquisición y las rutas de comunicación entre dispositivos. Además, si se aplica el concepto de red mallada, pueden existir coordinadores o routers, alimentados permanentemente en espera de recibir/repetir las tramas de los dispositivos o sensores. Ambos dispositivos son del tipo FFD, debido a que exigen empotrar la mayoría de primitivas definidas por el stack ZigBee.

Los dispositivos que harán la función de sensores, termostatos o mandos a distancia serán de funcionalidad reducida, y serán alimentados por baterías o pilas.

¹⁶ VALVERDE, op.cit. Pág. 2

Sin lugar a dudas, una de las mayores aportaciones del ZigBee y el que mayor interés está despertando a las empresas desarrolladoras de productos, es el concepto de red nodal o red mallada por el que cualquier dispositivo ZigBee puede conectarse con otro dispositivo usando a varios de sus compañeros como repetidores. A este se le conoce como enrutado “multi-salto”, primero hace llegar la información al nodo ZigBee vecino, el cual puede además ser coordinador de la red, para así llegar al nodo destino, pasando por todos los que sean necesarios. De esta manera cualquier nodo ZigBee puede hacer llegar los datos a cualquier parte de la red inalámbrica siempre y cuando todos los dispositivos tengan un vecino dentro de su rango de cobertura.

Figura 5. Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee.



Fuente. <http://www.seccperu.org/files/ZigBee.pdf>

La aplicación del concepto de Mesh Networks, hará viable muchas aplicaciones de domótica vía radio en viviendas construidas, allí donde las tecnologías radio de generaciones anteriores estaban limitadas en cuanto a la cobertura o alcance entre dispositivos. Gracias a esto la instalación y puesta en marcha de dispositivos de domótica en cualquier vivienda será una tarea muy sencilla e independiente de la tipología y tamaño de esta.¹⁷

2.4.2.3 Capa de acceso al medio (MAC). La subcapa MAC del protocolo IEEE 802.15.4 provee un interfaz entre la capa física y las capas superiores de los LR-WPANs. Presenta las siguientes características:

- Asociación/disociación
- Acuse de recibo (ACK)
- Mecanismos de acceso al canal
- Validación de trama
- Control de garantía de ranuras de tiempo (Slot Time)
- Control de guías (Beacon)

¹⁷ VALVERDE, op.cit. Pág. 6

- Sondeo del canal (Scan)

La MAC proporciona dos tipos de servicios hacia las capas superiores, a través de dos Puntos de Acceso a Servicios (Service Access Points, SAPs):

- A los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la subcapa MCPS-SAP (MAC Common Part Sublayer-Service Access Point).
- Al manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades MLME-SAP (MAC Layer Management Entity-Service Access Point).¹⁸

2.4.2.4 Capa física. La capa física es la responsable de la transmisión y la recepción de datos en un canal de radio y acorde con las técnicas de modulación y *spreading*. La IEEE 802.15.4 ofrece tres bandas de frecuencia en las cuales operar: 2.4 GHz, 915MHz y 868 MHz. La frecuencia de 2.4 GHz, específica la operación en la banda Industrial, Médica y Científica (ISM), que prácticamente está disponible en todo el mundo, mientras que la frecuencia de 865 MHz opera en Europa y 915 MHz en Estados Unidos. El estándar IEEE 802.15.4 utiliza la técnica DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) para transmitir la información a través del medio. Además, las velocidades de transmisión son de 250 Kbps en la banda de 2.4 GHz, 40 Kbps en la banda de 915 MHz y 20 Kbps en la banda de 868 MHz.

Tabla 9. Parámetros técnicos según las frecuencias

Banda de Frecuencia (MHz)	Parámetros de Datos	
	Velocidad de bits (kbps)	Modulación
868	20	BPSK
915	40	BPSK
2400	250	O-QPSK

Fuente. http://sensornetworks.eecs.berkeley.edu/docs/ZigBee_2.ppt

¹⁸ ZIGBEE ALLIANCE, op. cit. Pág. 17

2.5 MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Existen varios tipos de medidores dependiendo de su construcción, tipo de energía que mide, clase de precisión y conexión a la red eléctrica.

2.5.1 Principios de medición de la energía eléctrica. La potencia es la razón del flujo de energía desde la fuente hasta la carga en la unidad de tiempo. Esto está dado por el producto instantáneo de las señales de tensión y de corriente. La señal resultante se denomina potencia instantánea', y es la velocidad del flujo de energía en cualquier instante de tiempo. La unidad de potencia es el Watt ó Joule/segundo.

Se tiene entonces $v(t) = V_m \cdot \text{sen}(wt)$, e $i(t) = I_m \cdot \text{sen}(wt)$; donde $V_m = \sqrt{2}V$ e $I_m = \sqrt{2}I$. Luego tenemos que $p(t) = v(t) \cdot i(t) = V \cdot I - V \cdot I \cdot \cos(2w.t)$

La potencia promedio sobre un número entero de ciclos está dada por:

$$P = \frac{1}{n.T} \int_0^{nT} p(t).dt = V.I \quad \text{Eq. 1}$$

Donde T es el período del ciclo y P la potencia activa o real. Podemos observar que la potencia activa es igual a la componente continua de la potencia instantánea $p(t)$ o sea V.I. Esta es la relación utilizada para calcular la potencia Activa. La señal de potencia instantánea se genera por la multiplicación de las señales de tensión y corriente.¹⁹

2.5.2 Clasificación de los medidores.

2.5.2.1 Medidores de inducción (Electrónicos). Es un medidor en el cual las corrientes en las bobinas fijas reaccionan con las inducidas en un elemento móvil, generalmente un disco, haciéndolo mover.

El principio de funcionamiento es muy similar al de los motores de inducción y se basa en la teoría de la relación de corriente eléctrica con los campos magnéticos.

2.5.2.2 Medidores estáticos (Electrónicos). Medidores en los cuales la corriente y la tensión actúan sobre elementos de estado sólido (electrónicos) para producir pulsos de salida y cuya frecuencia es proporcional a los Vatios-hora ó Var-hora.

¹⁹ MOTTA BITTENCURT, Hugo, LOMBARDERO, Oscar G. Medidor electrónico de energía, [online]. [Citado 11 feb., 2010].

Están contruidos con dispositivos electrónicos, generalmente son de mayor precisión que los electromagnéticos y por ello se utilizan para medir en centros de energía, donde se justifique su mayor costo.²⁰

2.5.2.3 Medidores de energía inteligentes (Smart meter). Los medidores inteligentes hacen posible un nuevo futuro energético.

- **Lectura del medidor a distancia:** CenterPoint Energy leerá tu medidor inteligente de manera remota, por lo cual prácticamente eliminará la necesidad de ir a tu casa para hacerlo. Esto significa menos camiones en las carreteras.
- **Operaciones agilizadas:** La conexión y desconexión del servicio a distancia reducirá el tiempo requerido para procesar la mayoría de leas solicitudes de servicio domiciliars y de algunas empresas.
- **Notificación automática de interrupción del servicio:** Los medidores inteligentes notificarán automáticamente a CenterPoint Energy acerca de las interrupciones del servicio, lo que nos ayudará a restablecer la energía más rápidamente.
- **Eficiencia y ahorro energéticos:** Podrás ver tu historia de uso de electricidad para administrar mejor tus costos de energía haciendo pequeños cambios, como ajustar el termostato.
- **Beneficios ambientales:** A medida que los consumidores manejan la energía con más eficiencia, tendrá que generarse menos electricidad, lo que es bueno para el medio ambiente.
- **Nuevos productos y servicios:** Los Proveedores de Electricidad (REP), que te venden tu electricidad, pueden ahora ofrecerte productos y servicios nuevos e innovadores.
- **Redes de área domiciliaria (HAN):** Los medidores inteligentes interactúan con dispositivos de red compatibles con el sistema ZigBee, tales como termostatos u otros electrodomésticos, para que puedas controlar mejor tu consumo de electricidad.²¹

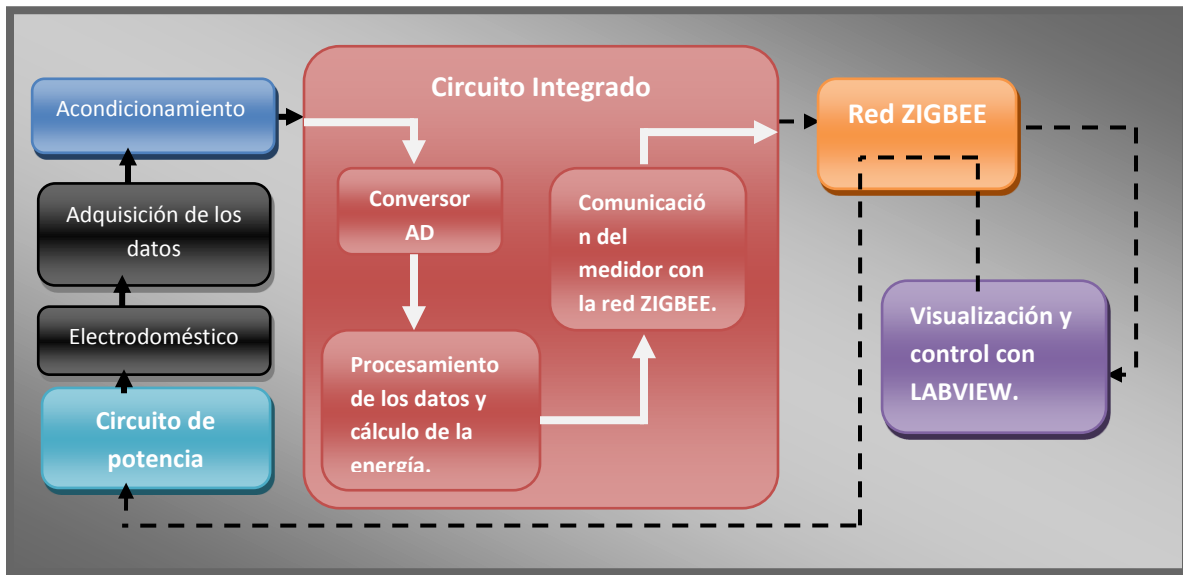
²⁰ DPTO NORMAS, CODENSA. MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA [Online]

²¹ CENTERPOINT ENERGY. Medidores inteligentes,[Online]

3. DISEÑO DEL MEDIDOR DE ENERGÍA

Este capítulo se enfoca al diseño del acondicionamiento de la señal para la lectura del medidor, la programación del circuito integrado de medición y la etapa de potencia para el encendido y apagado de los electrodomésticos. Para una mejor comprensión del sistema se presenta un diagrama a bloques del dispositivo.

Figura 6. Diagrama en bloques del sistema de medición.



Fuente. Elaboración propia

El medidor permite determinar la cantidad de energía que consume un electrodoméstico que se alimenta con 120v AC mientras este dentro de las especificaciones técnicas y de niveles de corriente, voltaje y potencia. El sistema permite tener un control del encendido y apagado de la carga conectada, en este caso es un electrodoméstico, la información entregada por el circuito integrado de medición es transmitida a uno de los dispositivos finales de la red ZIGBEE mediante comunicación serial, después de esta etapa la información es transmitida de forma inalámbrica al coordinador de la red, este coordinador está conectado al PC por el puerto serial. La información en el PC es visualizada por el software LABVIEW. Desde esta aplicación el usuario tiene la opción de encender o apagar el electrodoméstico, orden se envía de nuevo a través de la red ZIGBEE.

3.1 MEDICIÓN DE LA POTENCIA

Desde el punto de vista de las empresas generadoras de energía es importante conocer la cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo (Potencia) a una carga, con la finalidad de poder tener un control sobre la demanda de potencia, para llevar el proceso de facturación a los usuarios, y para su distribución.

Para realizar la medición de la energía es necesario primero tener conocimiento de la potencia eléctrica, como se mide y con se calcula.

Consideraciones previas: La potencia instantánea desarrollada en una carga por la que circula una intensidad de corriente $i(t)$ con un voltaje aplicado $v(t)$, está determinada por el producto de los valores instantáneos medidos en el mismo instante de tiempo t .

$$p(t) = v(t)i(t) \quad \text{Eq.2}$$

Siendo la potencia promedio o potencia activa la integración a lo largo del período T de las ondas en cuestión.

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad \text{Eq.3}$$

Siendo para corriente continua:

$$P = V_{DC}I_{DC} \quad \text{Eq.4}$$

Y para ondas senoidales, siendo φ el ángulo de desfase entre tensión y corriente:

$$P = V_{EF} I_{EF} \cos \varphi \quad \text{Eq.5}$$

Y además las potencias reactivan y aparente:

$$Q = V_{EF} I_{EF} \sin \varphi \quad \text{Eq.6}$$

$$S = V_{EF} I_{EF} \quad \text{Eq.7}$$

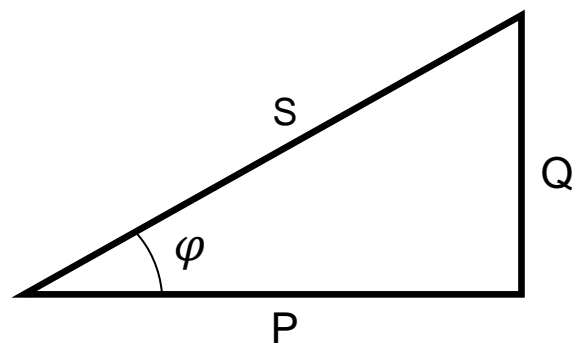
En procesos de corriente alterna monofásica con onda sinusoidal pura se define el factor de potencia al $\cos \varphi$, siendo φ el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente, igual al existente entre S y P en el triángulo de potencias de la figura 7

Si las ondas de tensión y/o corriente no son sinusoidales puras, se definen dos factores de Potencia.²²

- **El factor de potencia de desplazamiento:** $FPD = \cos \varphi_D$, correspondiente al ángulo de desfase φ_D entre las ondas fundamentales de tensión y corriente.
- **El factor de potencia:** $FP = \cos \varphi$, correspondiente al cociente entre la potencia activa P y la aparente S:

$$P = S \cos \varphi = V_{EF} I_{EF} \cos \varphi \quad \text{Eq.8}$$

Figura 7. Triangulo de potencia



<p>S: Potencia aparente (VA) P: Potencia activa (W) Q: Potencia reactiva (VAR)</p>

Fuente. Elaboración propia

Como se define anteriormente, la potencia es la velocidad del flujo de energía. Esta se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$p(t) = \frac{dE}{dt} \quad \text{Eq.9}$$

Donde P es la potencia y E la energía. Por lo tanto, la energía está dada como la integral de la potencia:

$$E = \int P dt \quad \text{Eq.10}$$

²² Universidad nacional del sur. Departamento de ingeniería eléctrica y de computadoras
 Laboratorio de medidas electricas 1. Mediciones eléctricas, medición de potencia, energía y factor de potencia

3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE MEDIDA

Como primera consideración para la realización del medidor de energía, es necesario hacer una etapa de acondicionamiento de la señal de voltaje y de corriente de la línea de alimentación, este proceso consta de un transductor de voltaje y un transductor de corriente, encargado de llevar los valores a un nivel adecuado para su tratamiento y un circuito simple de filtrado en la entrada del convertidor análogo digital del circuito integrado MSP430FE42x(A)

Para los fines de este proyecto son necesarios dos tipos de transductores, los cuales permitan medir la corriente que circula por la carga y la tensión aplicada sobre ella.

3.2.1 Transductores de señales. Los transductores son dispositivos electrónicos encargados de traducir las magnitudes físicas a magnitudes eléctricas, las cuales serán posteriormente tratadas por el circuito de acondicionamiento.

3.2.1.1 Transductor de corriente. Es muy importante tener presente que para las utilidades que se le darán al medidor es muy recomendable aislar galvánicamente el circuito de medida del de adquisición de las señales, en caso de presentarse un corto circuito en la línea de 120v, no se vea afectado el circuito de procesamiento de los datos.

Existen diferentes tipos de transductores de corriente tanto con aislamiento galvanico como sin este, un ejemplo de estos se ven en la tabla 10.

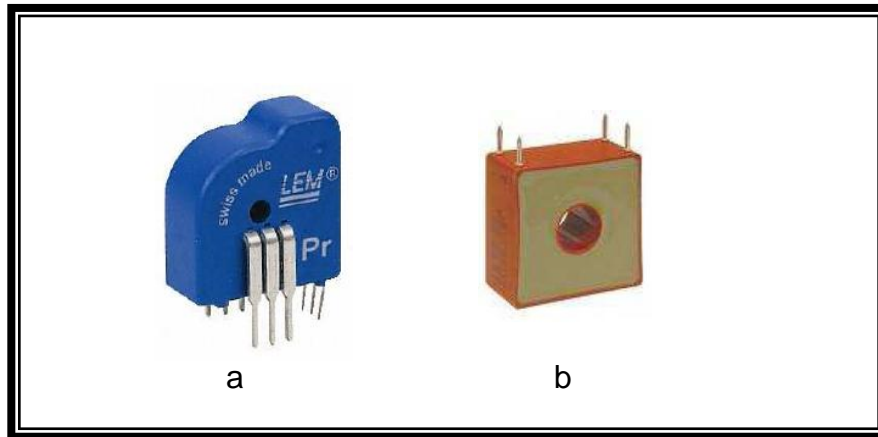
Tabla 10. Comparativa entre transductores de corriente.

	Ventajas	Inconvenientes
Sensor de Efecto HALL	<ul style="list-style-type: none"> • Añade aislamiento galvánico • Permite las medidas continuas 	<ul style="list-style-type: none"> • Precio medio-alto • Tamaño medio
Transformador de corriente	<ul style="list-style-type: none"> • Añade aislamiento galvánico 	<ul style="list-style-type: none"> • Precio alto • Tamaño grande • No permite las medidas continuas
Resistencia Shunt	<ul style="list-style-type: none"> • Precio bajo • Tamaño reducido • Permite las medidas continuas 	<ul style="list-style-type: none"> • No añade aislamiento galvánico • Pérdidas energéticas $I^2 \cdot R$

Fuente. Escuela superior de ingenieros, universidad de Sevilla.

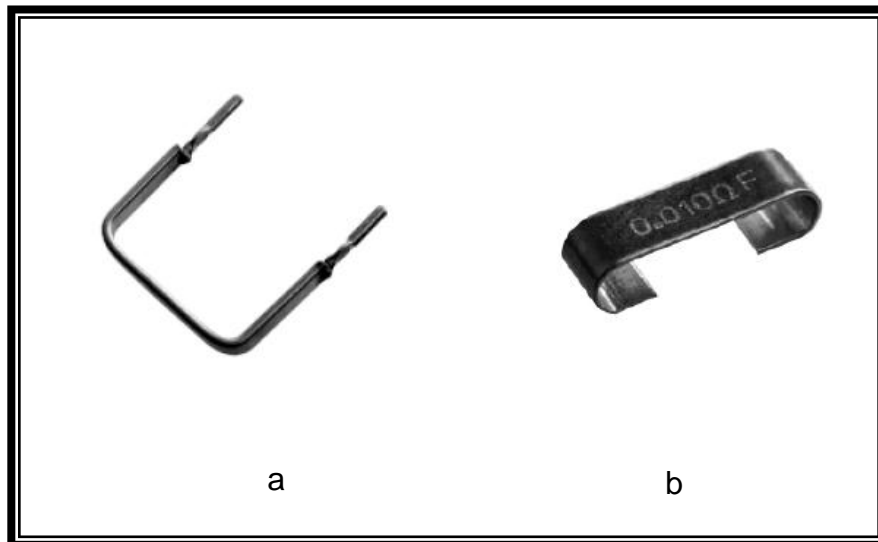
Para esta aplicación se pueden usar dos tipos. Ver figura 8 y 9

Figura 8. Transductores de corriente con aislamiento. a. transformador de efecto hall. b. transformador de corriente.



Fuente. Escuela superior de ingenieros, universidad de Sevilla.

Figura 9. Transductores de corriente sin aislamiento. a. Resistencia tipo through hole. b. resistencia tipo SMD.



Fuente. Escuela superior de ingenieros, universidad de Sevilla.

Para la implementación de este proyecto se usara una resistencia SHUNT, que proporciona un tamaño pequeño y un bajo en la aplicación

3.2.1.2 Transductor de voltaje. Al igual que sucede con la medición de la corriente, se puede proveer de aislamiento a la medición de voltaje. En la tabla 11 se muestran dos tipos de transductores de voltaje.

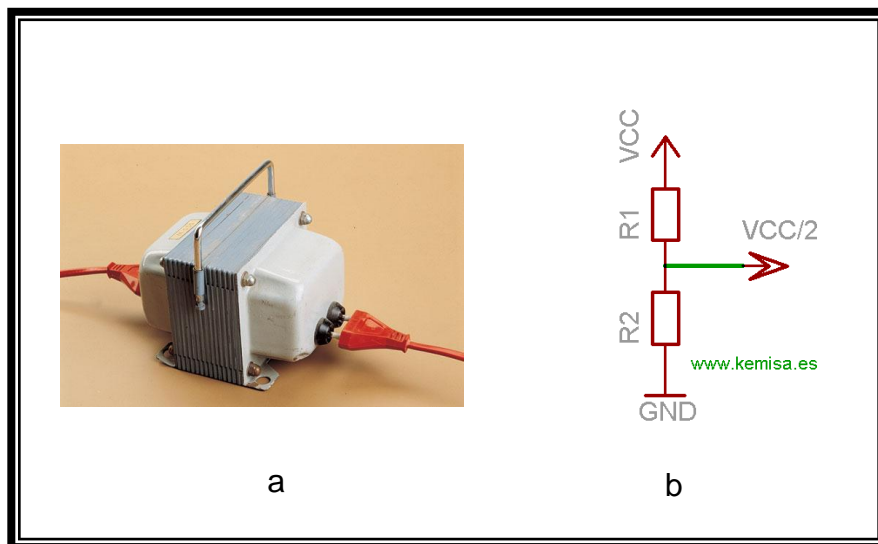
Tabla 11. Comparativa entre transductores de voltaje

	Ventajas	Inconvenientes
Transformador	<ul style="list-style-type: none"> • Añade aislamiento galvánico 	<ul style="list-style-type: none"> • Precio alto • Tamaño grande • No permite la medidas continuas
Divisor de Tensión Resistivo	<ul style="list-style-type: none"> • Precio bajo • Tamaño reducido • Permite la medidas continuas 	<ul style="list-style-type: none"> • No añade aislamiento galvánico • Perdidas energéticas $(V^2)/R$

Fuente. Escuela superior de ingenieros, universidad de Sevilla.

Para esta aplicación se pueden utilizara dos tipos de transductores, como se muestra en la figura 10.

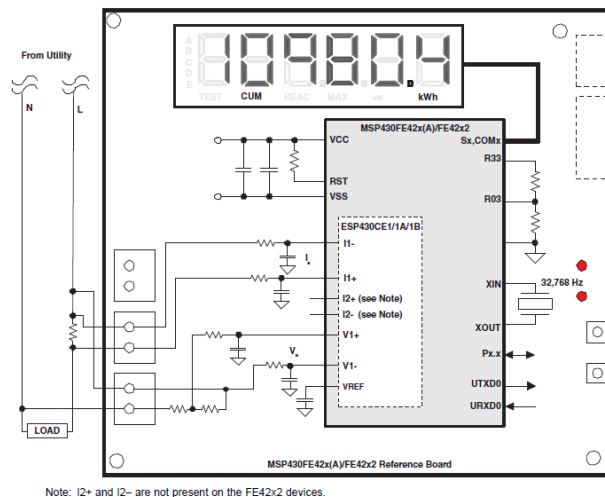
Figura 10. Transductores de voltaje. a. Transformador de voltaje. b. divisor de voltaje con resistencias



Fuente. Elaboración propia

Para la realización de este proyecto se opta por una de las soluciones que propone el fabricante del microcontrolador MSP430FE42x(A) en la hoja de datos, utilizando una resistencia shunt para la lectura de la señal de corriente y un divisor de voltaje con resistencia para la señal de voltaje, esta configuración se muestra en la figura 11.

Figura 11. Configuración con transformador de corriente y divisor de voltaje resistivo.

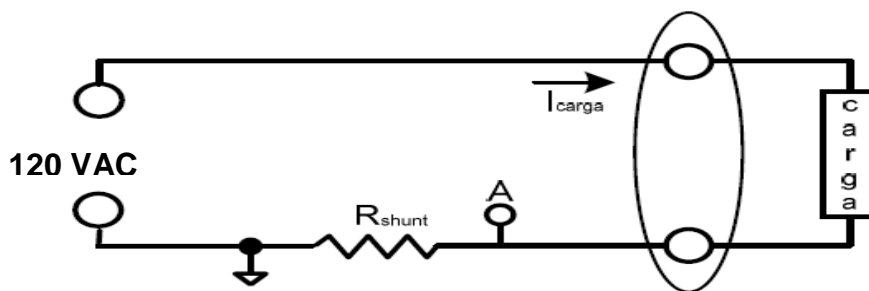


Fuente. Datasheet Implementing An Electronic Watt-Hour Meter With MSP430FE42x(A)/FE42x2

3.2.2 Circuitos de medida de señal. En este apartado se diseñan los circuitos para la medición de las señales analógicas de voltaje y de corriente.

3.2.2.1 Circuito para la medición de corriente.

Figura 12. Circuito de medida de corriente



Fuente. Elaboración propia

Calculo del valor de la resistencia SHUNT: Según las especificaciones del diseño, el dispositivo debe de ser capaz de medir dispositivos de hasta 16A, esto implica:

$$P_{R_{shut\ max}} = I_{carga\ max}^2 * R_{shunt} = (16A)^2 * R_{shunt} \quad \text{Eq.11}$$

Atendiendo a las especificaciones del transductor (OARS-1-005 del fabricante Teletronics), se conoce que su valor de potencia máximo es de 2W, con lo que:

$$P_{R_{shut\ max}} = (16A)^2 * R_{shunt} \leq 2W \rightarrow R_{shunt} \leq \frac{2W}{(16A)^2} = 0.0078\Omega \quad \text{Eq.12}$$

Aproximando al valor comercial más cercano:

$$R_{shunt} = 0.005\Omega$$

Cálculo de las pérdidas energéticas máximas producidas en el transductor: Para el peor de los casos, en el cual la corriente es igual a la máxima:

$$P_{R_{shut\ max}} = I_{carga\ max}^2 * R_{shunt} = (16A)^2 * 0.005 = 1.28W \quad \text{Eq.13}$$

3.2.2.2 Circuito para la medición de voltaje. El circuito que requiere esta configuración es el siguiente:

Figura 13. Circuito de medida de voltaje



Fuente. Elaboración propia

Cálculo de los valores de las resistencias RV1 y RV2: La expresión de funcionamiento de este transductor de tensión, responde al de un divisor de tensión resistivo, el cual se ha de calcular de forma que la tensión de salida presente una amplitud de pico comprendida entre un valor de 1,5V:

$$1.5V = \frac{110\sqrt{2} * R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} \quad \text{Eq.14}$$

Asumiendo el valor de $R_{v1} = 470K\Omega$ tenemos:

$$1.5V = \frac{110\sqrt{2} * R_{v2}}{470K\Omega + R_{v2}} \quad \text{Eq.15}$$

Despejamos R_{v2} de la Eq.16

$$R_{v2} = 4.57K\Omega$$

Un valor comercial para R_{v2} es:

$$R_{v2} = 4.7K\Omega$$

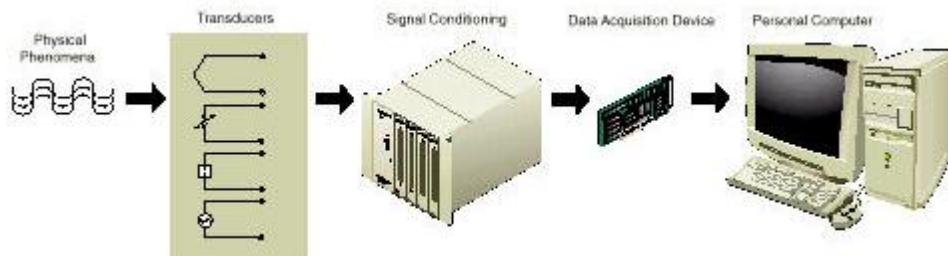
Cálculo de las pérdidas energéticas producidas en el transductor: Para este cálculo basta con analizar la potencia que disipan este conjunto de resistencias en serie:

$$P_{divisor} = \frac{V_{red}^2}{R_{v1} + R_{v2}} = \frac{(120V)^2}{474.7K\Omega} = 30.33mW \quad \text{Eq.16}$$

3.2.3 Acondicionamiento de la señal. El acondicionamiento de la señal de voltaje de 120V AC y la corriente AC, deben realizarse bajo los parámetros requeridos por el circuito integrado MSP430FE42x(A) para su correcta lectura y medición, la señal de la línea debe ser reducida a un nivel aceptable entre 1.3v y 3.3, la conversión analógica digital es realizada internamente por el circuito integrado.

El proceso de acondicionamiento de una señal se muestra en la figura 14

Figura 14. Acondicionamiento de una señal.

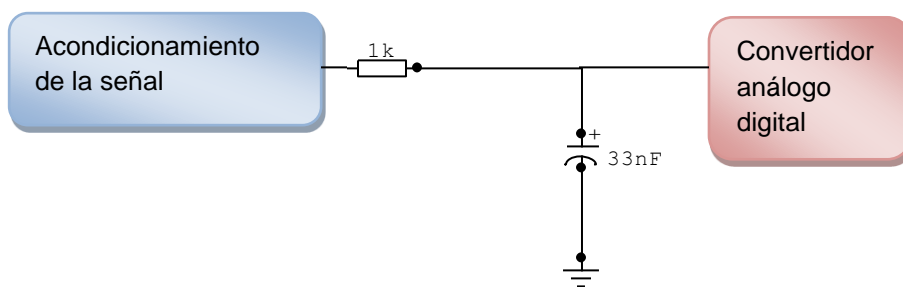


Fuente. www.ni.com/latam

Acondicionamiento de la señal para CAD bipolar, diferencial y con filtro incorporado en el μC : Como se verá posteriormente en el apartado 3.3, existen algunos CAD que ya integran la electrónica necesaria para realizar dicho acondicionamiento de la señal. Esto permite minimizar considerablemente dicho circuito externo, quedando únicamente reducido a un filtro paso bajo RC, que recomienda el fabricante para minimizar el efecto de “aliasing”.

Si se atiende a la recomendación del fabricante del microcontrolador, siempre y cuando la tensión de entrada esté por debajo del umbral máximo de funcionamiento, el circuito de adaptación de entrada se reduce a un simple filtro paso baja RC, para eliminar el efecto de aliasing. Los valores recomendados por el fabricante son una resistencia de 1K Ω en serie con el convertidor análogo digital y un condensador puesto a tierra de 33nF, este circuito se observa en la figura 15.

Figura 15. Circuito de filtrado anti-aliasing



Fuente. Elaboración propia

3.3 ELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR PARA LA MEDICIÓN MSP430F4XX

Se utiliza un microcontrolador complejo (MSP430F4xxx). Esta familia está diseñada específicamente para la realización de aparatos de medidas portátiles, tales como vatímetros, presentando una frecuencia máxima de 16MHz mediante el empleo de un FLL y poseen controlador de LCD integrado.

Algunos modelos (como los F471xx) poseen una CPU nueva denominada MSP430X, que expande el bus de direcciones hasta 20 bits, lo que incrementa notablemente el espacio de direccionamiento.

Más concretamente, la familia F471xx está pensada específicamente para el diseño de medidores de potencia portátiles, por lo que resultan idóneos para esta aplicación.²³

²³ PERSONAL VÁZQUEZ, Enrique, LARIOS MARÍN, Diego Francisco .,Red de sensores de medidas de consumo eléctrico, Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, online PDF, obtenido 16 abril 2010.

Tabla 12. Características de la familia MSP430F4xxx.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • Posee varios CAD que se pueden lanzar simultáneamente • El CAD soporta señales bipolares. • Posee hasta un total de 4 puertos de comunicaciones serie (según modelo). 	<ul style="list-style-type: none"> • Encapsulado grande, debido fundamentalmente al controlador de LCD, que no se va a usar para esta aplicación. • Ligeramente más caros que los de la familia 2 y 1.

Fuente. Escuela superior de ingenieros, universidad de Sevilla.

3.3.1 Adquisición de datos. El proceso de adquisición o conversión analógica digital, tiene asociados dos factores a tener en cuenta. Estos factores son el periodo de muestreo y el fondo de escala de la medida, los cuales se detallan a continuación.

3.3.1.1 Periodo de muestreo. Si se atiende al datasheet del fabricante, la frecuencia máxima del convertidor es de 1.1MHz, teniendo en cuenta que el reloj del sistema es de 8MHz, el escalado de reloj que hay que hacer es de:

$$Escalon \geq \frac{f_{reloj}}{f_{sd16,max}} = \frac{8MHz}{1.1MHz} = 7.27MHz \quad Eq.17$$

3.3.1.2 Escala de la medida. El fondo de escala viene determinada por la tensión de referencia y por la ganancia seleccionada en el canal y está definida por:

$$\mp V_{FSR} = \frac{V_{ref}/2}{GAIN_{PGA}} \quad Eq.18$$

• *Cálculo de la ganancia de la escala de tensión:*

$$V_{max_v} = 1.2 * V_{RMSmax} * \sqrt{2} * \frac{Rv1}{Rv1+Rv2} = 1.2 * 120V * \sqrt{2} * \frac{1k\Omega}{680k\Omega+1k\Omega} = 0.2999 \quad Eq.19$$

Atendiendo a la expresión de rango máximo de escala, y utilizando la referencia interna de 1,2V, se obtiene:

$$V_{FSR_v} \geq 0.2999 \rightarrow GAIN_{PGA_v} \leq \frac{V_{REF}/2}{0.2999} \quad Eq.20$$

$$GAIN_{PGA_v} \leq \frac{0.6}{0.2999} = 2.0064 \quad Eq.21$$

Aproximando este valor al valor permitido por el μC , se establecerá un valor de ganancia:

$$GAIN_{PGA_v} = 2 \quad \text{Eq.22}$$

- *Cálculo de la ganancia de la escala de corriente alta:* En esta escala los rangos de los valores responden a la siguiente expresión:

$$V_{maxIalta} = I_{RMSmaxIalta} * \sqrt{2} * R_{shunt} = 16A\sqrt{2} * 0.005\Omega = 0.1131 \quad \text{Eq.23}$$

Atendiendo a la expresión de rango máximo de escala, y utilizando la referencia interna de 1,2V, se obtiene:

$$V_{FSR_{Ialta}} \geq 0.1131 \rightarrow GAIN_{PGA_{Ialta}} \leq \frac{V_{REF}/2}{0.1131} \quad \text{Eq.24}$$

$$GAIN_{PGA_{Ialta}} \leq \frac{0.6V}{0.1131} = 5.30 \quad \text{Eq.25}$$

Aproximando este valor al inferior permitido por el μC , se establecerá un valor de ganancia:

$$GAIN_{PGA_{Ialta}} = 4 \quad \text{Eq.26}$$

- *Cálculo de la ganancia de la escala de corriente baja:* Para minimizar los errores en las medidas de valores pequeños, se ha optado por utilizar otro canal, con ganancia distinta. Esta segunda escala se propone para medir una carga máxima aproximada de 5A.

$$V_{maxIbaja} = I_{RMSmaxIbaja} * \sqrt{2} * R_{shunt} = 5A * \sqrt{2} * 0.005\Omega = 0.03536V \quad \text{Eq.27}$$

Atendiendo a la expresión de rango máximo de escala, y utilizando la referencia interna de 1,2V, se obtiene:

$$V_{FSR_{Ibaja}} \geq 0.0356V \rightarrow GAIN_{PGA_{Ibaja}} \leq \frac{V_{REF}/2}{0.03536V} \quad \text{Eq.28}$$

$$GAIN_{PGA_{Ialta}} \leq \frac{0.6V}{0.03536V} = 16.97 \quad \text{Eq.29}$$

Aproximando este valor al inferior permitido por el μC , se establecerá un valor de ganancia:

$$GAIN_{PGA_{Ibaja}} = 16 \quad \text{Eq.30}$$

3.3.2 Especificaciones del sistema.

Se desarrollan los cálculos pertinentes con respecto a los diferentes parámetros requeridos por el microcontrolador para su correcto funcionamiento.

3.3.2.1 Voltaje máxima medible. Con respecto a este parámetro existen tres rangos.

Voltaje máximo medible Este límite se corresponde con el máximo valor de tensión medible, tanto eficaz como valor medio.

Para el cálculo de la tensión máxima medible hay que tener en cuenta la ganancia del amplificador operacional interno del microcontrolador.

$$V_{max_v} = \frac{V_{ref}}{2 * GAIN_{PGA_v}} = \frac{1.2}{2 * 1} = 0.6 \quad \text{Eq.31}$$

A partir de dicho voltaje se puede calcular el máximo voltaje de pico de entrada que es capaz de medir el sistema:

$$V_{max_v} = V_{in,max} * \frac{R_{v1}}{R_{v1} + R_{v2}} \rightarrow V_{in,max} = \frac{R_{v1} + R_{v2}}{R_{v1}} * V_{max_v} \quad \text{Eq.32}$$

$$V_{in,max} = \frac{R_{v1} + R_{v2}}{R_{v1}} * V_{max_v} \quad \text{Eq.33}$$

Si se supone una señal puramente senoidal, se puede determinar que el máxima voltaje eficaz de entrada medible es:

$$V_{RMSmax} = \frac{V_{in,max}}{\sqrt{2}} = 288.92v \quad \text{Eq.34}$$

- **Tensión absoluta máxima soportada por el microcontrolador.** La máxima tensión absoluta soportada por el μC , viene limitada por la tensión máxima que es capaz de soportar en la entrada el conversor analógica digital, siendo está según su datasheet de 3,3V.

3.3.2.2 Corriente máxima soportada. Este límite se corresponde con el máximo valor de corriente medible, tanto eficaz como valor medio. Para el cálculo de la tensión máxima medible hay que tener en cuenta la ganancia del amplificador operacional interno del microcontrolador, dicha ganancia vale 4 para la escala de corriente alta.

A partir de dicha ganancia y sabiendo que la tensión de referencia interna es de 1,2V, se puede calcular la máxima caída de tensión que el conversor analógico digital es capaz de medir:

$$V_{maxI} = \frac{V_{ref}}{2 * GAIN_{PGA_V}} = \frac{1.2}{2 * 4} = 0.150 \quad \text{Eq.35}$$

A partir de dicha tensión se puede calcular la máxima corriente de pico de entrada que es capaz de medir el sistema:

$$V_{maxI} = I_{In,max} * R_{shunt} \rightarrow I_{In,max} = \frac{V_{max}}{R_{shunt}} = \frac{0.150v}{0.005\Omega} = 30A \quad \text{Eq.36}$$

Si se supone una señal puramente senoidal, se puede determinar que la máxima corriente eficaz de entrada medible es:

$$I_{RMSmax} = \frac{I_{in,max}}{\sqrt{2}} = 21.213A \quad \text{Eq.37}$$

3.3.2.3 Especificaciones de frecuencia. Los cálculos de la mínima y máxima corriente se desarrollan a continuación.

- **Frecuencia mínima medible:** Para calcular la frecuencia mínima, hay que tener en cuenta que debido al algoritmo programado solo entran al promedio usado para el cálculo de frecuencia aquellos segundos de los últimos 60 segundos medidos en los que se haya producido, al menos un semiciclo.

Teniendo en cuenta esto se puede calcular que la mínima frecuencia medible es:

$$F_{min} = \frac{N_{semiciclos,min}}{2 * T} = \frac{1}{2 * 1} = 0.5Hz \quad \text{Eq.38}$$

Teniendo en cuenta que el dato se representa con una precisión de centésimas de hertzio, se puede concluir que la mínima frecuencia medible es de 0,5Hz.

- **Frecuencia máxima medible:** Aplicando el teorema de Nyquist y teniendo en cuenta de que se está muestreando la señal con un periodo de 256µS, se puede determinar que la frecuencia máxima medible es de:

$$N_{semiciclos,max} = \frac{1}{2 * T_{muestreo}} = \frac{1}{2 * 256\mu s} = 1953 \quad \text{Eq.39}$$

$$F_{max} = \frac{N_{semiciclos,max}}{2 * T} = \frac{1953}{2} = 976.5Hz \quad \text{Eq.40}$$

3.3.2.4 Especificaciones de potencia. Al igual que en los casos de tensión y corriente el límite máximo viene marcado por la saturación del conversor CAD o por la imposibilidad de enviar un dato mayor.

El límite medible del conversor analógico digital considerando al sistema una red rígida de 120V eficaces viene determinado por la saturación del canal de medida de alta corriente. Esta corriente es de 21,213A, siendo por tanto la máxima potencia medible de:

$$P_{max} = V_{RMS} * I_{RMS,max} = 120V * 21.213A = 2545.56W \quad \text{Eq.41}$$

3.3.3 Procesamiento de datos. En esta etapa se hace un proceso de discretización de las señales medidas, este es realizado por el microcontrolador a través de los convertidores análogo digital. Una vez capturado los datos debemos traducir dicha información a magnitudes físicas que realmente queremos medir.

Independientemente de la ganancia introducida por el circuito de medida (divisor de tensión o Rshunt), los datos capturados por el CAD, están codificados en un registro de 16bit, almacenando el dato de medida bipolar con un formato en complemento a dos.

Teniendo en cuenta esta relación, podemos convertir el dato de medida, mediante la siguiente expresión:

$$V_{MED} = \frac{V_{REF}/2}{GAIN_{PGA} * (2^{15}-1)} * MED(puntos CAD) \quad \text{Eq.42}$$

Luego de tener el valor de la medición traducido en puntos del CAD se procede a calcular los valores RMS de las variables, se debe tener en cuenta que las magnitudes se deben aproximar a valores discretos.

3.3.3.1 Calculo de los valores RMS de voltaje y corriente. El valor RMS de una señal AC es el valor de tensión DC que deberíamos aplicar a una carga resistiva para que produzca la misma disipación de energía que si conectásemos esa misma carga resistiva a la señal AC en cuestión.²⁴

La definición matemática del valor cuadrático medio, responde a:

$$Med_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_{t_0}^{T+t_0} [Med(t)]^2 * dt} \quad \text{Eq.43}$$

Como se menciona en el párrafo anterior es necesario aproximar la ecuación 44 a una expresión discreta, tal como:

$$Med_{RMS} = \sqrt{\frac{\Delta t}{T} * \sum_{K=1}^{Nmuestras} [Med_k]^2} = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^{Nmuestras} [Med_k]^2}{Nmuestras}} \quad \text{Eq.44}$$

3.3.3.2 Calculo del factor de escala. Las medidas obtenidas por el CAD del μC son tomadas en base a una tensión de referencia. Esto unido a los componentes utilizados para escalar las medidas, hacen necesario la aplicación de un factor de escala, que nos permita hacer la conversión entre la medida en puntos del CAD y el parámetro real de medida.

$$Med_{RMS} = escala \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^{Nmuestras} [Med_k(puntos CAD)]^2}{Nmuestras}} \quad \text{Eq.45}$$

²⁴QMAX, energías renovables, Medición del Valor Eficaz de una Señal Alterna, Online.

- **Factor de escala en la medida de tensión eficaz (escala V):** Teniendo en cuenta los valores del divisor de tensión y que se han utilizado una configuración del CAD bipolar, de 16 bits, con ganancia 1

$$escalaV = \frac{680K\Omega + 1k\Omega}{1k\Omega} * \frac{0.6v}{(2^{15}-1)} = 1.2469 * 10^{-2}V \quad Eq.46$$

- **Factor de escala en la medida de corriente (escala I):** Teniendo en cuenta el valor de la resistencia shunt y que se han utilizado una configuración del CAD bipolar, de 16 bits, con ganancia 16.

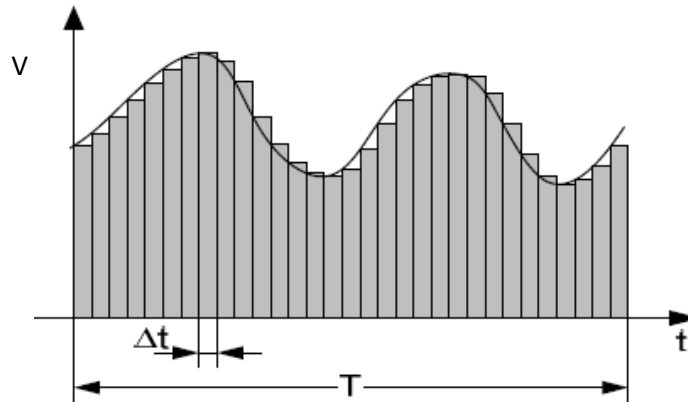
$$escalaI = \frac{1}{0.005\Omega} * \frac{1}{16} * \frac{0.6v}{(2^{15}-1)} = 2.2888882 * 10^{-4}A \quad Eq.47$$

3.3.3.3 Cálculo de la potencia activa. La definición matemática de la potencia activa, responde a:

$$P_{activa} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} [i(t) * v(t)] * dt \quad Eq.48$$

Hay que traducir esta expresión a tiempo discreto:

Figura 16. Aproximación discreta de la integral.



Tenemos que la potencia activa en forma discreta está representada por la siguiente ecuación.

$$P_{activa} = \frac{1}{T} * \int_{t_0}^{T+t_0} [i(t) * v(t)] dt \equiv \frac{1}{T} * \sum_{K=1}^{Nmuestras} [i_k * v_k] * \Delta t \quad Eq.49$$

Como en Δt es constante:

$$P_{activa} = \frac{\Delta t}{T} * \sum_{K=1}^{Nmuestras} [i_k * v_k] = \frac{\sum_{K=1}^{Nmuestras} [i_k * v_k]}{Nmuestras} \quad \text{Eq.50}$$

- **Calculo del factor de escala:** Para el cálculo de la potencia activa, se trabaja con los valores del CAD, acumulándose el producto de la medida de tensión y corriente. Debido a esto hemos de utilizar también un factor de conversión.

$$P_{activa} = \frac{\sum_{K=1}^{Nmuestras} [i_k * v_k]}{Nmuestras} = \frac{\sum_{K=1}^{Nmuestras} [escalaI * i_k(puntosCAD) * escalaV * v_k(puntosCAD)]}{Nmuestras} \quad \text{Eq.51}$$

$$P_{activa} = escalaI * escalaV \frac{\sum_{K=1}^{Nmuestras} [i_k(puntosCAD) * v_k(puntosCAD)]}{Nmuestras} \quad \text{Eq.52}$$

$$P_{activa} = escalaP_{activa} \frac{\sum_{K=1}^{Nmuestras} [i_k(puntosCAD) * v_k(puntosCAD)]}{Nmuestras} \quad \text{Eq.53}$$

Atendiendo a los valores de $escalaI$ y $escalaV$, calculados en el apartado anterior, podemos calcular la escala para el parámetro de potencia activa.

$$escalaP_{activa} = \frac{1}{0.005\Omega} * \frac{1}{16} * \frac{0.6V}{(2^{15}-1)} * \frac{680K\Omega+1K\Omega}{1K\Omega} * \frac{0.6}{(2^{15}-1)} = 2.854212 * 10^{-6}W \quad \text{Eq.54}$$

3.3.3.4 Cálculo de la potencia aparente. La potencia aparente (también llamada compleja), se puede definir como la suma vectorial de la potencia activa (energía disipada por el circuito en forma de trabajo en un tiempo) y potencia reactiva (energía que se intercambian los componentes inductivos y capacitivos con la fuente de energía, devolviendo siempre toda la energía absorbida, realizándose un trabajo nulo al finalizar el periodo de la señal). La potencia aparente se mide en voltiamperios (VA).²⁵

La relación entre estas potencias, se puede representar mediante el triángulo de potencias de la figura 7:

La definición matemática de la potencia aparente, responde a:

$$P_{aparente} = V_{EF} * I_{EF} \quad \text{Eq.55}$$

²⁵ PERSONAL VÁZQUEZ, Enrique, LARIOS MARÍN, Diego Francisco .,Red de sensores de medidas de consumo eléctrico, memoria del calculo. Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, online PDF,pag.77 obtenido 26 abril 2010.

El cálculo de este parámetro se puede realizar de forma indirecta, utilizando los valores eficaces de tensión y corriente calculados anteriormente.

3.3.3.5 Cálculo de la potencia reactiva. Esta potencia la consumen los circuitos de corriente alterna que tienen conectadas cargas reactivas, como pueden ser motores, transformadores de voltaje y cualquier otro dispositivo similar que posea bobinas o enrollados. Esos dispositivos no sólo consumen la potencia activa que suministra la fuente de fuerzas electromotriz, sino también potencia reactiva.

La potencia reactiva o inductiva no proporciona ningún tipo de trabajo útil, pero los dispositivos que poseen enrollados de alambre de cobre, requieren ese tipo de potencia para poder producir el campo magnético con el cual funcionan. La unidad de medida de la potencia reactiva es el volt-ampere reactivo (VAR).²⁶

La definición matemática de la potencia reactiva, la podemos extraer del triángulo fundamental de potencias de la figura 8, respondiendo a:

$$P_{reactiva} = \sqrt{(P_{aparente})^2 - (P_{activa})^2} \quad \text{Eq.56}$$

El cálculo de este parámetro se puede realizar de forma indirecta, utilizando los valores de potencia activa y potencia aparente, calculados anteriormente.

3.3.3.6 Cálculo del factor de potencia. Factor de Potencia es el término usado para describir la relación entre la potencia de trabajo o real y la potencia total consumida. Las cargas puramente resistentes, tales como calefactores, lámparas incandescentes, etc. No requieren potencia reactiva para su funcionamiento, entonces la potencia real y la potencia total son iguales (F.P. = 1).²⁷

La definición matemática del factor de potencia, responde a:

$$f.d.p = \frac{P_{activa}}{P_{aparente}} \quad \text{Eq.57}$$

3.3.3.7 Cálculo de la energía. La acumulación de tiempo discreto es equivalente a la integración en tiempo continuo, por lo tanto tenemos:

$$E = \int P(t)dt = \lim_{T \rightarrow 0} \{ \sum_{n=0}^{\infty} P(nT)T \} \quad \text{Eq.58}$$

Donde n es el número de muestras discretas de tiempo y T el período de muestreo.

²⁶ASI FUNCIONA , Qué es el factor de potencia, online, <http://www.asifunciona.com>, Madrid, martes, 27 de abril de 2010

²⁷ INELAP , Guía rápida para corregir el factor de potencia [online] <http://reasa.com.mx/iconos/folleto-1.pdf> obtenido 13 mayo 2010.

Teniendo en cuenta que se está realizando un cálculo cíclico de energía, la expresión queda:

$$Energia = Energia_{anterior} + P_{activa} * T_{muestreo} \quad \text{Eq.59}$$

Siendo ésta la expresión matemática que se programa para el cálculo de la energía.

Cálculo del factor de escala: De la manera que se ha expresado la fórmula del apartado anterior, el resultado de la energía está expresado en Julios, siendo en esta unidad en la que se opera internamente en el algoritmo. Ahora bien, en la tabla de variables compartidas por la red zigbee el dato se guarda en kWh, por resultar esta unidad más conveniente para las medidas eléctricas. La conversión de unidades que hay que hacer, teniendo en cuenta que un Julio equivale a un vatio por segundo es la siguiente:

$$Energia_{kWh} = Energia_{W*s} * \frac{1kw}{1000w} * \frac{1min}{60s} = \frac{Energia_{W*s}}{3.6*10^6} \quad \text{Eq. 60}$$

3.3.3.8 Cálculo de la frecuencia. La frecuencia se define como el número de ciclos que se producen de una señal por unidad de tiempo, siendo su unidad el Hertzio.

$$F = \frac{N^{\circ}ciclos}{tiempo} \quad \text{Eq.61}$$

Para el cálculo de la frecuencia se ha programado una fórmula similar a la anterior, teniendo en cuenta que en vez de contar ciclos se cuentan semiciclos y que los intervalos de muestreo sin semiciclos no se han considerado en el sumatorio:

$$F = \frac{\sum_{i=0}^T N^{\circ}semiciclos_i}{2*T(N^{\circ} intervalos con semiciclos \neq 0)} \quad \text{Eq.62}$$

3.3.4 Software de programación del integrado. Existen muchos compiladores de programación para el microcontrolador que se utilizara para el desarrollo del trabajo. Se hará uso del IAR Embedded Workbench KickStart.

Siendo este un entorno de desarrollo gratuito desarrollado por IAR y facilitado por Texas Instruments en su propia web²⁸.

Sus principales ventajas e inconvenientes se presentan en la tabla 13.

²⁸TEXAS INSTRUMENT, IAR Embedded Workbench Kickstart - Free 4KB IDE, [on line].

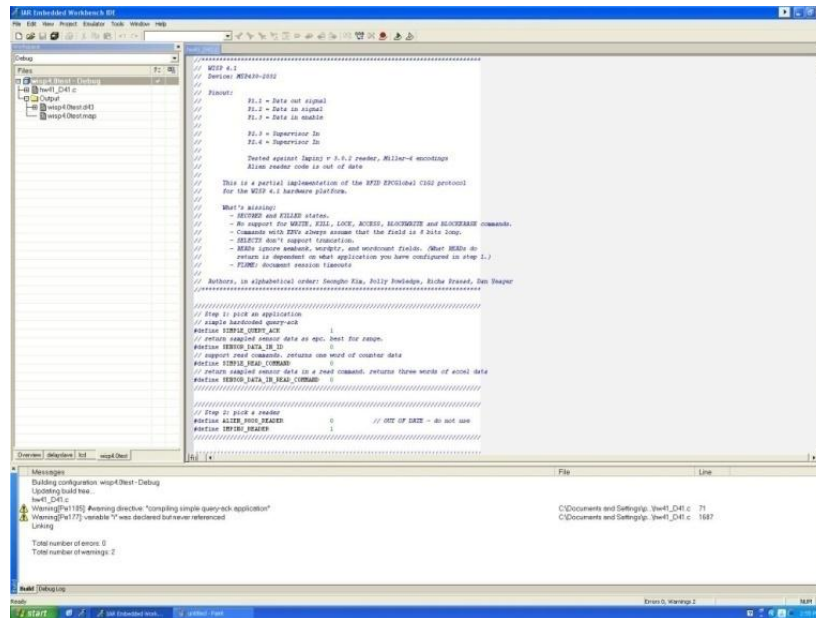
Tabla 13. Características del IAR Embedded Workbench KickStart.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • Versión gratuita. • Soporta todos los micros de la familia, incluso los más nuevos. • Genera código muy eficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Código limitado a unos 9K. • Entorno de trabajo más incómodo que el de Rowley Associates.

Fuente. Escuela superior de ingenieros, universidad de Sevilla.

Este compilador es el que recomienda la Texas Instruments como herramienta de partida, presentando un entorno amigable, pero estando restringido a que el código que se desarrolle tiene que ser menor de 9K.

Figura 17. Entorno de programación del IAR Embedded Workbench KickStart



Fuente. <http://wisp.wikispaces.com/file>

3.4 SISTEMA DE ENCENDIDO Y APAGADO

3.4.1 Circuito de potencia. Para los propósitos de este proyecto se debe diseñar un circuito de potencia que permita conmutar una carga de 16 A a 120 V AC, para esto se plantean una soluciones basada en un control por TRIAC.

Sus características fundamentales se resumen en la tabla 14.

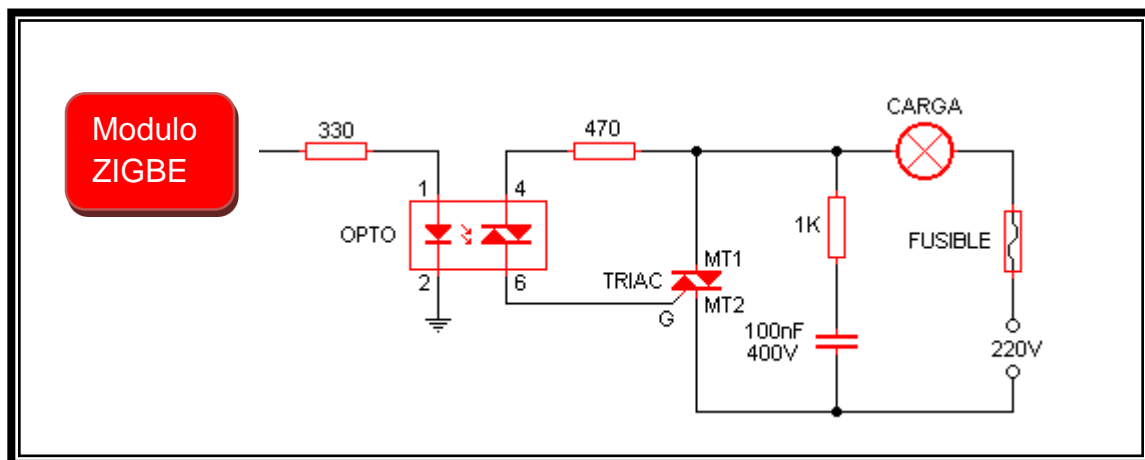
Tabla 14. Ventajas e inconvenientes del TRIAC.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • No tienen desgaste mecánico. • Alta fiabilidad • Presenta unas pérdidas reducidas • Las pérdidas que introducen dependen de la carga que controlan • Con el circuito de control adecuado, se pueden usar en regulación de la carga 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesitan incorporarle un disipador para poder manejar corrientes elevadas • Aunque el tamaño del componente es muy reducido, el conjunto triac + disipador es voluminoso

Fuente. Elaboración propia

El circuito de control sobre la carga utilizando el TRIAC BTA24800 empleado para el desarrollo de este proyecto se muestra en la figura 18.

Figura 18. Circuito de potencia con TRIAC



El circuito de potencia es el encargada de activar y desactivar la carga que sea conectada al medidor, para el caso de este proyecto será un electrodoméstico con un consumo máximo de 20 amperios y alimentado con 120v AC. El circuito mostrado en la figura 18 consta de un opto acoplador MOC 3011 que aísla la señal de potencia con la señal de control proporcionada por el modulo Zigbee, la resistencia de 330 ohmios se utiliza para encender el Led interno del MOC, y este a su vez activa el TRIAC interno de este, permitiendo que la corriente circule hacia la compuerta del TRIAC que conmuta la carga.

Para este proyecto no se hace necesario la utilización de un PWM debido a que el control sobre la carga será ON-OFF. En el circuito se hace uso del TRIAC BTA24800 que actúa como conmutador o switch, la señal proveniente del opto acoplador llega a la compuerta de TRIAC permitiendo de esta forma que la corriente circule de la terminal MT1 hacia la terminal MT2 y completando el circuito para activar o desactivar la carga. Como se menciono anteriormente una de las principales ventajas del TRIAC es que permite que a través de él circule tanto el ciclo positivo como el ciclo negativo de la señal de alimentación, permitiendo de este modo que a la carga llegue la señal completa sin intervalos de tiempo donde no se tiene presencia de voltaje actuando sobre la carga. Adicionalmente en el circuito de potencia se dispone de un condensador y una resistencia en serie formando una red snubber, que son utilizadas para proteger el elemento activo de conmutador (TRIAC) de las sobre tensiones producidas por una carga inductiva, al ser una red de protección esta se coloca en paralelo con el elemento de conmutación. Para este proyecto solo se coloca este circuito como prevención debido que solo se manejaran cargas resistivas.

Para la implementación de este circuito de potencia hay que tener en cuenta el cálculo del disipador de calor que debe tener el TRIAC debido a que este presenta una caída de tensión en conducción de 1.5v aproximadamente, lo que hace que al pasar una corriente máxima de 16 A sea necesario la utilización de un disipador.

3.4.1.1 Disipador térmico.

- **Propagación del calor:** El calor se transmite mediante tres formas conocidas: radiación, convección y conducción. Por radiación recibimos los rayos del Sol. La radiación no necesita un medio material para propagarse, puede hacerlo a través del vacío. Todo cuerpo con una temperatura superior a los cero grados absolutos (kelvin) produce una emisión térmica por radiación, pero en el caso que nos ocupa es de una magnitud despreciable, y por tanto no se tiene en cuenta la emisión por radiación. La convección es un fenómeno que atañe a fluidos, tales como el aire o el agua. Favorece la propagación del calor en estos cuerpos, que son de por sí muy buenos aislantes térmicos. Un cuerpo caliente sumergido en aire, hace que las capas próximas al mismo se calienten, lo que a su vez ocasiona una disminución de su densidad, y por esto se desplazará esta masa de aire caliente hacia estratos más elevados dentro del recinto. Inmediatamente, el "hueco" que ha dejado este aire es ocupado por aire más frío, y así se repite el ciclo, generando corrientes convectivas que facilitan el flujo térmico. Este mismo fenómeno se da en el agua, o cualquier líquido o gas. La transmisión por conducción se manifiesta más obviamente en cuerpos sólidos.

Curiosamente los cuerpos que son buenos conductores eléctricos, también lo son térmicos, y se explica a nivel subatómico. El cobre, la plata, níquel, aluminio, oro,

etc., son excelentes conductores. Si aplicamos una llama a una barra de cobre, enseguida notaremos el calor por el extremo que lo agarramos. Este calor se ha propagado por conducción.²⁹

En la disipación de calor de los semiconductores, solamente consideramos los dos últimos tipos de propagación: convección y conducción.

- **Analogía eléctrica:** Se puede establecer una correspondencia entre la Ley de Ohm y la propagación térmica mediante la siguiente tabla de equivalencias:

Tabla 15. Analogía entre la ley de ohm y la propagación térmica.

Analogía térmica - Ley de Ohm	
Intensidad (I)	Calor (W)
Voltaje (V)	Temperatura (T)
Resistencia (R)	Resist. térmica (R)
$V = IR$	$T = WR$

Fuente. Elaboración propia

- **Resistencia térmica:** La resistencia térmica (RT) se define como la oposición que presenta un medio para que el calor pueda fluir a través de él. Sus unidades, normalmente, se dan en °C/W.

Por lo tanto, el calor deberá vencer 3 resistencias térmicas para disiparse al ambiente:

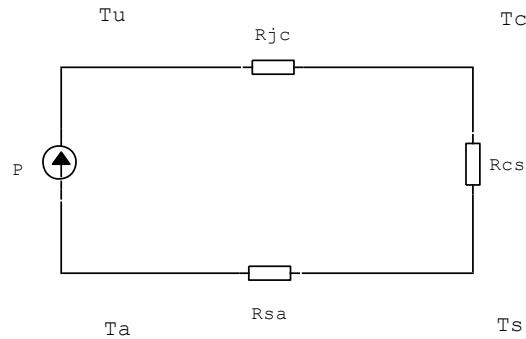
- La resistencia de las uniones semiconductoras (Juntion) hacia el encapsulado (Case) del dispositivo (R_{JC})
- La resistencia del encapsulado (Case) hacia el disipador de aluminio (Heat Sink) (R_{CS}).
- La resistencia del disipador (Sink) al ambiente (R_{SA}).³⁰

En la figura 19 se muestra la relación entre estas resistencias, la potencia y la temperatura.

²⁹ LCARDABA. Disipadores térmicos [en línea]. <<http://www.lcardaba.com/articles/heatsinks/heatsinks.htm>>. [citado: 5 abril 2010]

³⁰ LAPHAM CÁRDENAS, Luis. Selección de disipadores de calor para semiconductores de potencia. división de electricidad C.E.T.I. COLOMOS, 5 abril 2010.

Figura 19. Modelo eléctrico de la transferencia de calor en un semiconductor.



Fuente. Elaboración propia

Donde:

P = Pérdida de Potencia del dispositivo W

T_j = Temperatura de la unión en °C/W

T_c = Temperatura del encapsulado en °C/W

T_s = Temperatura del disipador en °C/W

T_a = Temperatura ambiente en °C/W

Entonces se aplica la analogía de un circuito eléctrico al esquema anterior, tendremos la siguiente expresión:

$$T_j - T_a = P(R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}) \quad \text{Eq.63}$$

La mayoría de fabricantes de semiconductores proporcionan los datos suficientes para poder calcular el disipador que necesitamos. Necesitamos como punto de partida, la temperatura máxima que puede alcanzar la unión del transistor. Esta temperatura no se deberá alcanzar en ningún caso, para no destruir el componente. Normalmente el fabricante proporciona el "operating temperature range" que indica el valor de la temperatura máxima.

La variable será entonces la resistencia térmica del disipador al ambiente. Despejando de la ecuación 11 la R_{sa} , tenemos:³¹

$$R_{sa} = \frac{T_j - T_a}{P} - (R_{jc} + R_{cs}) \quad \text{Eq.64}$$

³¹ LAPHAM CÁRDENAS, Luis. Selección de disipadores de calor para semiconductores de potencia. división de electricidad C.E.T.I. COLOMOS, 5 abril 2010.

- **Metodología de diseño para disipadores de calor.** Para aplicar el disipador de calor adecuado a una cierta aplicación de la electrónica de potencia, se pueden seguir al menos dos caminos. El primero consiste en realizar los cálculos pertinentes para determinar la resistencia térmica del disipador hacia el ambiente necesaria, y luego dimensionar la pieza de aluminio a utilizar. Otro método consiste en que, una vez que se determina la R_{sa} , seleccionamos un disipador comercial disponible en un catálogo comercial. En este trabajo se considera la segunda opción por considerarla más práctica.

Los principales pasos para proteger a los dispositivos de potencia de sobrecalentamientos son:

- Estimar la potencia máxima que va a disipar el dispositivo electrónico.
- Buscar en el datasheet las R_{jc} , y R_{cs} , así como la temperatura máxima de operación del dispositivo a proteger.
- Identificar el tipo de encapsulado del dispositivo
- Calcular la R_{sa} .
- Seleccionar el disipador de aluminio comercial que cumpla con una resistencia térmica igual o menor a la calculada.

Montar el dispositivo al disipador, aplicando un material aislante entre los dos para llenar los pequeños huecos entre las dos superficies y así mejorar la transferencia de calor.³²

3.4.1.2 Diseño del disipador de calor. Para el diseño del disipador hay que tener en cuenta las características del dispositivo que se está utilizando. Para el caso de este proyecto se hará uso del TRIAC BTA16600 y sus parámetros básicos se muestran a continuación.

- Temperatura máxima que puede alcanzar (T_{max}):
- $T_j \text{ max} = 125 \text{ °C}$. A una temperatura ambiente $T_a = 25 \text{ °C}$.
- Resistencia térmica juntura carcasa (R_{jc}):
- $R_{jc} = 2.1 \text{ °C/W}$.
- Resistencia térmica carcasa disipador (R_{cs}):

Para determinar el valor de esta resistencia térmica se toma como referencia la tabla 16, en donde se muestra el valor de la resistencia térmica dependiendo de material aislante que se coloque entre el disipador y la carcasa del dispositivo.

³² Ibid, LAPHAM CARDENAS

Tabla 16. Resistencias térmicas de aisladores.

RESISTENCIA TERMICA CONTENEDOR -DISIPADOR				
Tipo de contenedor	Contacto directo sin mica	Contacto directo y silicona	Contacto con mica	Contacto con mica silicona
TO.5	1	0,7	--	--
TO.39	1	0,7	2	1,5
TO.126	1,4	1	1,4	1,3
TO.220	0,8	0,5	1,4	1,2
TO.202	0,8	0,5	1,4	1,2
TO.152	0,8	0,5	1,2	0,9
TO.90	0,5	0,3	1	0,7
TO.3P.	0,4	0,2	2,1	1,5
TO.59	1,2	0,7		
TO.117	2	1,7	--	--
SOT.48	1,8	1,5		
DIA.4L	1,1	0,7		
TO.66	1,1	0,65		

Fuente. <http://www.lcardaba.com/articles/heatsinks/heatsinks.htm#tablas>.

Para el diseño del disipador se utilizara un contacto directo y silicona para un tipo de carcasa o contenedor TO.220 que es el que corresponde al TRIAC BTA16600.

$$R_{cs} = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C/W.} \quad \text{Eq.65}$$

La potencia máxima que disipa el TRIAC es el producto de la caída de tención en conducción entre MT1 y MT2 y la máxima corriente que circula por este.

$$P_{max} = 1.5V * 16A \quad \text{Eq.66}$$

$$P_{max} = 24W \quad \text{Eq.67}$$

Los datos anteriores son tomados del datasheet del fabricante STmicroelectronics.³³

Aplicando los valores anteriores en la Eq.69 tenemos:

$$R_{sa} = \frac{125 - 25}{24} - (2.1 + 0.5) \quad \text{Eq.68}$$

$$R_{sa} = 1.566 \text{ } ^\circ\text{C/W.} \quad \text{Eq.69}$$

³³ STmicroelectronics. Datasheet , en línea PDF ,<http://www.st.com> 6 abril 2010

Ahora, se debe seleccionar un disipador de aluminio comercial en el que se pueda montar el TRIAC de encapsulado tipo: TO-220, y que tenga una resistencia térmica igual o menor a $1.566 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Acudimos a un catalogo del fabricante AAVID THERMALLOY.³⁴ Y seleccionamos el más adecuado para nuestro propósito.

El disipador seleccionado es el S561/B/75 con unas dimensiones $120 \times 75 \times 37 \text{ mm}$ con una resistencia térmica de $1.3 \text{ }^\circ\text{C/W}$ que para el caso es válido el valor

Figura 20. Disipador de calor S561/B/75



Fuente. <http://es.rs-online.com>

3.4.2 Comunicación con el modulo Zigbee. Para realizar la comunicación del circuito medidor con el modulo de comunicaciones Zigbee se hará uso del protocolo RS232 que tanto el modulo Zigbee como el microcontrolador para la medición cuenta con este.

3.4.2.1 Comunicaciones RS232. Este tipo de comunicaciones es un interfaz que define una norma para las comunicaciones entre dos elementos, un maestro (DTE) y una unidad esclava (DCE). Requiere del empleo 3 conductores para establecer las comunicaciones, TX, RX y GND, además en la norma se definen otros conductores adicionales relacionados con la sincronización de mensajes entre los elementos, así como algunos conductores adicionales de alimentación (hasta llegar a los 9 ó 25 conductores que define la norma), si bien en su forma más simple estos cables adicionales no son necesarios.

3.4.2.2 Características de la comunicación. Especificaciones explícitas de ingeniería

- Niveles de voltaje (-15v hasta +15v); un bit por baudio, forma de la señal que representa un 1 y un 0; el propósito o función de cada uno de los 25 pines que conforman la interface.

Lineamientos de ingeniería que pueden modificarse (flexibles)

³⁴ AAVID THERMALLOY. Online Catalog. [online]. [Citado: 6 abril de 2010].

- Método para iniciar y terminar el el flujo de datos; método para coordinar al emisor y al receptor

Consideraciones NO especificadas en el estándar

- La forma en que los caracteres se representan con bits; el tipo de conector utilizado.³⁵

3.5 FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL DISPOSITIVO

En este apartado se hacen los cálculos de la fuente de alimentación del circuito de medición y el modulo de comunicación Zigbee.

3.5.1 Requisitos para el diseño de la fuente. El voltaje de salida de la fuente será de 3,3V, puesto que a esta tensión se tiene que alimentar el microcontrolador para la medición de energía. Para el cálculo de los requisitos de la fuente de alimentación hay que hacer un dimensionado del consumo de corriente previsto por todos los elementos. En la siguiente tabla se muestra dicha estimación, extraída a partir de los datos que aparecen en sus respectivos datasheet:

Tabla 17. Consumo de energía del circuito.

Nombre	Descripción	Consumo
Regulador de tensión 3,3V	Consumo de corriente necesaria por el regulador elegido para su funcionamiento	12μA
Microcontrolador	Consumo calculado para el microcontrolador funcionando a 16MHz	5mA
Led indicador	Consumo del led que se usa como indicador de Funcionamiento	2mA
Opto-triac	Consumo del opto-triac usado para controlar el elemento actuador de la carga.	7mA
Comunicaciones.	Consumo máximo previsto por el bloque de comunicaciones. Esto se ha dimensionado para que permita en un futuro comunicaciones inalámbricas.	40mA

Fuente. Elaboración propia

³⁵ HELD, Gilbert. "Data Communications Networkink Devices". John Wiley & Sons. New York. 1999

Sumando todos estos valores se obtienen un consumo de 55mA. Teniendo en cuenta que para las cantidades anteriores se ha supuesto los valores máximos de pico, con lo que se obtiene que la fuente deba cumplir con las siguientes características:

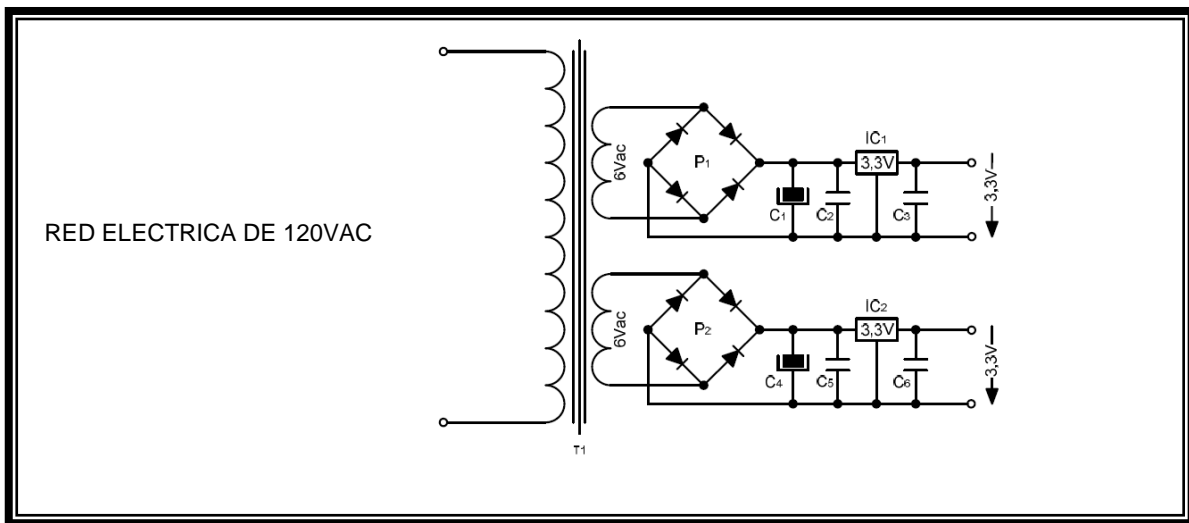
$$V_{salida} = 3.3v \quad \text{Eq.70}$$

$$I_{salida} = 55mA \quad \text{Eq.71}$$

Para el diseño del proyecto se realizara una fuente con dos salidas de voltaje, una para el circuito medidor de energía y otro para las comunicaciones, por lo tanto es suficiente hacer el diseño con una corriente de salida de 40mA por cada canal.

3.5.2 Fuente de alimentación con transformador.

Figura 21. Diagrama de la fuente de alimentación.



Fuente. Elaboración propia

3.5.2.1 Cálculo de la corriente necesaria de entrada. Para el cálculo de la corriente de entrada se puede utilizar inicialmente la suposición de que el regulador conmutado de 3,3V utilizado se comporta como un transformador. En este caso, si se parte de que la tensión de salida nominal es de 3,3V (3,432V en el peor de los casos según el datasheet) la relación de transformación es:

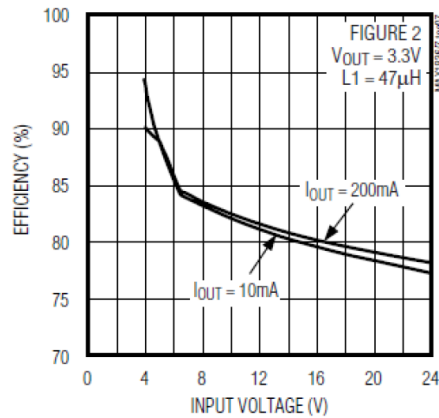
$$D_{max} = \frac{V_{salida,max}}{V_{entrada,min}} = \frac{3.462v}{(6*\sqrt{2})-rizado} = \frac{3.462v}{8.48-1v} = 0.463 \quad \text{Eq.72}$$

Por lo que la corriente ideal necesaria de entrada, para una corriente de salida de 40mA por devanado es de:

$$I_{entrada,ideal,max} = D_{max} * I_{salida,max} = 0.463 * 40mA = 18.52mA \quad \text{Eq.73}$$

Teniendo como referencia la siguiente figura.

Figura 22. Rendimiento en funcion de la tencion de entrada del microcontrolador



Fuente. datasheet del microcontrolador MSP430

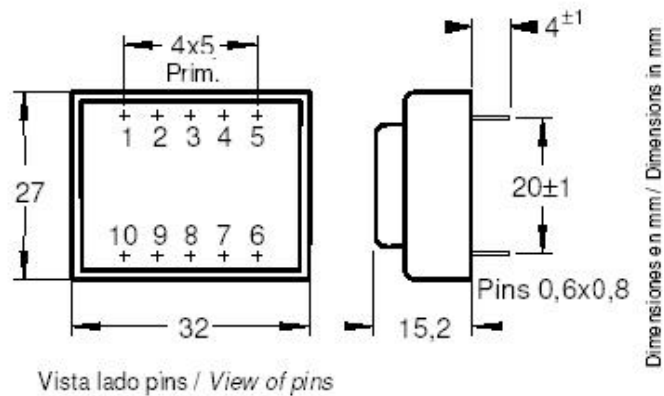
Se puede comprobar que hasta aproximadamente 9V de entrada el rendimiento es siempre mejor del 80%, por lo que la corriente de entrada máxima será:

$$I_{entrada,max} = \frac{I_{entrada,ideal,max}}{Eficiencia} = \frac{18.52mA}{0.8} = 23.15mA \quad \text{Eq.74}$$

Siendo este valor de corriente el que se considerara para dimensionar el resto del circuito.

3.5.2.2 Cálculo del transformador T1. Para el cálculo del transformador, hay que tener en cuenta las especificaciones de la fuente. La entrada o primario, viene determinada por la red eléctrica, mientras que por la parte de salida se requiere un doble secundario. Para las especificaciones requerida a la salida (3,3V y 55mA), se ha optado por el transformador más pequeño de la familia T70/E del fabricante Crovisa (ref: 30806905). Este transformador tiene una salida de 0,5VA, lo que implica dos salidas de hasta 41.6mA corriente superior a los 23,15mA requeridos.

Figura 23. Dimensiones del transformador



Fuente. <http://www.crovisa.com/espanol/ei30-5.htm>

El transformador escogido tiene unas pérdidas de 2W, el cual implica un rendimiento máximo del 15%.

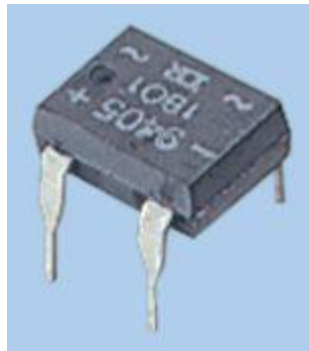
3.5.2.3 Cálculo de los puentes rectificadores (P1 y P2): Para la aplicación se ha optado por dos puentes rectificadores de referencia DB101g, los cuales soportan voltajes de hasta 50V y corrientes de 1. Características por encima de las necesidades del circuito:

Para los cálculos de voltaje se ha introducido un coeficiente de seguridad de 1.5.

$$V_{max} = 1.5 * 6v\sqrt{2} = 12.728v \quad \text{Eq.75}$$

$$I_{max} = 23.15mA \quad \text{Eq.76}$$

Figura 24. Puente rectificador

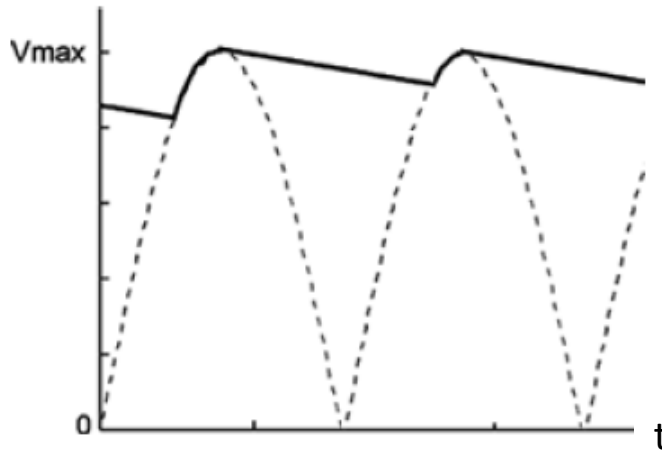


Fuente. <http://es.farnell.com/taiwan-semiconductor>

3.5.2.4 Cálculo de los condensadores de filtro C1 y C4: El valor de este condensador, ha de ser tal que se garantice un rizado como máximo de 1V. Para este cálculo se estudiará el caso extremo, una corriente de salida constante igual a la máxima demanda.

Si el rizado es muy pequeño, el tiempo de descarga del condensador aproximadamente igual a un semiperiodo (10ms).

Figura 25. Filtrado de señal rectificadas



$$\Delta V = \frac{I_{salida}}{C} * \Delta T \quad \text{Eq.77}$$

$$\Delta V \leq 1V \rightarrow C \geq \frac{23.15mA}{1V} * 10ms = 231.5\mu F \quad \text{Eq.78}$$

Para el cálculo de la tensión máxima que ha de soportar cada uno de estos condensadores, se utilizará el mismo coeficiente de seguridad que para el puente rectificador.

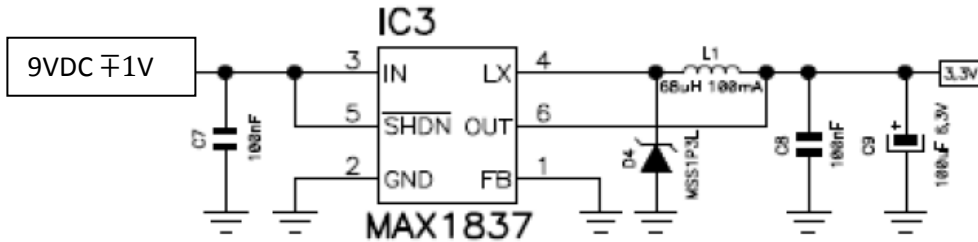
$$V_{max} = 1.5 * 6V\sqrt{2} = 12.728V \quad \text{Eq.79}$$

Atendiendo a estos límites, se ha optado por dos condensadores:

$$C_1 = C_4 = 270\mu/15v \quad \text{Eq.80}$$

3.5.2.5 Cálculo del regulador de tensión de 3.3V: Para la fuente de alimentación de 3,3V se usa el siguiente esquema:

Figura 26. Circuito del regulador de voltaje.



Fuente. <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/maxim/MAX1836-MAX1837.pdf>

Con el fin de mejorar las eficiencias energéticas se ha decidido usar un regulador conmutado, que posea un alto rendimiento, bajo rizado y que sea capaz de entregar una corriente superior a los 55mA necesarios para estas fuentes. Un regulador como el MAX1837 cumple con con las especificaciones anteriores y además presenta la ventaja de requerir muy pocos componentes, puesto que el mosfet de salida lo lleva integrado.

Cálculo de las pérdidas energéticas en los reguladores: Al ser un regulador conmutado, sus pérdidas energéticas son mínimas. Ya que si se atiende a su datasheet en el peor de los casos, el rendimiento siempre será superior al 75%.³⁶

Cálculo de los condensadores de desacoplo C7 y C8: Todos los condensadores de desacoplo que se usan en este proyecto tienen un valor de 100nF por recomendación del fabricante.

Cálculo del diodo D4: Este diodo debe ser capaz de funcionar a una frecuencia superior a la máxima del regulador (180kHz), y debe soportar los 250mA que como máximo entrega el regulador y teniendo una caída de tensión baja, con el fin de reducir las pérdidas. El diodo seleccionado MSS1P3L cumple todos los requisitos, siendo además el recomendado por el fabricante.

Cálculo de la bobina L1: Para el cálculo de esta bobina el fabricante da la siguiente expresión:

$$L_{min} = \frac{(V_{entrada,max} - V_{salida}) * T_{on}}{I_{LIM,min}} = \frac{(V_{entrada,max} - V_{salida}) * 1\mu s}{500mA} \quad \text{Eq.81}$$

³⁶ 24V Internal Switch, 100% Duty Cycle, Step-Down Converters, maxim, datasheet. [Online] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/maxim/MAX1836-MAX1837.pdf>

Teniendo en cuenta que la tensión máxima de entrada que va a haber en esta fuente es de 18V (el peor caso de todas las fuentes diseñadas) y que la corriente de la bobina siempre será superior a 250μA, la bobina debe ser superior a:

$$L > \frac{(18v-3.3v)*1\mu s}{500mA} = 29.4\mu H \quad \text{Eq.82}$$

La bobina elegida cumple sobradamente con esta restricción:

$$L1 = 68\mu H \quad \text{Eq.83}$$

Cálculo del condensador de salida C9. El valor de esta capacidad determina el rizado de salida de la fuente. El fabricante recomienda una capacitancia de 100uF a 6.3V .

4. EL ESTÁNDAR ZIGBEE

ZigBee constituye una de las grandes partes del proyecto puesto que será el medio de transmisión elegido para el envío de los datos, una vez medidos.

Figura 27 .Logotipo Zigbee



Fuente. ZigBee Alliance

ZigBee puede ser usado para una gran variedad de aplicaciones, como podemos observar en la Figura 27, pero en nuestro caso nos interesa su utilización para fines de medición de energía consumida en un electrodoméstico del hogar.

En este capítulo se tratará de forma específica el funcionamiento de este tipo de conexiones, partiendo de una definición de ZigBee y posteriormente estudiando tanto sus principales características como su funcionamiento en una red ZigBee.

4.1 ¿QUÉ ES ZIGBEE?

El Zigbee es una tecnología inalámbrica que opera en las bandas libres ISM (Industrial, Scientific & Medical) de 2,4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU). Tiene una velocidad de transmisión de 250 Kbps y un rango de cobertura de 10 a 75 metros. A pesar de coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes como WiFi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado, esto es debido a su baja tasa de transmisión y, a características propias del estándar IEEE 802.15.4. Como se puede apreciar en la figura 1, Zigbee cubre un área en la que otras tecnologías no desempeñan un buen papel, ya que fueron diseñadas a partir de diferentes requerimientos. Como es el caso de UWB (Ultra Wide Band) alta velocidad de transmisión sin importar el poco alcance, o bien el caso de las redes celulares donde el alcance es lo que más importa. El mismo Bluetooth que se compara constantemente con Zigbee tiene diferentes capacidades en cuanto a velocidad de transmisión y rango de cobertura.

Zigbee se caracteriza por la capacidad de operar redes de gran densidad, situación que ayuda a aumentar la confiabilidad de la comunicación, ya que entre más nodos existan dentro una red, mayor número de rutas alternas existen para garantizar que un paquete llegue a su destino. Cada red Zigbee tiene un

identificador de red único, lo que permite que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin problema alguno. Teóricamente pueden existir hasta 16,000 diferentes redes en un mismo canal y cada red puede estar constituida por hasta 65,000 nodos, obviamente estos límites se ven truncados por algunas restricciones físicas (memoria disponible, ancho de banda). Por otra parte, Zigbee también delimita las características de la red y esto lo hace en función del área de aplicación en la que se utilice. Es también un protocolo de comunicación multsaltos, esto quiere decir que existe comunicación entre dos nodos aun cuando estén fuera del rango de transmisión, siempre y cuando existan otros nodos intermedios que los interconecten. Esta propiedad incrementa significativamente área de cobertura de la red. Una de las características de mayor valor de Zigbee es su topología de malla (MESH), que permite a la red auto recuperarse de problemas en la comunicación aumentando su confiabilidad.

Figura 28. Aplicaciones de ZigBee



Fuente. <http://www.sg.com.mx/content/view/392>

Zigbee define tres tipos de dispositivos diferentes:

- **Zigbee Coordinador (ZC):** es el dispositivo que inicia una red, y forma la raíz de ésta. Es capaz de almacenar información de su red, y puede actuar como “centro de confianza” al almacenar y administrar las llaves de seguridad. Solamente puede haber un coordinador por red.
- **Zigbee Ruteador (ZR):** además de ejecutar alguna función aplicativa, un ruteador puede funcionar como intermediario, sirviendo como puente de datos hacia otros dispositivos.
- **Zigbee Dispositivo fina (ZED):** contiene solamente la funcionalidad necesaria para hablar con su nodo padre; no puede pasar datos a otros dispositivos. Por lo general este tipo de dispositivo mantiene desactivado el radio transmisor la mayor parte del tiempo, con la finalidad de consumir la menor cantidad de energía posible y así obtener una larga vida de las baterías, lo cual es uno de los principales beneficios de Zigbee.

En cuanto a seguridad se refiere, se utiliza el estándar estadounidense AES128 para cifrado y autenticación de los paquetes que viajan por el aire.

4.2 ARQUITECTURA ZIGBEE

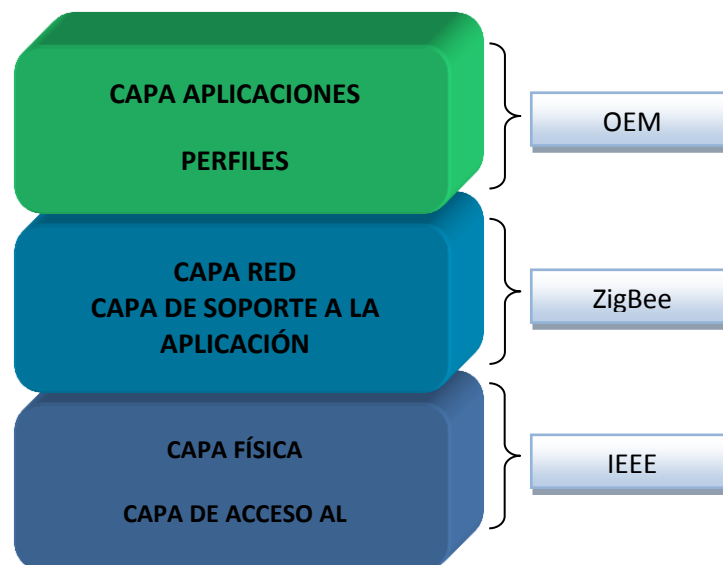
Zigbee es una pila (stack) de protocolos, que semejante al modelo de referencia OSI está constituido por diferentes capas independientes una de otra, y cada una de ellas cumple funciones específicas. La figura 2 ilustra las diferentes capas que conforman la pila.

- La capa de más bajo nivel es la capa física, que en conjunto con la capa de acceso al medio, brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas por el estándar IEEE 802.15.4.
- La siguiente es la capa de red, la cual brinda los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red (el algoritmo de enrutamiento de malla está basado en el protocolo Ad Hoc On - Demand Vector Routing – AODV), proporcionar los medios para garantizar la entrega de paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autenticarlos.
- La siguiente capa es la de soporte a la aplicación que es la responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y

simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. En el nivel conceptual más alto, se encuentra la capa de aplicación que no es otra cosa que la aplicación misma.

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interface de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores y las inferiores reportan resultados a las superiores. Además de las capas mencionadas, a la arquitectura se integran otro par de módulos que realizan tareas específicas: el módulo de seguridad que es quien provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el módulo de administración del dispositivo Zigbee, que es quien se encarga de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de la red³⁷.

Figura 29. Pila de protocolos (ZigBee Stack)



Fuente. Elaboración propia

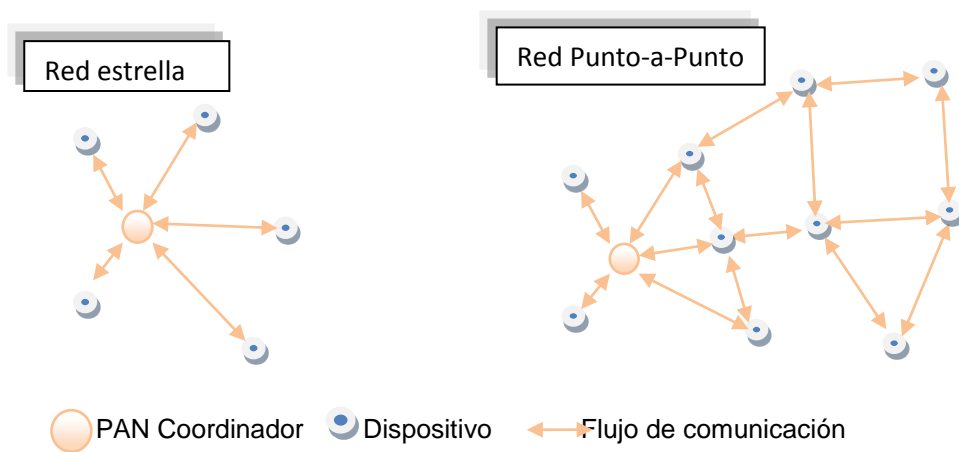
4.2.1 Capas de red. En las redes tradicionales por cable, la capa de red es responsable por la topología de construcción y mantenimiento de la misma, así como de nombrarla y de los servicios de enlace que incorpora las tareas necesarias de direccionamiento y seguridad. Estos mismos servicios existen para redes inalámbricas para el hogar, sin embargo representan un reto mayor por la primicia de ahorro de energía. Las redes que se construyan dentro de esta capa del estándar IEEE 802.15.4 se espera que se auto organicen y se auto mantengan

³⁷ Christian P. García. Zigbee Comunicación, [en línea]. <<http://www.sg.com.mx/content/view/392>>. [Citado el 1 de febrero de 2010]

en funcionamiento con lo que se pretende reducir los costos totales para el consumidor.

El estándar IEEE 802.15.4 soporta múltiples topologías para su conexión en red, entre ellas la topología tipo estrella y la topología peer-to-peer (punto-a-punto). (Figura 3). La topología a escoger es una elección de diseño y va a estar dado por la aplicación a la que se desee orientar; algunas aplicaciones como periféricos e interfaces de PC, requieren de conexiones de baja potencia de tipo estrella, mientras que otros como los perímetros de seguridad requieren de una mayor área de cobertura por lo que es necesario implementar una red peer-to-peer o malla³⁸.

Figura 30. Topologías de red zigbee



Fuente. Elaboración propia

4.2.2 Capa física. El IEEE 802.15.4 ofrece dos opciones de PHY que combinan con el MAC para permitir un amplio rango de aplicaciones en red. Ambas PHYs se basan en métodos de secuencia directa de espectro extendido (DSSS) que resultan en bajos costos de implementación digital en IC, y ambas comparten la misma estructura básica de paquetes low-duty-cycle con operaciones de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre ambas PHYs radica en la banda de frecuencias. La PHY de los 2.4 GHz, especifica operación en la banda industrial, médica y científica (ISM), que prácticamente está disponible a nivel mundial, mientras que la PHY de los 868/915 MHz especifica operaciones en la banda de 865 MHz en Europa y 915 MHz en la banda ISM en Estados Unidos. Mientras que la movilidad entre países no se anticipa para la mayoría de las aplicaciones de redes en las casas, la disponibilidad internacional de la banda de

³⁸ Archundia Papacetzi, F. M.. Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, cap 4. 2003, [en línea]. <<http://catarina.udlap.mx>>.[Citado el 3 de febrero de 2010]

los 2.4GHz ofrece ventajas en términos de mercados más amplios y costos de manufactura más bajos. Por otro lado las bandas de 868 MHz y 915 MHz ofrecen una alternativa a la cogestión creciente y demás interferencias (hornos de microondas, etc) asociadas a la banda de 2.4 GHz. Y mayores rangos por enlace debido a que existe menores pérdidas de propagación.

Existe una segunda distinción de las características de la PHY es el rango de transmisión. La PHY de 2.4 GHz permite un rango de transmisión de 250 kb/s, mientras que la PHY de los 868/915 MHz ofrece rangos de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s respectivamente. Este rango superior de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se atribuye principalmente a un mayor orden en la modulación, en la cual cada símbolo representa múltiples bits. Los diferentes rangos de transmisión se pueden explotar para lograr una variedad de objetivos o aplicaciones. Por ejemplo la baja densidad de datos en la PHY de los 868/915 MHz se puede ocupar para lograr mayor sensibilidad y mayores áreas de cobertura, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir un área geográfica, mientras que el rango superior de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir salidas superiores y de poca latencia. Se espera que en cada PHY se encuentren aplicaciones adecuadas a ellas y a sus rangos de transmisión.

Algunas características de alto nivel del 802.15.4 se resumen en la tabla 18.

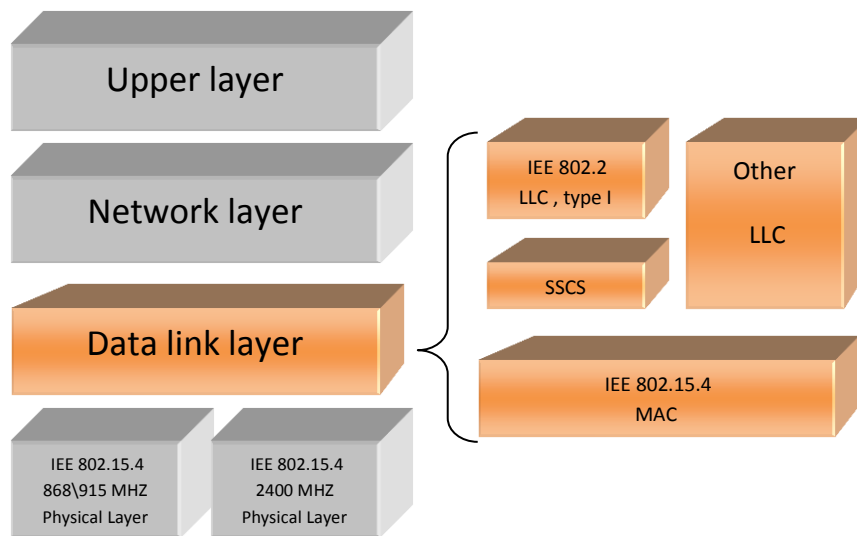
Tabla 18. Propiedades del IEEE 802.15.4

Propiedad	Rango
Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 – 60 m.
Latency	Abajo de los 15 ms.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz.
Direccionamiento	Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE
Canal de acceso	CSMA-CA y rasurado CSMA-CA
Temperatura	El rango de temperatura industrial: -40° a +85° C

Fuente. <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB>.

4.2.3 Capa de enlace de datos (data link layer, DLL). El proyecto IEEE 802 divide al DLL en dos sub capas, la sub capa de enlace de acceso a medios (Medium Access Control, MAC) y la de control de enlaces lógicos (Logical link control, LLC). El LLC es común a todos estándares 802, mientras que la sub capa MAC depende del hardware y varía respecto a la implementación física de esta capa. La figura 4 ilustra la forma en que el estándar IEEE 802.15.4 se basa en la organización internacional para la estandarización (ISO) del modelo de referencia para la interconexión de sistemas abiertos (OSI).

Figura 31. Relación del IEEE 802.15.4 con el sistema OSI.



Fuente. Elaboración propia a partir de zigbee Alliance.

Las características del MAC IEEE 802.15.4 son; la asociación y la disociación, reconocimientos de entrega de trama, mecanismos de acceso al canal, validación de trama, garantía del manejo de las ranuras de tiempo, y manejo de guías. Las sub capas MAC proporcionan dos tipos de servicios hacia capas superiores que se acceden a través de dos puntos de acceso a servicios (SAPs). Los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la sub capa (MCPS-SAP), y el manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades (MLME-SAP). Esos dos servicios proporcionan una interfaz entre las sub capas de convergencia de servicios específicos (SSCS) u otro LLC y las capas físicas.

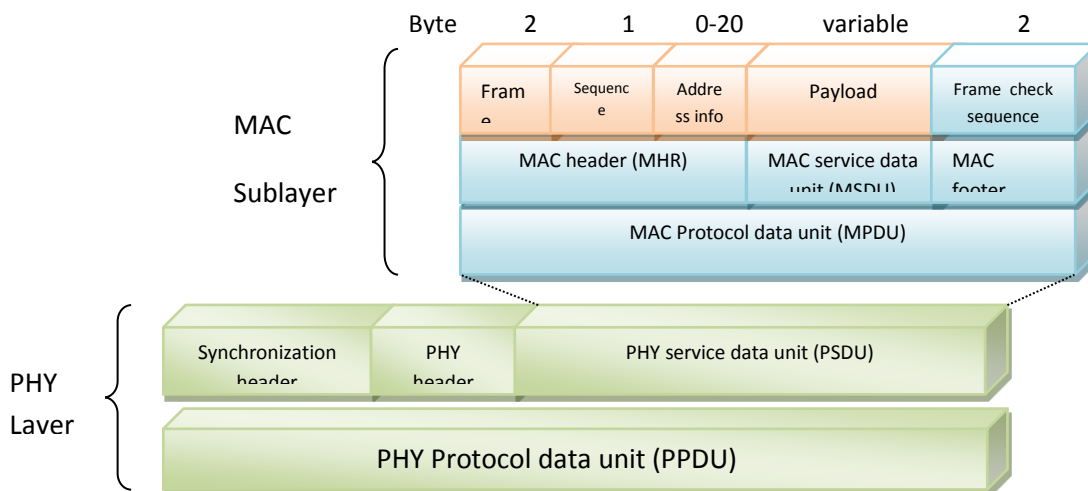
El administrador de servicios MAC tiene 26 primitivas. Comparadas con el 802.15.1 (bluetooth), que tiene alrededor de 131 primicias en 32 eventos, el MAC

802.15.4 es muy simple, haciéndolo muy versátil para las aplicaciones hacia las que fue orientado, aunque se paga el costo de tener un instrumento con características menores a las del 802.15.1 (por ejemplo el 802.15.4 no soporta enlaces sincronizados de voz).

4.3 FORMATO GENERAL DE TRAMAS MAC

El formato general de las tramas MAC se diseñó para ser muy flexible y que se ajustara a las necesidades de las diferentes aplicaciones con diversas topologías de red al mismo tiempo que se mantenía un protocolo simple. El formato general de una trama MAC se muestra en la figura 4. “A la trama del MAC se le denomina unidad de datos de protocolos MAC (MPDU) y se compone del encabezado MAC (MHR), unidad de servicio de datos MAC (MSDU), pie de MAC (MFR). El primer campo del encabezado de trama es el campo de control. Este indica el tipo de trama MAC que se pretende transmitir, especifica el formato y la dirección de campo y controla los mensajes de enterado”. En pocas palabras, la trama de control especifica como es el resto de la trama de datos y que es lo que contiene. El tamaño de las direcciones puede variar entre 0 y 20 bytes. Por ejemplo, una trama de datos puede contener información de la fuente y del destinatario, mientras que la trama de enterado no contiene ninguna información de ninguna dirección. Por otro lado una trama de guía solo tiene información de la dirección de la fuente. Esta flexibilidad en la estructura ayuda a incrementar la eficiencia del protocolo al mantener los paquetes lo más reducido que se puede. La duración máxima de paquetes es de 4.25 ms para la banda de los 2.4 GHz, y de 26.6 ms para la banda de los 915 MHz, y de 53.2 ms para la banda de 868 MHz.

Figura 32. Forma general de la trama MAC.



Fuente. Elaboración propia a partir de zigbee Alliance.

El campo llamado payload es variable en longitud; sin embargo, la trama completa de MAC no debe de exceder los 127 bytes de información. Los datos que lleva el payload dependen del tipo de trama. El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas. Esas son la trama de guía, de datos, tramas de enterados y tramas de comandos MAC. Solo las tramas de datos y de guía contienen información proveniente de capas superiores; las tramas de mensajes de enterado y la de comandos MAC originados en el MAC son usadas para comunicaciones MAC peer-to-peer.

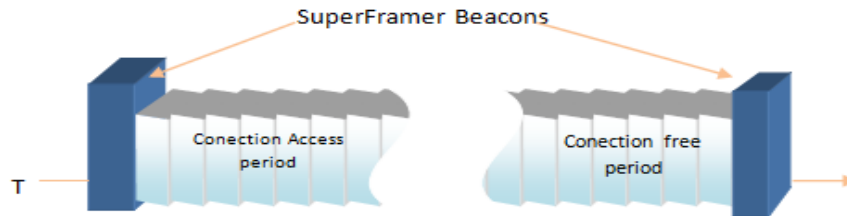
Otros campos en la trama MAC son una secuencia de números al igual que tramas de chequeo (FCS). La secuencia de números en los encabezados enlazan a las tramas de

acknowledgment con transmisiones anteriores. La transmisión se considera exitosa solo cuando la trama de enterado contiene la misma secuencia de números que la secuencia anterior transmitida. Las FCS ayudan a verificar la integridad de las tramas del MAC.

4.3.1 La estructura de las súper ranuras. Algunas aplicaciones requieren anchos de banda dedicados a lograr estados latentes para un consumo de baja potencia. Para lograr dichos estados latentes el IEEE 802.15.4 se puede operar en un modo opcional llamado súper-estructuras (superframes).

En un superframe, un coordinador de red, denominado el coordinador PAN, transmite superframes de guía en intervalos definidos. Estos intervalos pueden ser tan cortos como unos 15 ms o tan largos como 245 ms. El tiempo entre cada uno de ellos se divide en 16 ranuras de tiempo independientes a la duración de cada superframe. Un aparato o instrumento puede transmitir cuando sea durante una ranura de tiempo. Pero debe de terminar su transmisión antes de la siguiente superframes de guía. El canal de acceso en las ranuras de tiempo es una contención de base; sin embargo el coordinador de PAN puede asignar intervalos o ranuras de tiempo a un solo aparato que requiera un determinado ancho de banda permanentemente o transmisiones latentes bajas. Estas ranuras de tiempo asignadas son llamadas ranuras de garantía (GTS) y juntas forman un periodo de contención libre localizado antes de la próxima señal de guía (Figura 5). El tamaño del periodo de contención libre puede variar dependiendo de la demanda de los demás aparatos asociados a la red; cuando el GTS se utiliza, todos los aparatos deben de completar todas sus transacciones de contención de base antes de que el periodo de contención libre comience.

Figura 33. Estructura de las supertramas.



Fuente. Elaboración propia a partir de zigbee Alliance.

4.3.2 Otras características MAC. Dependiendo de la configuración de red, una WPAN de baja transmisión (LRWPAN) puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a canales. En una red de guía con superframes, una portadora fragmentada en varios intervalos de tiempo permite múltiples accesos con un mecanismo que evita las colisiones de información (CSMACA).

En redes sin faros o señales de guía, se utiliza el estándar CSMA-CA. Estas redes trabajan de la siguiente forma. Cuando algún aparato desea transmitir en una red que no permite señales de guía, la red primero revisa si otro aparato se encuentra transmitiendo sobre el mismo canal. Si es el caso, el intento de acceso al canal se tiene que hacer en ocasiones posteriores, o indica una falla de conexión después de varios intentos fallidos.

La trama de acknowledgment confirma si una transmisión previa no utiliza los mecanismos de CSMA dado que estos se mandan inmediatamente después de cada paquete de información.

En una red beacon-enabled, cualquier dispositivo, que desee transmitir durante el periodo de acceso de contención, espera a que empiece la siguiente ranura de tiempo y después determina si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en la misma ranura de tiempo. Si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en dicho spot, el dispositivo se repliega a un número aleatorio de slots o indica un fallo en la conexión después de varios intentos. Además en una red beacon-enabled, las tramas de acknowledgment no utilizan CSMA.

Una función importante del MAC es la confirmación de recepciones exitosas de frames de algún dispositivo. Las recepciones exitosas y las validaciones de datos o comandos MAC se confirman por medio de acknowledgment. Si el dispositivo de recepción no es capaz de recibir la información en ese momento por algún motivo, el receptor no manda ningún acknowledgment. El campo de control en el frame indica si se espera un acknowledgment o no. El frame que contiene al

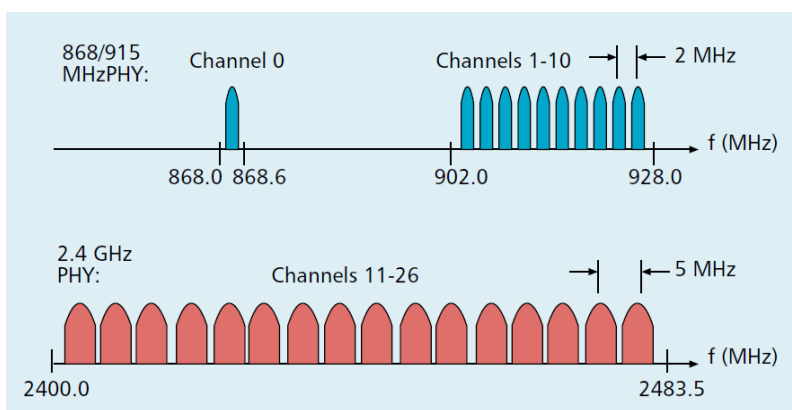
acknowledgment se manda de regreso inmediatamente después de que se hace una validación exitosa del frame de entrada. Los frames de guía (beacon frames) mandados por el coordinador del PAN y los frames de acknowledgments nunca son respondidos con algún acknowledgment.

El estándar IEEE 802.15.4 proporciona tres niveles de seguridad: sin seguridad (Por ejemplo, aplicaciones de publicidad); control de acceso a listas (sin seguridad criptográfica); y seguridad con clave simétrica. Para minimizar costos para dispositivos que no lo requieran, el método de distribución de clave no se especifica en el estándar pero se debe de incluir en capas superiores de las aplicaciones apropiadas³⁹.

4.4 CANALIZACIÓN

En el IEEE 802.15.4 se definen 27 canales de frecuencia entre las tres bandas (ver figura 6 y tabla 1.2). La PHY de los 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia que se puede utilizar el mismo hardware para ambos y así reducir costos de manufactura. La PHY de los 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz) esto con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.

Figura 34. Frecuencia de los canales IEEE 802.15.4.



Fuente. Zigbee Alliance.

³⁹ Archundia Papacetzzi, F. M.. Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, cap 4. 2003, [online].

Figura 35 Estructura de canales del IEEE 802.15.4.

Channel number	Channel center frequency (MHz)
$k = 0$	868.3
$k = 1, 2, \dots, 10$	$906 + 2(k - 1)$
$k = 11, 12, \dots, 26$	$2405 + 5(k - 11)$

Fuente. Zigbee Alliance.

Dado que el hogar es propenso a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como una interferencia no intencionada de las diferentes aplicaciones, la capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas dentro del hogar. El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de algoritmos la cual es responsabilidad de la capa de red. La capa MAC incluye funciones de búsqueda que sigue paso a paso a través de una lista de canales permitidos en busca de una señal de guía, mientras que la PHY contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

4.5 MODULACIÓN

La PHY en los 868/915 MHz utiliza una aproximación simple DSSS (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa) en la cual cada bit transmitido se representa por un chip-15 de máxima longitud de secuencia (secuencia m). Los datos binarios son codificados al multiplicar cada secuencia m por +1 o -1, y la secuencia de chip que resulta se modula dentro de la portadora utilizando BPSK (binary phase shift keying). Antes de la modulación se utiliza una codificación de datos diferencial para permitir una recepción diferencial coherente de baja complejidad.

La PHY de los 2.4 GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal basada en métodos de DSSS (con propiedades similares). Los datos binarios son agrupados en símbolos de 4 bits, y cada símbolo especifica una de las 16 secuencias de transmisión semi-ortogonales de código de pseudo-ruído (PN). Las

secuencias de PN son concadenadas para que sean datos de símbolos exitosos, y la secuencia agregada al chip es modulada en la portadora utilizando MSK (minimum shift keying). El uso de símbolos “casi ortogonales” simplifica la implementación a cambio de un desempeño ligeramente menor (< 0.5 dB). Los parámetros de modulación para ambas PHY se resumen en la tabla 19.

Tabla 19. Parámetros de modulación.

PHY	Frequency band	Data parameters			Spreading parameters	
		Bit rate (kb/s)	Symbol rate (kbaud)	Modulation	Chip rate (Mchips/s)	Modulation
868/915	868.0–868.6 MHz	20	20	BPSK	0.3	BPSK
MHz PHY	902.0–928.0 MHz	40	40	BPSK	0.6	BPSK
2.4 GHz PHY	2.4–2.4835 GHz	250	62.5	16-ary orthogonal	2.0	O-QPSK

Fuente. Zigbee Alliance.

En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la señalización ortogonal mejora su desempeño en 2 dB que BPSK diferencial. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, la PHY 868/915 PHY tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas. Por supuesto, que en ambos casos las pérdidas de implementación debido a la sincronización, forma del pulso, simplificaciones en el detector, y demás resultan en desviaciones en sus curvas óptimas de detección.

4.6 SENSIBILIDAD Y RANGO

Las especificaciones actuales de sensibilidad del IEEE 802.15.4 especifican -85 dBm para la PHY de los 2.4 GHz y de -92 dBm para la PHY de los 868-915 MHz.

Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias que se requieren debido a las imperfecciones en la manufactura de la misma manera que permite implementar aplicaciones de bajo costo. En cada caso, los mejores artículos deben de ser del orden de 10 dB mejores que las especificaciones, además algunos fabricantes como la Texas Instruments tienen amplificadores que mejoran la potencia y la sensibilidad hasta en 20dBm.

Naturalmente el rango deseado estará en función de la sensibilidad del receptor así como de la potencia del transmisor. El estándar especifica que cada dispositivo debe de ser capaz de transmitir al menos 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede ser mayor o

menor, la potencia actual de transmisión puede ser menor o mayor (dentro de los límites de regulación establecidos).

Los dispositivos típicos (1mW) se espera que cubran un rango de entre 10-20 m; sin embargo, con una buena sensibilidad y un incremento moderado en la potencia de transmisión, una red con topología tipo estrella puede proporcionar una cobertura total para una casa. Para aplicaciones que requieran mayor tiempo de latencia, la topología tipo mesh ofrecen una alternativa atractiva con coberturas caseras dado que cada dispositivo solo necesita suficiente energía para comunicarse con su vecino más cercano.⁴⁰

4.7 INTERFERENCIA DE Y PARA OTROS DISPOSITIVOS

Los dispositivos que operan en la banda de los 2.4 GHz pueden recibir interferencia causada por otros servicios que operan en dicha banda. Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, las cuales requieren una baja calidad de servicio (QoS), no requieren comunicación asíncrona, y se espera que realice varios intentos para completar la transmisión de paquetes. Por el contrario, un requerimiento primario de las aplicaciones del IEEE 802.15.4 es una larga duración en baterías; esto se logra con poca energía de transmisión y muy pocos ciclos de servicio.

Dado que los dispositivos IEEE 802.15.4 se la pasan dormidos el 99.9 por ciento del tiempo, y ocupan transmisiones de baja energía en el spread spectrum, deben de estar trabajando en las vecindades de la banda de los 2.4 GHz.⁴¹

⁴⁰ Callaway, Paul Gorday, and Lance Hester, Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. En : IEEE Communications Magazine. [online].[Citado el 15 de marzo de 2010].

⁴¹ Archundia Papacetzzi, F. M. 2003. Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, cap 4, [online] [Citado el 17 de marzo de 2010].

5. PROGRAMACIÓN, PLANOS Y DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DE VISUALIZACIÓN

Una vez estudiado de forma detallada el medio de transmisión que se usará para llevar a cabo este tipo de proyecto, se realizó una búsqueda de los dispositivos aptos para el proyecto.

Los componentes necesarios para la implementación del proyecto son los siguientes:

- **Transceiver ZigBee:** Consiste en el dispositivo que realiza la transmisión y recepción de la comunicación. Para ello debe ser compatible con el protocolo ZigBee, es decir, que el transceiver sea capaz de transmitir en la banda de frecuencia utilizada por ZigBee (2.4GHz). Lógicamente deberá llevar integrada una antena para hacer posible la transmisión y recepción vía RF.
- **Microcontrolador:** Estará compuesto por una CPU (*Central Processing Unit*), una memoria y puertos de E/S. El microcontrolador hace las tareas de recepción de los datos enviados por el medidor de energía, los procesa y los manda hacia el transceiver. Dentro de este componente se implementa la operación de conversión A/D, es decir, pasar las posibles señales analógicas transmitidas por los sensores a señales digitales para que el transceiver pueda hacer el envío de los datos. Mencionar también que el microcontrolador deberá ser compatible con ZigBee.
- **Sensores:** Serán los elementos encargados de sensar el consumo de energía del electrodoméstico y las medidas capturadas las enviara al microcontrolador para ser procesadas y ser transmitidas por el transceiver

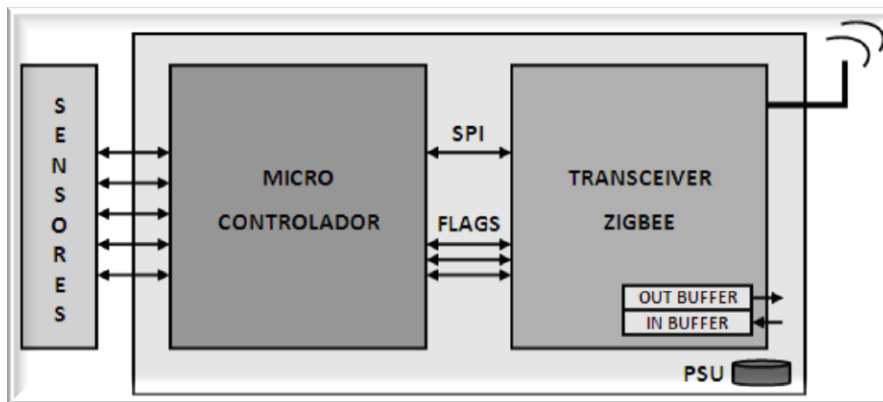
Una vez detallados los dispositivos necesarios, se tendrán las características y condiciones que deben cumplir para poder utilizarlos.

- **Tamaño reducido:** Tratándose de un proyecto que se basa en la realización de medidas en diferentes electrodomésticos, los dispositivos que deben efectuar las operaciones de medida y envío de datos deben ser lo más pequeños posibles. Por ello se han de descartar elementos de gran tamaño (hablamos de elementos que no deben superar los 2-3cm) y por consiguiente de mayor peso (se prefieren dispositivos lo más ligeros posible). Se trata de una de las condiciones primordiales ya que componentes voluminosos incomodarían la instalación del dispositivo dentro del electrodoméstico.
- **Solución completa:** se busco un integrado que incluya tanto el transceiver como el microcontrolador lo cual facilita el diseño y simplifica el hardware.

- **Bajo consumo:** se trata de una de las condiciones más importantes para cumplir ya que, como hemos podido estudiar, ZigBee se caracteriza por su bajo consumo. De todos modos, este punto se suple con la pila incorporada al integrado.
- **Visualización de los datos:** para ello se implementa un programa en LabView para visualización en un pc los datos medidos y tener control de encendido y apagado del electrodoméstico.

En la figura 36 se muestra un diagrama de bloques del circuito que incluye la parte de medición y la parte de transceiver.

Figura 36. Diseño esquemático del circuito (PCB)



Fuente. Elaboración propia a partir de la Texas instruments.

5.1 COMPARACIÓN DE DIFERENTES DISPOSITIVOS ZIGBEE

En la Tabla 20 podemos comprobar las principales características de las diferentes tecnologías, la cual se optó seleccionar la de Texas Instruments, por tener un tamaño reducido, incorporar el transceiver (cc2530) y el microcontrolador 8051 y un menor consumo de potencia.

Tabla 20. Comparación de diferentes dispositivos Zigbee.

	XBee Pro		EasyBee	AMPEDRF	MICAz	ATMEL	Texas Instrument
	XBee	XBee-PRO					
Tamaño (cm) [LxWxH]	2.43 x 2.76	2.43 x 3.29	2.6 x 2	2.7 x 1.5	6 x 3.2 x 0.7	-	3 x 2 x 0.1
Peso	3gr	3gr	-	-	18gr	-	-
Transceiver	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí (AT86RF230)	Sí (CC2530)
Micro	No	No	No	Sí	Sí	Sí (ATmega1281)	Sí (.8051)
Consumo Rx	40mA	45mA	20mA	25mA	19.7mA	15.5mA	13.3mA
Consumo Tx	40mA	295mA	18mA	50mA	17.4mA	16.5mA	21.2mA
Pila	2.1-3.6V	3.0-3.4V	2.1-3.6V	3.3V	1.5V	3.6V	3.6V
Potencia salida	1.25-2mW	10-50mW	1mW	1mW	1-3.98mW	4mW	1mW

Fuente. Texas Instrument

Para realizar pruebas y diseño de la red Zigbee se adquirió el kit de desarrollo CC2530ZDK figura 37, con el cual se hicieron los ensayos y pruebas pertinentes para lograr el conocimiento del protocolo.

Figura 37. CC2530ZDK ZigBee Development Kit.



Fuente. Texas instruments

5.2 CONTENIDO Y DESCRIPCIÓN DEL KIT CC2530ZDK

El CC2530ZDK consiste en una completa herramienta de desarrollo inalámbrico para la creación de proyectos *wireless*, haciendo uso de una interfaces USB, serie para una mayor comodidad a la hora de interactuar, por ejemplo, con un ordenador y suministrando tanto el *hardware* como el *software* necesario para manipular el microcontrolador 8051 INTEL y el transceiver inalámbrico CC2530 a 2.4GHz. El Kit, incluye siete tarjetas inalámbricas a 2.4GHz que trabajan a muy bajo consumo. Los proyectos que se realicen con estos dispositivos pueden ser autonomos gracias a la plataforma de batería que incluye el kit. SimpliciTI, y ZigBee Stack son herramientas de programación que posee las propiedades necesarias para generar redes inalámbricas robustas y bajo consumo.

Las características principales del CC2530ZDK son:

- Interface USB que permite la programación de los dispositivos.
- Microcontrolador 8051 de ultra-bajo consumo.
- Transceiver CC2530 a 2.4GHz.
- Comunicación UART, USB.
- Pins disponibles para la realización de pruebas.
- LEDs (rojo/verde) para indicar, de forma visual, el desarrollo de la comunicación.

El CC2530ZDK puede hacer uso de dos entornos de programación para poder escribir, descargar y programar nuestras aplicaciones en el dispositivo ZigBee. Estos dos entornos son:

- IAR Embedded Workbench Integrated Development Environment (IDE).
- SmartRF Flash Programmer.

Estas dos herramientas nos serán muy útiles en el momento que queramos probar y programar nuestros módulos.

5.3 MEDIDOR DE LA ENERGÍA

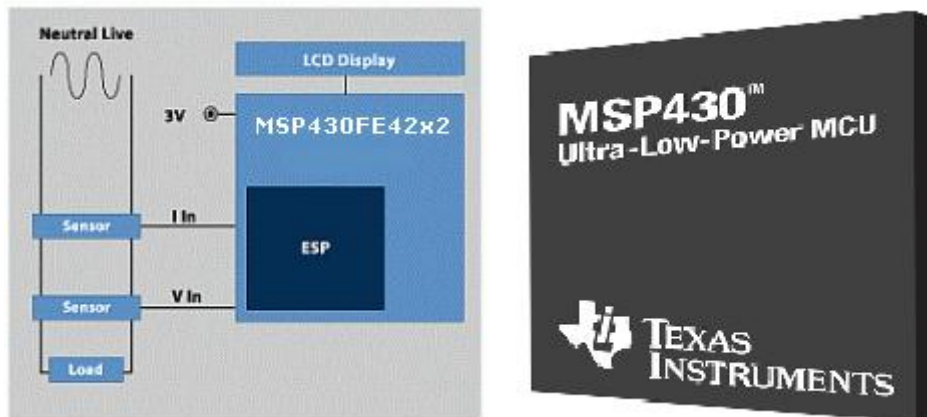
Existen multitud de microcontroladores diferentes en el mercado a precios muy variados, que van desde los microcontroladores simples de 8 bits (como las familias de los 8051) hasta microcontroladores avanzados de 32bits, tales como los que poseen un núcleo ARM.

Para esta aplicación particular es necesario el empleo de un procesador de prestaciones medias, pero que posea un precio económico tanto en las herramientas software como en el costo del mismo dispositivo, que permita

diseñar un producto final cuyo costo sea asequible, tal que sea viable la integración de un dispositivo final por enchufe en una instalación.

Asimismo también es recomendable que el microcontrolador a elegir tenga unas dimensiones reducidas junto con un bajo consumo, puesto que ambas características influyen en tamaño del dispositivo final. La familia de microcontroladores que se ha encontrado que mejor cumplen con todas esas características son los MSP430, producidos por Texas Instruments.

Figura 38. Microcontrolador MSP430



Fuente. Elaboración propia a partir de la Texas instruments.

Están contruidos con una CPU RISK de 16 bits muy eficiente (casi todas las instrucciones se ejecutan en 1 ciclo de instrucción), con arquitectura de Von Neumann y está diseñado especialmente para aplicaciones empotradas de bajo costo y bajo consumo de energía.

El MSP430 es muy útil para aplicaciones inalámbricas o para aplicaciones de bajo consumo, siendo incluso posible realizar con ellos aplicaciones de procesamiento digital de datos si la frecuencia de la señal no es muy elevada debido a los periféricos que puede integrar, tales como CAD y CDA, multiplicador (de 16 o 32 bits, según el modelo) e incluso el controlador de DMA de múltiples canales (hasta 3).

El número de periféricos integrados depende de la familia y el modelo concreto, pero suele ser habitual en todos ellos que posean oscilador interno, timer incluyendo control PWM directo de las salidas, watchdog, USART, SPI, I2C, 10/12/14/16-bit CADs y circuito brownout reset.

Algunos periféricos opcionales no tan usuales incluyen comparadores, amplificadores operacionales dentro del chip para el acondicionamiento de señales, CDA de 12 bits, controlador de LCD, etc.

La familia actual completa poseen memoria flash programable tanto externamente a través de JTAG o a través del bootstrap loader (BSL) como internamente desde el propio microcontrolador.

Algunos modelos de encapsulados con pocas E/S en vez del JTAG emplean un puerto de programación/depuración propietario denominado Spy-Bi-Wire, que es capaz de programar y depurar el código empleando tan solo 4 pines.⁴²

5.4 PROGRAMACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Una vez realizado el estudio y la configuración del kit de desarrollo CC2530ZDK para la generación de redes inalámbricas, y el microcontrolador MSP430 para la medición de la energía consumida se hace la programación de la aplicación requerida para este proyecto.

La programación está estructurada en funciones y módulos cada uno con tarea concreta la cual se parametriza de acuerdo a la aplicación.

Debido a la complejidad y extensión del programa, este se ha dividido en varias funciones y módulos, que solo se nombrarán, ya que cada uno de los cuales está encargado de realizar un trabajo concreto.

El entorno de programación que se utiliza para programar los dispositivos es el IAR Embedded Workbench Integrated Development Environment (IDE). Antes de empezar a manipular el entorno de programación y de conocer el tipo de lenguaje que se deberá utilizar, se debe pensar qué papel jugarán los nodos dentro de la red generada.

Más allá de la transmisión de datos de forma inalámbrica, se desea la posibilidad de adaptar un sensor a una de las tarjetas para hacer posible la transferencia inalámbrica de los datos medidos y el microprocesador MSP430. La tarjeta que irá conectada directamente al MSP430 se denominará como End Device (ED) y actuará como emisor, receptor. Con los datos ya almacenados en el emisor, éste se encargará de la transmisión RF de los datos hacia otra tarjeta. Esta segunda tarjeta, que irá conectada directamente a la interface serial, denominada como Access Point (AP). La tarjeta receptora irá conectada al puerto serie del ordenador

⁴² PERSONAL VÁZQUEZ, Enrique, LARIOS MARÍN, Diego Francisco ., Red de sensores de medidas de consumo eléctrico, memoria del cálculo. Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, [Online]

para que, finalmente, los datos puedan ser monitoreados almacenados para posteriores cálculos y además tener un control on-off del dispositivo remoto.

Una vez planteados las funciones de cada tarjeta y el funcionamiento de la red, debemos tener presente la organización que suele tener una red basada en ZigBee.

Como se ha podido estudiar en apartados anteriores, una red ZigBee está basada en un nodo central (AP) que actúa como coordinador de la red (ZC) y en un seguido de dispositivos finales End Device (ED), los cuales se encargan de mandarle paquetes de información al punto de acceso. En nuestro caso nos encontramos con una situación de un punto de acceso y varios dispositivos finales.

Antes de empezar con la programación de los dispositivos detallaremos las principales funciones y procedimientos que deben realizar el ZC, ED y MSP430:

Una de las tarjetas será programada como Coordinador. Ésta será la encargada de hacer el papel de nodo central. Sus funciones principales son las de inicializar la red, crear las direcciones de identificación para los posibles ED y estar escuchando el canal por la posibilidad de llegada de paquetes de información y posteriormente pasarlos a PC.

Las otras tarjetas serán programadas como ED. Ésta hará el papel de dispositivos finales de red recibe y envía paquetes de información. Su función principal es la de recibir los datos provenientes del MSP430 y posteriormente transmitirlos hacia el coordinador de la red (ZD).

El MSP430 será el encargado de la lectura del sensor por medio del converso A/D y por medio de funciones matemáticas, hará los cálculos correspondientes al consumo del electrodoméstico, y el dato final lo transmitirá al ED para el envío del paquete.

A continuación se determinan las principales funciones de los programas realizados para la red inalámbrica, y a su vez aquellos procedimientos que se han programado específicamente para el proyecto, se aclara que estas funciones son para la programación del chip zigbee (CC2530) y el medidor de energía (MSP430)

Las funciones básicas que debemos encontrar en la programación de una red ZigBee son las siguientes.

5.4.1 Funciones de inicialización del dispositivo. Las siguientes funciones se llaman durante la inicialización de la base de RF y la Capa de abstracción del hardware (HAL) son responsable de configurar los dispositivos periféricos de

hardware y configurar los puertos de I/O. en la figura 39 se muestra las secuencia de la inicialización.

halBoardInit()

Asegura que los periféricos de interfaz de radio se inicialicen, estos se deben llamar en primer lugar

basicRfInit()

Inicializa la estructura de datos para RF, establece el canal, la dirección de red, el ID del la PAN, configura la interrupción de recepción de paquetes y los periféricos de radio.

uint8 halRfInit(void)

Enciende le radio, configura según la especificaciones de trabajo, permite el autoack y configura las IO de radio

void halRfSetShortAddr(uint16 shortAddr)

Coloca una dirección de 16 bit en el radio

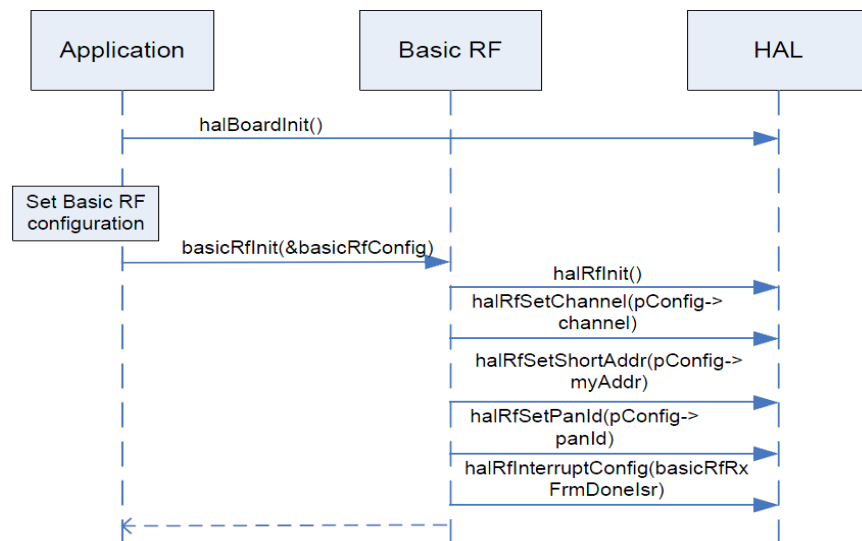
void halRfSetPanId(uint16 PanId)

Coloca la identificación de la PAN a 16 bit

halRfInterruptConfig()

Registrar el servicio de interrupciones de rutina para manejar los paquetes de recibido y envío de interrupción de la radio.

Figura 39. Iniciación de la red



Fuente. Texas instruments.

5.4.2 Funciones para la transmisión de paquetes TX. Estos son las funciones que se realizan durante una transmisión de paquetes básicos de RF con la solicitud de reconocimiento, en la figura 12 se muestra la secuencia de la transmisión.

uint8 basicRfSendPacket(uint16 destAddr, uint8 pPayload, uint8 length)*

Enviar un paquete con la dirección de destino, el dato a transmitir y la longitud del paquete. Devuelve TRUE si el paquete fue enviado con éxito o un FALSE si no es enviado. Si existe una solicitud `ackRequest` el valor devuelto de esta función sólo podrá lograrse si se recibe una confirmación del destino.

halRfWaitTransceiverReady()

Espere hasta que el receptor está listo, encendido.

basicRfBuildMpdu(destAddr, pPayload, length)

Mantiene un búfer interno para el Protocolo MAC Unidad de datos salientes. Envía la dirección de dispositivo, la información de cabecera y la longitud.

halRfWriteTxBuf(txMpdu, mpduLength)

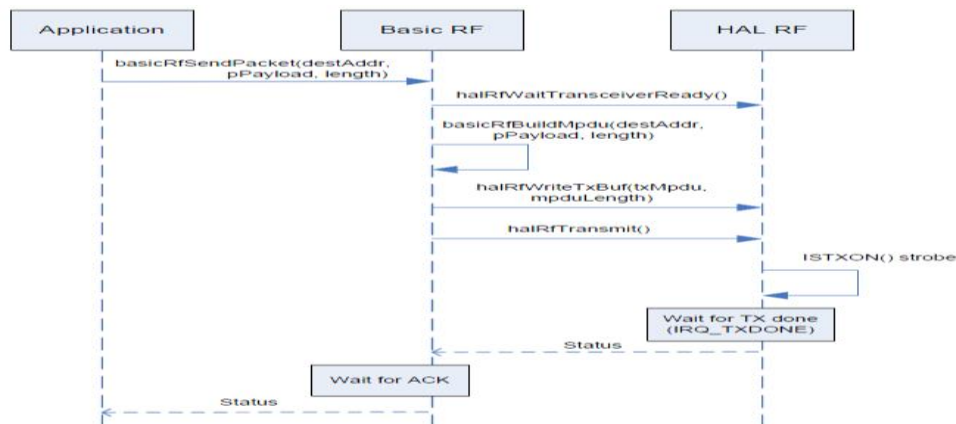
Escriba el número de bytes dados por la longitud de la posición de memoria apuntada a los datos del buffer de radio TX.

halRfTransmit()

Esta función es la encargada de transmitir un paquete al aire. Esta función estroboscópica emitirá el comando `ISTXON()` para enviar el paquete en el FIFO TX.

Esta función esperará hasta que la transmisión de paquetes este terminado (`IRQ_TXDONE`), además se detiene otro tiempo predefinido a que reciba `ACK`, y devuelve la respuesta a la función `basicRfSend()`.

Figura 40. Trasmisiones de paquetes



Fuente. Texas instruments.

5.4.3 Funciones para la Recepción de paquetes RX. Estos son los pasos que se realizan durante una recepción de paquetes con la solicitud de reconocimiento, en la figura 12 se muestra la secuencia de la transmisión.

basicRfRxFrameDoneSr()

Esta función se activa cuando hay paquetes nuevos y espera hasta que se produzca (RXPKTDONE), al terminar se ejecuta una rutina de interrupciones en el modulo HAL_RF, para que el dispositivo atienda el paquete.

halRfReadRxBuf(length, 1)

Esta función leer el primer byte de la trama recibida en el buffer de RX

halRfRecvFrame(rxMpdu, length)

El paquete completo se lee desde el buffer RX. El paquete de entrada se almacena en el buffer de datos rxMpdu.

El CC2530 entra al reconocimiento de dirección, si es correcto automáticamente envía el ACK si el AUTOACK está habilitado, luego la bandera de rxi.isReady se establece en TRUE para indicar que un nuevo paquete fue recibido

basicRfPacketIsReady()

Devuelve TRUE si un paquete recibido está listo para ser recuperado por la capa superior.

basicRfReceive()

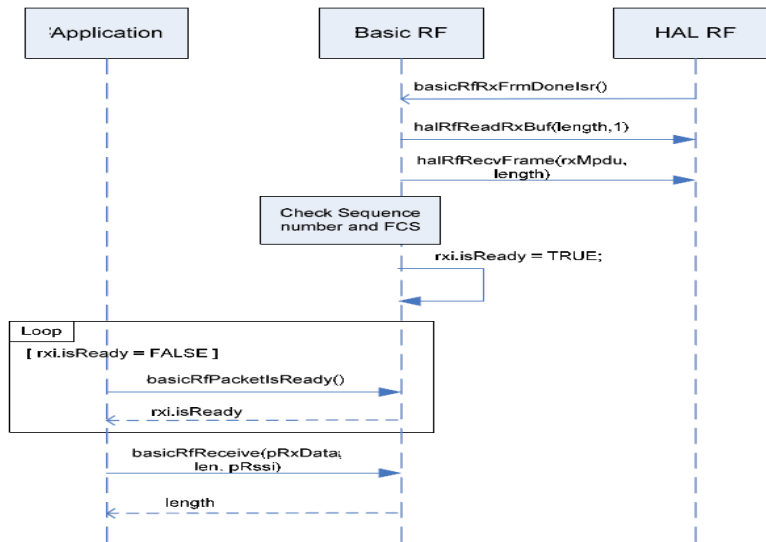
Recibe el paquete en la capa superior, y es responsable de la asignación del tamaño del buffer y signa 2 bytes para el valor RSSI. (Recibido Indicador de intensidad de señal)

basicRfReceive()

Copia el dato recibido sobre una ubicación de memoria pRxData en la lista de memoria, para ser utilizado, también el valor en dBm de RSSI también se copia en la memoria.⁴³

⁴³ CC2530 Software Examples User's Guide, [Online]

Figuran 41. Recepción de paquetes RX



Fuente. Texas instruments.

5.4.4 Funciones globales para la medición.

Función main()

Programa principal, se encarga de inicializar todos los periféricos y del tratamiento de los datos capturados. Es un bucle que se está siempre ejecutándose y se corresponde con el proceso de menor prioridad.

Función Inicia()

Se encarga de inicializar los periféricos, los puertos de E/S y de arrancar las comunicaciones.

Función inicia_cad()

Función auxiliar encargada de configurar el conversor ADC de 16 Bits, así como inicializar todas las variables asociadas.

Función IniFlash()

Se encarga de cargar en memoria e inicializar la flash con los correspondientes valores necesarios para calibrar los resultados de las medidas.

*Función SeccionCriticalINT() **

Rutina que se encarga de deshabilitar las interrupciones globales mientras que almacena el dato entero en la tabla compartida.

Función SeccionCriticaTablaINT()

Rutina que se encarga de deshabilitar las interrupciones globales mientras que almacena la tabla de enteros en la tabla compartida.

Función ControlFlash()

Esta función se encarga de calibrar las escalas y los offset de canales de medida cuando le llegue la correspondiente orden por Uarl.

Función ControlEnergia()

Esta función se encarga de comprobar si ha llegado un nuevo dato de Energía, actualizando en caso afirmativo el registro interno.

5.4.5 Funciones específicas para realizar las medidas.

medidas.c

Módulo de funciones auxiliares utilizadas para el cálculo de las medidas a partir de los valores capturados por el ADC.

Función CalculaRMS()

Función que calcula el valor RMS a partir del acumulado del cuadrado de las medidas que se le pasa como parámetro.

Función CalculaPact()

Función que calcula la potencia activa a partir de los datos acumulados.

Función CalculaPapar()

Función que calcula la potencia aparente a partir del valor calculado de V_{rms} y I_{rms} .

Función CalculaPreact()

Función que calcula la potencia reactiva a partir del valor calculado de Potencia activa y aparente.

Función CalculaFDP()

Función que calcula el factor de potencia a partir de los valores

Función CalculaEnergia()

Función que calcula la energía a partir de la potencia calculada. Calculados de potencia activa y aparente.

Función CalculaFrec()

Función que calcula el valor RMS a partir del acumulado del cuadrado de las medidas que se le pasa como parámetro.

Comienzo de la función CalculaMedia()

Función que calcula en valor RMS a partir del acumulado del cuadrado de las medidas que se le pasa como parámetro.

UART.c

Módulo encargado de la inicialización y control de las comunicaciones Serie entre el sensor y el modulo zigbee.

Función IniUART()

Función que configura el periférico de la UART para la transmisión y recepción serie asíncrona.

Función IniTIMER A()

Función que configura el Timer A para usarlo en la UART.

Función AnalizarDatos()

Función que decodifica el mensaje que ha llegado por el puerto serie y elabora la trama de respuesta.

Función CRC16()

Función que calcula el CRC de una tabla.

Comienzo de la función AddCRC()

Función que añade el CRC a la tabla de transmisión.

Función Error()

Función que memoriza en la tabla de transmisión la trama de error.

Función TestModBusFree()

Función que verifica si hay operaciones activas en el puerto serie.

5.4.6 Rutinas de interrupción.

Rutina de interrupción del ADC16

Esta rutina se encarga de actualizar los valores acumulados usados para el cálculo de las medidas, así como la detección de la máxima corriente instantánea.

Rutina de interrupción de recepción de la UART

Esta rutina se encarga de memorizar la trama que llega por la UART.

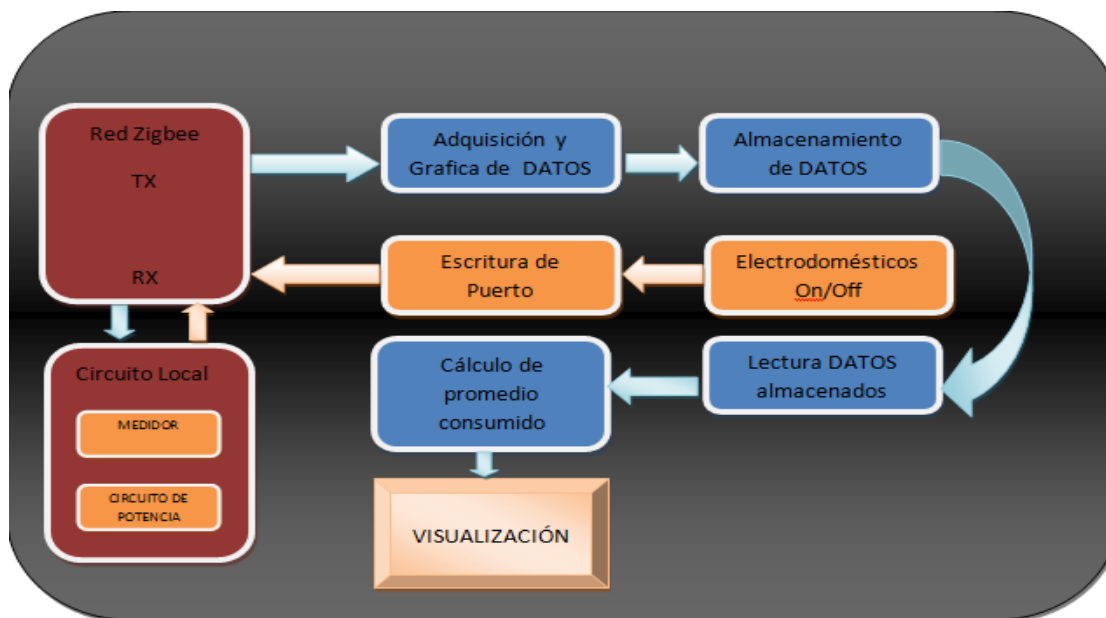
Rutina de transmisión de la UART

Esta rutina se encarga de enviar la trama de respuesta por la UART.

5.5 INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW

En la figura se muestra el diagrama a bloques de la visualización y la conexión con los demás módulos que constituyen el proyecto.

Figura 42. Diagrama en bloques del sistema de Visualización.



Fuente. Elaboración propia

5.5.1 lenguaje de programación gráfico. Actualmente se desarrollan lenguajes de alto nivel para crear nuevas soluciones ofreciendo una amplia variedad de programas que permite al usuario interactuar de una forma más fácil con la máquina.

Su función principal radica en que a partir de su desarrollo, existe la posibilidad de que se pueda utilizar el mismo programa en distintas máquinas, es decir que es independiente de un hardware determinado. La única condición es que la PC tenga un programa conocido como traductor o compilador, que lo traduce al lenguaje específico de cada máquina.⁴⁴.

Una parte importante se ha centrado en hacer más fácil la tarea del programador y por esto ha salido al mercado una nueva alternativa de lenguajes de programación gráficos, denominado también 'lenguaje G'

⁴⁴ MASTER MAGAZINE. Definición de lenguaje de alto nivel [Online]. 10 de Marzo de 2010

G es un lenguaje de programación, aunque a diferencia de la gran mayoría no es basado en texto, es gráfico, a través de diagramas. El lenguaje G es el lenguaje que se utiliza para desarrollar programas como el LabVIEW. Antes se utilizaba en dos productos de NI, LabVIEW y BridgeVIEW, posteriormente BridgeVIEW se convirtió en un módulo de LabVIEW (DSC) y ahora es LabVIEW el programa que utiliza G, no siendo el único.⁴⁵

En el mercado también hay otros programas que utilizan el lenguaje G, como el FlowDesigner; es un entorno de desarrollo libre (GPL / LGPL) de flujo de datos orientada. Se puede utilizar para construir aplicaciones complejas mediante la combinación de pequeños bloques de construcción reutilizables. En algunos aspectos, es similar a ambos Simulink y LabView, pero no es un clon de cualquiera de estos dos.⁴⁶

Simulink ® es un entorno de simulación multidominio y diseño basado en modelos para la dinámica y los sistemas integrados. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de bibliotecas de bloques que le permiten diseñar, simular, implementar y probar una variedad de variables en el tiempo los sistemas, incluidos las comunicaciones, control, procesamiento de señales, procesamiento de video y procesamiento de imágenes.⁴⁷

Las aplicaciones son tan variadas como los diferentes ingenieros que las crearon. Afortunadamente, LabVIEW combina la flexibilidad de un lenguaje de programación con el poder de una herramienta avanzada de ingeniería, así los ingenieros pueden terminar sus proyectos sin importar sus requerimientos específicos.⁴⁸

5.5.2 LabView. Es un entorno de programación gráfica usado por miles de ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo. LabVIEW ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos. La plataforma LabVIEW es escalable a través de múltiples objetivos y sistemas operativos, desde su introducción en 1986 se ha vuelto un líder en la industria.⁴⁹

Para el desarrollo de nuestro proyecto utilizaremos Labview por ser una herramienta que tenemos al alcance adicional de eso esta específicamente diseñada para sistemas de automatización y control de procesos.

⁴⁵ NATIONAL INSTRUMENTS. Discusiones sobre productos NI [online]

⁴⁶ SOURCE FORGE. Main Page [online]

⁴⁷ MATHWORKS. Simulink [online].

⁴⁸ NATIONAL INSTRUMENTS. Labview [online].

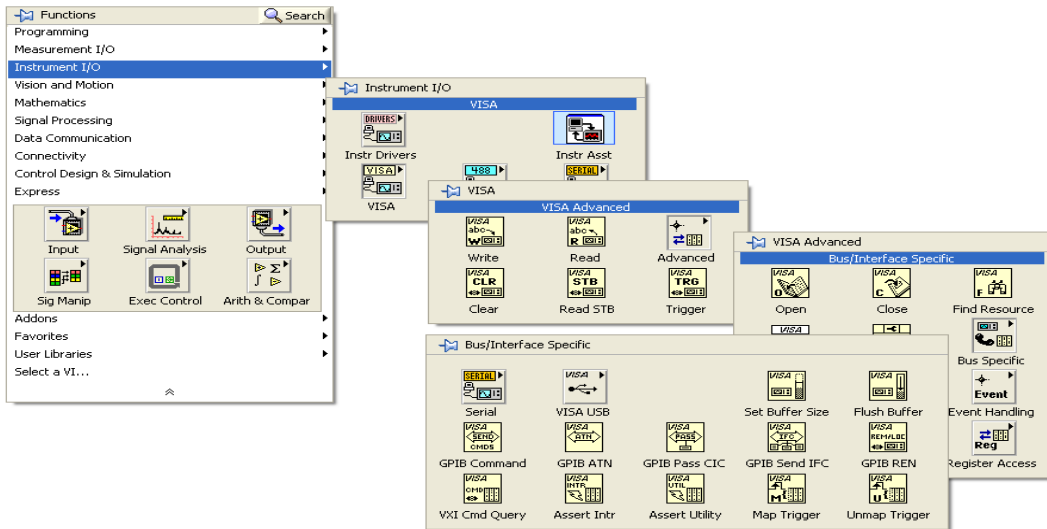
⁴⁹ NATIONAL INSTRUMENTS. ¿Qué es NI Labview? [online].

5.5.3 Manejo de puertos. Para desarrollar la aplicación, es necesario utilizar los puertos del computador para poder adquirir la información se determino usar el puerto serial, a causa de los kit de prueba Zigbee solo utilizan puerto serial. Pero teniendo en cuenta que la tecnología avanza rápidamente se puede mejorar el diseño realizando la transferencia de datos por medio del USB.

En esta sección entraremos a configurar en labview un puerto serial para realizar la toma de datos. El labview cuenta con el VISA, es un modulo perteneciente a este y permite la configuración de toda clase de puertos.

A continuación y debido a que es un lenguaje grafico, se mostraran algunas imágenes para mostrar los procedimientos. Para seleccionar los diferentes elementos en labview dan click derecho en cualquiera de las ventanas (parte de usuario o diagrama de bloque) y desplegara un menú similar al mostrado en la figura 43.

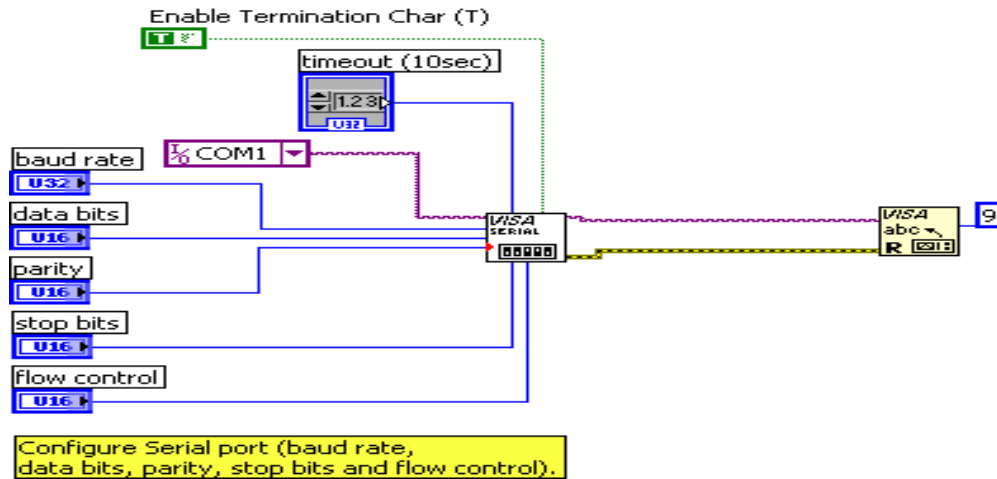
Figura 43. Herramientas de labview.



Fuente. Labview.

Para configurar el puerto serial se utiliza la siguiente configuración.

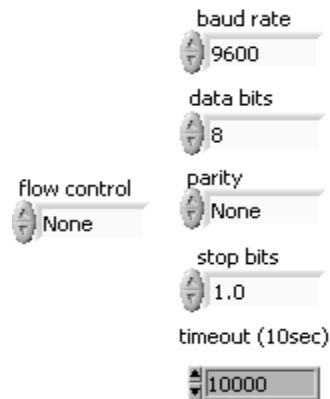
Figura 44. Configuración de puerto bloque de diagramas.



Fuente. Labview.

Para el panel frontal queda de la siguiente manera como se muestra en la figura 45.

Figura 45. Configuración de puerto panel frontal.



Fuente. Labview.

Desde allí se controla el puerto por donde se ingresara la información, la velocidad en baudios, para nuestro caso utilizamos 9200 baudios, la tasa se bits que son 8, la paridad la ubicamos en “None” para que la configuración quede por defecto, stop bits, especifica el número de bits de parada que sirve para indicar el final de un cuadro y control de flujo, establece el tipo de control utilizado por el mecanismo de transferencia.

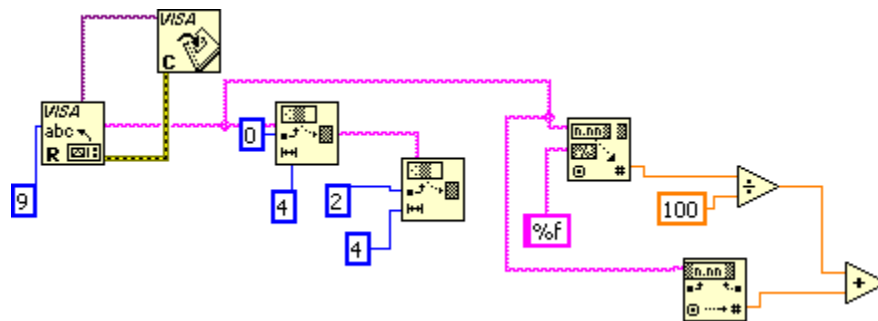
Figura 46. Herramienta de lectura de puerto.



Fuente. Labview.

Este bloque es la parte de lectura del puerto y el numero especifica la cantidad de bits que van a ingresar por el puerto. Esto permite que el programa realice un control de la entrada de datos y no se desborde o se sature el programa.

Figura 47. Elementos para procesar los datos y visualizar posteriormente.



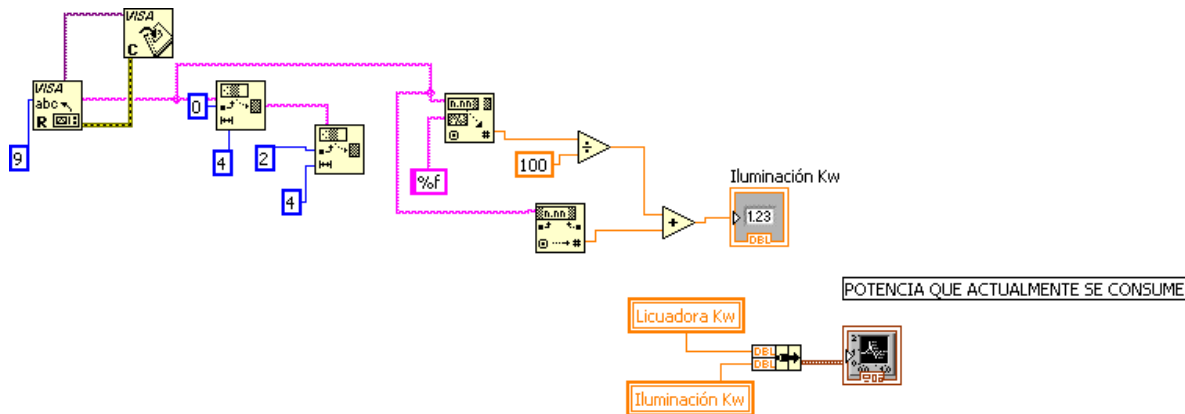
Fuente. Labview.

La sección que se le añadió permite coleccionar la información del buffer la cual se presenta en formato string y luego con el elemento agregado convierte el string en un número DBL para luego poder ser visualizado.

5.5.4 Visualización y Almacenamiento de variables. Una parte muy importante en este desarrollo es poder visualizar el consumo de la energía eléctrica y luego almacenar los datos para ser procesados y finalmente mostrar el consumo promedio que se ha generado durante un periodo de tiempo (semanal, mensual, trimestral, semestral, anual, etc.)

5.5.4.1 Visualización. Continuando con el diseño de nuestro prototipo que permitirá la visualización del consumo energético, agregamos nuevos elementos a nuestro programa.

Figura 48. Elementos para visualizar los datos del puerto.



Fuente. Labview.

Los elementos que son anexados, son para visualizar la potencia que está siendo consumida en el instante de tiempo, permiten que la interfaz con el usuario sea mucho más amigable. Aquí se realizó la conversión del formato que entrega el puerto serial "string" en un número de 10 bytes, para luego ser graficado por las herramientas de *String Subset*, *Sacan Value*, *Divide*, *add* y *Graph Indicator*.

En el panel frontal el indicador se ve de la siguiente forma:

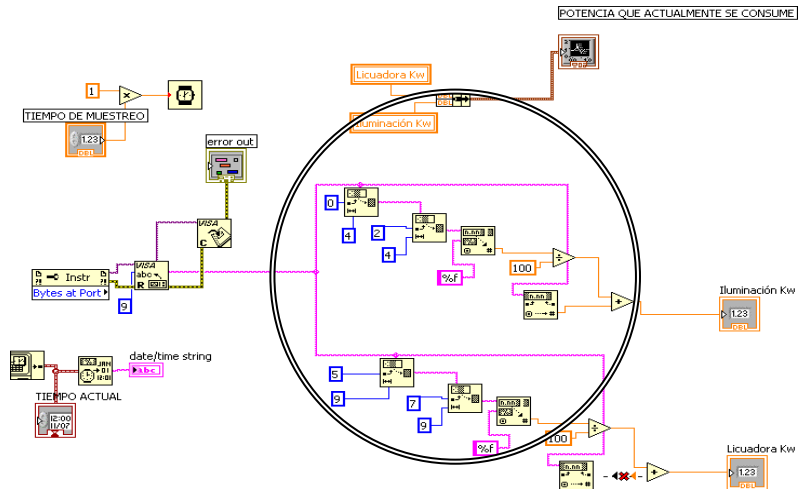
Figura 49. Visualizador de datos en forma grafica.



Fuente. Labview.

En la figura 50 se denota con un circulo la sección encargada de tomar los datos de los diferentes electrodomésticos que llegan por el puerto RS232 y a su vez llevarlo a los diferentes indicadores para realizar una visualización tanto grafica como numerada, permitiendo al individuo observar detenidamente los valores que se procesan.

Figura 50. Caso por “default”



Fuente. Labview

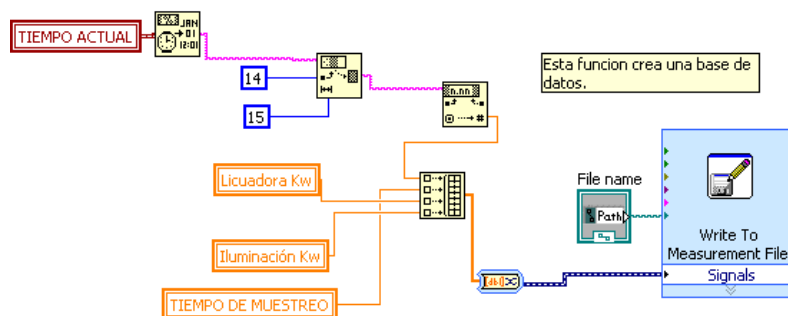
Cabe notar que para poder graficar todas las variables en un mismo *Graph Indicator*, se deben multiplexar las señales y en este caso es muy útil la herramienta “*Bundle*”. Además evitar excesivos alambrados se puede utilizar “*Local Variable*”, esta se desprende de la variable original. Para poder ubicarla se da click derecho en el indicador que utilizamos, se sitúa el puntero del mouse en “*create*” y seleccionamos “*Local Variable*”. Cuando nos cree la variable local de nuevo le damos click derecho y cambiamos a modo read.

Este tipo de herramientas ayuda a que la programación se haga más cómoda y confiable, nos da una visión de donde se puede cometer un error mucho más fácil y por consiguiente es más ordenado el proceso de programación.

5.5.4.2 Toma de datos. La toma de datos es primordial en la labor del software debido que aquí se substraerá el resultado de la potencia consumida durante la cantidad de tiempo seleccionada por el usuario.

Para esto el Labview cuenta con una herramienta muy importante para almacenar, se conoce como *Write to measurement file* y su forma grafica es la siguiente

Figura 51. Herramienta “Write to measurement file”



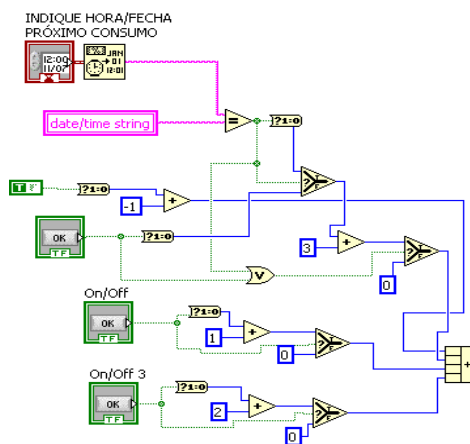
Fuente. Labview.

5.5.5 Selector de opciones. Cada programa cuenta con un menú de opciones, ofreciendo una mayor versatilidad y agrado a los ojos de los consumidores.

Esta opción lo que permite es activar por medio de un modelo de interrupciones, diferentes opciones que el usuario va a tener. Entre algunas funciones se encuentran:

- Configuración del sistema
- Cálculo del consumo promedio
- Cálculo del consumo de potencia en la moneda actual.
- Control de encendido y apagado de los diferentes electrodomésticos a los cuales se les pueda adaptar la tecnología zigbee.

Figura 52. Selector de opciones.



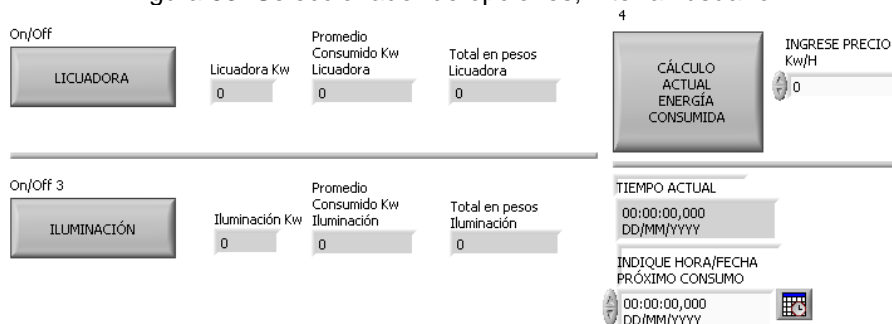
Fuente. Labview.

Este sistema se implemento de forma tal que funcionara por medio de casos, es decir que cada botón tiene asociado un número el cual activa el “caso”

correspondiente, así se emula un tipo de interrupción poniendo como “caso” por “Default” el encargado de estar recibiendo de forma constante los datos del programa y almacenándolos a su vez en el sistema.

Como se había mencionado antes, los otros “casos” se encargan de detener el proceso que esta por “defecto” y llama la secuencia deseada. Es decir que para el usuario poder visualizar un promedio del consumo; al activarse el botón este genera una interrupción interna y llama la función que realiza el procedimiento, finalizado este vuelve al caso que esta por defecto.

Figura 53. Seleccionador de opciones; interfaz usuario.



Fuente. Labview.

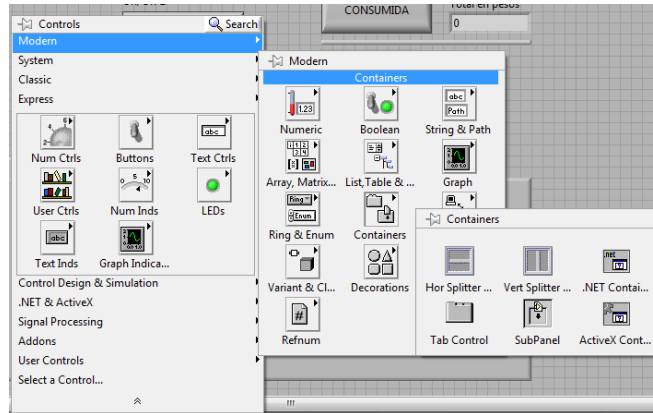
Como se puede observar en la grafica anterior, esta muestra las posibilidades por medio de los pulsadores que tiene el usuario para controlar sus electrodoméstico y adicional si este desea volver calcular el promedio o simplemente espera a una fecha asignada donde el software automáticamente realiza el cálculo.

5.5.5.1 Configuración del sistema. Es muy importante poder configurar nuestro sistema debido a que no todos los equipos son compatibles entre sí. Afortunadamente se cuenta con protocolos lo que permite manipular algunos parámetros, para que haya compatibilidad entre hardware y software.

Aquí se logra ubicar algunas opciones de configuración básica para usuarios menos conocedores y de avanzada para los que son más exigentes.

Ya se había mencionado antes la configuración de los puertos, pero también es importante destacar cada cuanto quiere que se quiere mostrar la señal para no sobre saturar el sistema con muchos datos y además la ubicación de donde se van a almacenar las bases de datos del consumo mensual.

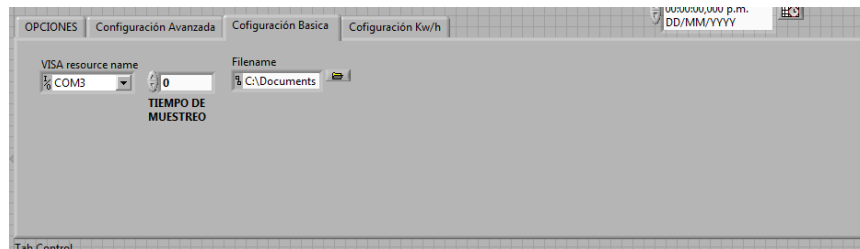
Figura 54. Menú de Labview



Fuente. Labview.

Para esta sección tomamos la opción *modern/Containers/Tab Control* y allí aparecerá un recuadro con forma de carpeta y pondremos nuestra configuración del sistema.

Figura 55. Opción de "Tab".

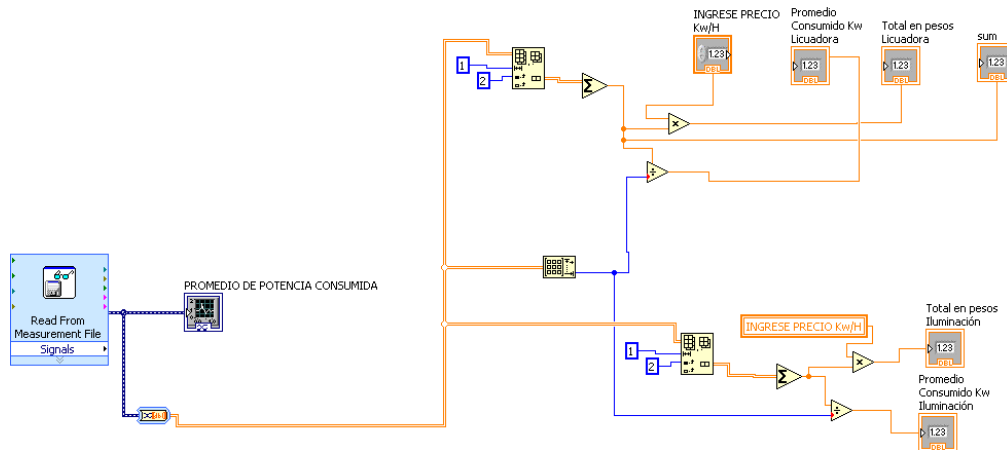


Fuente. Labview.

5.5.5.2 Cálculo de la potencia promedio consumida y valor en la moneda actual. Los datos que se almacenan constituyen la información necesaria para poder visualizar el consumo que se realiza mensualmente de los electrodomésticos.

En esta parte del programa se tomaron diferentes herramientas de labview para realizar el cálculo, pero principalmente está el "Read", el cual lee la base de datos y después de esto se envía al icono que grafica la información del consumo general de los electrodomésticos.

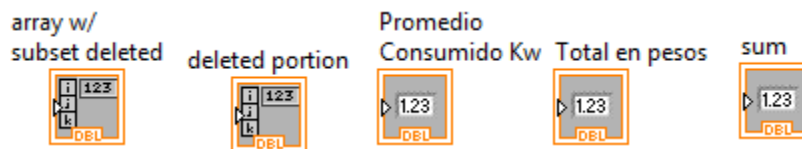
Figura 56. Herramienta "Read"



Fuente. Labview.

De aquí se desprenden varios elementos que en conjunto nos brindan los datos deseados, desde la grafica hasta el consumo total en pesos.

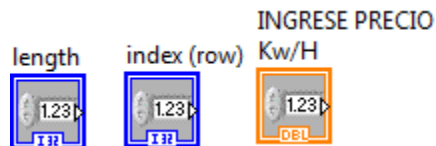
Figura 57. Variable tipo "indicador"



Fuente. Labview.

Estos elementos son simplemente indicadores de datos, con esto se observa que la información que nos está brindado el sistema si es verídica y no un conjunto de errores. A excepción del "Total en pesos" y "Promedio consumido Kw" que son herramientas para visualizar el resultado de las operaciones matemáticas.

Figura 58. Variable tipo "control"



Fuente. Labview.

Las herramientas mostradas en la figura 58, son denominadas de tipo “control”, nos permite manipular las variables que le ingresamos al sistema a diferencia de una “constante”, la cual es fija.

Las que se encuentran en azul son variables de tipo entero de 32 bits, y las estamos usando para modificar los valores en una herramienta de labview “*Delete From Array*” que nos permite sacar de una matriz un segmento. Para nuestro caso es importante ya que la base de datos que se guarda en el sistema queda almacenada en forma de matriz, una columna representa el tiempo de muestreo, otra el día de toma de datos y por último la cantidad vatios consumidos por el electrodoméstico.

Figura 59. Herramienta “*Delete From Array*”



Fuente. Labview.

Es importante esta herramienta solo es necesario la columna de vatios consumidos, para realizar el promedio y calcular el valor en pesos consumidos por el usuario.

Figura 60. Herramienta “*Delete From Array*”

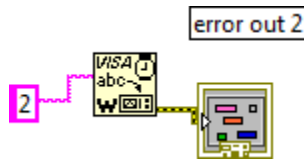


Fuente. Labview.

La gráfica que nos muestra los operadores se utiliza para realizar las diferentes operaciones matemáticas que dan una estimación del consumo de energía eléctrica.

5.5.5.3 Control de encendido y apagado de los electrodomésticos. Una de los objetivos planteados en el proyecto de grado, es que la persona que tenga el software pueda controlar el encendido y pagado de electrodomésticos, por eso esta fase es importante para que se cumpla el objetivo propuesto.

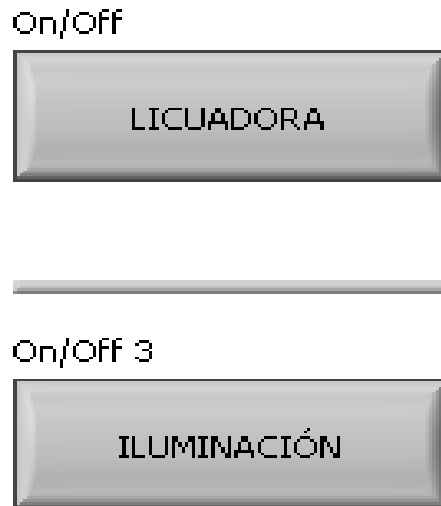
Figura 61. Herramienta para enviar datos al dispositivo.



Fuente. Labview.

Es tan simple como se observa en la figura. Solo se envía por la configuración del visa en modo “*Wright*”; se le indica el dato que se va a enviar, y listo. En este caso tiene el 2 que representa el encendido de la “licuadora”. Hay que tener en cuenta que por razones de tiempo y debido al alcance que le dimos, solo realizaremos un control On/Off.

Figura 62. Botones del panel de usuario.

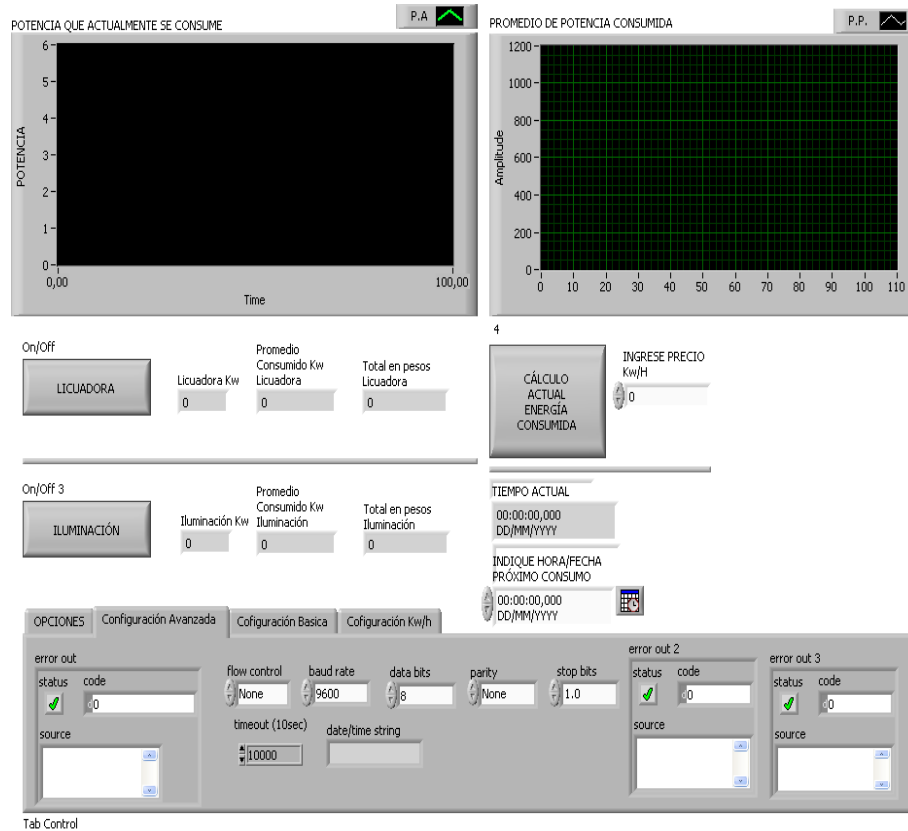


Fuente. Labview.

5.6 ESQUEMAS FINALES DEL PROTOTIPO

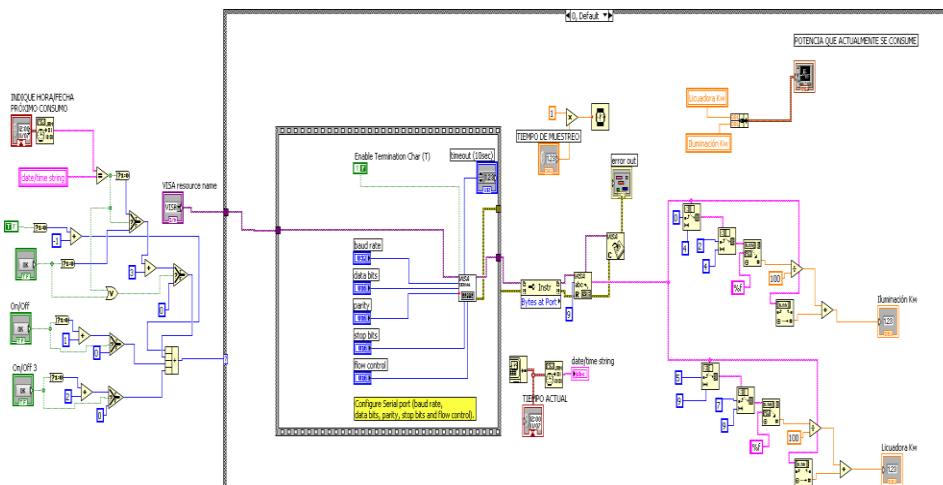
5.6.1 Diagrama de la programación del prototipo. La unión de todos los fragmentos que se mencionaron durante el proceso de programación, da como resultado la culminación del objetivo esperado, como se muestra en las siguientes figuras.

Figura 63. Panel Frontal o de Usuario.



Fuente. Labview.

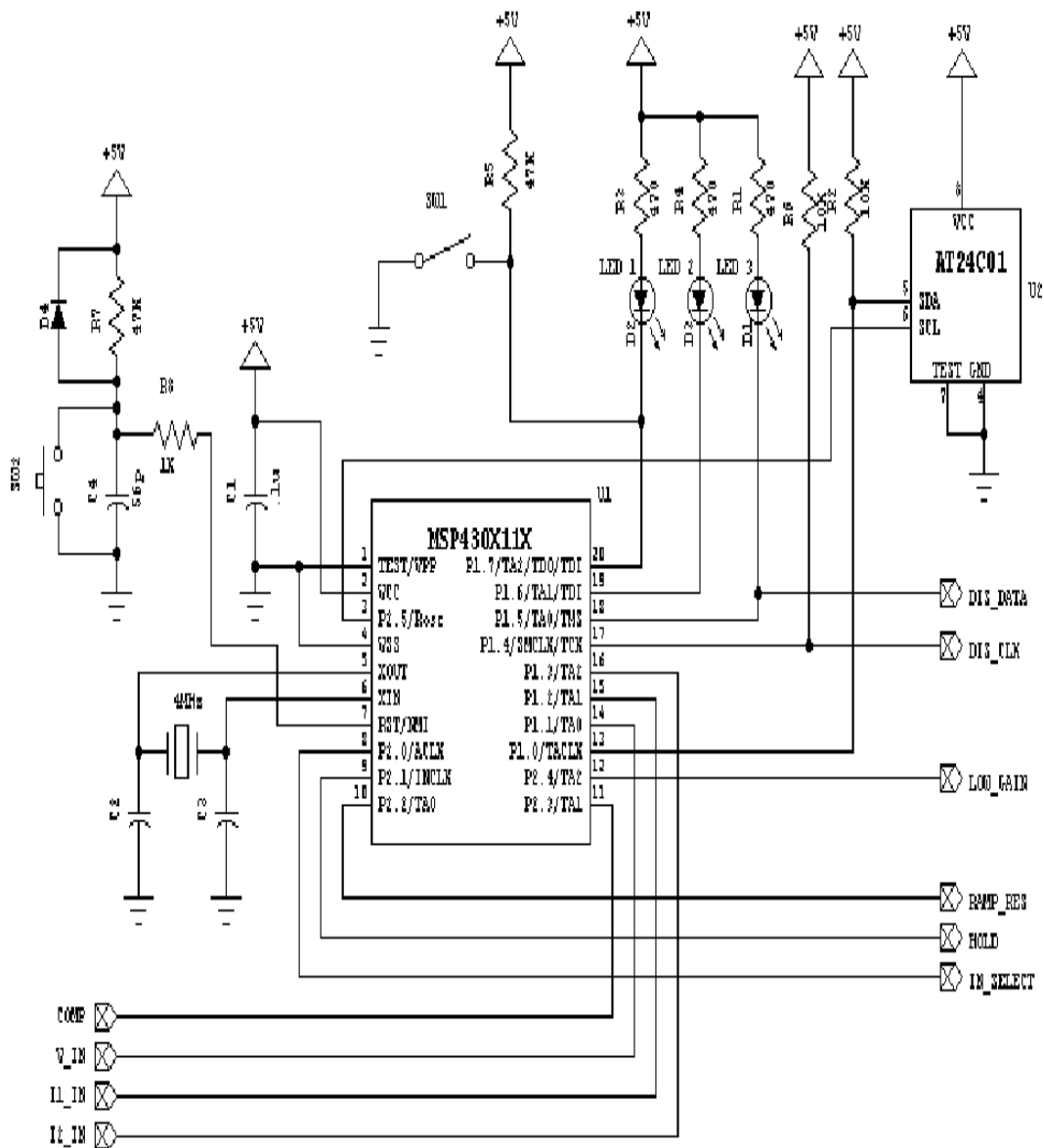
Figura 64. Diagrama de bloques o Panel de programación



Fuente. Labview.

5.6.2 Esquema del circuito del medidor de energía.

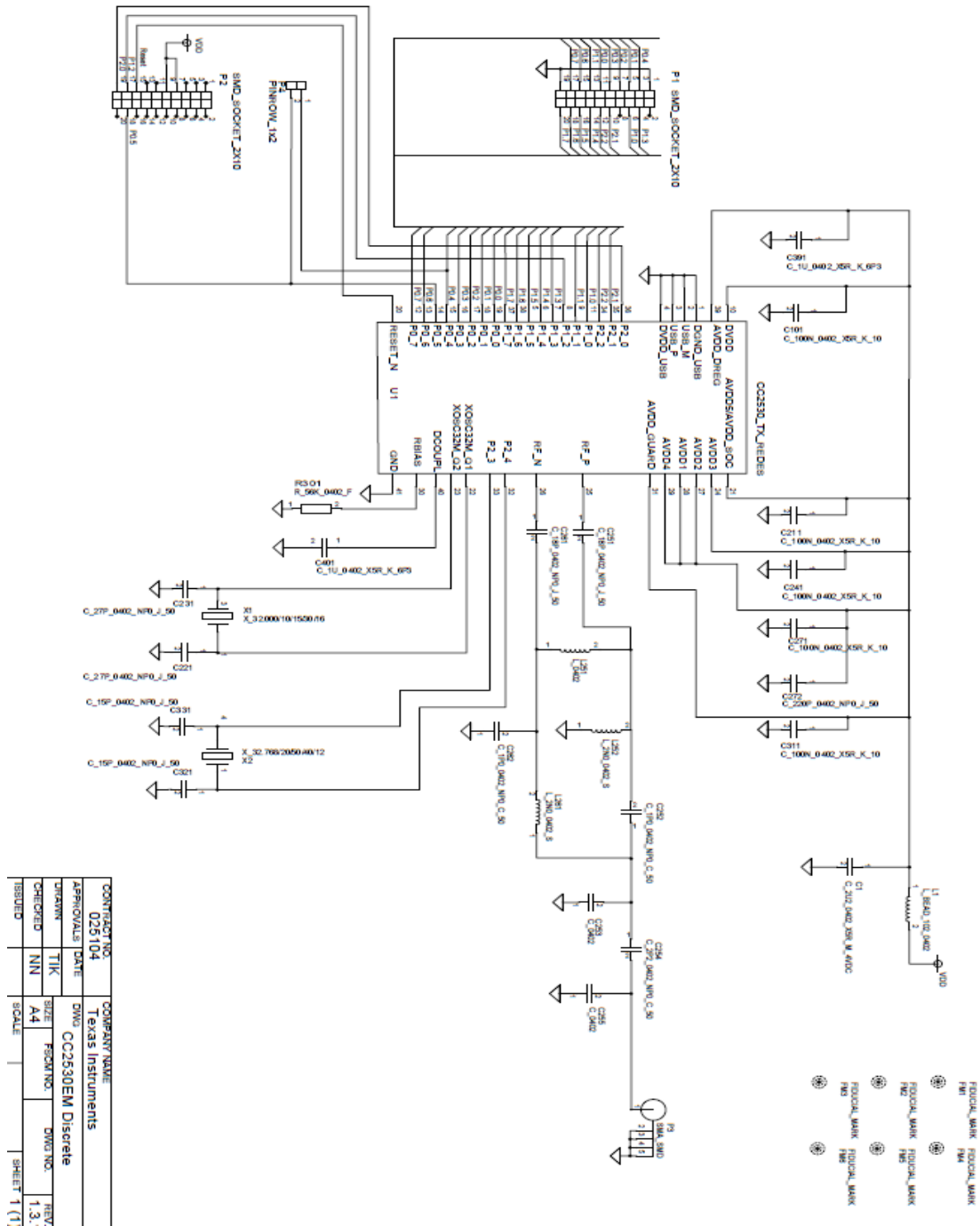
Figura 65. Esquema recomendado para MSP430



Fuente. Texas Instruments.

5.6.3 Esquema del circuito de la red Zigbee.

Figura 66. Esquema recomendado para CC2530.



Fuente. Texas Instruments.

CONCLUSIONES

- Actualmente existen una gran cantidad de estándares que permiten todo tipo de aplicaciones en el campo de las comunicaciones inalámbricas, sin embargo, solo de estos estándares es adecuado ZigBee para situaciones en las que se requiere de un bajo consumo de energía y además de trabajar áreas relativamente pequeñas.
- El bajo consumo de energía en *ZigBee* se debe a la capacidad de los dispositivos de dormir durante largos periodos de tiempo, además de presentar baja latencia en su modo de transmisión y de *standby*, lo hace una potente herramienta para aplicaciones domóticas.
- La principal aplicación de ZigBee son los sistemas para redes domóticas e industriales, pues ha sido creado para cubrir las necesidades del mercado en estos campos, sin embargo, ZigBee tiene amplias capacidades de desarrollo que le permite ser utilizado en múltiples aplicaciones.
- Aunque ZigBee es prometedor, desde el lanzamiento de la última especificación de la norma, todavía no es muy adoptado en el mercado, por eso vemos una oportunidad de negocio para comenzar a trabajar en nuestro medio.
- La interfaz grafica de un sistema, el cual se pretende llevar a las personas del común y es muy importante, pues dependiendo de lo amigable que sea esta con el usuario será su éxito. Labview permite hacer esto de forma muy fácil, pero su licencia es muy costosa lo cual no puede ser muy asequible, por esto recomendamos la importancia de usar un software de libre distribución o que sea mucho más económico.
- Se pudo observar que Labview es un sistema muy potente, pero entre más código se le ingrese, más lento se vuelve, por lo tanto es importante utilizar solo las funciones necesarias y no colocar exceso de elementos de programación.
- También se presenta una deficiencia en el código, que no pudimos corregir a tiempo, pero que es necesario en caso de que se llegara a vender, y es la asignación de direcciones de red por parte de Labview. Cuando se incorporen nuevos dispositivos se tendría que modificar el programa fuente de forma manual para poder agregar más de estos. La solución es que tenga funciones como un DHCP (*dynamic host configuration protocol*), que asigna direcciones de red de forma dinámica, así cada vez que se agregue un dispositivo nuevo a

la plataforma, este deberá incluir un modulo de control y asignar la parte de visualización para el dispositivo nuevo.

- El proceso de medición de energía se implemento utilizando una resistencia shunt por motivos de reducir el tamaño del dispositivo, pero es mejor utilizar un transformador de corriente para que el consumo de energía sea mucho menor.
- En el desarrollo de la etapa de medición se observo que el circuito elegido para la medición de la energía es muy adecuado, debido a que su consumo es muy reducido, lo que es muy indicado para los fines del proyecto.
- Una de las principales ventajas del medidor es que debido a que se necesita muy poco hardware para su desarrollo el tamaño es bastante reducido, lo que facilita la incorporación en los electrodomésticos.

7. RECOMENDACIONES

Actualmente el CC2420 y el CC2530 es el dispositivo de fácil acceso para aplicaciones Zigbee y por su bajo precio, se recomienda la adaptación del mismo para trabajos con otros microcontroladores que puedan Manejar comunicación SPI.

Se recomienda que para la implementación del los dispositivos (Medidor y transceiver) se utilicen elementos superficiales ya que ayudarían a la reducción del tamaño y es un factor importante para un prototipo final.

Se invita para la visualización del consumo de energía y el control del electrodoméstico, buscar otras alternativas de software, ya que el software utilizado en este trabajo es mas de control industrial, además sus licencias son demasiadas costosas para pensar a futuro una posible comercialización.

En nuestro caso la red zigbee se utilizo para la medición de energía y control de electrodomésticos, se recomienda investigar y desarrollar otras aplicaciones de esta tecnología ya que se ve que tiene muchos otros campos donde puede ser aplicada.

Para elegir que estándar es el más conveniente al momento de cubrir una aplicación es necesario estudiar el tipo de características que posee dicha necesidad y analizar cuál de las tecnologías inalámbricas se ajusta mejor, pues el hecho de que haya varios sistemas WPAN, no implica que todas ellas satisfagan todo tipo de requerimientos.

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE HERNÁNDEZ, Juan Manuel y GARCÍA ESPINOSA, Rafael Esteban. Control de iluminación inalámbrico utilizando el protocolo de comunicación IEEE 802.15.4 (zigbee). Trabajo de grado. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Electrónica.

Archundia Papacetzzi, F. M.. Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking. Tesis Licenciatura. Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, cap 4. 2003, [en línea]. <<http://catarina.udlap.mx>>.[Citado el 3 de febrero de 2010]

ARGAÑARAZ, José Hugo. Mediciones eléctricas. Bahía blanca, 2003,3p Universidad nacional del sur. Disponible en <www.ingelEq.uns.edu.ar>

BLOGWIMAX.COM. ¿Qué es Wimax? [Online]. Textinfo ,22 de abril de 2009 [citado 13 de Octubre de 2009]. Disponible en internet: <http://blogwimax.com/que-es-wimax/>

CALDERÓN ARBOLEDA, Jhon Jairo. MANTILLA JAIMES, Carlos. Diseño, construcción y evaluación de una red de inalámbrica de sensores zigbee. Bucaramanga, 2006, 147p. Trabajo de grado (ingeniería electrónica). Universitaria de investigación y desarrollo. Facultad de ingeniería electrónica. Disponible en < www.radiogis.uis.edu.co >

CASADOMO.COM. Domótica – Introducción [Online]. Textinfo [Madrid, España]. Casadomo Soluciones S.L. 2009 [citado 06 de octubre de 2009]. Disponible en internet: <<http://www.casadomo.com/noticiasDetalle.aspx?c=14>>.

CENTERPOINT ENERGY. Medidores inteligentes [Online].Textinfo [Texas, Estados Unidos] Center Point Energy. Octubre de 2009 [citado 7 de octubre de 2009]. Disponible en internet: <<http://www.centerpointenergy.com>>

COOPER, William D. HELFRICK, Albert D. Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición. 1 ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1991. 405p

DOCCO. Doco Ltda, Automatización de espacios [Online]. 22 de Septiembre de 2009 [citado 11 de Octubre de 2009]. Servicios disponibles en Medellín, Colombia. Disponible en Internet: <<http://www.tecnodoco.com/>>.

DPTO NORMAS, CODENSA. Medidores de energía eléctrica [Online]. Textinfo [Bogota, Colombia] CODENSA S.A. 27 de Julio de 2001 [citado 7 de octubre 2009]. Capitulo 7. Medidores estáticos (Electrónicos). Disponible en internet: <http://www.codensa.com.co/documentos/6_26_2007_12_25_17_PM_GENERALIDADES%207.4.pdf>.

ELECTRONIC HOUSE. Estados Unidos. Octubre 16, 2009. Disponible en:<www.electronichouse.com>.

ENERGY STAR. Recursos en Español [Online]. [citado 9 de Octubre de 2009]. Disponible en internet: <http://www.energystar.gov/index.cfm?c=home.resources_espanol>.

ES.KIOSKEA.NET. Redes inalámbricas [Online]. Textinfo, Kioskea. 16 de octubre de 2008 [citado. 23 de Septiembre de 2009]. Disponible en internet: <<http://es.kioskea.net/contents/wireless/wlintro.php3>>.

GIDATI. Grupo de investigación de la UPB. Investigación del mercado doméstico colombiano [Online]. Textinfo. [Medellín, Colombia] Universidad Pontificia Bolivariana, 20 de Enero de 2007 [citado el 30 de septiembre de 2009]. Disponible en <<http://convena.upb.edu.co/domotica/documentacion>>.

GORE, Albert Arnold. An Inconvenient Truth [película]. Producida por Lawrence Bender, Estados Unidos: Paramount Home Entertainment, 2006. 1 DVD. 96 minutos. Color.

HENAO MERCHAN, Oscar David. Hardware y software domotico. Medellin, 2006, 217p. Trabajo de grado (ingeniería electrónica). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de ingeniería eléctrica y electrónica.

HIDALGO ALCALÁ, Miguel Eduardo. Diseño del sistema de iluminación automatizado para una oficina en un edificio inteligente, basado en tecnología inalámbrica zigbee. Proyecto de Grado. Lima: Pontificia Universidad Católica Del Perú. Facultad de ciencias e ingeniería. Ingeniería Electrónica.

KAMMERER ORCASITA, Edwin y HERRERA ORTIZ, Jhon Freddy. Control De Luces Y Electrodomésticos Del Hogar Mediante Tecnología Zigbee. Trabajo de Grado. Envigado: Institución Universitaria de Envigado. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Electrónica.

LEVIN F., Earl. Shedding Light on room Illumination. En: Cepro. Septiembre 2001. P 166-122.

NATIONAL INSTRUMENTS. Lenguaje de programación [online] <<http://forums.ni.com/ni/board/message?board.id=6170&thread.id=1070>>. [Citado el 10 de Marzo de 2010].

ORTEGA HUEMBES, Carlos Alberto, DEL SOCORRO ROQUE, Deyanira y ÚBEDA SEQUEIRA, Leslie Eduardo. Zigbee: El Nuevo Estándar Global Para La Domótica e Inmótica. [online]. Texinfo 1 ed.[Managua, Nicaragua]: Universidad

Nacional De Ingeniería, 20 Julio 2008. [Citado 7 oct., 2009]. Obtenido de < <http://www.scribd.com/doc/4559979/Zigbee> >

PALAZZESI, Ariel Google Power Meter [Online]. Neoteo.com. 11 de febrero de 2009 [citado 11 de Octubre de 2009]. Disponible en internet: <<http://www.neoteo.com/google-power-meter-14779.neo>>

PERSONAL VÁZQUEZ, Enrique, LARIOS MARÍN, Diego Francisco, Red de sensores de medidas de consumo eléctrico. Sevilla 2009,189p. Trabajo de grado (Ingeniería Automática y Electrónica). Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la universidad de Sevilla: < <http://bibing.us.es> >

ROJAS BLANCO, Edwar Alonso y VELANDIA PUENTES, Cesar Eduardo. Prototipo de sistema de telemetría para el monitoreo de signos vitales en actividades de montaña. Anteproyecto de Grado. Bogota D.C.: Universidad Pedagógica Nacional. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Electrónica.

SOURCEFORGE.NET. Flow Designer [En línea]. <http://sourceforge.net/apps/mediawiki/flowdesigner/index.php?title=Main_Page>. [Citado el 10 de Marzo de 2010].

THE MATHWORKS. Simulink [En línea]. <<http://www.mathworks.com/products/simulink/>>. [Citado el 10 de Marzo de 2010].

TONI. RV: Home Automation Products[Online]. Mensaje para: OCHOA Alejandro. 20 de agosto de 2009 [citado 9 de Octubre de 2009]. CITYGROW Technology Co. Distributor. Disponible en internet:<Toni@nicetex.com.hk>.

TRIANO, José María. CASSIRAGA, Gustavo A. DREISZIGACKER Matías G. Medición digital de potencia en laboratorio de maquinas eléctricas Paraná, 7p. Universidad Tecnológica Nacional, facultad de ingeniería electrónica. Disponible en < www.uniram.com.ar >.

UNINCCA. Redes locales inalámbricas [Online]. Textinfo [Bogotá, Colombia], Universidad Incca de Colombia. 22 de junio de 2001 [citado 10 de Octubre de 2009]. Disponible en internet: <<http://www.unincca.edu.co/boletin/indice.htm>>.

VALVERDE REBAZA, Jorge Carlos. El Estándar Inalámbrico ZigBee [Online]. Textinfo [Trujillo, Perú] Universidad Nacional de Trujillo, 2007 Disponible en <<http://www.seccperu.org>>

X-NET.NET. Estándares Inalámbricos, (Pasado, presente y futuro de las redes wireless) [Online]. Texinfo [Madrid, España], X-NET. 06-Mar-2003 [citado 13 de octubre de 2009]. Disponible en internet: <<http://www.x-net.es/tecnologia/wireless.pdf> >

ANEXOS