



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y**  
**REDES**

**“EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE COMPRESIÓN DE AUDIO PARA SU  
TRANSMISIÓN EN TIEMPO REAL UTILIZANDO REDES ZIGBEE”**

**TESIS DE GRADO**

Previa la obtención del título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y REDES**

Presentado por

**GUSTAVO JAVIER LÓPEZ RODRÍGUEZ**

RIOBAMBA – ECUADOR

2014

**Mi más grande agradecimiento a mi Dios, quien siempre ha estado a mi lado y nunca me ha dejado solo, y me ha dado el más hermoso regalo en mi vida que es mi Madre quien me ha brindado un gran ejemplo, los mejores valores y sobre todo su amor.**

**A mi Padre y Hermanos por toda la ayuda en los momentos necesarios, por su motivación, por el apoyo y respaldo incondicional en estos años de estudio.**

**A mis amigos por el apoyo y la compañía que me han brindado y por todos esos momentos inolvidables dentro y fuera de nuestra aula de clases.**

**Dedicado a mi Dios que sin Él no lo hubiera podido hacer, mi Padre por su apoyo constante, a mis hermanos, mis sobrinos y amigos.**

**En especial a mi Madre por ser quien más se esforzó para que pudiera culminar con éxito mi carrera profesional, por brindarme siempre su buen ejemplo y todo su Amor y cariño.**

**FIRMAS RESPONSABLES Y NOTA**

**NOMBRE**

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Iván Menes

**DECANO DE LA FACULTAD DE  
INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Wilson Baldeón

**DIRECTOR DE ESCUELA DE  
ING. EN ELECTRÓNICA  
TELECOMUNICACIONES  
Y REDES**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Paul Romero

**DIRECTOR DE TESIS**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Wilson Baldeón

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL  
DE TESIS**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Eduardo Tenelanda

**DIRECTOR CENTRO DE  
DOCUMENTACIÓN**

**NOTA DE LA TESIS:** \_\_\_\_\_

## **RESPONSABILIDAD DEL AUTOR**

“Yo Gustavo Javier López Rodríguez, soy el responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis, y el patrimonio intelectual de la misma pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”

---

Gustavo Javier López Rodríguez

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<b>WSN</b>	Redes de Sensores Inalámbricos
<b>WPAN</b>	Redes Inalámbricas de Área Personal
<b>LR-WPAN</b>	Redes Inalámbricas de Área Personal con Tasas Bajas de Transmisión
<b>QoS</b>	Calidad de Servicio
<b>PC</b>	Computadora Personal
<b>WIMAX</b>	Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas
<b>LMDS</b>	El Sistema de Distribución Local Multipunto
<b>VOIP</b>	Voz sobre Protocolo de Internet
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific & Medical
<b>PHY</b>	Capa Física
<b>CSMA-CA</b>	Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Prevención de Colisiones
<b>ACK</b>	Acuse de Recibo o Asentimiento
<b>MAC</b>	Control de acceso al medio
<b>GOF</b>	Trama General de Operaciones
<b>RF</b>	Radio Frecuencia
<b>IC</b>	Circuito Integrado
<b>DSSS</b>	Secuencia Directa De Espectro Expandido
<b>RAM</b>	Memoria de acceso aleatorio
<b>OSI</b>	Modelo de interconexión de sistemas abiertos
<b>NWK</b>	Capa de Red
<b>APS</b>	Subcapa de Soporte de Aplicación
<b>ZDO</b>	Objetos de dispositivo ZigBee
<b>FDD</b>	Dispositivo de funcionalidad completa
<b>RFD</b>	Dispositivos de funcionalidad reducida
<b>NWKID</b>	Network User ID
<b>ACL</b>	Lista De Control De Acceso
<b>RDSI</b>	Red Digital de Servicios Integrados
<b>ECGs</b>	Electrocardiogramas
<b>BAN</b>	Redes de Área Corporal

<b>GPRS</b>	Servicio General De Paquetes Vía Radio
<b>IP</b>	Protocolo de Internet
<b>ADPCM</b>	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
<b>PCM</b>	Pulse Code Modulation
<b>IMA</b>	Interactive Multimedia Association
<b>G.721</b>	Estándar para la compresión de audio
<b>CCITT</b>	Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico
<b>MDCT</b>	Transformación Discreta de Coseno Modificado
<b>MPEG</b>	Motion Picture Experts Group
<b>CELP</b>	Code Excited Linear Prediction
<b>ITU-T</b>	Sector de Normalización de las Telecomunicaciones
<b>VBR</b>	Tasa De Bits Variable
<b>VAD</b>	Detección De Actividad De Voz
<b>AAC</b>	Advanced Audio Coding
<b>MDCT</b>	Transformada De Coseno Discreta Modificada
<b>QoE</b>	Calidad de Experiencia
<b>RMS</b>	Raíz Medios Square

## ÍNDICE GENERAL

**PORTADA**

**AGRADECIMIENTO**

**DEDICATORIA**

**ÍNDICES**

**INTRODUCCIÓN**

### **CAPÍTULO I**

#### **MARCO REFERENCIAL**

1.1. ANTECEDENTES.....	17
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TESIS.....	18
1.3. OBJETIVOS.....	20
1.3.1. Objetivo General.....	20
1.3.2. Objetivos Específicos.....	20
1.4. HIPÓTESIS.....	21

### **CAPÍTULO II**

#### **MARCO TEÓRICO**

2.1. PROTOCOLO IEEE 802.15.4.....	22
2.2. EL ESTÁNDAR ZIGBEE.....	23
2.2.1. Introducción.....	23
2.2.2. Características de Zigbee.....	24
2.2.3. Estructura del Estándar Zigbee.....	25
2.2.4. Requisitos de Hardware.....	27
2.2.4. Arquitectura.....	28
2.2.6. Topologías de Red en el Estándar Zigbee.....	30
2.2.7. Dispositivos del Estándar.....	31
2.2.8. Seguridad.....	33
2.2.8.1. Servicios de Seguridad.....	33
2.2.8.1.1. Control de Acceso.....	34
2.2.8.1.2. Encriptación de Datos.....	34

2.2.8.1.3. Integridad de tramas.....	34
2.2.8.1.4. Refresco Secuencial.....	35
2.2.8.2. Modos de Seguridad.....	35
2.2.8.2.1. Modo Inseguro.....	35
2.2.8.2.2. Modo ACL.....	35
2.2.8.2.3. Modo Seguro.....	36
2.2.9. Capa Física.....	36
2.2.10. Canalización.....	37
2.2.11. Aplicaciones de Zigbee.....	39
2.2.11.1. Introducción.....	39
2.2.11.2. Red de Sensores.....	40
2.2.11.3. Automatización de Edificios y Hogares (Inmótica y Domótica).....	41
2.2.11.4. Control Industrial.....	42
2.2.11.5. Agricultura y Control Ambiental.....	43
2.2.11.6. Cuidados Médicos.....	44
2.2.11.7. Aplicación de ZigBee en audio.....	45
2.2.11.8. Otras Aplicaciones.....	47
2.2.12. Futuro de Zigbee.....	48
2.2.13. Módulos Xbee.....	48
2.2.13.1. Características mecánicas y distribución de pines.....	50
2.3. CODIFICACIÓN Y COMPRESIÓN DE AUDIO.....	52
2.3.1. Introducción.....	52
2.3.2. Algoritmos con pérdidas.....	53
2.3.2.1. Algoritmos $\mu$ -law y A-law (G.711).....	53
2.3.2.2. ADPCM.....	54
2.3.2.3. Compresión MPEG.....	55
2.3.2.4. CELP (Code Excited Linear Prediction).....	57
2.3.2.6. HILN.....	58
2.3.2.7. AMR.....	59
2.3.2.8. Speex.....	59
2.3.2.9. ACC.....	60
2.3.2.10. ATRAC.....	62

2.3.2.12. MP2.....	62
2.3.2.13. MP3.....	63
2.3.2.14. Musepack.....	64
2.3.2.15. Ogg Vorbis.....	65
2.3.2.16. Windows Media Audio (WMA).....	66
2.3.2.17. PCM.....	67
2.3.3. VS1063.....	68
2.3.3.1. Características Principales.....	69
2.4. CALIDAD DE VOZ EN REDES.....	70
2.4.1. Introducción.....	70
2.4.2. El espectro audible.....	70
2.4.3. Medición de la calidad del Sonido.....	71
2.4.3.1. Distorsión Armónica Total.....	71
2.4.3.2. Potencia de Salida.....	72
2.4.3.2. Respuesta de frecuencia.....	73
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MARCO PROPOSITIVO</b>	
3.1. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.....	74
3.2. DISEÑO Y MONTAJE DEL PROYECTO.....	75
3.2.1. Instalación y Programación del microcontrolador ATmega48 en AVRStudio.....	76
3.2.2. Instalación de X-CTU y configuración de módulos Xbee.....	78
3.2.3. Montaje de Módulos Xbee y VS1063.....	82
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
4. EJECUCIÓN DE PRUEBAS.....	87
4.2. PARÁMETROS DE EVALUACIÓN.....	88
4.3. OBTENCIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS.....	88
4.3.1 Frecuencia Global.....	88
4.3.2. Espectro de Frecuencia Audible.....	91
4.3.3. Potencia Total RMS.....	92
4.3.4. Encuesta.....	95
4.4. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN Y VALIDACIÓN.....	96

4.4.1. Adobe Audition 3.0.....	96
4.5. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	97
4.5.1. Determinar el algoritmo de compresión más eficiente.....	97
4.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	98
4.7. EVALUACIÓN DE ALGORITMOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE PONDERACIÓN.....	100

**CONCLUSIONES**

**RECOMENDACIONES**

**RESUMEN**

**SUMARY**

**GLOSARIO**

**ANEXOS**

**BIBLIOGRAFÍA**

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura I. 1.</b> Esquema de bloques del sistema.....	20
<b>Figura II. 2.</b> Formato de Tramas.....	26
<b>Figura III.3.</b> Esquema típico de un dispositivo Zigbee.....	27
<b>Figura II.4.</b> Diferentes capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee.....	28
<b>Figura II. 5.</b> Modelos de Red Zigbee.....	31
<b>Figura II. 6.</b> Estructura de Canales.....	38
<b>Figura II. 7.</b> Canalización en la banda de 2.4 GHz.....	39
<b>Figura II. 8.</b> Aplicaciones definidas por la alianza Zigbee.....	40
<b>Figura II. 9.</b> Arquitectura de un nodo en una red de sensores.....	41
<b>Figura II. 10.</b> Aplicación de ZigBee en la domótica.....	42
<b>Figura II. 11.</b> Aplicación de Zigbee en el control industrial.....	43
<b>Figura II. 12.</b> Aplicación de Zigbee en la Agricultura.....	43
<b>Figura II. 13.</b> Aplicación de Zigbee en cuidados médicos.....	44
<b>Figura II. 14.</b> módulo Xbee, fabricados por Maxstream.....	49
<b>Figura II.15.</b> Planos mecánicos de los módulos XBee/XBee-PRO.....	51
<b>Figura II.16.</b> Breakout Board para VS1063.....	69
<b>Figura III.17.</b> Diagrama de Bloques del Sistema de Comunicación de audio.....	75
<b>Figura III. 18.</b> Programación en AVRstudio de algoritmos de VS1063.....	76
<b>Figura III.19.</b> Asistente para creación o apertura de un proyecto.....	77
<b>Figura III.20.</b> Visión global de nuestro proyecto en AVRStudio.....	78
<b>Figura III.21.</b> Pantalla de inicialización de X-CTU.....	79
<b>Figura III.22.</b> Pantalla de configuración de X-CTU.....	79
<b>Figura III. 23.</b> Porteus V8.0.....	82
<b>Figura III. 24.</b> Montaje de Modulo Xbee y Vs1063.....	83
<b>Figura III. 25.</b> Diseño de la pista.....	83
<b>Figura III. 26.</b> Mascara.....	84
<b>Figura III. 27.</b> Swich de selección de algoritmos de compresión de audio S1 y S2.....	85
<b>Figura III. 28.</b> Led indicador de modo transmisión activado.....	86

<b>Figura IV. 29.</b> Análisis de Frecuencia Global con Ogg.....	89
<b>Figura IV. 30.</b> Análisis de Frecuencia Global con $\mu$ -law.....	89
<b>Figura IV. 31.</b> Análisis de Frecuencia Global con PCM.....	90
<b>Figura IV. 32.</b> Análisis de Frecuencia Global con ADPCM.....	90
<b>Figura IV. 33.</b> Análisis de Espectro de Frecuencia Audible con Ogg.....	91
<b>Figura IV.34.</b> Análisis de Espectro de Frecuencia Audible con $\mu$ -law.....	91
<b>Figura IV. 35.</b> Análisis de Espectro de Frecuencia Audible con PCM.....	92
<b>Figura IV. 36.</b> Análisis de Espectro de Frecuencia Audible con ADPCM.....	92
<b>Figura IV. 37.</b> Análisis de Potencia Total RMS con Ogg.....	93
<b>Figura IV. 38.</b> Análisis de Potencia Total RMS con $\mu$ -law.....	94
<b>Figura IV. 39.</b> Análisis de Potencia Total RMS con PCM.....	94
<b>Figura IV. 40.</b> Análisis de Potencia Total RMS con ADPCM.....	95
<b>Figura IV. 41.</b> Resultados Finales de la Encuesta.....	98
<b>Figura IV. 42.</b> Grafica de la Frecuencia Global (Hz).....	98
<b>Figura IV. 43.</b> Espectro de Frecuencia Audible.....	99
<b>Figura IV. 44.</b> Potencia Total RMS.....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla II. I.</b> Propiedades del IEEE 802.15.4.....	24
<b>Tabla III.II.</b> Distribución de los pines de los módulos XBee y XBee PRO.....	39
<b>Tabla IV. III.</b> Resultados finales de los parámetros medidos.....	97
<b>Tabla IV. IV.</b> Ponderación de los parámetros.....	101
<b>Tabla IV.V.</b> Calificación de Frecuencia Global.....	101
<b>Tabla IV.VI.</b> Calificación de Espectro de Frecuencia Audible.....	102
<b>Tabla IV.VII.</b> Calificación de Potencia Total RMS.....	103
<b>Tabla IV.VIII.</b> Calificación de Encuesta.....	103
<b>Tabla IV. IV.</b> Ponderación de Datos.....	104

## INTRODUCCIÓN

La comunicación inalámbrica ha tenido una gran aceptación en la comunicación de diferentes dispositivos entre ellos ZigBee, que es una tecnología inalámbrica creada con el objetivo de interconectar varios dispositivos móviles, que se caracteriza y se diferencia de otras tecnologías por sus dispositivos de bajo consumo de energía.

ZigBee es un estándar de baja tasa de datos, bajo consumo de energía y bajo costo, la mayoría de los usos actuales de ZigBee se centran en aplicaciones de control y automatización. Sin embargo, se ha registrado un creciente interés en la experimentación de las aplicaciones multimedia con especial énfasis en la evaluación de la capacidad de transmisión de las redes Zigbee, así que existen otras áreas que posiblemente se pueden beneficiar de este estándar de bajo costo y de baja potencia. El concepto de audio a través de una red Zigbee obliga a encontrar nuevas soluciones para el eficaz desarrollo de esta tarea, el uso de la compresión de voz pretende reducir el volumen de la información para transmitir una señal de voz, de tal manera que la pérdida de la señal decodificada con respecto a la señal sin comprimir sea lo menor posible, permitiendo la transmisión de audio por medio del estándar IEEE 802.15.4 ZigBee con la mejor calidad posible.

Tratar con transmisión multimedia a través de canales inalámbricos ha sido siempre un tema difícil, el estándar ZigBee no contiene referencias técnicas para la comunicación de voz dado que tiene un tamaño muy limitado para carga de datos, pero su bajo

costo, y el flexible enrutamiento de red y de gestión hacen que la transmisión de audio por medio de redes ZigBee sean una opción interesante.

Se realizará una evaluación de diferentes algoritmos de compresión de audio desarrollando un ambiente que permita el estudio de los mismos, con el fin de determinar el algoritmo más eficiente para su transmisión en tiempo real usando redes ZigBee.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO REFERENCIAL**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

Durante los últimos años las tecnologías sobre redes han ido evolucionando de tal manera que personas, empresas y organizaciones intercambian información y coordinan sus actividades. De la misma manera se ha observado una explosión en investigaciones sobre redes de sensores inalámbricos (WSN), en particular en redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (LR-WPAN) que son utilizadas para varias aplicaciones, donde se usa una baja tasa de datos, baja QoS (Quality of Service), es decir en aplicaciones donde la probabilidad de transmisión es baja. El estándar que especifica las LR-WPAN es IEEE 802.15.4 desarrollado por el grupo de trabajo IEEE 802.15 y en la cual se basa ZigBee.

Zigbee soporta varios protocolos de un alto nivel de comunicación, para su uso con radiodifusión digital, abordando necesidades ideales de bajo costo y además con redes de baja potencia, fundamentadas en el estándar WPAN, IEEE 802.15.4. El nacimiento

de este estándar empezó en el año de 1998 gracias a la investigación en conjunto de varias empresas sin ánimo de lucro entre ellas Motorola, Ember, Honeywell y Mitsubishi y la mayoría fabricantes de semiconductores. Dicho grupo de trabajo llamado Alianza Zigbee y el resultado fue una nueva tecnología inalámbrica para áreas personales del grupo denominado LR-WPAN.

El estándar Zigbee es perfecto para su desarrollo en redes domóticas, concretamente creado para sustituir la expansión de sensores y actuadores. Ha existido un creciente interés en analizarlo en aplicaciones de multimedia. Aun sin garantizar QoS por su limitado ancho de banda, existen un conjunto de aplicaciones en las que puede resultar muy importante como vigilancia, grupos de rescate y salvamento, seguridad en entornos demóticos, grupos desplegados en un área limitada con necesidad de comunicación donde un sistema de audio en tiempo real de bajo costo basado en tecnología Zigbee es una idea sumamente atractiva.

El presente proyecto consiste en analizar algoritmos de compresión de audio y compáralos para así lograr la mejor calidad de audio entendible.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TESIS**

ZigBee comunica una serie de dispositivos haciendo que trabajen de una manera más eficiente entre sí. Es un transmisor y un receptor que usa baja potencia para trabajar y tiene como campos de aplicación la automatización de edificios, salud, control industrial, control de hogares, Pc y periféricos, electrodomésticos o generalmente en

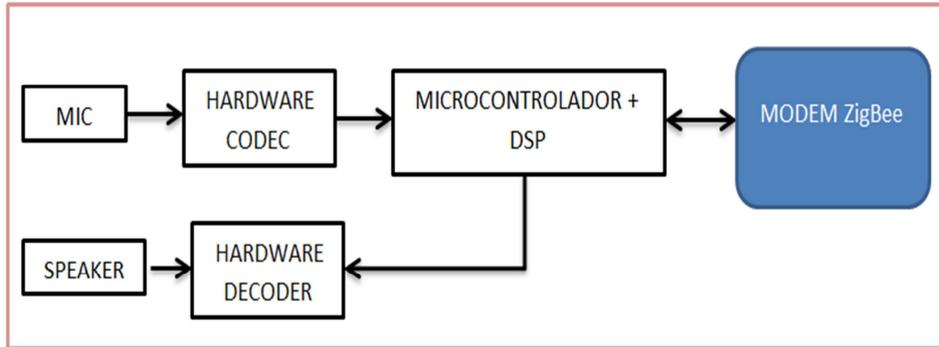
aplicaciones de control, Si embargo existen otras áreas que se pueden beneficiar de bajo consumo de batería y bajo costo que proporciona esta tecnología. Es ideal para conexiones con diversos tipos de topología, lo que a su vez lo hace más seguro, barato y que no haya ninguna dificultad a la hora de su construcción porque es muy sencilla.

Zigbee que tiene como base el estándar IEEE 802.15.4, fue desarrollado para aplicaciones de baja velocidad de datos y bajo consumo de energía. Entonces ¿Por qué deberían estas normas ser consideradas como útiles para aplicaciones de audio? Cuando existen necesidades de baja calidad de audio (decenas de kbps) o no necesariamente se requiera una alta calidad de sonido,

Zigbee podría ser una útil solución, ya que añadiendo algoritmos de compresión de audio se puede conseguir una calidad de audio muy aceptable, útil en muchas aplicaciones, el costo bajo de módems Zigbee hace que sea probable la ampliación en varias cantidades, añadiendo más aplicaciones y donde la utilización de audio podría ser necesaria.

Los algoritmos de compresión de audio que intervendrán en esta evaluación serán algoritmos con pérdidas, usando métodos de compresión de forma de onda, los cuales tienen como su nombre lo indica el objetivo de lograr la compresión del sonido conservando la forma de onda original.

Por todo lo expuesto se realizara una investigación de la tecnología Zigbee y algoritmos de compresión de audio, se integraran ambos para determinar que algoritmo de compresión de audio es el más efectivo para lograr una comunicación de audio en una red Zigbee.



*Figura I. 1. Esquema de bloques del sistema*

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVOS GENERALES:**

Evaluar algoritmos de compresión de audio para su transmisión en tiempo real usando redes Zigbee.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Estudiar la tecnología Zigbee IEEE 802.15.4, sus ventajas y límites teóricos en aplicaciones de audio.
- Analizar algoritmos de compresión de audio para su implementación en una red Zigbee.
- Desarrollar un ambiente que permita el estudio de los distintos algoritmos de compresión de audio en redes Zigbee.
- Determinar la eficacia de algoritmos de compresión de audio con pérdidas, en una red Zigbee.

#### **1.4. HIPÓTESIS**

El estudio y evaluación de algoritmos de compresión de audio permitirá determinar algoritmo más eficiente en una red Zigbee.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. PROTOCOLO IEEE 802.15.4**

IEEE 802.15.4 es un estándar únicamente diseñado para redes de área personal inalámbricas de baja tasa (LR- WPAN), Está dirigido a baja velocidad de datos, bajo consumo de energía y bajo costo de red, ofreciendo conectividad inalámbrica a nivel de dispositivo. Define especificaciones para la conectividad inalámbrica de baja velocidad de datos entre los dispositivos que consumen mínima energía.

El estándar se caracteriza por mantener un alto nivel de simplicidad. Su banda de frecuencia operativa incluye la banda de 2,4 GHz industrial, científica y médica que proporciona la disponibilidad de casi todo el mundo; además, esta banda también es utilizada por otros estándares inalámbricos IEEE 802.

## **2.2. EL ESTÁNDAR ZIGBEE**

### **2.2.1. Introducción**

Hoy en día se puede disponer de una variedad de esquemas inalámbricos alineados para el uso de sistemas con valiosas obligaciones de ancho de banda, pero se requiere un estándar móvil definido para redes de sensores en atenciones de industrialización y domésticas.

El problema de manipular cualquiera de los formatos inalámbricos existentes reside en el gran derroche de energía y el ancho de banda que manejan en comparación a la baja tasa de bits remitidos por un sistema sensor o de control y con bajas exigencias de energía.

En un comienzo, los fabricantes de sensores han elegido desarrollar enmiendas propietarias, lo que produjo dificultades de interoperabilidad entre los varios fabricantes.

Las empresas se dieron cuenta que era necesario un nuevo estándar, con la capacidad de transmisión de datos de baja capacidad y un bajo costo, por este motivo fue el nacimiento del estándar IEEE 802.15.4 comercialmente llamado ZigBee. Se decidió nombrarlas como redes LR-WPAN, debido a su baja tasa de transmisión y su limitado alcance.

Propiedad	Rango
capacidad de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s - 915 MHz: 40kb/s - 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 a 75 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

**Tabla II. I. Propiedades del IEEE 802.15.4**

### 2.2.2. Características de Zigbee

Podemos describir las siguientes características de ZigBee:

- ZigBee trabaja en las frecuencias libres ISM de 2.4 GHz, 868 MHz para países Europeos y 915 MHz para norte américa.
- Posee una capacidad de transmisión de 250 Kbps y un alcance de 10 a 75 metros.
- Su capacidad de trabajo no disminuye aun al operar con otras redes como WiFi o Bluetooth, esto se debe a su bajo volumen de transmisión y, a propiedades del estándar IEEE 802.15.4.
- Propiedad de funcionar en redes de gran solidez, esta particularidad refuerza la confianza de las comunicaciones, al existir más nodos entre de una red, se lograra tener, mayor cifra de rutas alternas estarán disponibles para avalar que un paquete alcance a su destino.

- Hipotéticamente se puede poseer incluso 16 000 redes diferentes ocupando un canal y cada una consigue estar formada por hasta 65000 nodos, comprensiblemente estos valores están limitados por ciertas limitaciones físicas (memoria disponible, ancho de banda, etc.).
- Se comunica por medio de multi-salto, logra permitir que los nodos se comuniquen incluso cuando estos se hallen fuera de lugar del rango de transmisión, pero al estar otros nodos en medio para realizar una interconexión, incrementando el área de cobertura de la red.
- Al usar la configuración de malla (MESH) logra auto recuperación de inconvenientes a la red en la comunicación ampliando su confiabilidad.

### **2.2.3. Estructura del Estándar Zigbee**

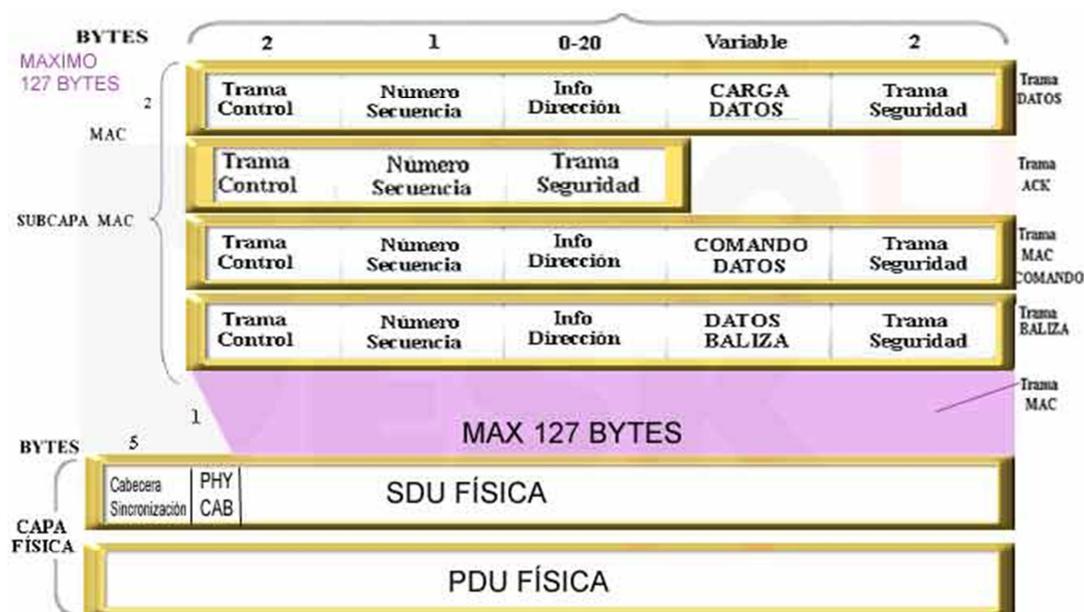
En la figura II. 2. Se puede observar los campos de los diferentes tipos de tramas: datos, ACK, MAC y baliza.

Un límite de 104 bytes de información soporta la trama de datos. Esta se halla numerada para cerciorar que todas las tramas llegan, además para incrementar la fiabilidad de transmisión, debe existir una confirmación de que la trama ha alcanzado su destino sin errores.

La trama ACK es muy importante, llamada también de reconocimiento. Es enviada a partir el receptor con destino al emisor, y así permitir la confirmación que el paquete ha llegado a su destino sin faltas.

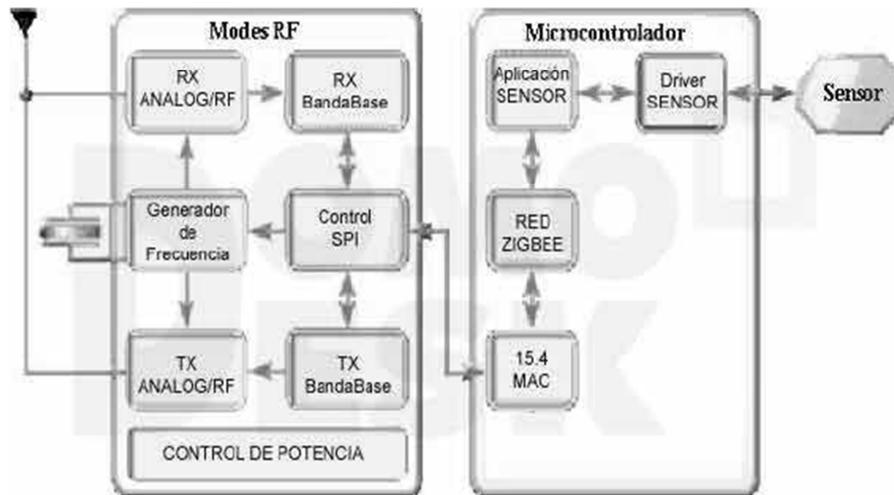
Para la configuración de la red a distancia o remotamente se usa la trama MAC, así como el control y arreglo de dispositivos y nodo.

El uso de balizas es muy importante ya que en esta tecnología los dispositivos funcionan la mayor parte del tiempo en estado pasivo, se hace necesario tramas que activen los nodos, literalmente despertando los dispositivos, los cuales si no recogen más información vuelven a dormir o a entrar en modo pasivo, de esta manera se logra ahorrar una gran cantidad de batería pasando todo el tiempo encendidos.



**Figura II. 2. Formato de Tramas**

El dispositivo ZigBee característico contiene un fragmento que consta de circuito integrado de radio frecuencia RF IC acoplado a un mínimo empleo de voltaje del microcontrolador, además vinculado a un sistema de sensor o actuador. Los protocolos y aplicaciones son desarrollados sobre un chip de memoria flash.



**Figura II.3.** Esquema típico de un dispositivo Zigbee.

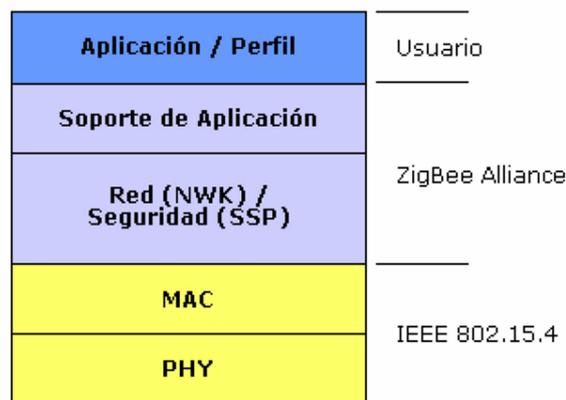
#### 2.2.4. Requisitos de Hardware

Los microcontroladores de 8 bits actualmente se han desarrollado hasta lograr formar parte en casi todo dispositivo de control electrónico, se han convertido en la base fundamental para el desarrollo de nuevas tecnologías implementadas en los aparatos eléctricos de uso cotidiano.

Este estándar necesita un nivel de implementación medio para su uso. Esta implementación es posible desarrollarla en base a software por medio de diversas arquitecturas. Sin embargo, independientemente de donde se la desarrolle, se requiere recursos mínimos. Ya que los dispositivos pueden efectuar diversos roles, los requisitos también varían de unos a otros.

### 2.2.5. Arquitectura

La arquitectura del estándar ZigBee posee una pila de protocolos, muy parecida al modelo OSI el cual está constituido por diferentes capas, estas son independientes entre sí. En la Figura II.4. es posible observar las diferentes capas que forman parte de la pila de protocolos.



**Figura II.4.** Capas que son parte de la pila de protocolos en ZigBee

- La transmisión de datos por el aire, punto a punto esta proporcionada por la capa física, en conjunto con la capa de acceso al medio, además el estándar IEEE 802.15.4 hace descripción de par de capas.
- El estándar opera por medio las bandas ISM de uso no regulado, en el lugar que se precisan un máximo de 16 canales dentro del alcance de 2.4 GHz, estos canales poseen un ancho de banda de 5 MHz. En donde se puede lograr una velocidad de transmisión en el aire a valores de 250 Kbps en medidas que llegan a los 10 y 75 m, los mismos que estrictamente dependen del entorno.

- La meta principal de la capa de red (NWK) es lograr el uso adecuado del subnivel MAC y además brindar una interfaz óptima que la capa de aplicación usará. NWK proporciona las técnicas requeridas como: iniciación de la red, unión a la red, enrutamiento de paquetes mandados a diferentes nodos en la red, proporcionando facilidades que permitan la transmisión del paquete al destino, filtrando paquetes recibidos, cifrar y autenticar. Hay que conocer que el códec de enrutamiento usado es la configuración de malla, la cual trabaja con el protocolo Ad Hoc On-Demand Vector Routing – AODV. Al realizar el trabajo de unir o distanciar dispositivos por medio del controlador de red, ejecuta seguridad, y orienta tramas a cada uno de sus respectivos destinos; igualmente, la capa de red del controlador de red tiene la responsabilidad de establecer una nueva red y proporcionar direcciones que posee esta. Es aquí donde se generan varias configuraciones de red que ZigBee tolera (árbol, estrella y malla).
- La capa de soporte de aplicación sostiene el rol que el nodo juega en la red, filtrando paquetes a altura de aplicación, llevando el papel que juegan en grupos y elementos con los que la aplicación trabaja y facilitando la transmisión de datos a los varios dispositivos de la red.
- La capa de aplicación que no es más que la aplicación misma y de la cual los fabricantes son los que la desarrollan. Aquí se pueden hallar los ZDO (Objetivo de dispositivo ZigBee) los cuales están encargados de definir la función del nodo internamente en la red, su configuración final; además la subcapa APS y los objetivos del sistema puntualizados por cada uno de los fabricantes.

La comunicación entre capas es dada por medio de una aplicación de datos y otra de control, las capas que se encuentran en un nivel más alto solicitan servicios a las capas de posición inferior, y éstas reportan sus resultados a las superiores. Existe además de lo mencionado otro par de módulos: módulo de seguridad, es el cual proporciona los requerimientos para cifrar y autenticar los datos, y el módulo de administración del equipo ZigBee, es el cual dirige los servicios de red del equipo local, también se encarga de proporcionar a la aplicación funciones de dirección remota de red.

### 2.2.6. Topologías de Red en el Estándar Zigbee

El estándar ZigBee consta de varias configuraciones de red entre las cuales están estrella, árbol y malla o rejilla, como se podemos observar en la Figura II. 5.

Cuando se configura la topología en estrella, un nodo tipo FFD lleva la función de coordinador de red y este tiene la responsabilidad de iniciar y conservar los dispositivos en la red. El resto de dispositivos ZigBee, se los conoce como dispositivos finales, se comunican directamente con el coordinador.



**Figura II. 5. Modelos de Red Zigbee**

En la configuración punto a punto, los nodos logran tener comunicación directa si están dentro del radio de alcance mutuo. La configuración punto a punto tiene la capacidad de lograr crear otras más complejas, como redes en malla o rejilla, siempre y cuando sea posible el enrutado de los datos de un nodo a otro.

Dentro de la topología de malla, el coordinador ZigBee está encargado de la iniciación de la red y de escoger los requerimientos de la red, además la red es extensible mediante los nodos ZigBee. El encaminamiento está a cargo de un protocolo de pregunta- respuesta excluyendo las trayectorias que no sean recomendables. La red ya establecida podría llegar a poseer hasta 254 nodos, esto tal vez nunca sea necesario. Utilizando el direccionamiento local, es posible la configuración de una red de más de 65535 nodos.

### **2.2.7. Dispositivos del Estándar**

ZigBee posee los siguientes tipos de dispositivos:

- El coordinador:

Es el nodo encargado de sostener el sistema administrado. Es el más completo de los 3 tipos de equipos, requiriendo capacidad de memoria y servicios de computación.

- El dispositivo de función completa (FFD):

Recibe mensajes del protocolo 802.15.4. Posee la capacidad de trabajar como un coordinador de red. Su memoria y la capacidad de computación, logran que pueda realizar funciones de Router o además tenga la capacidad trabajar en nodos de red que funcionen de interface al usuario.

- El dispositivo de función reducida (RFD):

Este nodo lleva una capacidad y funcionalidad limitada descritas dentro del estándar para el bajo costo y sencillez. En pocas palabras, son los sensores/actuadores de la red.

Cada uno de estos dispositivos han sido diseñados para propósitos distintos. El dispositivo de función reducida desarrollado para aplicaciones muy básicas, como interruptores de iluminación y sensores infrarrojos, donde no se requiere enviar o recibir extensas cantidades de información. Únicamente es capaz de comunicarse con dispositivos FFD. Esto hace posible que se logre implementar aprovechando los mínimos recursos posibles, así como un ahorro energético visible. En cambio, los FFDs pueden actuar como coordinadores o como dispositivos finales. Pueden comunicarse con otros FFDs y RFDs. Para ello necesitan más recursos, han de implementar la pila completa y precisan un consumo más exigente.

ZigBee se beneficia de esta diferencia. A parte del coordinador de la red, puede existir routers, ciertamente han de ser FFD, incrementando las posibles topologías de red, abriendo la posibilidad de crear no solo redes en estrella y punto a punto sino también rejillas o mallas y árboles.

Para que una red ZigBee exista, es primordial como mínimo dos elementos. Un coordinador FFD el cual establecerá la red, le asignará el NWKID, y tendrá los componentes necesarios para la agregación y eliminación de nodos en la red. También es preciso, como mínimo, un nodo, que se lo configure como FFD o RFD, con el cual comunicarse.

### **2.2.8. Seguridad**

Existen varias limitaciones para aplicar una seguridad más eficiente dentro de ZigBee, aun así se definen medidas básicas de seguridad efectuados en la subcapa MAC para garantizar el buen funcionamiento y la interoperabilidad de dispositivos. Dentro de los mismos incluye la destreza para mantener una lista de control de acceso (ACL) y usar criptografía simétrica para proteger las tramas transmitidas. Pero aquellos parámetros de seguridad no precisamente estarán aplicados en todos los dispositivos y en todo momento. Las capas superiores serán las que establezcan en qué momento se implementara la seguridad en la subcapa MAC.

#### **2.2.8.1. Servicios de Seguridad**

ZigBee define un conjunto de seguridades de clave simétrica, que consiste en usar claves dadas por procesos de capas superiores. La administración y la colocación de esas claves es compromiso del desarrollador. El distribuidor de esos mecanismos comprende que las claves son generadas, transmitidas y almacenadas en un modo seguro.

#### **2.2.8.1.1. Control de Acceso**

Es una prestación de seguridad que ofrece la capacidad a un nodo de poder elegir otros con los cuales pueda comunicarse. Un dispositivo mantiene una lista los dispositivos o nodos con los cuales puede esperar tramas de datos.

#### **2.2.8.1.2. Encriptación de Datos**

En Zigbee la encriptación de datos es una prestación de seguridad que usa una cifra simétrica para salvaguardar los datos de ser leídos por otros dispositivos. La información puede ser encriptado usando una clave compartida por un grupo de dispositivos o usando una clave compartida entre dos pares. La encriptación puede ser de la trama de datos, de beacon, o de comandos.

#### **2.2.8.1.3. Integridad de tramas**

Es una prestación de seguridad maneja Códigos de Integridad de Mensajes (MIC), para resguardar datos que no poseen clave criptográfica. La integridad puede ser dada a tramas de datos, *beacons* y comandos. La clave usada para dar integridad de trama puede ser compartida por un grupo de dispositivos o entre dos pares.

#### **2.2.8.1.4. Refresco Secuencial**

Es una prestación de seguridad que utiliza una sucesión ordenada de entradas para resistir tramas que han sido reemplazadas por otras. Cuando una trama es tomada el valor de refrescamiento es comparado para asegurarse si es la esperada.

#### **2.2.8.2. Modos de Seguridad**

En consecuencia al modo en el cual el dispositivo esté funcionando y el nivel de seguridad ansiado, la subcapa MAC puede ofrecer diferentes servicios de seguridad.

##### **2.2.8.2.1. Modo Inseguro**

De manera que no se utiliza seguridad, no hay servicios de seguridad de ningún tipo trabajando en los dispositivos de la red.

##### **2.2.8.2.2. Modo ACL**

AL trabajar en modo ACL, proporcionan servicios de seguridad limitada para la comunicación con otros dispositivos. Las capas primeras alcanzan elegir las tramas que serán rechazadas basándose en que si la subcapa MAC muestra si la trama pertenece a un dispositivo admitido. Por el motivo que la protección criptográfica no está soportado en la subcapa MAC en este modo, las capas superiores deben implementar otros mecanismos para garantizar la identidad de los dispositivos.

### **2.2.8.2.3. Modo Seguro**

Al operar en modo seguro logran suministrar de cualquiera de los servicios de seguridad detallados anteriormente. Los servicios ofrecidos dependen de la configuración de seguridad usada. Los servicios que se pueden ofrecer en el modo seguro son:

- Control de Acceso
- Encriptación de Datos
- Integridad de Trama
- Refrescamiento Secuencial

### **2.2.9. Capa Física**

El estándar IEEE 802.15.4 brinda dos intereses de capa física PHY, en donde es posible puede combinar con el MAC y así acceder a una extensa variedad de aplicaciones en red. Ambas PHYs se fundamentan en procesos de sucesión directa de espectro expandido (DSSS) que implican bajos costos de desarrollo digital en Circuitos Integrados, y estas conllevan la misma distribución básica de paquetes low-duty-cycle (Bajo Ciclo de Ocupacion) con procedimientos de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre ambas PHYs radica en la banda de frecuencias.

La capa Física 2.4 GHz, detalla el trabajo en la frecuencia industrial, médica y científica (ISM), que fácilmente está utilizable a nivel mundial, en cambio que la PHY de los

868/915 MHz detalla operaciones en la banda de 865 MHz en Europa y 915 MHz en la banda ISM en Estados Unidos.

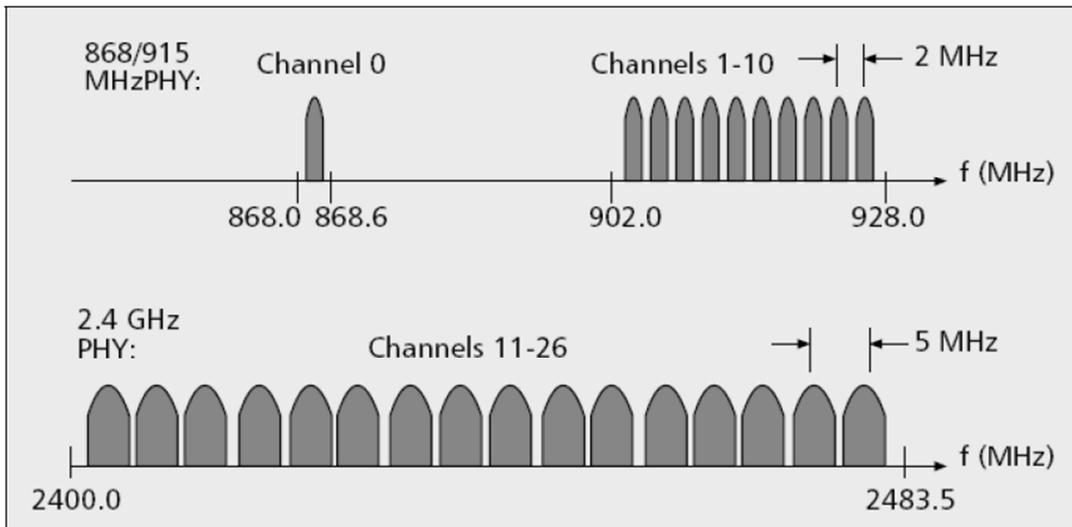
El libre acceso internacional de la banda de los 2.4 GHz brinda mejoras en procesos de servicios más extensos y precios de fabricación más bajos. Además las bandas de 868 MHz y 915 MHz brindan una alternativa a la cogestión progresiva y además interferencias (redes WLAN, hornos de microondas, teléfonos inalámbricos etc.) relacionados al rango de frecuencia de 2.4 GHz y más niveles por enlace ya que hay menores pérdidas de propagación.

Hay una segunda distinción de las particularidades de la PHY es el rango de transmisión. La PHY de 2.4 GHz accede un rango de transmisión de 250 kb/s, por otro lado que la PHY de los 868/915 MHz brinda rangos de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s respectivamente. Este valor alto de transferencia en la PHY de los 2.4 GHz se carga importantemente a un mayor orden en la modulación, en donde cada símbolo significa varios bits.

#### **2.2.10. Canalización**

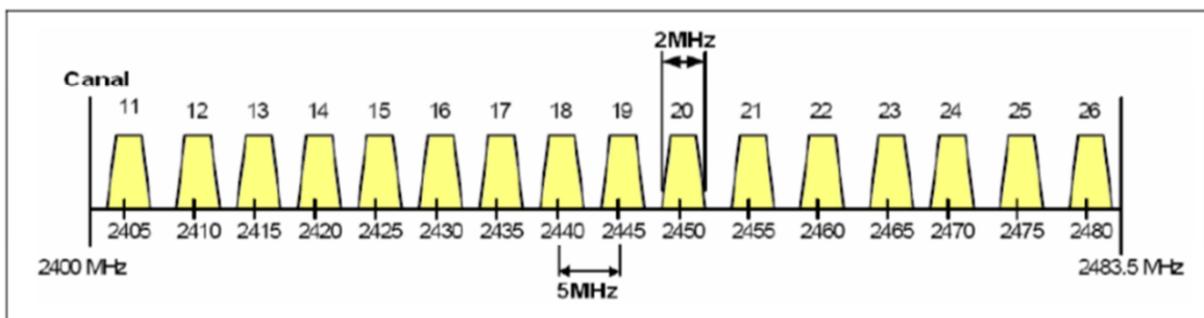
En el estándar IEEE 802.15.4 se detallan 27 canales entre sus bandas. La capa física de los 868 MHz a 915 MHz tolera un único canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. En consecuencia al sostenimiento regional de esas bandas, no es muy probable que solo una red funcione con los 11 canales. Pero,

estas bandas se suponen lo bastante próximas en frecuencia que puede funcionar un solo hardware para las dos y así disminuir costos de fabricación.



**Figura II. 6.** Estructura de Canales

La capa física 2.4 GHz resiste 16 canales de 2 MHz hallándose en 2.4 y los 2.4835 GHz con un extenso rango entre canales (5 MHz) y esto con el propósito de proporcionar las exigencias de filtración en envío y en la recepción.



**Figura II. 7.** Canalización en la banda de 2.4 GHz

## 2.2.11. Aplicaciones de Zigbee

### 2.2.11.1. Introducción

Fundamentalmente Zigbee posee su principal aplicación en el momento en que sus nodos se acoplan para funcionar juntos y constituir lo que se llama "Red de Sensores". El estándar ZigBee se ha desarrollado a medida para la monitorización y para aplicaciones de control. Por lo tanto, los mercados tal como la automatización de edificios (Inmótica) y hogares (Domótica), la atención médica, control industrial, control de iluminación y control comercial, son los principales campos de aplicación.



**Figura II. 8.** Aplicaciones definidas por la alianza Zigbee

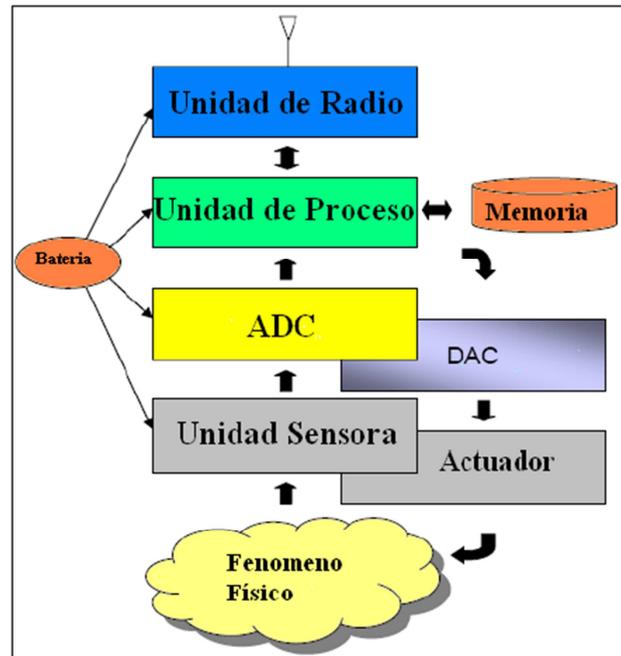
#### **2.2.11.2. Red de Sensores**

Las redes de sensores se encuentran creadas por un conjunto de dispositivos con indudables características sensitivas y de transmisión, estos logran constituir redes inalámbricas Ad-Hoc sin construcción física predeterminada y tampoco gestión central.

Una red de sensores es una percepción limitadamente nueva en adquisición y procedimiento de datos con múltiples aplicaciones en distintas áreas así como industria, domótica, militarización, detección ambiental, etc.

Esta tipo de redes se identifican por su disposición para seguir creciendo y por su auto configuración, logrando cambiar en todo instante a emisor, receptor, brindar bienes de encaminamiento entre dispositivos que no posean línea de vista continua, también guardar información concerniente a los sensores localizada en el respectivo nodo.

Cada nodo, desarrollándose de sujeto individual de una red de sensores, no deja de ser una pequeña computadora, con un pequeño procesador, una memoria de programa y una memoria para recopilar variables, pero al que además se añade unos pequeños periféricos IO (entrada/salida) tales como un transceptor radio y un pequeño conversor A/D (Analógico/Digital) que utiliza para agregación de los datos de los sensores locales.



*Figura II. 9. Arquitectura de un nodo en una red de sensores*

### **2.2.11.3. Automatización de Edificios y Hogares (Inmótica y Domótica)**

Zigbee brinda seguridad, alarmas de humo, CO2, intrusos, control para aire acondicionado, lectura de medidores de agua, gas, electricidad, control de iluminación, control de accesos, control de riego, control de toldos y persianas, control de electrodomésticos.

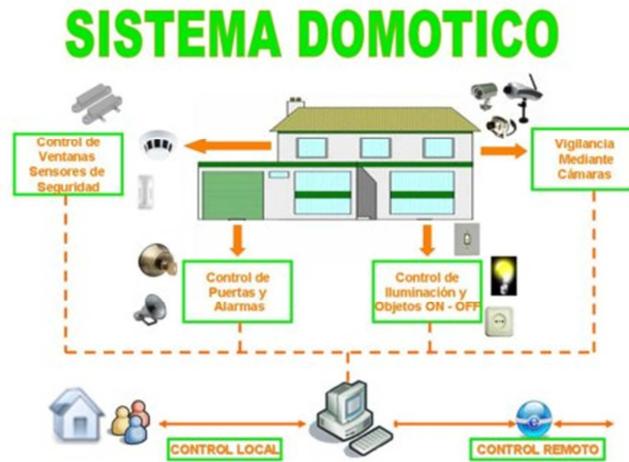


Figura II. 10. Aplicación de ZigBee en la domótica

#### 2.2.11.4. Control Industrial

En cuanto al ambiente industrial Zigbee se aplica para:

- Control de procesos
- Sensores de temperatura, presión, y otros
- Control y asistencia remota
- Monitoreo Ambiental

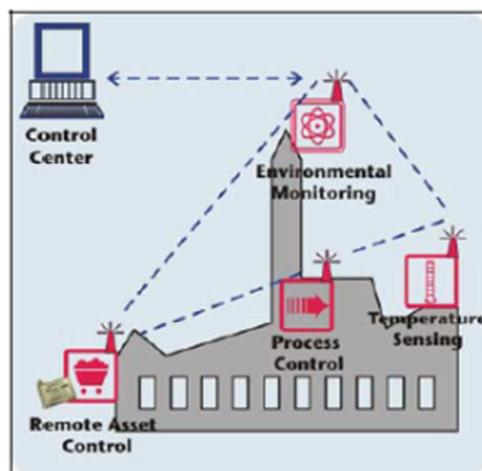


Figura II. 11. Aplicación de Zigbee en el control industrial

#### 2.2.11.5. Agricultura y Control Ambiental

Es posible utilizar Zigbee para elaborar agricultura de precisión. Por ejemplo en un área extensa cientos de nodos pueden ser utilizados para que transmitan información como temperatura, niveles de luz y humedad del terreno, para que sea analizada en un centro de procesamiento.



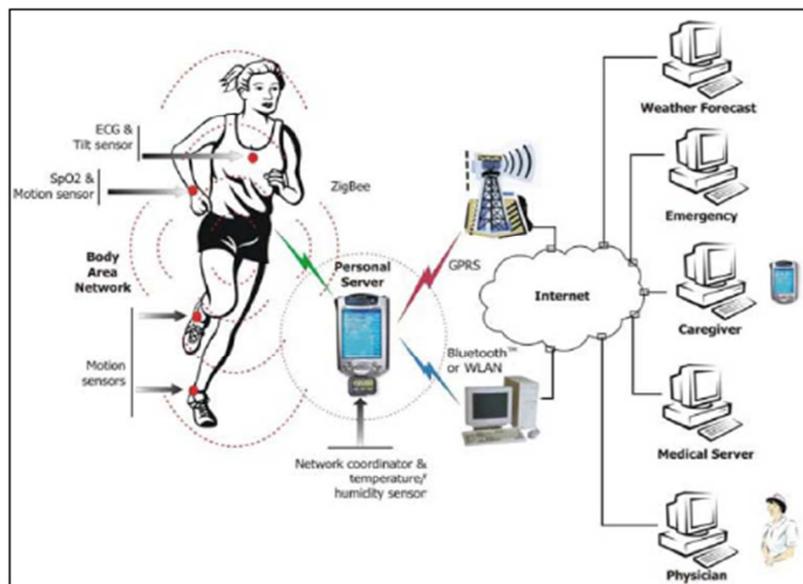
**Figura II. 12** Aplicación de Zigbee en la Agricultura

El control ambiental de áreas extensas de bosque o de océanos, sería imposible sin la existencia de las redes de sensores. El seguimiento de otros parámetros, como temperatura, humedad, fuego, actividad sísmica, etc. Además es una ayuda a expertos a determinar o advertir un inconveniente o exigencia y además reduce el impacto ambiental, que generamos los seres humanos.

### 2.2.11.6. Cuidados Médicos

Para controlar a pacientes con enfermedades crónicas, entre ellas diabetes, y asma, es significativo monitorear constantemente los signos vitales. La cardiología es el área más destacada de aplicación del monitoreo de los pacientes a través de Electrocardiogramas (ECGs), que indican el estado general del corazón del paciente.

Las redes de Área Corporal (Body Area Networks: BAN), forman la estructura básica en el cuidado de la salud manipulando medios electrónicos.



**Figura II. 13.** Aplicación de Zigbee en cuidados médicos

Zigbee combinado con terceras tecnologías inalámbricas, brindaría un monitoreo completo. En la primera fase se forma la red WBAN utilizando ZigBee, los datos de cada uno de los sensores son enviados a un coordinador de red WBAN, este coordinador se conecta vía GPRS. WLAN o Bluetooth con un servidor local el cual se

enlaza con la red Internet, a través de IP, el médico tratante, servicios de emergencia o un fisiatra poseerán la información del estado del paciente al momento y siempre, en el caso de emergencias logrará enviar un equipo médico de ayuda.

#### **2.2.11.7. Aplicación de ZigBee en audio**

Recientemente ha existido un creciente interés en el uso de ZigBee en aplicaciones multimedia. La capacidad de transmisión y ancho de banda de ZigBee no brindan la capacidad de proporcionar una calidad de servicio (QoS), sin embargo existen aplicaciones donde las características de ZigBee resultan muy interesantes como en grupos de rescate y salvamento, vigilancia, seguridad en entornos domésticos.

La comunicación es de gran importancia en cualquier actividad de rescate, siendo así que las comunicaciones se convierten en imprescindibles para la correcta coordinación de los diferentes equipos de rescate, en donde una red de comunicación basada en tecnología ZigBee brindaría la capacidad de transmisión de audio en tiempo real a bajo costo, con una excelente flexibilidad y facilidad de despliegue que nos brinda ZigBee.

Hoy en día en el mercado, dos de las tecnologías inalámbricas más dominantes de área local son Wifi y Bluetooth las cuales son utilizadas para conexión entre laptops, celulares y una variedad de otros dispositivos portátiles. Aquellos protocolos nos hacen preguntarnos como hemos sobrevivido sin ellos, aprovechando su comodidad y ventajas permitiendo que los usuarios se conecten a una amplia gama de aparatos de computación y telecomunicación fácil y rápidamente sin la necesidad de usar cables.

Sin embargo ZigBee puede ser una mejor opción para aplicaciones de baja potencia, bajo ancho de banda o control, tal como sensores de red. Y con un potente procesador, ZigBee puede ejecutar tareas complejas eficazmente dentro de la restricción de una baja potencia y bajo ancho de banda. Mientras que Zigbee no es un protocolo de alta velocidad de transmisión de datos, estaría en la capacidad de transmitir audio utilizando el bajo ancho de banda y a una baja potencia, además sería posible comprimir el audio para aprovechar de una mejor manera el bajo ancho de banda de Zigbee e intentar brindar la mejor calidad de audio posible.

ZigBee se desarrolló con una baja velocidad de datos en mente. Bajo consumo de energía para aplicaciones donde la velocidad de datos es baja, y dispositivos que a menudo están apagados. ¿Porque debería este estándar ser considerado para aplicaciones de audio? Especialmente cuando existen estándares como Bluetooth y muchas soluciones exclusivas que ya satisfacen estas necesidades.

Existen varios argumentos que hablan a favor de la transmisión de audio en ZigBee:

- Los requerimientos en la velocidad de datos necesarios para audio varía enormemente con la aplicación y puede estar entre decenas de Kbps (Baja calidad de voz) y cientos de Kbps (Música de buena calidad), haciendo a ZigBee una alternativa considerable para aplicaciones de audio bajas/medias.
- En la actualidad se utilizan métodos de compresión en el teléfono (voz) o industrias de la música que podrían aplicarse para reducir la velocidad de los datos. Por supuesto, esto requiere el uso de la potencia de procesamiento

adecuada para la compresión/descompresión de algoritmos. Muchos algoritmos con diferentes grados de complejidad están disponibles con una velocidad de bits reducida en ciertos casos a unos pocos Kbit/s. Algunas aplicaciones integran el poder de procesamiento necesario o incluso los algoritmos de compresión.

- El bajo costo de los módulos ZigBee hacen que se puedan implementar en varias cantidades incrementando el número de aplicaciones en las que se puedan desempeñar.
- Las capacidades de las redes de ZigBee son dignos de considerarse para aplicaciones de audio de gama baja que tienen que cubrir un área pequeña, y deben tener la flexibilidad y facilidad de despliegue proporcionado por un sistema inalámbrico.
- Las capacidades de enrutamiento de ZigBee se pueden utilizar de una manera similar a los sistemas VoIP.

#### **2.2.11.8. Otras Aplicaciones**

Debido a su baja velocidad de transmisión de datos y su naturaleza de bajo consumo, también entra en los mercados del control remoto para la electrónica de consumo y lo que se denomina dispositivos para la interface humana, como teclados ratones y joysticks. También en el automóvil se esperan posibles aplicaciones, como por ejemplo la monitorización del nivel de presión de las ruedas para mejorar la seguridad del vehículo.

La compañía surcoreana fabricante de teléfonos móviles Pantech&Curitel ha introducido en el mercado el primer teléfono móvil en implementar el protocolo ZigBee que puede actuar como sensor dentro de una red ZigBee o controlar dicha red. Puede ser usado en aplicaciones de automatización y localización.

#### **2.2.12. Futuro de Zigbee**

Expertos prevén un futuro brillante para ZigBee. Está claro que un gran nicho de mercado tienen Zigbee y LR-WPAN en la automatización del hogar y el monitoreo industrial.

Se estima que los dispositivos ZigBee sean los routers inalámbricos más baratos, y también desarrollados de manera masiva. Gozarán de un costo bajo. Brindarán una solución tan económica porque la radio se puede elaborar con muchos menos circuitos analógicos de los que se requieren corrientemente.

#### **2.2.13. Módulos Xbee**

Los transmisores XBee y XBee-PRO de fabricación implantada por Maxstream, son los primeros servicios resistentes de aplicación industrial con aprobación ZigBee, se fundamentan en un escenario compatible con ZigBee, y se describen con un rango y una fiabilidad líderes en el sector.



**Figura II. 14.** *módulo Xbee, fabricados por Maxstream*

Los módulos XBee y XBee-PRO muestran una solución enormemente potente para los diversos mercados que patrocinan la conexión a redes inalámbricas para sus usos de comunicaciones de datos.

Los módulos XBee son dispositivos de radio frecuencia que operan en la banda de 2.4 GHz con estándar de comunicación 802.15.4. Brindan una velocidad de comunicación desde 1200 hasta 115.200 baudios atravesando por cada uno de los valores supuestos, además poseen de diversas I/O que consiguen ser conformadas para otras funciones. Una de las ventajas de manejar estos módulos es que se puede obtener hasta 65000 combinaciones diferentes de red. El protocolo 802.15.4 corresponde a las redes PAN (Personal Area Network). Los módulos Xbee son baratos, poderosos y fáciles de utilizar. Para utilizar los módulos con cualquier microcontrolador que incorpore comunicación serial, solo con configurar unos cuantos parámetros. Estos dispositivos gozan de 6 convertidores análogo-digital y 8 entradas digitales también Rx y Tx. Operan a 2.4 GHz y conforman una red misma a la que se logra conectar o

desconectar. Es importante señalar que son módulos micros procesados con lo cual están corregidos los problemas de fallo de trama, ruidos, etc.

Hay dos formas que los módulos pueden comunicarse: Transmisión serial transparente (modo AT) y el modo API. Los dispositivos Xbee se los puede configurar por medio de PC manejando el programa X-CTU o a través de un microcontrolador.

Se puede encontrar en el mercado 2 versiones de estos dispositivos. La serie 1 y la serie 2 o además conocida como 2.5. Los dispositivos de estas versiones poseen similar pin-out, pero, no son compatibles entre sí porque manejan diferentes chipset y funcionan con otros protocolos.

#### **2.2.13.1. Características mecánicas y distribución de pines:**

La repartición de los pines de los Módulos de Radiofrecuencia XBee y XBee-PRO son compatibles entre sí, tal y como se muestran en las siguientes imágenes.

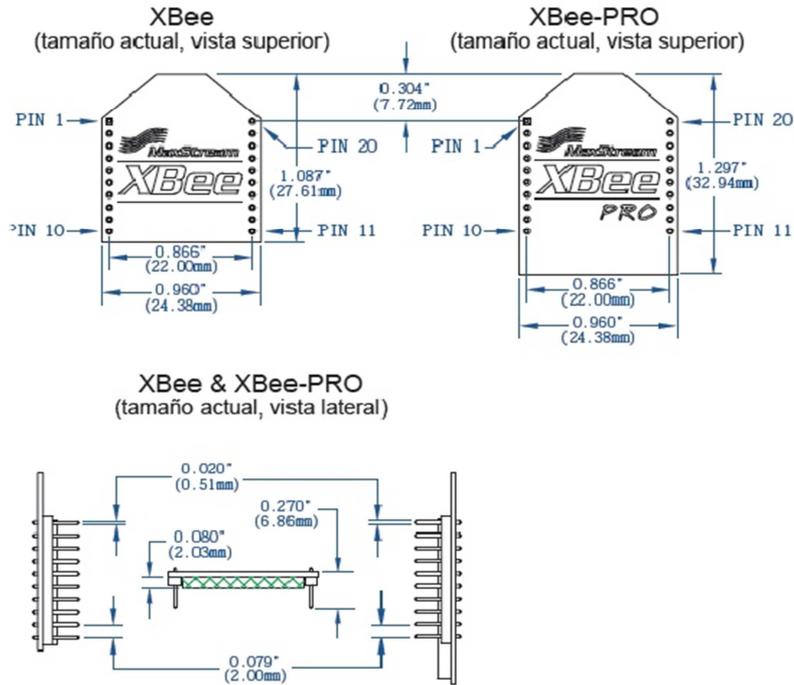


Figura II.15. Planos mecánicos de los módulos XBee/XBee-PRO

En la Tabla II.II. Se muestra la distribución de los pines de los módulos XBee y XBee PRO.

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	D08*	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
7	PWM1	Output	PWM Output 1
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4 / DIO4	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF	Input	Voltage Reference for AD Inputs
15	Associate / AD5 / DIO5	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	RTS / AD6 / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0

Tabla II.II. Distribución de los pines de los módulos XBee y XBee PRO.

## **2.3. CODIFICACIÓN Y COMPRESIÓN DE AUDIO**

### **2.3.1. Introducción**

Comprimir sonido es una manera de comprimir los datos, concretamente en la disminución del volumen de los ficheros de audio. Los algoritmos de compresión de audio son además conocidos como códecs de audio. Estos códecs poseen dos tipos de compresión, establecidos en algoritmo de compresión sin pérdida o con pérdida.

Al sonido se lo puede definir como oscilaciones que son transmitidas a través de un canal material, canal que regularmente es el aire. Al referirnos a audio se está hablando de que el sonido está adaptándose a otro medio.

Al comprimir audio nos referimos a un método en el que se reduce la tasa de bits de un sonido digital con el fin de reducir su tamaño en disco. El sonido más próximo o óptimo en relación al audio original es el habitualmente el WAV de 32 bits y 192 KHz. Mientras se comprime el audio se disminuyen estos parámetros, y con ello se degrada su calidad en relación al sonido físico.

Para entender más claramente el transcurso de la compresión de audio se debe imaginar que el sonido es conformado por ondas de forma curva, como cualquier curva las del sonido además posee infinitos puntos en su recorrido. Cuando se convierte de un sonido a audio digital lo que se realiza es ubicar esa onda en una

cantidad de ejes coordenados, si se quisiera representar la onda tal como es esto sería imposible porque las curvas tienen infinitos puntos y por esta razón las coordenadas del eje serían infinitas. Al crear un sonido las ondas son representadas en los ejes con un número limitado de puntos pero pretendiendo llegar un grado de exactitud de manera que el sonido reproducido logre ser lo más cercano posible al sonido grabado. El comprimir sonido se fundamenta en una forma representativa de una disminución de la cuadrícula de los ejes coordenados, lo que se puede representar en una menor cantidad de puntos y por ende una más baja fidelidad de sonido, pero también ese menor número de puntos simboliza una menor cantidad de datos y por esta razón el archivo de audio obtenido posee un tamaño más bajo.

### **2.3.2. Algoritmos con pérdidas**

Son aquellos códecs que descartan determinadas frecuencias al ejecutar el proceso de compresión de audio.

#### **2.3.2.1. Algoritmos $\mu$ -law y A-law (G.711)**

G.711 realiza representación de una señal de audio en frecuencias de la voz humana, por medio de mensajes de 8 bits de resolución, también un valor de 8000 muestras por segundo. En conclusión, el codificador G.711 suministra una velocidad de datos de 64 Kbit/s.

Para llegar a obtener una relación señal a ruido óptima para señales de voz humana, se usa un método de compresión previo a codificar la señal (el comprimir nivel no debe ser confundido con la comprimir datos digitales). Existe el  $\mu$ -law, trabaja en Norte América y Japón y el A-law se lo utiliza en Europa y el resto del mundo.

El códec  $\mu$ -law es un método fundamental de compresión, básicamente logarítmico, que permite, con tan sólo 8 bits por muestra, cubrir el equivalente de 14 bits por muestra en cuantificación lineal. Esta técnica ofrece una tasa de compresión de:

$$\frac{\text{numero de bits por muestra}}{8} : 1$$

Hay una variación de este algoritmo utilizado en el resto del mundo con los mismos propósitos llamado A-law. Su trabajo es esencialmente el mismo, suministrando un rango dinámico ligeramente inferior lo que, por el contrario, introduciendo menor distorsión para señales de menor amplitud.

### **2.3.2.2. ADPCM**

El algoritmo de codificación ADPCM se beneficia de que con mucha repetición, dos muestras cercanas de audio son muy equivalentes entre sí. En vez de representar cada muestra de audio de forma independiente como se hace en la codificación PCM, el codificador calcula la diferencia entre cada muestra y el valor que cree que debería corresponderle. Dicha diferencia será, previsiblemente, muy pequeña y por tanto ocupará muy pocos bits.

ADPCM en algunos casos pide que el codificador coopere a su salida información adicional a parte de los valores diferenciales PCM con dos propósitos. Por un lado, en algunos casos el decodificador puede requerir esa información adicional para determinar el incremento del cuantificador, del predictor o de ambos. Además, esta información suministra redundancia de datos al decodificador y le cede reconstruir la señal aunque el flujo de datos contenga errores, así como aprobar acceso aleatorio al flujo de datos.

En cuanto a los elementos de compresión, cada versión del códec brinda uno distinto. Por ejemplo, el algoritmo ADPCM planteado por la Interactive Multimedia Association (IMA) brinda un factor de compresión expresado por:

$$\frac{\text{numerodebitspormuestra}}{4} : 1$$

Otros proyectos de compresión ADPCM contienen la representación G.721 de la CCITT, con una tasa binaria comprimida de 32 kilobits/s y la G.723, con una tasa binaria comprimida de 24 kilobits/s. Conjuntamente, los algoritmos ADPCM asimismo se utilizan para la compresión de audio en los CDs interactivos.

### **2.3.2.3. Compresión MPEG**

El algoritmo para compresión de audio MPEG (Motion Picture Experts Group) es un estándar ISO para la compresión de audio de alta fidelidad. Forma parte de un grupo

de tres estándares de compresión, siendo las otras dos vídeos y sistemas. Cuando se combinan audio y vídeo sincronizados la compresión es tal que se obtiene una tasa de 1.5 megabits/s.

Al inverso que en los algoritmos estudiados primeramente, el algoritmo MPEG puede lograr compresión con pérdidas que puede pasar como compresión sin pérdidas de cara al oído humano. Para su perfeccionamiento se llevaron a cabo pruebas intensas de audición por parte de diversos tipos de sujetos. Estas pruebas establecieron que incluso con un factor de compresión 6:1 (estéreo, 16 bits por muestra a 48 KHz, comprimido a 256 kilobits/s) y en circunstancias óptimas de audición, los oyentes expertos fueron incapaces de distinguir las señales comprimidas de las originales.

El grado de provecho de este algoritmo es porque aprovecha del enmascaramiento auditivo, concepto manifestado en los fundamentos, y que está en la dificultad de oír una señal débil en presencia de una señal más fuerte cercana tanto en tiempo como en frecuencia.

Al comprimir audio, esta característica se utiliza convirtiendo la señal de audio al dominio de la frecuencia, dividiendo el espectro resultante en sub-bandas aproximadamente iguales a las bandas críticas (aquellas en las que se produce el enmascaramiento) y, finalmente, cuantificando cada sub-banda de acuerdo a la audibilidad del ruido de cuantificación en dicha banda. Para que la compresión sea recomendable, todas las bandas deben cuantificarse con un número de niveles no superior al necesario para hacer el ruido de cuantificación inaudible.

El algoritmo MPEG consta de tres capas para comprimir audio. La primera de ellas implementa el algoritmo básico aquí descrito mientras que las capas II y III mejoran ciertos aspectos de éste. Cada una de las capas mejora el rendimiento de la compresión a costa de una mayor complejidad tanto en codificadores como en decodificadores.

En cuanto a los factores de compresión y tasas binarias, estos son variables en función de la calidad anhelada a la salida del codificador, cambiando desde 32 kilobits/s, recomendadas para aplicaciones de voz, hasta 256 kilobits/s que se podría utilizar para música de alta fidelidad.

#### **2.3.2.4. CELP (Code Excited Linear Prediction)**

Algoritmo de codificación de voz propuesto originalmente por MR Schroeder y BS Atal en 1985. Proporciona una calidad mucho mejor que los algoritmos de baja velocidad de bits existentes en ese momento, tales como la predicción lineal con excitación residual y vocoders. También se utiliza en la codificación de voz MPEG-4 Audio. CELP se usa comúnmente como un término genérico para una clase de algoritmos y no para un códec específico.

El algoritmo CELP se basa en cuatro ideas principales:

- Usa el modelo de filtro-original y la producción de la voz mediante predicción lineal (LP).
- Usa un adaptador y un codebook fijo como la entrada (excitación) del modelo de LP.
- Realizar una búsqueda en circuito cerrado en un “dominio ponderado perceptivamente”.
- Aplicación de cuantificación vectorial (VQ)

El algoritmo original lo simuló en 1983 por Schroeder y Atal que necesitó 150 segundos para codificar 1 segundo de voz cuando se ejecutó en un superordenador Cray-1. Desde entonces, las formas más eficientes de la aplicación de codebook y la mejora de las capacidades de computación han permitido ejecutar el algoritmo en dispositivos embebidos, tales como teléfonos móviles.

#### **2.3.2.5. HILN**

Es un códec de audio paramétrico. La premisa básica del codificador de voz es que la mayoría de audio, puede ser sintetizado a partir de sólo sinusoidales y el ruido. El codificador describe sinusoidales individuales con amplitud y frecuencia, tonos armónicos de frecuencia fundamental, la amplitud y la envolvente espectral de los parciales, y el ruido de amplitud y la envolvente espectral. Este tipo de codificador es capaz de codificar audio a entre 6 y 16 kilobits por segundo de un ancho de banda de audio típica de 8 kHz.

### **2.3.2.6. AMR**

Multi-tasa adaptativo, AMR es un códec de compresión de audio mejorado para la codificación de voz. AMR ha sido establecido como el estándar de codificación de audio por 3gpp en octubre de 1998 y al presente se utiliza considerablemente en GSM. Formaliza activamente el ancho de banda escogiendo entre ocho diferentes tasas de bits.

Se puede hallar varios programas para convertir este formato a formatos de audio como son el MP3 o el WAV, como, por ejemplo, el Mobile Amr Converter entre otros. Usar éstos es respectivamente necesario por razón de que no todos los reproductores de sonido poseen los archivos necesarios como para reproducir un archivo codificado como AMR.

### **2.3.2.7. Speex**

Speex se basa en CELP y fue creado para comprimir voz a tasa de bits desde 2 a 44 kbps y tiene cualidades que no es posible obtener con otros códecs de voz como codificación de intensidad estéreo, combinación de diversas frecuencias de muestreos en el bitstream en uso y modo VBR.

El propósito del desarrollo de Speex fue porque se necesitaba de un algoritmo de voz que se maneje en código libre y sin licencias. Éstas fueron las razones fundamentales para que funcione con software de código abierto. Vorbis trabaja con audio en general,

pero no está perfeccionado para la voz, pero si funciona de manera óptima sobre IP (VoIP).

Los objetivos al diseñarlo fueron acceder a buena calidad en la voz y baja tasa de datos. Alta calidad además representaba poseer funcionamiento para wideband (frecuencia de muestreo de 16 kHz) y narrowband (frecuencia de muestreo de 8 kHz).

Características generales:

- Software libre.
- Unificación de banda estrecha y banda ancha en el mismo bitstream.
- Extenso valor de bitrate utilizable (desde 2 kbps a 44 kbps).
- Localización de actividad de voz
- codificación de intensidad estéreo.

#### **2.3.2.8. ACC**

AAC (Advanced Audio Coding) es un tipo de señal digital audio que se basa en un algoritmo de compresión con pérdida, un método por el cual se excluyen algunos de los datos de audio para lograr el mayor grado de compresión posible, obteniendo un archivo de salida que suena lo más parecido posible al original.

Por razones de su gran funcionamiento y la eficacia, la codificación de audio avanzada (AAC) es parte principal de MPEG-4, 3GPP y 3GPP2, y es el algoritmo de audio de selección para Internet, conexiones inalámbricas y de radio difusión digital.

Este formato lo usa Apple como formato primordial para los iPods y para su software iTunes. Asimismo es utilizado en diferentes aplicaciones por Ahead Nero, Winamp y Nintendo DSi. Se puede incluir legalmente la protección de los derechos de autor

Características:

- El AAC usa una frecuencia de bits variable (VBR), una técnica de codificación que acomoda el número de bits utilizados por segundo para comprimir datos de audio, en relación de la complejidad de la transferencia de audio en un momento determinado.
- AAC es un algoritmo de codificación de banda ancha de audio que tiene un rendimiento superior al del MP3, que produce una mejor calidad en archivos pequeños y requiere menos recursos del sistema para codificar y decodificar.
- Este algoritmo está puesto para usos de banda ancha y se caracteriza por la separación de redundancias de la señal acústica, también al comprimir mediante la transformada de coseno discreta modificada (MDCT), muy parecido al del MP3.
- No posee compatibilidad con MPEG-1.
- Máxima calidad entre 320 y 448 kbps (5 canales) y entre 128 y 192 (2 canales)

### **2.3.2.9. ATRAC**

ATRAC (Adaptive TRansform Acoustic Coding) es un algoritmo de compresión de audio con pérdidas diseñado por Sony, con base en características psicoacústicas, que propone varias tasas de compresión, dependiendo de la calidad de sonido.

La primer diseño, ATRAC-1, fue en 1992 y lograba comprimir la información de audio alrededor de a la quinta parte de la tasa de datos de un CD. También, esta tecnología no ha dejado de desarrollarse y sus versiones más recientes ATRAC3 y ATRAC3plus, que aparecieron en el año 1999 y en 2002, brindan compresiones mayores, alcanzando codificar el audio al 5 y 10% de la tasa de datos de un CD, correspondientemente.

ATRAC maneja codificación perceptual. La codificación perceptual se basa en la psicoacústica y aprovecha las imperfecciones del oído humano para evitar digitalizar los sonidos que una persona difícilmente percibirá.

De igual manera que otros códecs, solo se comprimen los sonidos que están por encima de los sonidos audibles. Muchas personas no son capaces de diferenciar sonidos que se localizan a frecuencias próximas de tonos dominantes.

### **2.3.2.10. MP2**

MPEG-1 Audio Layer 2 (MP2), es un estándar de compresión de audio con pérdidas. Ha sido delegado por MP3 en los ordenadores personales y aplicaciones Internet.

Se encuentra definido en la norma ISO/IEC 11172-3, quedando establecidos los siguientes parámetros:

- Frecuencias de muestreo: 32, 44.1 y 48 kHz
- Tasas de bits: 32, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 320 y 384 kbit/s

#### **2.3.2.11. MP3**

MPEG-1 Audio Layer III o MPEG-2 Audio Layer III, más frecuentemente se lo conoce como MP3, es un estándar de compresión de audio digital que cuenta con patente que usa un códec con pérdida para lograr un menor tamaño de archivo.

Este estándar fue elaborado por el Moving Picture Experts Group (MPEG) para llegar a ser un segmento del estándar MPEG-1 y MPEG-2. Un archivo comprimido con este estándar usando una compresión de 128kbit/s lograra llegar a tener un tamaño de cerca de unas 11 veces menor que su equivalente en CD. Además es posible comprimir utilizando una mayor o menor tasa de bits por segundo, ateniendo como resultado claramente en su mayor o menor calidad de audio final, así también el tamaño del archivo resultante.

Este estándar fue creado primordialmente por Karlheinz Brandenburg, del Fraunhofer-Gesellschaft - red de centros de investigación alemanes – que en conjunto con

Thomson Multimedia fiscaliza las patentes pertenecidas al MP3. Un año más tarde al registro de patentes su instituto obtuvo en concepto de patentes 1,2 millones de euros. Diez años más tarde esta cantidad ha alcanzado los 26,1 millones.

El estándar MP3 ha llegado a ser el más manipulado para transmisión de audio y compresión de audio gracias a la capacidad de regular la calidad de la compresión, correspondiente al tamaño por segundo (bitrate), y por tanto el tamaño final del archivo, que lograría ocupar 12 e incluso 15 veces menos que el archivo original sin comprimir.

Básicamente, el poseer una patente no quiere decir que su calidad sea baja ni alta, pero reprime que la comunidad consiga mejorar el estándar y consigue obligar a pagar por la utilización de algún códec. Mp3 aún es el estándar más usado y el que tiene más éxito, obteniendo nuevas versiones.

#### **2.3.2.12. Musepack**

Musepack (MPC) es un códec con pérdida de código libre de mucha eficiencia. Desarrollado para transparencia, lo que quiere decir que para ser un algoritmo de compresión con pérdida es muy dificultoso percibir diferencias entre el archivo wave original y el archivo MPC más pequeño usando el perfil "Standard" por defecto.

Musepack está estimado como uno de los que mejor capacidad tiene en compresión para bitrates medios/altos. Muy pocas mejoras han sido hechas para bitrates más bajos (como 128kbps) de todas maneras brinda una calidad aceptable.

Es un códec que se basa en MPEG-1 Audio Layer-2 / MP2, aun así desde 1997 se ha perfeccionado rápidamente y renovado ampliamente. Hoy en día se halla en una fase adelantada en el que domina un código muy perfeccionado y sin patentes.

### **2.3.2.13. Ogg Vorbis**

Ogg vorbis pertenece al proyecto Ogg y fue nombrado Ogg Vorbis o simplemente ogg por ser el algoritmo generalmente hallado en el contenedor Ogg.

Vorbis es un códec conocido para condescender flexibilidad máxima del codificador, reconociendo avanzar competitivamente en una variedad enormemente amplia de bitrates.

Este códec posee una forma de codificación que obtiene como objetivo descartar una cierta cantidad de información pensada como irrelevante para reducir la cantidad de datos. Esta idea fue manipulada anteriormente por ejemplo en la compresión de mp3.

Tiene un nivel de calidad calidad/bitrate comparable con MPEG-2 y Musepack (MPC) y además comparable con AAC en la mayoría de bitrates. De la misma manera, el codificador 1.0 puede codificar valores de calidad comenzando en CD audio y DAT-rate

estéreo hasta 48kbps sin disminuir la frecuencia de muestreo. Vorbis asimismo está considerado para frecuencias de muestreo bajas como telefonía de 8kHz y hasta alta definición de 192kHz, y una variedad de representaciones de canales.

La versión de vorbis 1.0 fue informada en julio de 2002, con una “Carta de anuncio de Ogg-Vorbis 1.0” reconociendo el soporte recibido y exponiendo por qué es preciso el impulso de códecs libres.

#### **2.3.2.14. Windows Media Audio (WMA)**

Windows Media Audio (WMA) es estándar de compresión de audio diseñada por Microsoft. Es software que pertenece a esta empresa y que es parte de la aplicación Windows Media.

WMA es parte de cuatro algoritmos diferentes. El algoritmo WMA original, distinguido claramente como WMA, fue ideado para lograr competir con MP3 y al RealAudio. WMA Pro, un formato más actual y desarrollado, tolera audio surround y de alta resolución. Asimismo existe un códec de compresión sin pérdida, WMA Lossless, se encarga de comprimir audio sin desperdiciar calidad. Asimismo se puede hallar otra versión conocida como WMA Voice, orientada en contenido hablado, emplea compresión y está desarrollado para tasas de bits muy bajas.

Se ha censurado mucho las acostumbradas afirmaciones de Microsoft de la calidad del códec. Un renglón de MP3 Developments asevera que no se compara el sonido de un CD y un archivo de audio WMA a 64 kbit/s.

### **2.3.2.15. PCM**

En 1937, Alex Haley Reeves, un excelente ingeniero británico que laboraba para la Western Electric Company perfeccionó la idea de digitalizar la señal de voz para impedir los ruidos y distorsiones a las que se ven afectadas las comunicaciones analógicas. En la década de 1930, Reeves planteó la primera modulación digital debidamente dicha: PCM (Modulación de Pulsos Codificados). Pero este algoritmo de compresión PCM no se haría popular hasta los años 60, posteriormente a la invención del transistor. Presentemente, la mayoría de los sistemas de comunicaciones conocidos se fundan en modulaciones digitales.

La compresión de tipo PCM se fundamentó en la recolección de prototipos de audio a una frecuencia establecida. El valor de cada muestra es un número real aleatorio y se redondea a un definitivo valor finito. Cada valor se representa con un número finito de bits, que depende del número de valores que pueden tomar las muestras.

PCM, recluta 8.000 muestras por segundo y cada muestra se representa con 8 bits. Esto nos proporciona una señal digital con una tasa de 64.000 bits por segundo. La señal digital se puede decodificar y cambiar otra vez en una señal analógica, pero esta señal será distinta de la señal analógica original como resultado del muestreo. Si se

acumulan más muestras y se recogen más valores posibles para estas muestras, la señal analógica decodificada será mucho más semejante a la señal original.

### **2.3.3. VS1063**

El VS1063 es un Codificador, Decodificador y códec versátil para varios formatos de audio.

El VS1063 contiene un alto rendimiento, bajo consumo de energía así como una memoria ROM, 16 Kib para instrucciones RAM y hasta 80 Kib de datos RAM para aplicaciones de usuario que simultáneamente se ejecutan con cualquier decodificador incorporado.

VS1063 puede actuar tanto como un decodificador o codificador en un sistema con un microcontrolador, o como un circuito independiente que arranca desde la memoria externa SPI. Cuando se utiliza como un esclavo VS1063 puede funcionar en tres modos de funcionamiento diferentes: decodificador, codificador o modo de códec.

En el modo de decodificador VS1063 recibe su flujo de bits de entrada a través de un bus serie de entrada. El flujo de entrada se decodifica y pasa a través de un control de volumen digital de 18 bits a un sobre muestreo sigma-delta DAC. La decodificación se controla a través de un bus de control en serie. Además de la de decodificación básica, es posible añadir características específicas de la aplicación, como efectos DSP, a la memoria RAM de usuario, o incluso para cargar las aplicaciones de usuario.

En el modo de codificador VS1063 puede leer audio de sus entradas analógicas, opcionalmente comprime los datos, que luego pueden ser leídos por el procesador host, ofrece una interfaz de audio de dúplex completo.



**Figura II.16.** Breakout Board para VS1063

### **2.3.3.1. Características Principales**

- Codifica:  
MP3, Ogg Vorbis, PCM, IMA ADPCM, G.711 ( $\mu$ -law, A-law), G.722 ADPCM.
- Decodifica:  
MP3 (MPEG 1 & 2 audio layer III); MP2 (layer II), MPEG4/ 2 AAC-LC, HE-AAC v2,  
Ogg Vorbis, FLAC, WAV (PCM, IMA ADPCM, G.711  $\mu$ -law/A-law, G.722 ADPCM)
- Hasta 96 Kb de RAM para el código de usuario y datos.
- Interfaces de control de serie y datos.
- Control de agudos y bajos
- Operación de baja potencia.

## **2.4. CALIDAD DE VOZ EN REDES**

### **2.4.1. Introducción**

El envío de voz a través de redes lleva un papel que se desarrolla con más importancia y un funcionamiento con muy frecuente. Los consumidores desean estar complacidos con la calidad del servicio independientemente de la tecnología utilizada. De esta manera, la “calidad de experiencia” QoE se encarga de la medición de una aplicación red y su cumplimiento de las expectativas y necesidades requeridas por el usuario. En cambio, la “calidad de servicio” QoS se trata de como esta el rendimiento de la red pero desde el ámbito técnico.

### **2.4.2. El espectro audible**

El espectro audible forma parte de las audiofrecuencias, nos referimos, a toda la gama de frecuencias que logran ser distinguidas por el oído humano.

La gran mayoría de personas pueden percibir frecuencias entendidas entre los 20 Hz y los 20 KHz. Pero, este margen puede cambiar dependiendo de cada persona y se altera con la edad.

No está dentro del espectro audible los siguientes ondas:

- Arriba se encuentran los ultrasonidos (Ondas acústicas de frecuencias mayores a los 20 KHz.)
- Los infrasonidos (Ondas acústicas de frecuencias bajas a los 20Hz).

### **2.4.3. Medición de la calidad del Sonido**

Existen varias formas de medir la calidad del sonido. Diversas mediciones que se han establecido concretamente para medir y calificar la calidad de sonido. Trataremos algunos de los procedimientos más comunes en la medicación utilizados para la calidad del sonido.

#### **2.4.3.1. Distorsión Armónica Total**

La distorsión armónica es una cuantificación técnica manipulado para concretar la señal de audio que sale de un sistema.

La distorsión armónica se provoca cuando la señal de salida de un sistema no corresponde a la señal que entró en él. Esta inexactitud de linealidad perturba a la forma de la onda, porque el dispositivo ha metido armónicos que no existían en la señal de entrada.

Al referirnos a distorsión armónica, regularmente se trata de la llamada distorsión armónica total, que es necesariamente, la cantidad de armónicos que el dispositivo introduce y que no estaban en la señal original.

Para regularizar las medidas. La distorsión armónica total se calcula implantando un tono de 1 kHz y calculando la señal de salida. En las medidas técnicas de los dispositivos, suele figurar la distorsión armónica total y se da en forma de porcentaje.

La distorsión armónica total jamás debe estar por arriba del 1%. De ser así, en vez de beneficiarse la señal, la distorsión comienza a alterar y el sonido resultante empieza a ser diferente al original, no obstante se manipulan distorsiones superiores con objetivo artístico.

#### **2.4.3.2. Potencia de Salida**

Potencia de salida es el máximo de energía por canal, generalmente se muestra como Watts o dBs. Hay dos medidas de pico y RMS. Pico vatios es regularmente lo que se muestra en la publicidad, por lo general es la máxima cantidad de energía que un dispositivo genera en un muy corto de tiempo. RMS significa Raíz Medios Square y es una manera más apropiada para determinar la potencia durante un período más largo de tiempo.

### **2.4.3.3. Respuesta de frecuencia**

Respuesta de frecuencia es una manera significativa para determinar la calidad de sonido. La mayoría de los oídos humanos pueden oír frecuencia (sonido), que es de unos 20 a unos 20 KHz. La mayoría de las personas consideran frecuencias de bajos, las frecuencias por debajo de 256 Hz. Frecuencias de rango medio son las frecuencias que van desde unos 256Hz a unos 2KHz. Estas frecuencias incluyen el diálogo y la mayor parte de la voz humana, piano, guitarra y otros instrumentos. Frecuencias altas se encuentran en la parte superior de la respuesta de frecuencia del espectro. Por lo general son de 2KHz a unos 16KHz o superior. Se incluyen platillos, notas altas de la voz humana, y algunos instrumentos de cuerda.

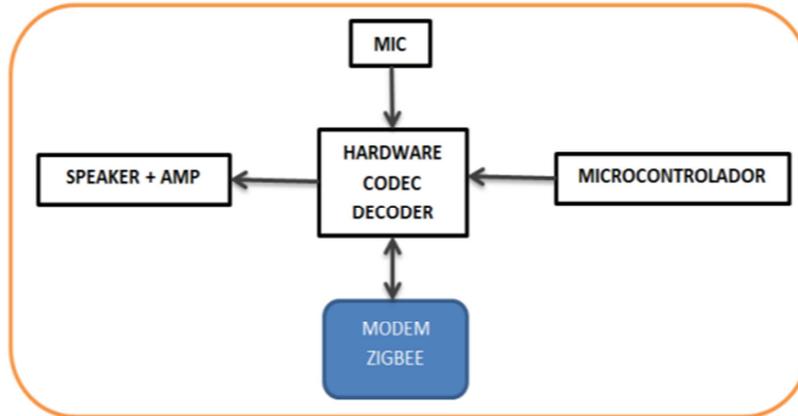
## **CAPITULO III**

### **MARCO PROPOSITIVO**

#### **3.1 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE TRANSMISIÓN DE AUDIO UTILIZANDO UNA RED ZIGBEE**

El objetivo es diseñar un sistema de comunicación de audio en tiempo real de baja calidad, que nos permita determinar el algoritmo de compresión de audio más óptimo para dicha comunicación.

Se propone un sistema de comunicaciones de audio en tiempo real de baja calidad, que nos permita determinar el algoritmo de compresión de audio más óptimo para dicha comunicación, para esto se dividió en dos partes la primera el diseño del hardware y la segunda el diseño del software para el control de VS1063.



*Figura III.17. Diagrama de Bloques del Sistema de Comunicación de audio*

### 3.2. DISEÑO Y MONTAJE DEL PROYECTO

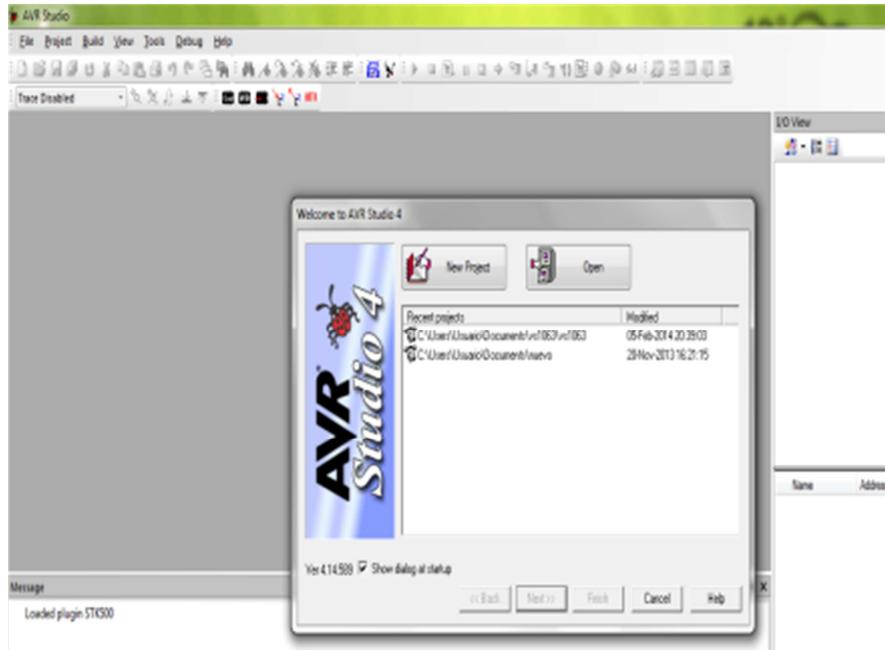
El proyecto para transmitir audio a través de una Red ZigBee fue diseñado tanto como en hardware como en software.

- **Diseño del software.**

El software fue diseñado e implementado en AVRstudio, donde se programó el micro atmega48 con las respectivas instrucciones para controlar el VS1063, y se pueda comprimir el audio ingresado a los módulos Xbee, a demás seleccionar los diferentes algoritmos para comprimir o descomprimir el audio.

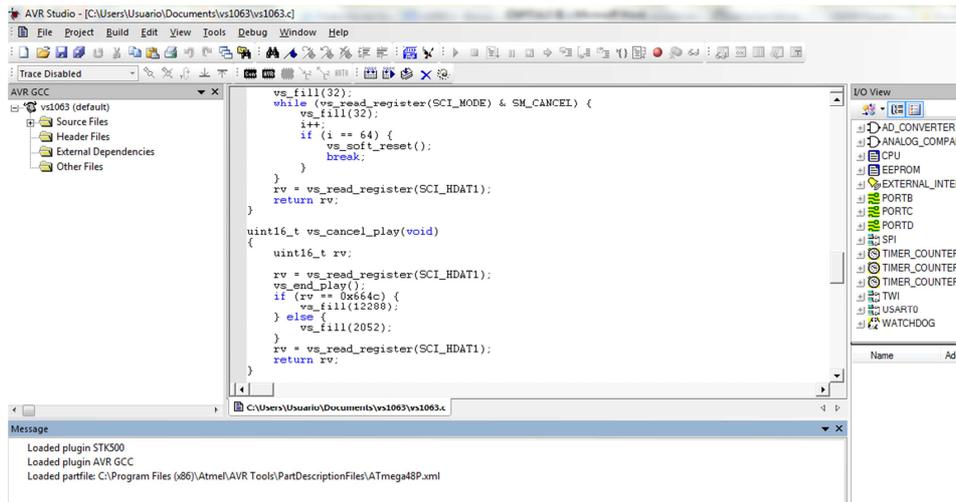


izquierdo damos un clic sobre AVR Simulator2; en el lado derecho damos clic sobre el dispositivo que vamos a programar en nuestro proyecto utilizaremos el ATmega48.



**Figura III.19.** Asistente para creación o apertura de un proyecto.

Después de escribir nuestro código, procedemos a guardarlo presionando el icono **Save** de la barra de herramientas estándar. El siguiente paso es compilarlo presionando el icono **Build**. Si nuestro código es correcto, al menos sintácticamente, veremos en la ventana de **Output** -situada en la parte inferior de la pantalla.



**Figura III.20.** Visión global de nuestro proyecto en AVRStudio

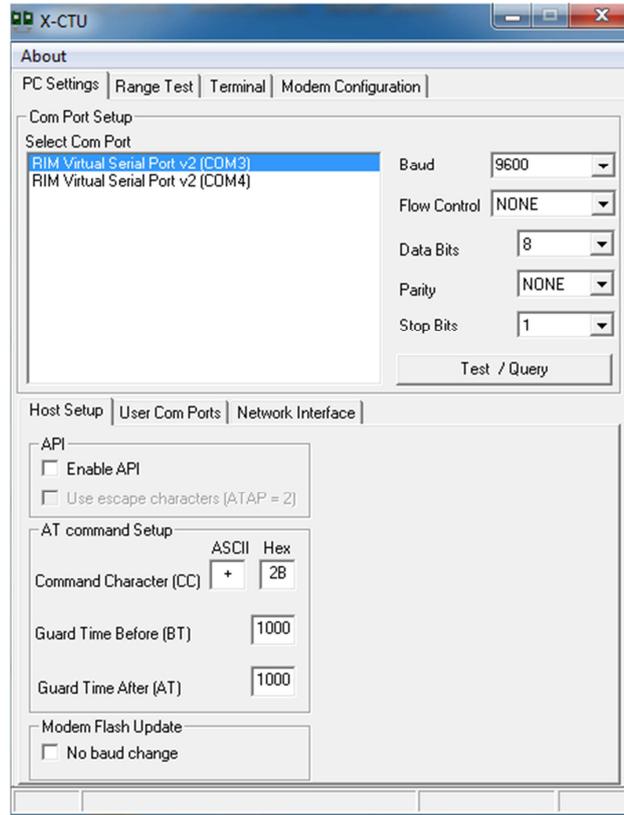
### 3.2.2. Instalación de X-CTU y configuración de módulos Xbee.

Antes de empezar con la configuración del módulo Xbee tenemos que instalar el programa X-CTU, este software nos permitirá configurar los Xbee para crear nuestra red.

Si bien es cierto que es posible utilizar Hyperteminal de Windows para configurar un módulo Xbee, existe un programa llamado X-CTU, el cual permite realizar estas operaciones de manera más natural, fácil y rápida.

Primero debemos descargar el archivo instalable, que lo podemos encontrar en el siguiente enlace [http://ftp1.digi.com/support/utilities/40002637\\_c.exe](http://ftp1.digi.com/support/utilities/40002637_c.exe), una vez descargado el archivo procedemos a la instalación del programa haciendo doble click en dicho archivo.

Cuando hayamos finalizado la instalación podemos ejecutar el programa a través de un acceso directo ubicado en el escritorio, llamado X-CTU y nos aparecerá una pantalla como la siguiente.



**Figura III.21.** Pantalla de Iniciación de X-CTU

**PC Settings:** Permite al usuario seleccionar el puerto COM y configurar ese puerto para adaptarse a la configuración realizada sobre el módulo XBEE.

**Range Test:** Permite a un cliente para realizar una serie de pruebas entre dos módulos.

**Terminal:** Permite acceder o no a los puertos COM del computador, mediante un programa de emulación. Esta pestaña también permite la posibilidad de acceder al firmware de los módulos utilizando comandos AT.

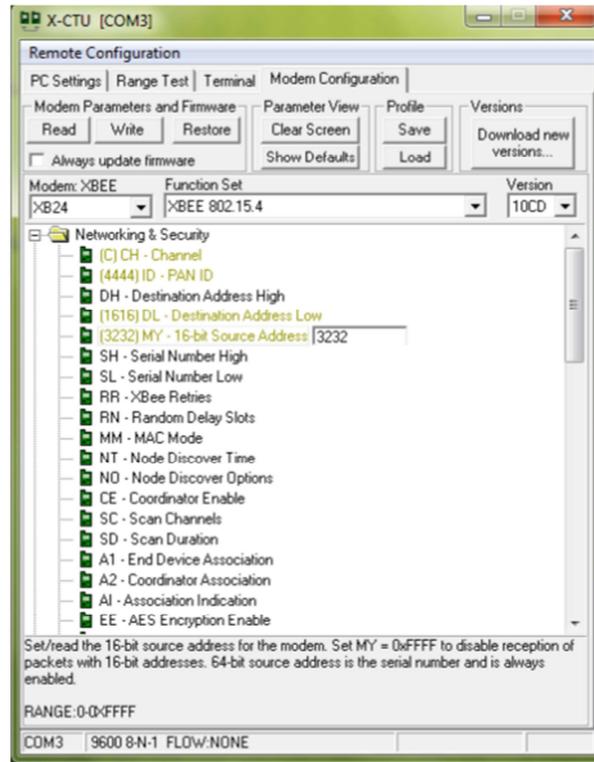
**Modem Configuration:** Permite la posibilidad de programar las configuraciones del firmware de los módulos a través de una interfaz gráfica de usuario. Esta pestaña también permite a los clientes la posibilidad de cambiar las versiones de firmware.

En la Figura III.21. Encontramos que el programa ha detectado los puertos, donde serán conectados los módulos para su configuración, seleccionamos la velocidad en la que vamos a trabajar (Baud) en este caso será 9600.

Seleccionamos el modelo del módulo Xbee, trabajamos en el canal en este caso C para evitar interferencias, PAN ID (4444), Para el primer módulo asignamos el valor de Source address MY (Dirección Original) (1616), Destination address low DL (3232).

Figura III.22. Para el segundo módulo correspondería MY (3232) y DL (1616), de esta manera nuestra Red ZigBee quedara programada para que solo se puedan ver entre ellos.

Antes de modificar algún parámetro es recomendable hacer click en la pestaña **Read** para obtener la información previa que tiene grabada el módulo ZigBee.



*Figura III.22. Pantalla de configuración de X-CTU*

Una vez hecho todo lo anterior, hacemos click en la pestaña **Write** para que todos los cambios queden grabados en el módulo ZigBee.

Con la programación de estos sencillos parámetros, los módulos Xbee están listos para trabajar.

- **Diseño de Hardware**

El Hardware fue diseñado en Proteus 8, tomando en cuenta la configuración de los pines de los módulos Xbee y VS1063.

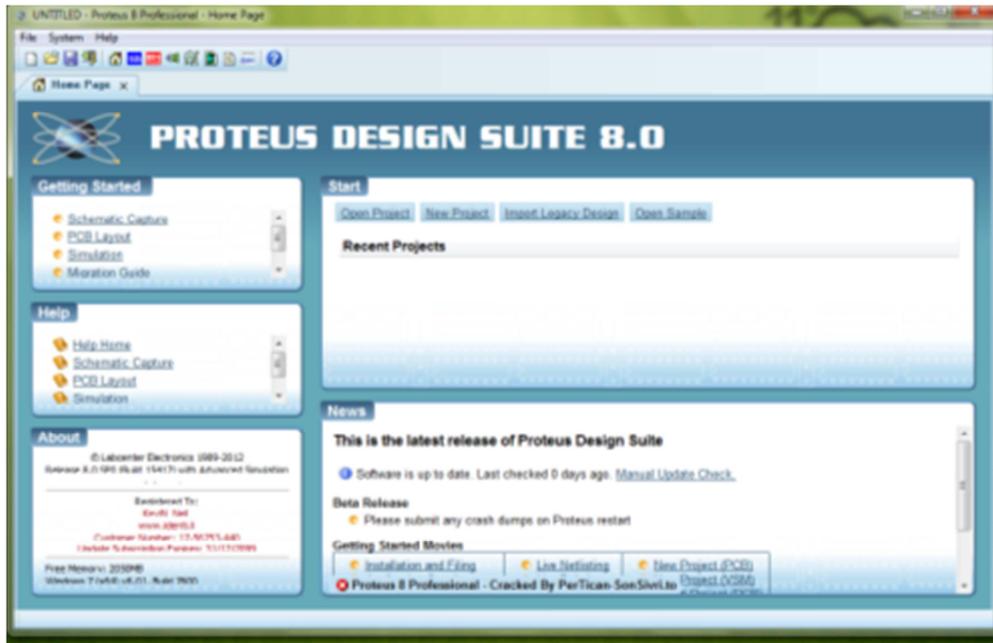


Figura III. 23. Proteus V8.0

### 3.2.3. Montaje de Módulos Xbee y VS1063

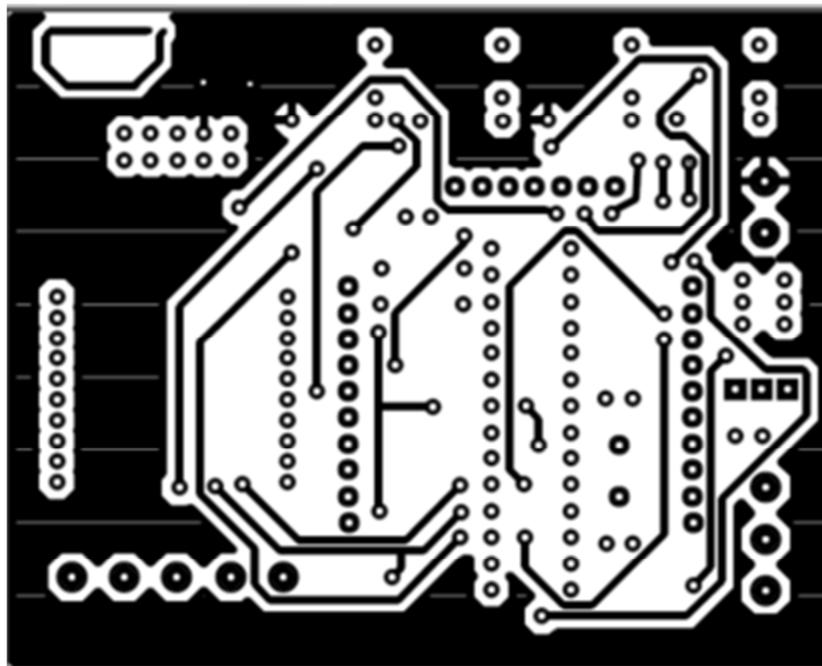
El módulo Xbee como el VS1063 fue diseñado para ser montado en un socket (hembra) y por lo tanto no requiere soldaduras para montarlo en la placa Figura III. 24.

Se usan módulos Xbee de fabricación MaxStream, estos dispositivos suministran 2 formas amigables de transmisión: Transmisión serial transparente (modo AT) y el modo API que proporciona muchas ventajas. Consiguen ser configurados desde el PC manejando el software X-CTU o por medio de un microcontrolador, estos módulos Xbee se comunican por la interfaz serie RS232 con ATmega48 que tiene en su interior un microcontrolador ATMEL de 8 bits con 8 kbytes de memoria flash, tiene una velocidad de ejecución de hasta 20 MIPS (20 Millones de Instrucciones Por Segundo), está optimizado para generar un mejor código con los compiladores de alto nivel, en especial el C. La función del microcontrolador es controlar el módulo VS1063 para que

realice las tareas de codificación y decodificación de los respectivos algoritmos, y los mismos sean transmitidos por medio de los módulos Xbee y obtener una red de baja calidad de audio.



**Figura III. 24.** Montaje de Modulo Xbee y Vs1063



**Figura III. 25.** Diseño de la pista

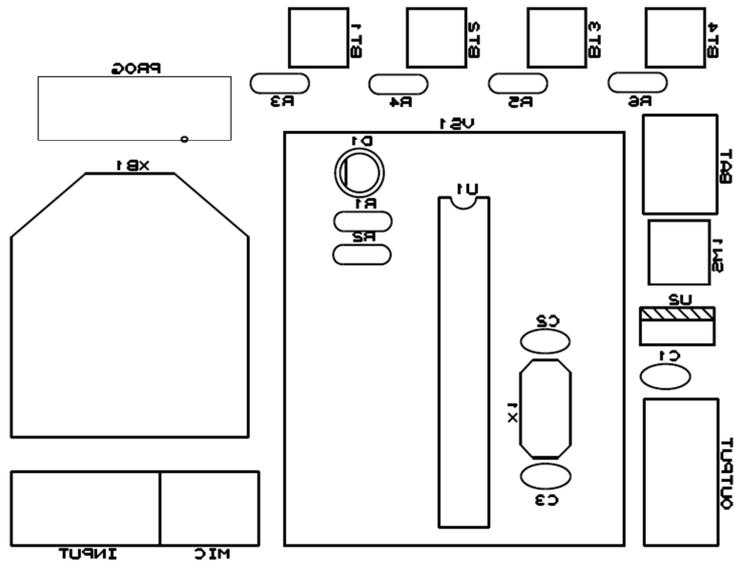


Figura III. 26. Mascara

A través de los pines Tx y Rx el VS1063 se comunica con el módulo Xbee, este a su vez por una comunicación serial por medio de los respectivos pines DIN y DOUT. La selección de los algoritmos de compresión de audio se los hace por medio de switch o conmutador donde podremos escoger el valor binario 0 o 1 y de esta manera seleccionar con cual algoritmo de compresión vamos a transmitir y recibir. El prototipo consta de dos switch que nos proporciona la selección de 4 algoritmos de compresión de audio. Figura III. 27.



**Figura III. 27.** *Switch de selección de algoritmos de compresión de audio S1 y S2*

La activación del modo Transmisor o Receptor está a cargo de los switch T y R existe un led indicador de activación del modo transmisor en cada uno de los módulos. Figura III.

28.

La amplificación de la señal de salida del audio está a cargo de un circuito a base de amplificadores operacionales, que nos brindara la posibilidad de poder escuchar el audio con una mayor facilidad ya que sin el mismo, la potencia de audio transmitido era demasiado bajo como para que lo podamos escuchar.



**Figura III. 28.** *Led indicador de modo transmisión activado*

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4. EJECUCIÓN DE PRUEBAS**

Después de haber terminado la implementación del prototipo, realizaremos pruebas de transmisión de audio con los diferentes algoritmos, dichas transmisiones las digitaremos en una PC para su correspondiente análisis y determinación del algoritmo más eficiente.

Las pruebas se realizaran entre los siguientes algoritmos:

- Ogg
- $\mu$ -law
- PCM
- ADPCM

## **4.2. PARÁMETROS DE EVALUACIÓN**

Se ha considerado los principales parámetros que muestran la eficiencia al comprimir audio para su transmisión en una red ZigBee.

- Frecuencia Global
- Espectro de Frecuencia Audible
- Potencia Total RMS
- Encuesta

## **4.3. OBTENCIÓN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS**

### **4.3.1 Frecuencia Global**

Indica la frecuencia media, de la totalidad del audio o un rango específico.

- Transmisión en Ogg

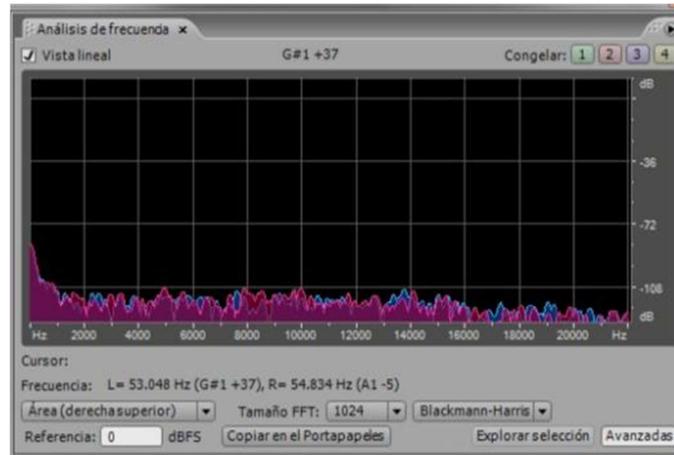


Figura IV. 29. *Análisis de Frecuencia Global con Ogg*

- Transmisión  $\mu$ -law

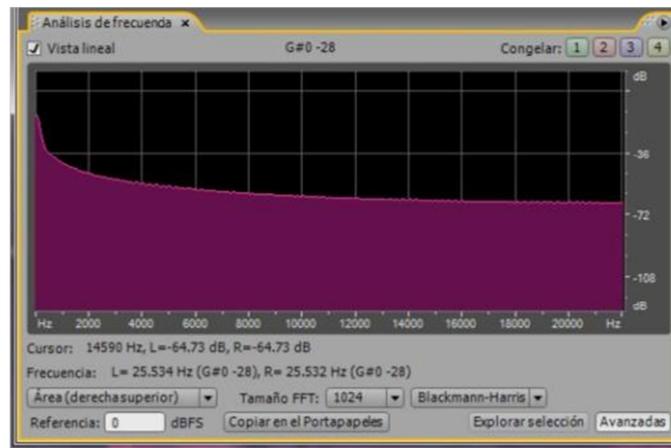


Figura IV. 30. *Análisis de Frecuencia Global con  $\mu$ -law*

- Transmisión PCM

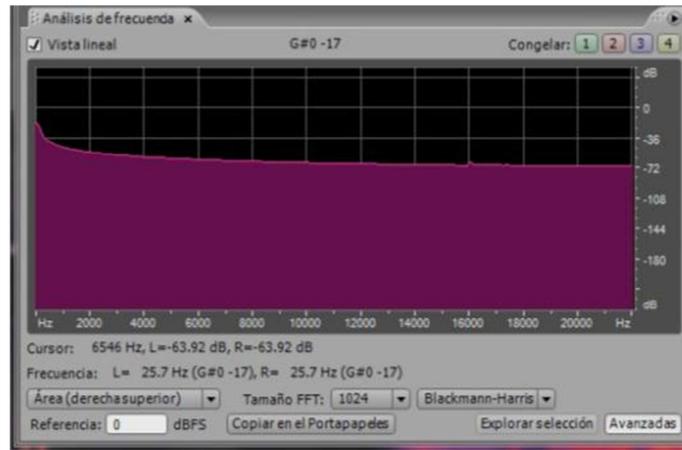


Figura IV. 31. Análisis de Frecuencia Global con PCM

- Transmisión ADPCM

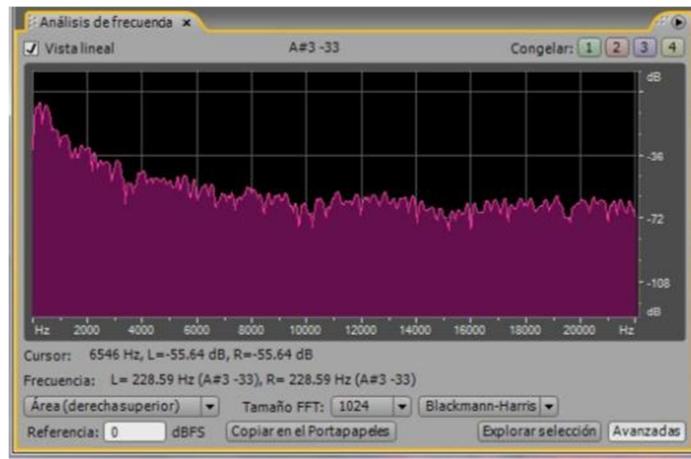


Figura IV. 32. Análisis de Frecuencia Global con ADPCM

### 4.3.2. Espectro de Frecuencia Audible

Representa la energía del contenido frecuencial de la señal según va variando ésta a lo largo del tiempo, es decir, toda la gama de frecuencias que consiguen percibir por el oído humano.

- Transmisión en Ogg

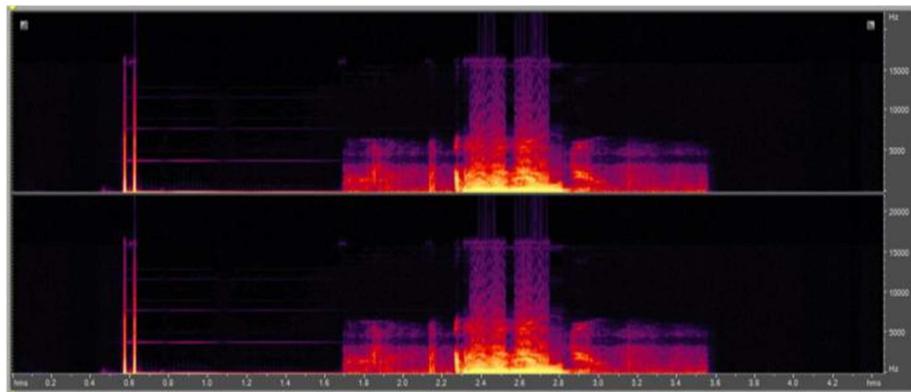


Figura IV. 33. Análisis de Espectro de Frecuencia Audible con Ogg

- Transmisión  $\mu$ -law

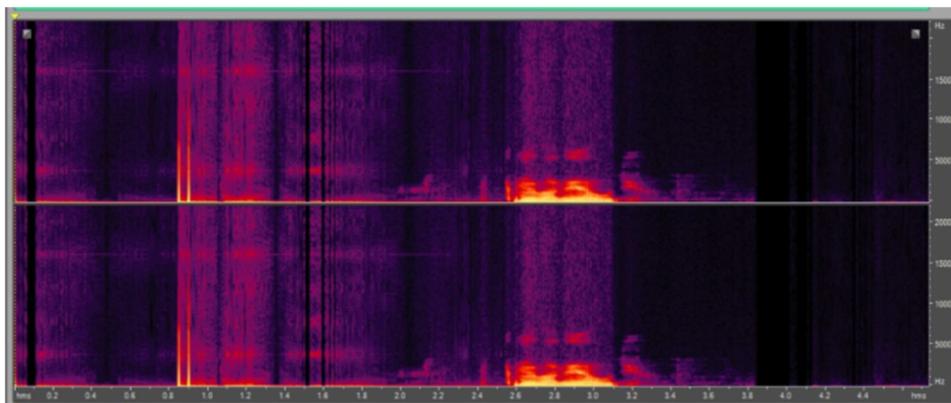
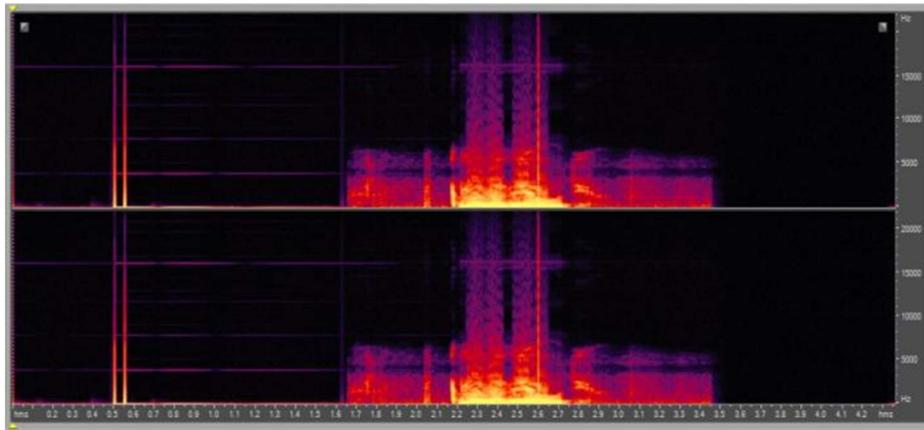


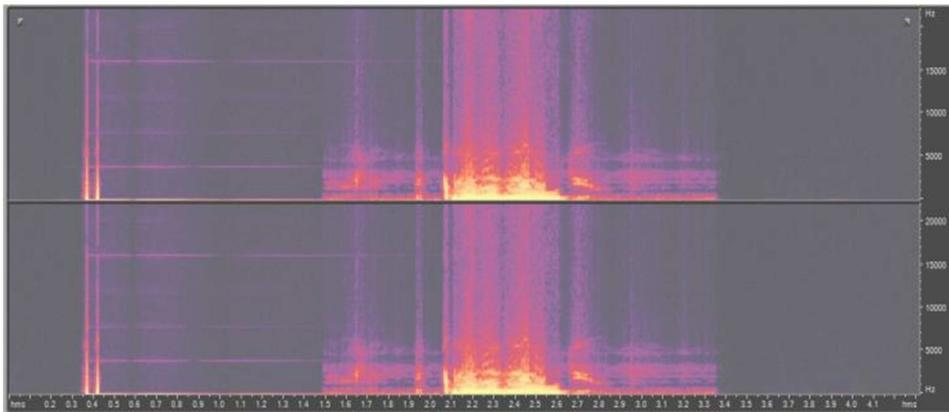
Figura IV. 34. Análisis de Espectro de Frecuencia Audible con  $\mu$ -law

- Transmisión PCM



**Figura IV. 35.** *Análisis de Espectro de Frecuencia Audible con PCM*

- Transmisión ADPCM



**Figura IV. 36.** *Análisis de Espectro de Frecuencia Audible con ADPCM*

### 4.3.3. Potencia Total RMS

Muestra de los valores de raíz cuadrada media de la selección. Los valores RMS se basan en la prevalencia de las amplitudes específicas, reflejando a menudo el volumen percibido mejor que las amplitudes medias o absolutas.

- **Transmisión en Ogg**

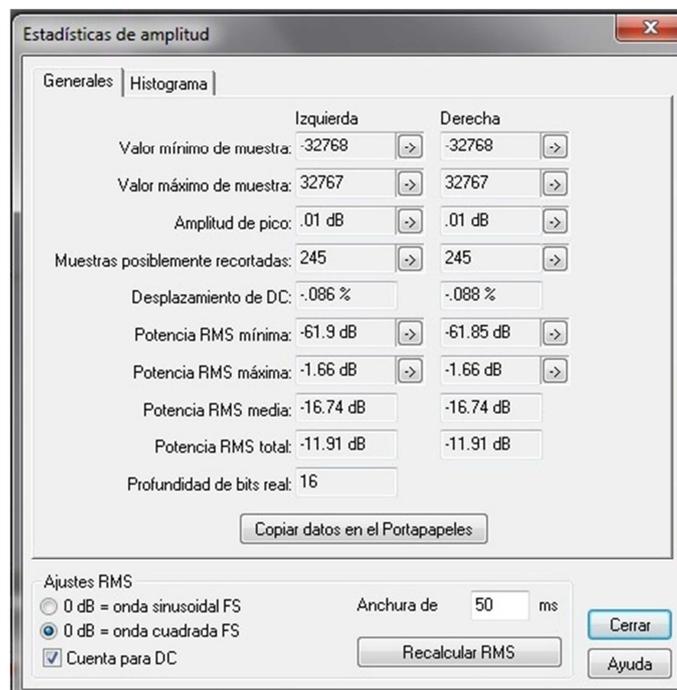


Figura IV. 37. Análisis de Potencia Total RMS con Ogg

- Transmisión  $\mu$ -law

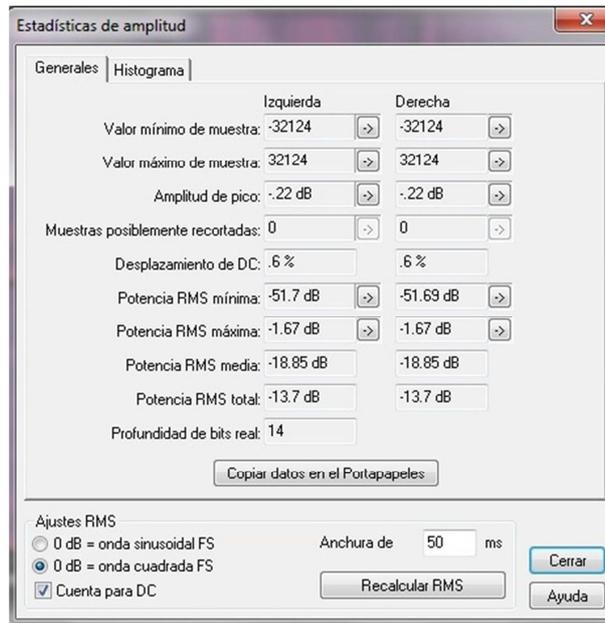


Figura IV. 38. Análisis de Potencia Total RMS con  $\mu$ -law

- Transmisión PCM

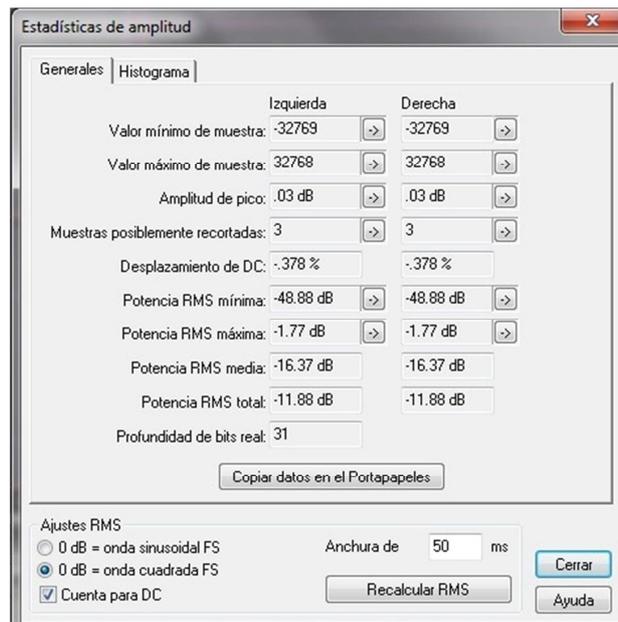
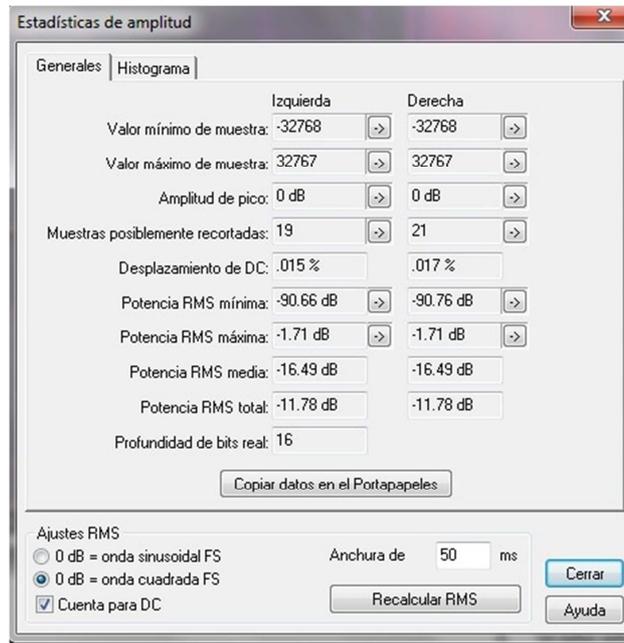


Figura IV. 39. Análisis de Potencia Total RMS con PCM

- **Transmisión ADPCM**



**Figura IV. 40.** *Análisis de Potencia Total RMS con ADPCM*

#### 4.3.4. Encuesta

Se realizó un análisis, cuyo universo de estudio lo constituyeron 100 personas, entre 14 y 45 años. Se explicó el objetivo y la importancia de la investigación, el funcionamiento y se realizó las pruebas con cada participante para posteriormente realizar la encuesta con las siguientes preguntas.

Los resultados de la segunda pregunta de la encuesta la tomaremos como referencia para la comprobación de la hipótesis, ya que las preguntas restantes son de carácter informativo.

¿Conoce usted de algoritmos de compresión de audio?

- Si
- No

¿Cuál transmisión le pareció tener mejor calidad de sonido?

- A (Ogg)
- B ( $\mu$ -law)
- C (PCM)
- D (ADPCM)

¿Cuál es la conclusión que le dio al escuchar las diferentes transmisiones de audio?

#### **4.4. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN Y VALIDACIÓN**

##### **4.4.1. Adobe Audition 3.0**

Adobe Audition primeramente llamado Cool Edit Pro, es un software desarrollado en tipo de estudio de sonido propuesto con el fin de editar de audio digital de Adobe Systems Incorporated que consiente tanto un ambiente de edición combinado de ondas multipista, por lo que se sido nombrándola "navaja suiza" del audio digital por su variabilidad.

Adobe Audition brinda varias maneras de analizar el audio. Para comparar las relaciones de fase entre cualquier de los dos canales. Para examinar análisis de frecuencia y Estadísticas de amplitud y potencia.

#### 4.5. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La verificación de la hipótesis se la realizo de las siguientes partes.

- Mediante el estudio de una Red ZigBee se pretende transmitir audio.
- Determinar el algoritmo de compresión más eficiente para transmisión de audio en una red ZigBee

##### 4.5.1. Determinar el algoritmo de compresión más eficiente para transmisión de audio en una red ZigBee

Algoritmo	Frecuencia Global	Espectro de Frecuencia Audible	Potencia RMS
Ogg	53.048 Hz	1600 Hz	-11.91 dB
$\mu$ -law	25.534 Hz	600 Hz	-13.7 dB
PCM	25.7 Hz	1600 Hz	-11.88 dB
ADPCM	228.59 Hz	2000 Hz	-11.78 dB

**Tabla IV. III.** *Resultados finales de los parámetros medidos*

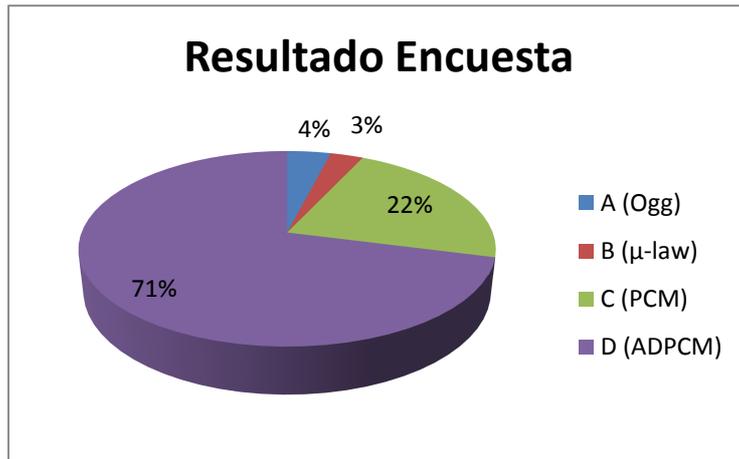


Figura IV. 41. Resultados Finales de la Encuesta

#### 4.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Se comparan los datos obtenidos en la implementación del prototipo al transmitir una frase “Prueba de Audio” a través de una red ZigBee en tiempo real y posteriormente analizándola con Adobe Audition 3.0

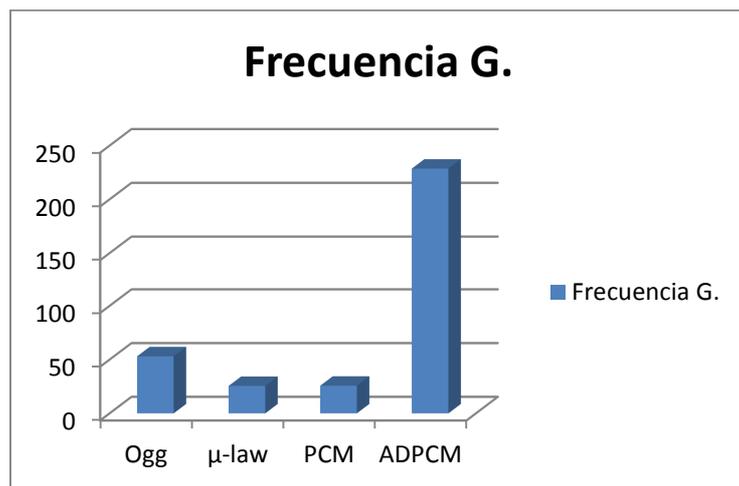
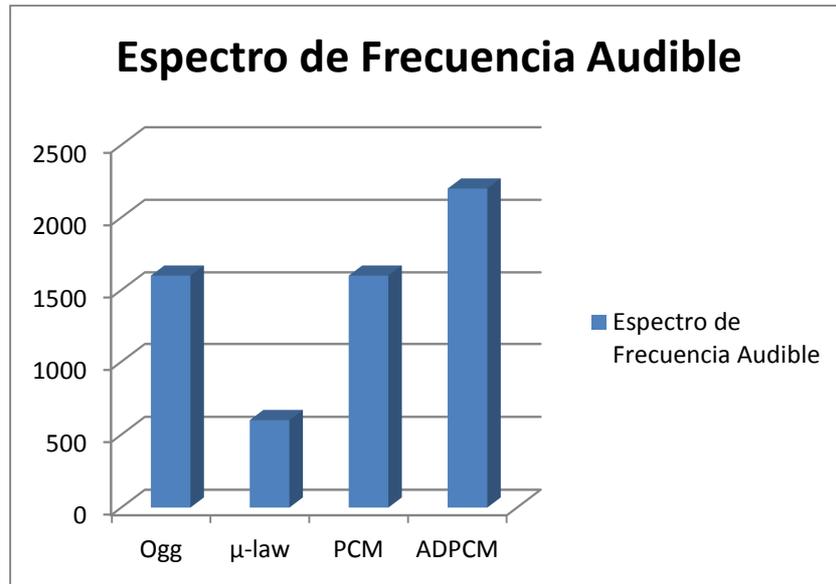


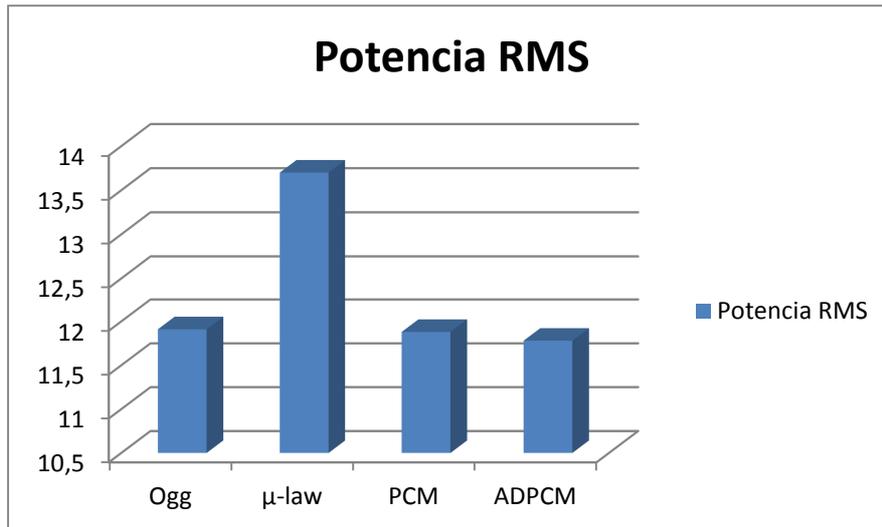
Figura IV. 42. Grafica de la Frecuencia Global (Hz)

Como se puede observar en la Figura IV. 42. El algoritmo de compresión con pérdidas ADCPM, tiene una mayor frecuencia global y similitud con la energía acústica original a lo largo de su transmisión, es decir mayor fidelidad.



**Figura IV. 43.** *Espectro de Frecuencia Audible*

En la Figura IV. 43. se puede observar que ADPCM cubre toda la frecuencia dentro del espectro audible hablamos de cada una de las frecuencias que es posible percibir por el oído humano.



**Figura IV. 44.** *Potencia Total RMS*

En la Figura IV. 44. se puede apreciar la potencia promedio total, estos valores se los mide en dB y son negativos, mientras más cerca están a 0 se tendrá un mayor volumen percibido. En este caso ADPCM tiene un valor más cercano a 0 lo que nos proporciona un mayor volumen de percepción.

#### **4.7. EVALUACIÓN DE ALGORITMOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE PONDERACIÓN**

Se debe tomar en cuenta la asignación de los valores en una escala del 0 al 10 siendo el 0 un puntaje inaceptable y 10 un valor óptimo, además de la asignación de los pesos a los parámetros de acuerdo a la importancia de cada uno en el rendimiento del prototipo.

<b>Variables</b>	<b>Aceptable</b>	<b>Valor Asignado</b>
Frecuencia G.	0Hz – 230hz	25%
Espectro de F. A.	20Hz – 20khz	25%
Potencia RMS	-20dB – 0dB	25%
Encuesta		25%

**Tabla IV. IV. Ponderación de los parámetros**

Para establecer valores de calificación de Frecuencia Global, se propone un rango recomendado entre 184 - 230Hz, en una escala de 10 a 8, tomando en cuenta que 8 es el valor óptimo mínimo, si la Frecuencia Global está entre 230 - 0Hz, se lo considera aceptable, de lo contrario los valores menores a 0 se los considera inaceptables asignándoles una valoración nula.

<b>Frecuencia Global</b>	<b>Valor Ponderado</b>
184 – 230	10 – 8
138 – 184	8 – 6
92 – 138	6 – 4
46 – 92	4 – 2
0 – 46	2 – 1
<0	0

**Tabla IV. V. Calificación de Frecuencia Global**

Para establecer valores de calificación de Espectro de Frecuencia Audible, se propone un rango recomendado entre 1604 - 2000Hz, en una escala de 10 a 8, tomando en cuenta que 8 es el valor óptimo mínimo, si la Espectro de Frecuencia Audible esta

entre 20 – 20000Hz, se lo considera aceptable, de lo contrario los valores menores a 20Hz se los considera inaceptables asignándoles una valoración nula.

<b>Espectro de Frecuencia Audible</b>	<b>Valor Ponderado</b>
2000 – 1604	10 – 8
1604 – 1208	8 – 6
1208 – 812	6 – 4
812 – 416	4 – 2
416 – 20	2 – 1
<20	0

**Tabla IV.VI.** *Calificación de Espectro de Frecuencia Audible*

Para establecer valores de calificación de Potencia Total RMS, se propone un rango recomendado entre -0 – -3dB, en una escala de 10 a 8, tomando en cuenta que 8 es el valor óptimo mínimo, si la Potencia Total RMS está entre -15 – 0dB, se lo considera aceptable, de lo contrario los valores menores a -15dB se los considera inaceptables asignándoles una valoración nula.

Potencia Total RMS	Valor Ponderado
0 – -3	10 – 8
-3 – -6	8 – 6
-6 – -9	6 – 4
-9 – -12	4 – 2
-12 – -15	2 – 1
<-15	0

**Tabla IV.VII. Calificación de Potencia Total RMS**

Para establecer valores de calificación de la Encuesta, se propone un rango recomendado entre 100 – 80%, en una escala de 10 a 8, tomando en cuenta que 8 es el valor óptimo mínimo.

Encuesta	Valor Ponderado
100 – 80	10 – 8
80 – 60	8 – 6
60 – 40	6 – 4
40 – 20	4 – 2
20 – 0	2 – 0

**Tabla IV.VIII. Calificación de Encuesta**

Se realizó la ponderación de los parámetros tomando valores de la Tabla IV.III. Asignándoles una calificación de acuerdo a las variaciones anteriormente explicada obteniendo los siguientes datos.

PÁRAMETROS	PESO	PUNTAJE DE CADA ALGORITMO							
		Ogg		$\mu$ -law		PCM		ADPCM	
		Calificación		Calificación		Calificación		Calificación	
FRECUENCIA G.	25%	2.31	0.58	1.11	0.28	1.12	0.28	9.68	2.42
ESPECTRO F. A.	25%	7.98	2	2.96	0.74	7.98	2	10	2.5
POTENCIA RMS	25%	1.99	0.5	0.91	0.23	1.98	0.5	1.96	0.49
ENCUESTA	25%	0.4	0.1	0.3	0.1	2.2	0.55	7.1	1.78
<b>TOTAL</b>	100%		3.18		1.35		3.33		9.19

**Tabla IV. IX. Ponderación de Datos**

Mediante la técnica de ponderación se concluye que el algoritmo de compresión de audio con pérdidas ADPCM, es el más eficiente con respecto al resto obteniendo una calificación de 9.19 sobre 10. Comprobando con esto la hipótesis planteada al inicio de la tesis.

## CONCLUSIONES

1. Es posible la transmisión de audio en redes ZigBee, este estándar no fue diseñado para aplicaciones multimedia, pero en determinadas situaciones donde no se requiera calidad de audio se podría utilizarlo.
2. Conociendo la limitada velocidad de transmisión del estándar ZigBee, el algoritmo ADPCM implementado en el prototipo mostró características de mayor eficiencia en comparación al resto de algoritmos analizados, al transmitir audio en una Red ZigBee, solucionando el problema del limitado ancho de banda.
3. El módulo VS1063, fue una solución en la implementación ya que cuenta con varios algoritmos de compresión de audio integrados, proporcionándonos una ventaja en el diseño y desarrollo del prototipo.
4. Mediante la Evaluación de algoritmos de compresión de audio para su transmisión en tiempo real usando redes ZigBee, se recopiló bastante información y conocimiento con respecto al tema, la cual puede ser muy útil al momento de buscar una alternativa, al uso de redes ZigBee en multimedia.

5. El uso de Redes ZigBee en aplicaciones de audio como domótica, vigilancia, grupos desplegados en una área limitada con necesidad de comunicación donde un sistema de audio basado en ZigBee con un bajo costo y consumo de energía podría ser una alternativa fiable.
  
6. Para lograr un sistema de mayores prestaciones, se podría explorar diferentes transmisores ZigBee de diferentes fabricantes, otros tipos de antenas que logren mayor rango de cobertura con más ganancia, así como diferentes algoritmos de compresión de audio.

## RECOMENDACIONES

1. Tener presente la funcionalidad de cada uno de los componentes antes de elaborar la plaqueta, para evitar errores de diseño o implementar componentes innecesarios.
2. Para obtener una transmisión de audio de mejor calidad es necesario implementar amplificadores a la entrada y salida de los módulos VS1063.
3. Se debe tener presente las características de cada uno de los algoritmos analizados, para su correcta interpretación de los resultados, teóricamente ADPCM ofrece mejor calidad de audio en comparación al resto de algoritmos analizados, y después del análisis demostró ser el que mejor calidad proporcionó a la transmisión.
4. Se recomienda homologar el voltaje de los dispositivos utilizados, para evitar un diseño complejo y averías por voltajes que se deberían suministrar.
5. El uso de las redes ZigBee para transmisión de audio, es recomendable para aplicaciones donde es posible aprovechar el bajo costo, consumo de energía y alcance de los dispositivos.

## RESUMEN

La investigación de evaluación de algoritmos de compresión de audio para su transmisión en tiempo real usando redes ZigBee se realizó en la Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

El objetivo es analizar la tecnología ZigBee, ventajas, características y aplicaciones, conocer los diferentes algoritmos de compresión de audio, características principales y también desarrollar un prototipo que permita transmitir audio.

El método de investigación deductivo permitió comprender aspectos generales que intervienen para transmitir audio en ZigBee como frecuencias operativas, capacidad de transmisión y topologías de red. El método inductivo permitió observar parámetros específicos que pueden determinar mejor transmisión de audio entre ellos los diferentes algoritmos de compresión, finalmente el método analítico permitió analizar valores para determinar el algoritmo más eficiente estos parámetros fueron frecuencia global, Espectro de Frecuencia Audible, Potencia RMS y una encuesta.

La implementación del sistema se realizó mediante software como Proteus8, X-CTU y AVR Studio, para realizar mediciones de audio Adobe Audition 3.0, hardware como ATmega84, Módulos Xbee y Vs1063.

El algoritmo ADPCM obtuvo mejores medidas en comparación al resto, comprobándolo con la técnica de ponderación y obteniendo los siguientes datos: frecuencia global 228.59Hz, Espectro de Frecuencia Audible 2000Hz, Potencia RMS - 11,78dB y 71% en resultados por encuesta.

Se concluye que usar redes ZigBee para transmitir audio es posible y ADPCM es el algoritmo más eficiente. Se recomienda usarlo en aplicaciones de audio como domótica, vigilancia, donde se puede aprovechar el bajo costo, consumo energético y alcance de dispositivos.

**Palabras clave:**

ZigBee; RMS (valor cuadrático medio); ADPCM (codificador de forma de onda); ATmega84; Vs1063.

## SUMMARY

The research "Evaluation of audio compression algorithms for its transmission in real time by using ZigBee networks" was carried out at the Electronics Engineering in Telecommunications and Networks at the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

The objective is to analyze the ZigBee technology, advantages, features and applications; to know the different audio compression algorithms, main features and to develop a prototype that allows to transmit audio.

The deductive method was used in this research to understand general aspects in order to transmit audio in ZigBee as operative frequencies, transmitting capacity and networks topologies. The inductive method allowed to observe specific parameters to determine better audio transmission among them, including different compression algorithms; finally, the analytical method allowed to analyze intervals to determine the most efficient algorithm. These parameters were Overall Frequency, Audible Frequency Spectrum, Power RMS and a Survey.

The implementation of the system was performed by means of a "software" Proteus8, X-CTU and AVR studio; to perform measures of audio "Adobe audition 3.0", "hardware" ATmega48, XBee modules and VS1063.

The ADPCM algorithm got better measures compared with the others, checking with estimated frequency and obtaining the following data: overall frequency 228.45Hz, audible frequency spectrum 2000Hz, RMS Power -11.78dB and 71% in survey results.

It is concluded that to use ZigBee networks to transmit audio is possible and ADPCM is the most efficient algorithm. It is recommended the use of ZigBee for audio and domotic applications, vigilance where it can be useful due to low cost, energy consumption and devices scope.

## GLOSARIO

**Multimedia.-** Se utiliza para referirse a cualquier objeto o sistema que utiliza múltiples medios de expresión físicos o digitales para presentar o comunicar información. De allí la expresión multimedios. Los medios pueden ser variados, desde texto e imágenes, hasta animación, sonido, video, etc.

**Sensor.-** Un sensor es un aparato idóneo para mostrar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables, y convertirlas en variables eléctricas.

**Semiconductores.-** Es un dispositivo que trabaja como un conductor o como aislante en consecuencia a varios factores.

**Domótica.-** Es la unión de procedimientos idóneos de automatizar un hogar, asistiendo a los servicios de administración energética, seguridad, bienestar y comunicación, y que se integran por medio de redes interiores y exteriores de comunicación, cableadas o inalámbricas.

**Algoritmo.-** instrucciones o reglas bien delimitadas, ordenadas y finitas que logra ejecutar una actividad por medio de pasos continuados que no generen dudas a quien deba realizar dicha actividad.

**Periféricos.-** Se nombra periféricos a los equipos o dispositivos complementarios e independientes enlazados a la unidad central de procesamiento de una computadora.

**Latencia.-** Se denomina latencia a 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.

**Trama.-** Paquete de datos.

**Microcontrolador.-** Es un circuito integrado programable, que puede establecer las disposiciones punteadas en su memoria.

**Memoria flash.-** Brinda la lectura y escritura de variadas puntos de memoria en la misma operación.

**Redes inalámbricas Ad-Hoc.-** Una red ad hoc se trata generalmente a redes en que todos los dispositivos poseen igual estado dentro de la red y tienen la libertad de acoplarse con cualquier otro nodo de red ad hoc.

**Tasa de Bits.-** El término tasa de bits especifica la cantidad de bits que se envían por unidad de tiempo por medio de una aplicación de transmisión digital o entre dos dispositivos digitales. Es la velocidad de transferencia de datos.

**Psicoacústico.-** Estudia la compresión sonora, tales como la amplitud, ecualización y acústica. Estas cualidades y los parámetros de éste o características del sonido están, a

su vez, determinadas por los propios parámetros del sonido, principalmente, frecuencia y amplitud. También estudia la relación entre la sensación percibida por un sonido determinado

**Vocoders.-** Un vocoder (nombre derivado de voice coder, «codificador de voz») es un analizador y sintetizador de voz. Fue desarrollado en la década de 1930 como un codificador de voz para telecomunicaciones. Su primer uso fue la seguridad en radiocomunicaciones, donde la voz tiene que ser digitalizada, cifrada y transmitida por un canal de ancho de banda estrecho.

**Armónicos.-** En sonido y telecomunicaciones, un armónico de una onda es un componente sinusoidal de una señal.



**Anexos**

## ANEXO A

### Programación ATmega84

El diseño del prototipo de transmisión de audio en redes ZigBee se lo desarrollo con la implementación del micro ATmega84, seleccionado por ser muy económico y trabajar a 3,3V lo que nos la homologación de voltajes en los dispositivos utilizados en la implementación.

```
#include <string.h>

#include "vs1063.h"

#include "timer.h"

#include "spi.h"

// read the 16-bit value of a VS10xx register
uint16_t vs_read_register(const uint8_t address)
{
    uint16_t resultvalue = 0;
    uint16_t aux = 0;
    vs_deselect_data();
    vs_select_control();
    vs_wait();
    spi_transfer(VS_READ_COMMAND);
    spi_transfer(address);
    aux = spi_transfer(0xff);
```

```

    resultvalue = aux << 8;

    aux = spi_transfer(0xff);

    resultvalue |= aux;

    vs_deselect_control();

    vs_wait();

    return resultvalue;
}

// write VS10xx register

void vs_write_register_hl(const uint8_t address, const uint8_t highbyte, const uint8_t
lowbyte)
{
    vs_deselect_data();

    vs_select_control();

    vs_wait();

    delay(2);

    spi_transfer(VS_WRITE_COMMAND);

    spi_transfer(address);

    spi_transfer(highbyte);

    spi_transfer(lowbyte);

    vs_deselect_control();

    vs_wait();
}

```

```
// write VS10xx 16-bit SCI registers

void vs_write_register(const uint8_t address, const uint16_t value)

{

    uint8_t highbyte;

    uint8_t lowbyte;

    highbyte = (value & 0xff00) >> 8;

    lowbyte = value & 0x00ff;

    vs_write_register_hl(address, highbyte, lowbyte);

}

// read data rams

uint16_t vs_read_wramaddr(const uint16_t address)

{

    uint16_t rv = 0;

    vs_write_register(SCI_WRAMADDR, address);

    rv = vs_read_register(SCI_WRAM);

    return rv;

}

// write to data rams

void vs_write_wramaddr(const uint16_t address, const uint16_t value)

{

    vs_write_register(SCI_WRAMADDR, address);

}
```

```

    vs_write_register(SCI_WRAM, value);
}

// wait for VS_DREQ to get HIGH before sending new data to SPI
void vs_wait(void)
{
    while (!(VS_DREQ_PIN & VS_DREQ)) {
        };
    }

// set up pins
void vs_setup(void)
{
    // input ports
    VS_DREQ_DDR &= ~VS_DREQ;

    // output ports
    VS_XCS_DDR |= VS_XCS;
    VS_XDCS_DDR |= VS_XDCS;
    VS_XRESET_DDR |= VS_XRESET;

    vs_deassert_xreset();

    delay(400);

    vs_wait();
}

```

```
}
```

```
void vs_soft_reset(void)
```

```
{
```

```
vs_write_register(SCI_MODE, SM_SDINEW | SM_RESET);
```

```
delay(2);
```

```
// set SC_MULT=3.5x, SC_ADD=1.0x
```

```
vs_write_register(SCI_CLOCKF, 0x8800);
```

```
}
```

```
// setup I2S (see page77 of the datasheet of vs1053 )
```

```
// also enables blinky lights on the simple dsp evaluation board
```

```
void vs_setup_i2s(void)
```

```
{
```

```
//set GPIO0 as output
```

```
vs_write_wramaddr(0xc017, 0x00f0);
```

```
//enable I2S (MCLK enabled, 48kHz sample rate)
```

```
vs_write_wramaddr(0xc040, 0x000c); // I2S_CF_MCLK_ENA | I2S_CF_ENA
```

```
}
```

```
// set VS10xx volume attenuation 0x00 loud - 0xfe silent
```

```
void vs_set_volume(const uint8_t leftchannel, const uint8_t rightchannel)
```

```
{
```

```
// volume = dB/0.5
```

```
vs_write_register_hl(SCI_VOL, leftchannel, rightchannel);  
}
```

```
// returns 0 on success
```

```
// returns the old codec id on failure
```

```
uint16_t vs_end_play(void)
```

```
{
```

```
uint8_t i=0;
```

```
uint16_t rv;
```

```
if (vs_read_register(SCI_HDAT1) == 0x664c) {
```

```
    vs_fill(12288);
```

```
} else {
```

```
    vs_fill(2052);
```

```
}
```

```
vs_write_register(SCI_MODE, SM_CANCEL);
```

```
vs_fill(32);
```

```
while (vs_read_register(SCI_MODE) & SM_CANCEL) {
```

```
    vs_fill(32);
```

```
    i++;
```

```
    if (i == 64) {
```

```
        vs_soft_reset();
```

```
        break;
```

```
    }
```

```
}  
  
rv = vs_read_register(SCI_HDAT1);  
  
return rv;  
  
}
```

```
uint16_t vs_cancel_play(void)
```

```
{  
  
    uint16_t rv;  
  
  
    rv = vs_read_register(SCI_HDAT1);  
  
    vs_end_play();  
  
    if (rv == 0x664c) {  
        vs_fill(12288);  
    } else {  
        vs_fill(2052);  
    }  
  
    rv = vs_read_register(SCI_HDAT1);  
  
    return rv;  
  
}
```

```
void vs_fill(const uint16_t len)
```

```
{  
  
    uint8_t buff[VS_BUFF_SZ];  
  
    uint8_t fill;
```

```

uint16_t i = 0;

fill = vs_read_wramaddr(endFillByte);

memset(buff, fill, VS_BUFF_SZ);

vs_select_data();

for (i = 0; i < (len / VS_BUFF_SZ); i++) {
    vs_wait();

    spi_transmit_sync(buff, 0, VS_BUFF_SZ - 1);
}

vs_wait();

spi_transmit_sync(buff, 0, (len % VS_BUFF_SZ) - 1);

vs_deselect_data();
}

// level 0 - disabled - suited for listening through loudspeakers
//     1 - suited for listening to normal musical scores with headphones
//     2 - less subtle than 1
//     3 - for old and 'dry' recordings
void vs_ear_speaker(const uint8_t level)
{
    const uint16_t ear_speaker_level[4] = { 0, 0x2ee0, 0x9470, 0xc350 };

    vs_write_wramaddr(earSpeakerLevel, ear_speaker_level[level%4]);
}

```

```
}
```

```
// algoritmo pcm
```

```
void pcm(const uint8_t datos)
```

```
{
```

```
    const uint16_t ear_speaker_level[4] = { 0, 0x2ee0, 0x9470, 0xc350 };
```

```
    vs_write_wramaddr(earSpeakerLevel, ear_speaker_level[level%4]);
```

```
}
```

```
// algoritmo adpcm
```

```
void pcm(const uint8_t datos)
```

```
{
```

```
    const uint16_t ear_speaker_level[4] = { 0, 0x2ee0, 0x9470, 0xc350 };
```

```
    vs_write_wramaddr(earSpeakerLevel, ear_speaker_level[level%3]);
```

```
}
```

```
// algoritmo ogg
```

```
void ogg(const uint8_t datos)
```

```
{
```

```
    WriteSciReg(SCI_WRAMADDR, 0x1e10);
```

```
    availSpace = ReadSciReg(SCI_WRAM);
```

```
    if (availSpace >= 32) {
```

```

    ReadSamples(samples, 32);

    WriteSciRegMultiple(SCI_AICTRL0, samples, 32);

}

}

//          algoritmo G.711 u-law and A-law
void ogg(const uint8_t datos)
{
    WriteSciReg(SCI_WRAMADDR, 0x1e10);

    availSpace = ReadSciReg(SCI_WRAM);

    struct {

        u_int16 sceFoundMask; /*1e2a single-channel-el. found since last clr*/
        u_int16 cpeFoundMask; /*1e2b channel-pair-el. found since last clr*/
        u_int16 lfeFoundMask; /*1e2c low-frequency-el. found since last clr*/
        u_int16 playSelect; /*1e2d 0 = first any, initialized at aac init */
        s_int16 dynCompress; /*1e2e -8192=1.0, initialized at aac init */
        s_int16 dynBoost; /*1e2f 8192=1.0, initialized at aac init */
        u_int16 sbrAndPsStatus; /*0x1e30 V3 gotSBR/upsampling/gotPS/PSactive*/
        u_int16 sbrPsFlags; /*0x1e31 V4*/

    } aac; /* 3*/

}

```

**ANEXO B**

**Modelo de Encuesta**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y REDES**

**EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE COMPRESIÓN DE AUDIO PARA SU TRANSMISIÓN  
EN TIEMPO REAL USANDO REDES ZIGBEE**

¿Conoce usted de algoritmos de compresión de audio?

- Si
- No

¿Cuál transmisión le pareció tener mejor calidad de sonido?

- A (Ogg)
- B ( $\mu$ -law)
- C (PCM)
- D (ADPCM)

¿Cuál es la conclusión que le dio al escuchar las diferentes transmisiones de audio?

.....

.....

.....

.....

## **CAPÍTULO V**

### **BIBLIOGRAFÍA**

- [ 1.] **GISLASON, D.**, ZigBee Wireless Networking., 1ra ed., Burlington – Estados Unidos de America., Elsevier., 2008., Pp. 20 – 23
  
- [ 2.] **SALOMON, D.**, Data Compression., 3rd ed., Northridge - Estados Unidos de America., Springer., 2004., Pp. 51 - 55
  
- [ 3.] **VALVERDE, REBAZA, J.**, El Estándar Inalámbrico ZigBee., 1ra Ed., Trujillo – Perú., 2007., Pp. 24 – 29
  
- [ 4.] **HANZO, L., Y SOMERVILLE, F.**, Voice and Audio Compression for Wireless Communications., 2nd ed., Ottawa – Canada., Published Online., 2007., Pp. 55 - 56
  
- [ 5.] **BARRIGA, VÁZQUEZ, W.**, Tecnologías inalámbricas de corto alcance: zigbee y bluetooth., Facultad de Ingenierías.,

Universidad Politécnica Salesiana., Quito-Ecuador., **TESIS.**, 2006., Pp.

30 – 45

E.book.

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/206/1/Indice.pdf>

[ 6.] **MELI, M. Y GYSEL, M.**, Using IEEE 802.15.4 / ZigBee in audio applications.,

Schaffhausen - Suiza., 2010., Pp. 46

E.book.

[http://www.ines.zhaw.ch/fileadmin/user\\_upload/engineering/\\_Institute\\_und\\_Zentren/INES/Wireless/Dokumente/EW200x\\_paper\\_Using\\_IEEE\\_802.15.4\\_and\\_zigbee\\_in\\_audio.pdf](http://www.ines.zhaw.ch/fileadmin/user_upload/engineering/_Institute_und_Zentren/INES/Wireless/Dokumente/EW200x_paper_Using_IEEE_802.15.4_and_zigbee_in_audio.pdf)

[ 7.] **JOSKOWICZ, J. Y SOTELO R.**, Medida de la calidad de voz en redes IP.,

Montevideo – Uruguay., 2006., Pp 75 -79

E.book

<http://iie.fing.edu.uy/~josej/docs/Medida%20de%20la%20calidad%20de%20voz%20en%20redes%20IP.pdf>

[ 8.] **MORENO, PALLO, V.**, Construcción de una red ZigBee prototipo para la

adquisición de datos desde transmisores de corrientes de dos hilos.,

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones., Escuela

Politécnica Nacional., Quito – Ecuador., **TESIS.**, 2009., Pp. 20 - 23

[ 9.] **PROTOCOLO IEEE 802.15.4**

<http://inalambricas2009.blogspot.com/2009/10/marco-referencial.html>

11/07/2013

**[ 10.] ARQUITECTURA ZIGBEE**

<http://www.domodesk.com/a-fondo-zigbee>

21/10/2013

**[ 11.] CODIFICACIÓN Y COMPRESIÓN DE AUDIO**

<http://es.cyclopaedia.net/wiki/Audio-comprimido>

22/10/2013

**[ 12.] ALGORÍTMOS M-LAW Y A-LAW (G.711)**

<http://www.voipforo.com/codec/codec-g711--ley.php>

22/10/2013

**[ 13.] G.711**

<http://es.inforapid.org/index.php?search=G.711>

22/10/2013

**[ 14.] SPEEX**

<http://www.speex.org/>

23/10/2013

**[ 15.] AMR**

<http://web.archive.org/web/http://es.shoutcheap.com/mp3-vs-aacplus/>

23/10/2013

**[ 16.] Windows Media Audio (WMA)**

<http://www.dvdvideosoft.com/es/converter/audio/wma-audio-converter.htm>

23/10/2013

**[ 17.] Vs1063**

<http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Widgets/vs1063ds.pdf>

18/12/2013

**[ 18.] Adobe audition**

<http://www.slideshare.net/garuypuka/presentacion-24-3-11>

04/01/2014