



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

### **CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN**

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

TEMA

INTERCONEXIÓN Y SINCRONIZACIÓN INALÁMBRICA DE SEMÁFOROS  
MEDIANTE REDES WSN BASADOS EN MÓDULOS ZIGBEE

AUTOR: PABLO ALEJANDRO SALAZAR AMUY  
DIRECTOR: ING. DAVID NARVÁEZ

IBARRA – ECUADOR  
2014



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA  
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN  
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

La UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional determina la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dego sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

<b>DATOS DEL CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD</b>	1003229067		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	SALAZAR AMUY PABLO ALEJANDRO		
<b>DIRECCIÓN</b>	IBARRA - CALLE QUITO E ISLA FERNANDINA.		
<b>EMAIL</b>	pablo_a.s@hotmail.es		
<b>TELÉFONO FIJO</b>	062545468	<b>TELÉFONO MÓVIL</b>	0986157698
<b>DATOS DE LA OBRA</b>			
<b>TÍTULO</b>	INTERCONEXIÓN Y SINCRONIZACIÓN INALÁMBRICA DE SEMÁFOROS MEDIANTE REDES WSN BASADOS EN MÓDULOS ZIGBEE		
<b>AUTOR:</b>	SALAZAR AMUY PABLO ALEJANDRO		
<b>FECHA:AAAAMMDD</b>			
<b>PROGRAMA:</b>	PREGRADO		
<b>TÍTULO POR EL QUE SE ASPIRA:</b>	INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN		
<b>DIRECTOR:</b>	ING. DAVID NARVÁEZ		

Firma: \_\_\_\_\_

Nombre: Pablo Alejandro Salazar Amuy

Cedula: 1003229067

## 2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Pablo Alejandro Salazar Amuy, con cédula de identidad Nro. 1003229067, en calidad de Autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad de material y como apoyo a la educación, investigación y extensión, en concordancia con la ley de Educación Superior Artículo 144.

Firma: \_\_\_\_\_



Nombre: Pablo Alejandro Salazar Amuy

Cedula: 1003229067

Ibarra, Junio 20 de 2014



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, **Pablo Alejandro Salazar Amuy**, con cédula de identidad Nro. 100322906-7, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **"INTERCONEXIÓN Y SINCRONIZACIÓN INALÁMBRICA DE SEMÁFOROS MEDIANTE REDES WSN BASADOS EN MÓDULOS ZIGBEE"**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **Ingeniero en Electrónica y Redes de Comunicación** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pablo Salazar Amuy', is written over a horizontal line.

Firma

Nombre: Pablo Alejandro Salazar Amuy

Cedula: 1003229067

Ibarra a los 20 días del mes Junio de 2014



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CERTIFICACIÓN DEL ASESOR**

Certifico, que el presente trabajo de titulación **INTERCONEXIÓN Y SINCRONIZACIÓN INALÁMBRICA DE SEMÁFOROS MEDIANTE REDES WSN BASADOS EN MÓDULOS ZIGBEE** fue desarrollado en su totalidad por el Sr. Pablo Alejandro Salazar Amuy, siendo un trabajo inédito.

En la ciudad de Ibarra, Junio 20 de 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "David Narváez", is written over a faint circular stamp.

Ing. David Narváez  
DIRECTOR DE PROYECTO



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CONSTANCIAS**

Yo, Pablo Alejandro Salazar Amuy declaro bajo Juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través del presente declaro cedo los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Universidad Técnica del Norte, según lo establecido por la Ley de Propiedad intelectual, por su reglamento y por la institución vigente.

Ibarra, a los 20 días del mes de Junio de 2014

EL AUTOR:

---

Pablo Alejandro Salazar Amuy

CI: 1003229067



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### DEDICATORIA

*Dedico este proyecto de titulación a mis padres Martha y Oswaldo, por todo el esfuerzo y el cariño depositado en mí, quienes a través de sus consejos y palabras de ánimo han sabido guiarme.*



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### AGRADECIMIENTOS

*A Dios por acompañarme todos los días mi la vida y ayudarme en los momentos más difíciles, por darme la calma y la sabiduría cuando más lo necesite.*

*A mis padres por todo su apoyo y cuidado incondicional en todas las etapas de mi vida, por su lucha incansable, por su paciencia y amor, a mis hermanos por el ánimo y el cariño de todos los días.*

*Mi agradecimiento sincero al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra, por brindarme la oportunidad y el apoyo de desarrollar el proyecto de titulación, especialmente al Ing. Ramiro Chacón y el personal de la Dirección de Tránsito y Transporte.*

*A todos mis amigos y familiares quienes con su ayuda y amistad me han impulsado a seguir adelante a través de sus consejos y palabras de ánimo.*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>EXECUTIVE SUMMARY .....</b>	<b>xvii</b>
<b>PRESENTACIÓN.....</b>	<b>xviii</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO SITUACIONAL DE LA SINCRONIZACIÓN DE SEMÁFOROS 1</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 ANTECEDENTES DE LA SEMAFORIZACIÓN .....	2
1.2.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS SEMÁFOROS EN LA CIUDAD DE IBARRA.....	2
1.2.1.1 Características de los Semáforos.....	3
1.2.1.2 Sincronización de Semáforos .....	4
1.3 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	5
1.4 INFORMACIÓN PRIMARIA DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	7
1.4.1 SITUACIÓN ACTUAL MEDIANTE MEMORIA FOTOGRÁFICA.....	7
1.4.2 DATOS DE LA OPERATIVIDAD DEL TRANSPORTE PÚBLICO.....	8
1.4.3 CRUCE SEMAFORIZADO, FASES Y TIEMPOS .....	10
1.5 SENSORES DE TRÁFICO VEHICULAR .....	10
1.5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA DE SENSORES .....	10
1.5.2 DETECTORES DE LAZO INDUCTIVO.....	12
1.5.3 SENSORES MAGNÉTICOS.....	14
1.5.4 SENSORES INFRARROJOS .....	14
1.5.5 PROCESADOR DE IMÁGENES DE VIDEO .....	15
1.6 INGENIERÍA DE TRÁFICO, CÁLCULOS Y APLICACIONES AL DISEÑO .....	17
1.6.1 CONCEPTOS BÁSICO.....	17
1.6.2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE TRÁFICO.....	21
1.6.3 ASIGNACIÓN DE TIEMPOS PARA EL CAMBIO DE FASE .....	23
1.6.3.1 Sentido de Circulación Este – Sur .....	24
1.6.3.2 Sentido de Circulación Este – Sur .....	25
1.6.3.3 Sentido de Circulación Este – Oeste.....	26
1.6.3.4 Sentido de Circulación Este-Norte.....	27
1.6.3.5 Sentido de Circulación Norte-Oeste.....	28
1.6.3.6 Sentido de Circulación Norte-Sur .....	29
1.6.3.7 Sentido de Circulación Sur-Norte .....	30
1.6.3.8 Tabla de acceso .....	31
1.6.3.9 Diseño de los tiempo del semáforo.....	33
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>38</b>
<b>2. MÓDULOS INALÁMBRICOS Y SU APLICACIÓN EN EL PROYECTO.....</b>	<b>38</b>
2.1 TECNOLOGÍA INALÁMBRICA.....	38
2.1.1 TECNOLOGÍA BLUETOOTH .....	38
2.1.1.1 Capacidad de Transmisión y Versión.....	40
2.1.1.2 Características Técnicas.....	42
2.1.2 TECNOLOGÍA ZIGBEE .....	42
2.1.2.1 Tipos de Dispositivos de la Red Zigbee.....	43
2.1.2.2 Topología.....	44
2.1.3 TECNOLOGÍA 802.11 - WI-FI.....	45
2.1.3.1 Capa física 802.11.....	46

2.1.3.2	Tecnología de Transmisión .....	46
2.1.3.3	Rango y flujo de datos.....	47
2.2	COMPARACIÓN TÉCNICA Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA INALÁMBRICO .....	48
2.2.1	MÓDULO XBEE-PRO ZB SERIE 2.....	48
2.3	RED DE SENSORES INALÁMBRICOS WSN .....	50
2.3.1	DISPOSITIVOS SENSORES.....	50
2.3.2	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO DE LAS WSN .....	52
2.3.2.1	Tolerancia a fallas.....	52
2.3.2.2	Escalabilidad.....	53
2.3.2.3	Costes de producción.....	53
2.3.2.4	Limitaciones del Hardware.....	54
2.4	ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN DE LAS WSNS .....	54
2.5	ESTÁNDAR IEEE 802.15.4.....	56
2.5.2	CAPA FÍSICA DEL ESTÁNDAR IEEE 802.14.5 .....	56
2.5.2.1	Subcapa MAC .....	57
2.5.2.1.1	Acceso al canal.....	58
2.5.2.1.2	Modelo de transferencia de datos .....	59
2.5.2.2	Estructura de la trama.....	63
2.5.2.3	Seguridad.....	66
2.6	ESTÁNDAR ZIGBEE .....	69
2.6.2	LA CAPA DE RED .....	70
2.6.2.1	Descubrimiento de la ruta.....	71
2.6.3	LA CAPA DE APLICACIÓN .....	72
2.6.4	SEGURIDAD EN ZIGBEE.....	73
2.6.5	ENCAMINAMIENTO .....	74
2.7	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA .....	75
2.7.2	DESCRIPCIÓN GENERAL.....	75
2.7.3	REQUISITOS DEL SISTEMA .....	75
2.7.3.1	Requisitos en base al ambiente de operación.....	76
2.7.3.2	Requisitos en base a especificaciones de potencia .....	76
2.8	REQUISITOS EN BASE AL DESEMPEÑO SOLICITADO .....	76
2.8.2	APROXIMACIÓN EN BLOQUES.....	76
2.8.2.1	Subsistema de Procesamiento .....	79
2.8.2.2	Subsistema de Comunicación Remota inalámbrica .....	79
2.8.2.3	Subsistema de Respuesta.....	80
2.8.2.4	Subsistema de alimentación .....	80
2.8.2.5	Subsistema de Visualización.....	80
<b>CAPÍTULO III .....</b>		<b>82</b>
<b>3. DISEÑO DE LA RED WSN.....</b>		<b>82</b>
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL HARDWARE .....	82
3.1.1	SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO .....	82
3.1.1.1	Unidad de procesamiento.....	82
3.1.2	SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN REMOTA INALÁMBRICA.....	87
3.1.3	SUBSISTEMA DE RESPUESTA .....	91
3.1.4	SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN .....	93
3.1.5	SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN.....	94
3.2	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO GENERAL.....	97
3.3	DISEÑO DE LA PLACA DEL CIRCUITO IMPRESO .....	97

3.4	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FIRMWARE.....	99
3.4.1	PROGRAMA PRINCIPAL .....	100
3.4.2	SUBROUTINAS.....	102
3.4.2.1	Subrutina de encendido de las luces del semáforo.....	102
3.4.2.2	Subrutina de actualización de configuración de estados.....	103
3.4.2.3	Subrutina de ejecución de comandos.....	104
3.4.3	INTERRUPCIONES .....	106
3.4.3.1	Recepción de dato por el módulo UART .....	106
3.4.3.2	Desbordamiento de TIMER1 .....	107
3.4.3.3	Subrutina Ejecuta_configuración en el PIC18F4525.....	110
3.4.3.4	Subrutina Ejecuta_sincronización .....	110
3.4.3.5	Subrutina de conexión entre nodos (enlaza_nodo).....	111
	<b>CAPITULO IV.....</b>	<b>115</b>
	<b>4. IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>115</b>
4.1	PARAMETROS DE CONFIGURACIÓN.....	115
4.1.1	ESTABLECER EL TIPO DE NODO .....	115
4.1.2	IDENTIFICADOR DEL NODO (ni).....	116
4.1.3	IDENTIFICADOR DE RED (PAN iD).....	116
4.1.4	ESCANEO DEL CANAL (SC) .....	116
4.2	CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE PRO S2B .....	117
4.3	MONTAJE FÍSICO .....	120
4.4	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	123
4.4.1	PRUEBAS DE FIABILIDAD DE LA COMUNICACIÓN .....	124
4.5	PRUEBA DE CONSERVACIÓN DE SINCRONISMO.....	128
4.6	PRUEBAS DE COBERTURA .....	130
	<b>CAPITULO V.....</b>	<b>134</b>
	<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>134</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	134
5.2	RECOMENDACIONES .....	136
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>138</b>
	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS .....</b>	<b>140</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>141</b>
	CARACTERÍSTICAS MICROCONTROLADOR ATMEGA324P.....	141
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>143</b>
	CARACTERÍSTICAS Xbee-PRO .....	143
	<b>ANEXO C .....</b>	<b>144</b>
	FORMATO PARA RECOLECCION DE DATOS DEL FLUJO VEHICULAR .....	144
	<b>ANEXO D .....</b>	<b>145</b>
	FIRMWARE DE LOS MICROCONTROLADORES.....	145

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

Figura 1. Controlador Lógico Programable PLC de marca SIEMENS.....	3
Figura 2. Avenida Alfredo Pérez Guerrero de doble carril.....	3
Figura 3. Plano de la Calle Guaranda e intersecciones.....	5
Figura 4. Vista aérea de la Calle Maldonado e intersecciones.....	6
Figura 5. Intersecciones de estudio de tráfico.....	6
Figura 6. Vista de la Calle Santa Isabel y Guaranda.....	7
Figura 7. Vista de la calle Guaranda y San Salvador.....	7
Figura 8. Intersección entre Guaranda y Santa Isabel.....	10
Figura 9. Aplicación del sensor de lazo inductivo en peajes.....	12
Figura 10. Sistema detector de Lazo Inductivo.....	13
Figura 11. Ejemplo de instalación de un Lazo Inductivo.....	13
Figura 12. Imágenes de un Sistema de Procesamiento de Imágenes de Video.....	15
Figura 13. Representación de movimientos permitidos para una intersección.....	19
Figura 14. Movimientos de fase para una intersección con presencia de semáforo.....	19
Figura 15. Diagrama de fases para una intersección simple con semáforo.....	20
Figura 16. Movimientos de giro en las zonas de estudio.....	21
Figura 17. Movimientos permitidos en la intersección Guaranda y San Salvador.....	31
Figura 18. Fase I, II y III de los movimientos de circulación de los automóviles.....	31
Figura 19. Intervalo de cambio de fase.....	34

### CAPÍTULO II

Figura 20. Grupo SIG (Special Interest Group).....	39
Figura 21. Arquitectura Maestro – Esclavo de una piconet.....	39
Figura 22. Tipología de una red Bluetooth.....	40
Figura 23. Logo de la ZigBee Alliance.....	43
Figura 24. Logo de Wi-Fi Alliance.....	45
Figura 25. Capas del modelo OSI definidas por el estándar IEEE 802.11.....	47
Figura 26. Módulo Xbee Pro ZB S2.....	49
Figura 27. Arquitectura de un nodo sensor.....	51
Figura 28. Pila de Protocolo de la red de sensores.....	55
Figura 29. Trama MAC.....	57
Figura 30. Estructura de la Supertrama sin GTSs.....	58
Figura 31. Estructura Supertrama con GTS.....	59
Figura 32. Comunicación con un Coordinador en un PAN con beacon.....	60
Figura 33. Comunicación con un Coordinador en un PAN no beacon.....	60
Figura 34. Comunicación de un coordinador de una PAN con beacon habilitado.....	61
Figura 35. Comunicación desde un coordinador en una PAN no beacons.....	62
Figura 36. Vista esquemática de la trama Beacon y paquete de capa PHY.....	64
Figura 37. Vista esquemática de la trama de datos y el paquete PHY.....	65
Figura 38. Vista esquemática de la Trama ACK.....	65
Figura 39. Vista esquemática de la Trama de Instrucciones MAC.....	66
Figura 40. Capas del protocolo de red inalámbrica ZigBee.....	68
Figura 41. Roles de los dispositivos IEEE 802.15.4 y estandar ZigBee.....	71
Figura 42. Diagrama de bloques del sistema.....	78

### CAPÍTULO III

Figura 43. Circuito de conexión del microcontrolador.....	85
Figura 44. Conexión del módulo Xbee.....	89
Figura 45. Diagrama de red inalámbrica ZigBee.....	90
Figura 46. Conexión del driver de potencia ULN2803.....	92
Figura 47. Circuito regulador de voltaje de alimentación.....	93

Figura 48. Configuración electrónica del regulador LM317T .....	94
Figura 49. Diagrama de conexión pantalla LCD 8x2 y microcontrolador.....	95
Figura 50. Diagrama general del circuito .....	96
Figura 51. Diagrama de las rutas del circuito de uno de los nodos.....	98
Figura 52. Elementos que componen el dispositivo nodo. ....	98
Figura 53. PCB de la placa principal de uno de los nodos. ....	99
Figura 54. Diagrama de flujo del Programa Principal .....	101
Figura 55. Subrutina para el encendido de las luces del semáforo .....	103
Figura 56. Subrutina de actualización de configuración de estados.....	104
Figura 57. Subrutina de ejecución de comandos.....	105
Figura 58. Trama de sincronismo de Estado de Semáforo .....	106
Figura 59. Diagrama de flujo de Interrupción por recepción de dato en el módulo UART .....	107
Figura 60. Interrupción por desbordamiento de TIMER1.....	109
Figura 61. Subrutina de envío de información a los nodos secundarios .....	111
Figura 62. Subrutina de sincronización de semáforos .....	112
Figura 63. Subrutina de conexión entre nodos .....	113
Figura 64. Acceso directo del programa X-CTU .....	117
Figura 65. Módulo Xbee Explorer.....	117

#### **CAPÍTULO IV**

Figura 66. Ventana de la aplicación X-CTU.....	118
Figura 67. Información básica del módulo Xbee.....	118
Figura 68. Ventaja de configuración del módulo Xbee .....	119
Figura 69. Envío de mensaje para prueba de conexión .....	119
Figura 70. Respuesta de mensaje de prueba de conexión .....	120
Figura 71. Placa nodo secundario.....	120
Figura 72. Gabinete metálico .....	121
Figura 73. Elementos distribuidos en el tablero.....	122
Figura 74. Montaje de las placas y demás elementos en el gabinete metálico.....	122
Figura 75. Sistema operando en modo normal.....	123
Figura 76. Sincronización mediante la interfaz en Labview.....	125
Figura 77. Configuración para prueba de sincronización .....	126
Figura 78. Proceso de búsqueda de nodos .....	126
Figura 79. Envío de nuevas temporizaciones .....	126
Figura 80. Periodo de espera de 30 segundos.....	126
Figura 81. Información enviada por el nodo central.....	127
Figura 82. Trama de información con datos de temporización.....	127
Figura 83. Velocidad de respuesta al procesamiento en los nodos .....	129
Figura 84. Desfase entre procesos .....	130
Figura 85. Relación Distancia vs Error.....	131
Figura 86. Relación Distancia vs Potencia de la señal recibida .....	131
Figura 87. Comandos AT y respuestas del nodo.....	132

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO I

Tabla 1 Tipos de Semáforos y sus Características.....	4
Tabla 2 Transporte Público Urbano que circula dentro del área de análisis .....	8
Tabla 3 Ruta de transporte Línea 8 San Cristóbal – Talleres del ferrocarril.....	8
Tabla 4. Ruta de transporte público urbano Línea 11 Azaya – La Campiña .....	9
Tabla 5 Ruta de transporte público urbano Línea 10 San Antonio - Azaya.....	9
Tabla 6 Fortalezas y Debilidades en la Tecnología de Sensores.....	11
Tabla 7 Comparación de sensores en función del área de estudio.....	17
Tabla 8 Promedio de autos que circulan por la intersección Guaranda-Santa Salvador .....	22
Tabla 9 Promedio de autos que circulan por la intersección Guaranda-Santa Isabel.....	23
Tabla 10 Sentido de Circulación Este – Sur .....	24
Tabla 11 Sentido de Circulación Sur – Oeste .....	25
Tabla 12 Sentido de circulación Este – Oeste .....	26
Tabla 13 Sentido de Circulación Este-Norte .....	27
Tabla 14 Sentido de circulación Norte – Oeste.....	28
Tabla 15 Sentido de Circulación Norte-Sur.....	29
Tabla 16 Sentido de Circulación Sur-Norte.....	30
Tabla 17 Estadística de giros realizados por los automóviles .....	31
Tabla 18 Asignación de tiempos para cada fase .....	37

### CAPÍTULO II

Tabla 19 Versiones de Bluetooth .....	41
Tabla 20 Características Técnicas Bluetooth.....	41
Tabla 21 Características de ZigBee.....	42
Tabla 22 Variantes de 802.11 .....	47
Tabla 23 Comparativa de las Tecnologías Inalámbricas .....	48
Tabla 24 Comparación entre módulos Xbee Pro S1 y S2 .....	49
Tabla 25 Características de modulación de la capa física.....	68
Tabla 26 Información transmitida dentro de la red WSN .....	80

### CAPÍTULO III

Tabla 27 Comparación de microcontroladores .....	83
Tabla 28 Configuración de los puertos del microcontrolador ATmega 324P .....	86
Tabla 29 Comparación de módulos inalámbricos.....	87
Tabla 30 Comparación de drivers de potencia .....	91
Tabla 31 Comparación de dispositivos de visualización.....	95
Tabla 32. Parámetros de configuración de los módulos del microcontrolador .....	102
Tabla 33 Representación de los datos de trama .....	108
Tabla 34. Modos de funcionamiento del semáforo .....	108

### CAPÍTULO III

Tabla 35 Elementos que componen las placas de los nodos secundarios .....	121
Tabla 36 Tiempo promedio de conexión.....	123
Tabla 37 Tiempo de temporización para prueba .....	125
Tabla 38 Calibración de temporización entre nodos secundarios .....	128
Tabla 39 Calibración de temporizadores entre nodo Principal y nodo Secundario 1 .....	128
Tabla 40 Calibración de temporizadores entre nodo Principal y nodo Secundario 2.....	129
Tabla 41 Pruebas de cobertura.....	131
Tabla 42 Comandos AT y respuesta del nodo.....	132

## ÍNDICE DE ECUACIONES

### CAPÍTULO I

Ecuación 1	Calculo para determinar el Volumen de hora pico promedio .....	25
Ecuación 2	Calculo para determinar el Factor de la hora de máxima demanda .....	25
Ecuación 3	Calculo para determinar la posibilidad de giros en la intersección .....	32
Ecuación 4	Calculo para determinar el volumen crítico .....	32
Ecuación 5	Calculo para determinar los niveles de saturación .....	32
Ecuación 6	Calculo para determinar el Flujo de saturación.....	33
Ecuación 7	Calculo para determinar el intervalo de cambio de fase .....	34
Ecuación 8	Calculo para determinar el Tiempo Total del periodo por ciclo.....	35
Ecuación 9	Calculo para determinar el periodo de Verde Total .....	36
Ecuación 10	Calculo para determinar el periodo de verde de fase .....	36
Ecuación 11	Calculo para determinar el periodo de rojo de fase .....	37
Ecuación 12	Calculo para comprobar la concordancia de los tiempos .....	37

### CAPÍTULO II

Ecuación 13	Calculo para determinar la Tolerancia a fallas de las redes WSN.....	53
Ecuación 14	Calculo de escalabilidad de las redes WSN .....	53

### CAPÍTULO III

Ecuación 15	Calculo del voltaje de alimentación del módulo ZigBee.....	90
Ecuación 16	Calculo del voltaje de salida del LM317T.....	93

### CAPÍTULO III

Ecuación 17	Calculo del tiempo promedio de sincronización.....	124
-------------	--	-----

## RESUMEN

El presente proyecto propone el diseño y construcción de un sistema de transferencia de información de sincronismo de semáforos a través de la tecnología inalámbrica, como una solución alternativa a los problemas de semaforización existentes en las zonas alejadas de la parte céntrica de la ciudad de Ibarra.

El objetivo es crear un sistema capaz de resolver los problemas de sincronización que afectan al flujo de tráfico vehicular, mediante dispositivos fáciles de implementar y de bajo costo, además de incorporar las funcionalidades de las redes inalámbricas. Con el fin de obtener datos fiables para el desarrollo del dispositivo, se realiza un análisis de tráfico vehicular en la zona de estudio que facilita la cuantificación de las variables que afectan directamente al tráfico y de igual manera se analiza la Tecnología ZigBee.

Una vez establecida la estructura del hardware y los elementos que componen los dispositivos, se realiza la lógica del funcionamiento que permita ejecutar las funciones requeridas mediante la representación de diagramas.

Posteriormente se pone en funcionamiento el sistema con la finalidad de evaluar el desempeño de los dispositivos y obtener datos que permitan concluir posibles fallas y debilidades del sistema y sus correspondientes sugerencias de mejora.

## **EXECUTIVE SUMMARY**

This project proposes the design and construction of a system of information transfer of synchronization of semaphores through wireless technology, as an alternative solution to the traffic problems in areas away from the central part of the city of Ibarra.

The objective is to create a system capable of solving synchronization problems that affect vehicular traffic flow through devices easy to implement and low cost, as well as incorporating the functionalities of wireless networks. In order to obtain reliable data for the development of the device, a traffic analysis is carried out in the study area that facilitates the quantification of variables that directly affect traffic and similarly the ZigBee technology is analyzed

Once established the structure of hardware and the elements that make up the device, the operating logic is represented by diagrams which allow to understand how the system performs its functions.

Subsequently, puts in functioning the system in order to evaluate the performance of devices and get data allowing to conclude failures and weaknesses of the system and their corresponding suggestions for improvement.

## **PRESENTACIÓN**

El creciente aumento de parque automotor en la ciudad de Ibarra ha evidenciado la necesidad de implementar un sistema de semaforización que beneficie el flujo de tráfico vehicular, estos nuevos sistemas permiten obtener datos del tráfico que son utilizados como base para mejorar los problemas de congestión en especial en la parte céntrica de la ciudad. Los actuales sistemas deben responder a los requerimientos de cada ciudad, además de ser sencillos de implementar, gestionar y manipular por parte de los encargados de este tan responsable trabajo que es controlar que el tráfico vehicular no cree mayores caos.

Los sistemas inalámbricos brindan muchos beneficios en este tipo de aplicaciones; permiten extender la red de semáforos sin la necesidad de tender cables que perjudican al ornamento de la ciudad, de igual manera los sistemas basados en microcontroladores brindan la oportunidad de crear sistemas a la medida de las necesidades y con pocos recursos, convirtiéndose en dos elementos muy útiles para el desarrollo de nuevos proyectos tecnológicos.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO Y ESTADO SITUACIONAL DE LA SINCRONIZACIÓN DE SEMÁFOROS**

El contenido de este capítulo tiene como propósito explicar de manera breve y precisa la información necesaria para el desarrollo del proyecto, la misma que incluye información respecto al lugar donde se realizará un análisis del tráfico vehicular, conceptos básicos sobre Ingeniería de Tráfico, la situación actual de la sincronización de los semáforos a cargo de la Dirección de Tránsito y Transporte del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra (GAD-IBARRA) y las diversas tecnologías de sensores utilizadas para detectar tráfico vehicular.

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Desde sus primeros inicios el hombre ha visto la necesidad de desplazarse hacia otros lugares con el propósito de satisfacer sus necesidades ya sea de alimento, exploración, diversión además de trabajo y negocios, a este movimiento de personas y bienes se le denomina transporte.

El aumento excesivo en el medio de transporte en una ciudad tiene como consecuencia directa el incremento de la congestión vehicular, principalmente en ciudades en vías de desarrollo como es el caso de la Ciudad de Ibarra. Las consecuencias más evidentes de la congestión vehicular son la pérdida de tiempo, accidentes de tránsito y daños a terceros.

El uso de dispositivos para regular el tránsito, como son los semáforos, han permitido mantener orden en las vías, además de garantizar un considerable nivel de seguridad tanto al peatón como al conductor del vehículo, sin embargo se requiere sistemas más complejos y que se ajusten a las condiciones actuales que demanda la ciudad y su desarrollo.

## **1.2 ANTECEDENTES DE LA SEMAFORIZACIÓN**

Ibarra es una ciudad pequeña considerada como el centro de desarrollo económico, educativo y científico de la zona norte del Ecuador, de acuerdo a los resultados del Censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador, el cantón cuenta con cerca de 181.175 habitantes, de estos la mayoría se encuentran en el área administrativa urbana, los cuales se movilizan a diferentes lugares de trabajo o centros de estudio mediante transporte público o privado; sin embargo, su estructura vial carece de grandes avenidas sobre todo en el centro de la ciudad y lo que es aún peor no existe espacio para la ampliación de calles o avenidas debido a las estructuras existentes, tales como casas y edificios.

El tráfico vehicular en el centro de la ciudad de Ibarra, es controlado por semáforos ubicados en casi todas las intersecciones, siendo las calles Simón Bolívar, José Olmedo, Antonio José de Sucre, Sánchez y Cifuentes y Av. Pérez Guerrero las más congestionadas en las horas denominadas pico<sup>1</sup>. El Departamento de Señalización y Semaforización de Imbabura (DSSI) estuvo a cargo de la señalización vial y el mantenimiento de los semáforos en la ciudad de Ibarra hasta el 19 de Octubre del 2010 para luego y por disposición del Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) designar al GAD-IBARRA, mediante su Dirección de Tránsito y Transporte la administración de la semaforización; al igual que el DSSI en su momento el GAD-IBARRA no dispone de un sistema de control de semáforos o algún tipo de gestión de los mismos.

### **1.2.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS SEMÁFOROS EN LA CIUDAD DE IBARRA**

Es importante conocer el funcionamiento y características de los actuales semáforos implementados en el centro y gran parte de la ciudad, con el propósito

---

<sup>1</sup> La hora punta u hora pico es la denominación que se le da al periodo de tiempo, no necesariamente una hora, en el que regularmente se producen congestiones. Por lo general la congestión se produce en horarios de ingreso y salida de oficinas y centros de estudios.

de comprender la importancia y necesidad del sincronismo de los semáforos en la ciudad.

### 1.2.1.1 Características de los Semáforos

Hasta mediados del año 2013, la ciudad contaba con semáforos en su mayoría operando con el Controlador Lógico Programable PLC LOGO! 230RC de marca SIEMENS que puede observarse en la Figura 1.



Figura 1. Controlador Lógico Programable PLC de marca SIEMENS

Fuente: El Autor.

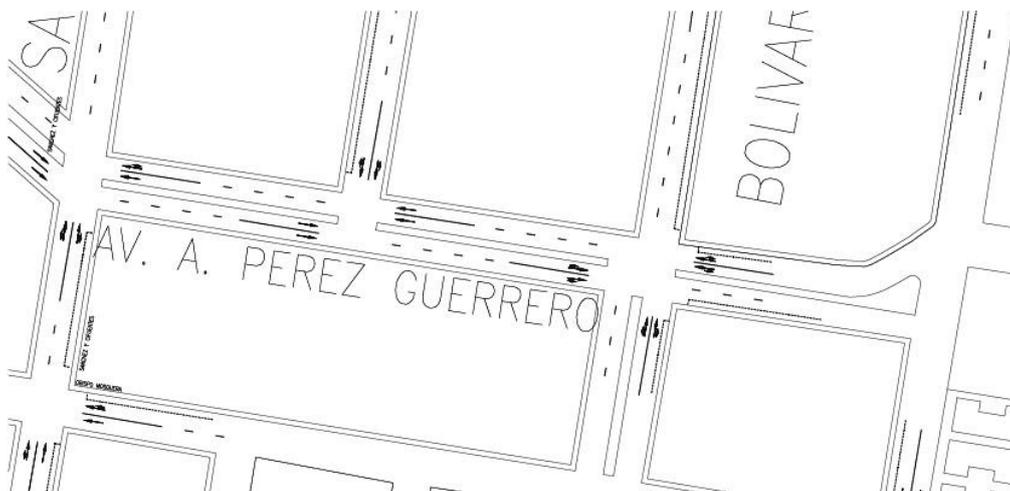


Figura 2. Avenida Alfredo Pérez Guerrero de doble carril

Fuente: Plano de Semaforización del Gobierno Autónomo Descentralizado de Ibarra 2013

Cada controlador PLC estaba enclavado dentro de un gabinete metálico de color blanco, ubicado en ciertas intersecciones; y contaba con cuatro salidas digitales utilizadas para encender o apagar las lámparas de señalización del semáforo mediante relés. Estos controladores manejaban sus intersecciones de manera individual y en un solo sentido de tráfico.

Actualmente el GAD-IBARRA, ha implementado un nuevo sistema de semaforización, el cual utiliza cámaras de video para monitorear el tráfico vehicular y controladores basados en microprocesadores de la familia ARM. El nuevo sistema está conectado con cada uno de los cerca de 132 controladores, ubicados en la mayor parte de la ciudad, en especial la parte céntrica. A diferencia de sus antecesores, estos controladores tiene la capacidad de sincronizarse de manera remota, además de poder operar de manera independiente y según la demanda del tráfico en el que se encuentren ubicados.

Tabla 1

*Tipos de Semáforos y sus Características*

Fuente: Manual4\_semaforos. Recuperado el 29 de junio del 2012, de [http://www.subtrans.gob.cl/subtrans/doc/MANUAL4\\_semaforos.pdf](http://www.subtrans.gob.cl/subtrans/doc/MANUAL4_semaforos.pdf)

De Tiempo Programado Fijo	Activado por el Tránsito	Interconectados y coordinados	Combinación
Puede tener varios programas, que se activan a diferentes horas del día para adaptarse a la demanda.	La duración de cada fase y su orden dependen de la demanda de tránsito en la intersección.	Cada semáforo tiene su propio programa pero obedecen a un control central que los coordina	Son sistemas coordinados que además pueden responder a la demanda.
La secuencia de fase responde a un programa fijo específico.	La demanda se identifica mediante detectores.		

La Tabla 1 describe los tipos de semáforos más comunes además de sus características más relevantes. Por su programación, los semáforos en su mayoría se clasifican como Semáforos de Tiempo Programado Fijo; este tipo de semáforos se caracterizan porque la secuencia de fase mostrada al tránsito, cambia de acuerdo a un programa fijo especificado por el programador. Los semáforos pueden programarse para actuar de manera diferente a determinadas horas del día con el fin de adaptarse mejor a la demanda.

### 1.2.1.2 Sincronización de Semáforos

La sincronización de semáforos que utilizaba el DSSI con los anteriores controladores era de forma manual. El personal mediante el análisis del tráfico en una determinada intersección, modifican los tiempos de cambio de fases y ciclo

del semáforo, considerando el nivel de tráfico en las horas pico. Para el caso en el que se requiere modificar los tiempos a lo largo de toda la calle o avenida, el personal debía reprogramar cada uno de los controladores.

El esfuerzo y el tiempo empleado para el sincronismo de los semáforos se evidenciaban en una mejor circulación del tránsito vehicular; sin embargo, también era cierto que este sincronismo se mantenía por poco tiempo. Mediante la sincronización de los semáforos el personal aplica el efecto Ola Verde<sup>2</sup> para reducir los tiempos de circulación y optimizar el uso de la vía, este efecto es perjudicado por la desincronización de los semáforos causando más contrariedades de las que se presentan en vías que no están semaforizadas.

### 1.3 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en el noreste de la ciudad de Ibarra, en el barrio Azaya de la Parroquia Guayaquil de Alpachaca, con una longitud de cerca de 450 metros de longitud entre las intersecciones Isla Santa Isabel, Isla San Salvador y Av. José Miguel Vaca. En la Figura 3 y 4, se resalta la zona de estudio.



Figura 3. Plano de la Calle Guaranda e intersecciones

Fuente: Plano de Semaforización del Gobierno Autónomo Descentralizado de Ibarra 04/12/2012

<sup>2</sup> Efecto producido en una avenida donde los semáforos están en un sincronismo tal que los vehículos que circulan por ella siempre encuentran luz verde.



Figura 4. Vista aérea de la Calle Maldonado e intersecciones

Fuente: Aplicación online Google Earth. (2013). Recuperado el 10 de enero de 2013, de <http://maps.google.com.ec/maps?hl=es&tab=ll>

La calle Guaranda es de doble sentido de un solo carril y una de las principales calles de entradas hacia el Barrio Azaya, en la Figura 5 se resaltan las intersecciones de interés, las mismas que son: Guaranda e Isla Santa Isabel, Guaranda e Isla San Salvador, Guaranda y Av. José Miguel Vaca.

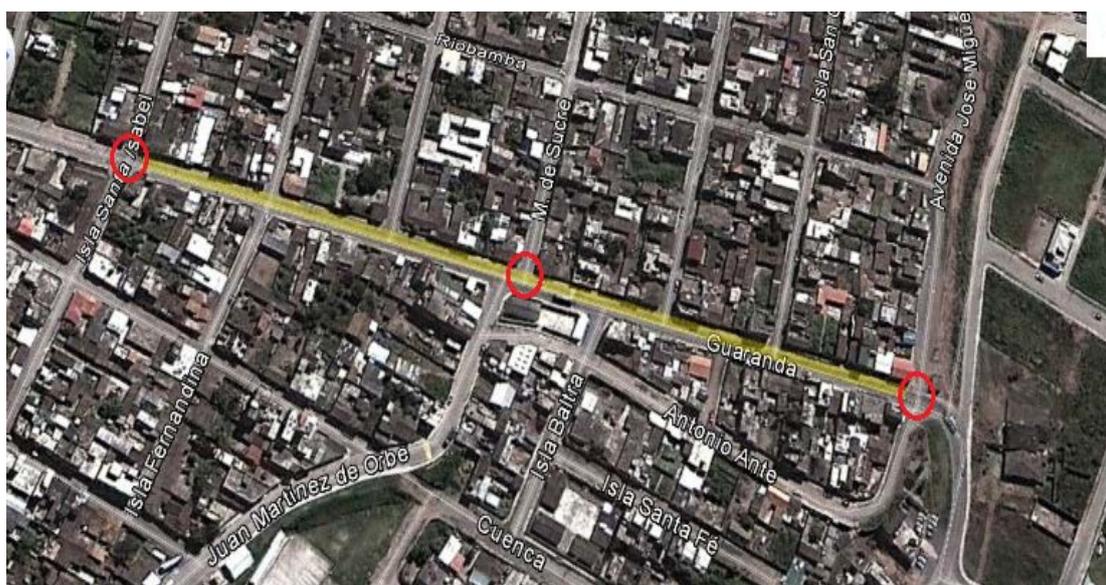


Figura 5. Intersecciones de estudio de tráfico

Fuente: Aplicación online Google Earth. (2013). Recuperado el 10 de enero de 2013, de <http://maps.google.com.ec/maps?hl=es&tab=ll>

## 1.4 INFORMACIÓN PRIMARIA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Igual que las características y descripción de los semáforos es importante conocer en qué situación se encuentran las vías donde se desarrolla el proyecto, por tal motivo, a continuación se presenta información respecto al tema.

### 1.4.1 SITUACIÓN ACTUAL MEDIANTE MEMORIA FOTOGRÁFICA

La información obtenida permite conocer la situación actual en el momento de estudio, esta información sirve para determinar las variables de estudio, analizando los sentidos de circulación y detección de cruces que cuentan con dispositivos controladores del tránsito (semáforo). Las Figura 6 y Figura 7, muestran la situación actual de la calle Guaranda.



*Figura 6.* Vista de la Calle Santa Isabel y Guaranda

Fuente: El Autor.



*Figura 7.* Vista de la calle Guaranda y San Salvador

Fuente: El Autor.

## 1.4.2 DATOS DE LA OPERATIVIDAD DEL TRANSPORTE PÚBLICO

Con el propósito de conocer la movilidad del sistema en materia de Transporte Público Urbano la Tabla 2 muestra una estadística de las rutas de transporte que circulan por la vía.

Tabla 2

*Transporte Público Urbano que circula dentro del área de análisis*

Fuente: El Autor.

Cooperativas de Transporte		
28 de Septiembre	San Miguel de Ibarra	Tiempo de espera
San Antonio – Azaya	-	10 min
Azaya – La Campiña	-	5 min
San Cristóbal – T. Ferrocarril	-	45 min

Tabla 3

*Ruta de transporte Línea 8 San Cristóbal – T. del ferrocarril*

Fuente: Lista completa de rutas Coop. 28 de Septiembre. Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel Ibarra.

Línea 8: San Cristóbal - Talleres del Ferrocarril	
Inicio: San Cristóbal Km: 14,78	Retorno: Yahuarcocha KM: 15,77
San Cristóbal	Yahuarcocha
Av. Atahualpa	Antigua vía Yahuarcocha
Av. Teodoro Gómez	Y Mirador Olivo Alto
Av. Eugenio Espejo	Calle S/N
Av. Fray Vacas Galindo	Centro turístico san miguel arcángel
Bolivia	Vía San Miguel Arcángel
Av. Víctor m. Guzmán	Av. 17 de Julio
Juan Martínez de Orbe	Dr. Luis Madera
<b>Guaranda</b>	Panamericana Norte
Av. José M. Vaca	Av. Cristóbal de Troya
Av. Jaime Roldos	Av. Jaime Roldos
Av. Cristóbal de Troya	Av. José M. Vaca
Gral. José m. Córdova	<b>Guaranda</b>
Av. 17 de Julio	Juan Martínez de Orbe
Vía San Miguel Arcángel	Av. Victor M. Guzmán
Centro Turístico San Miguel Arcángel	Av. Fray Vacas Galindo
:	:
:	:

Nota: No se ha incluido todo el circuito de calles debido a que el interés es resaltar la zona de estudio. Hasta el presente año 2013, no ha habido modificaciones considerables en la ruta y se mantiene la calle Guaranda dentro del circuito.

Tabla 4

*Ruta de transporte público urbano Línea 11 Azaya – La Campiña*

Fuente: Lista completa de rutas Coop. 28 de Septiembre. Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel Ibarra.

Línea 11: Azaya - La Campiña	
Inicio: Lomas de Azaya Km: 10,01	Retorno: La Campiña Km: 7,97
Lomas de azaya	La Primavera
Quito	La Campiña
Babahoyo	Rio Chinchipe
Latacunga	Av. El Retorno
Puyo	Av. Teodoro Gómez
Quito	Sánchez y Cifuentes
I. Santa Isabel	Grijalva
Guaranda	Av. Eloy Alfaro
Av. José Miguel Vaca	Redondel de Ajavi
Av. Víctor m. Guzmán	Av. Víctor M. Guzmán
Redondel de Ajavi	Av. José Miguel Vaca
Av. Cristóbal de Troya	Guaranda
Troya	I. Santa María

Tabla 5

*Ruta de transporte público urbano Línea 10 San Antonio - Azaya*

Fuente: Lista completa de rutas Coop. 28 de Septiembre. Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel Ibarra.

Línea 10: San Antonio – Azaya	
Inicio: San Antonio Km: 14,41	Retorno: Parque Alpachaca Km: 13,89
27 de Noviembre	De las Golondrinas
Luis E. Cevallos	Tungurahua
Simón Bolívar	Puyo (parque Alpachaca)
Av. Pérez Guerrero	Babahoyo
Sucre	Cuenca
Obispo Mosquera	Juan Martínez de Orbe
Salinas	Guaranda
Mejía	Av. José Miguel Vaca
Sánchez y Cifuentes	Av. Jaime Roldos
Av. Jaime Roldos	Av. Víctor M. Peñaherrera
Av. Jaime Miguel Vaca	F. Villamar
Guaranda	Olmedo
Juan Martínez de Orbe	Troya
Cuenca	Sucre
⋮	⋮
⋮	⋮

Como se puede apreciar en las Tablas 3, 4 y 5, en total transitan tres rutas de transporte público urbano por la calle Guaranda, y no siempre circulan de forma ordenada convirtiéndose en el principal motivo de congestión.

### 1.4.3 CRUCE SEMAFORIZADO, FASES Y TIEMPOS

En el momento de realizar la obtención de datos de tráfico vehicular, la intersección Guaranda e Isla Santa Isabel era la única que constaba de semaforización, la Figura 8, muestra los movimientos que se permite en los cambios de fase.

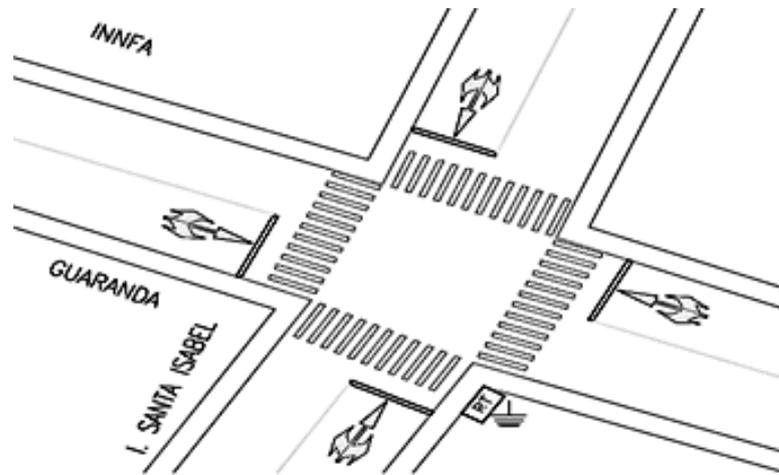


Figura 8. Intersección entre Guaranda y Santa Isabel

Fuente: Plano de Ubicación de semáforos Sección 1, Unidad Municipal de Tránsito y Transporte, Municipio de Ibarra

## 1.5 SENSORES DE TRÁFICO VEHICULAR

El uso de la tecnología para diversas actividades diarias se ha vuelto tan común y necesario que ciertas actividades no se podrían realizar sin la presencia de estas y una de ellas es la lectura o medición del flujo tráfico vehicular que se lo puede realizar gracias al desarrollo de sensores destinados para este propósito.

### 1.5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA DE SENSORES

La Tabla 6 muestra las fortalezas y debilidades de la tecnología de sensores respecto a la instalación, parámetros de medición y rendimiento ante condiciones climáticas, variación de la luz y el flujo de tráfico. Todos los sensores

en la lista pueden operan tanto en el día como en la noche. Los sensores de detección de tráfico pueden soportar múltiples carriles, múltiples zonas de detección con uno o más dispositivos.

Tabla 6

*Fortalezas y Debilidades en la Tecnología de Sensores*

Fuente: Adaptado de Department of Transportation, U.S (2006). Traffic Detector Handbook. Georgetown Pike.

Tecnología	Fortalezas	Debilidades
Lazo Inductivo	<p>Diseño flexible, soporta gran variedad de aplicaciones.</p> <p>Tecnología conocida.</p> <p>Proporciona parámetros básicos de tráfico (ej. Volumen, presencia, velocidad y baches).</p> <p>No se ve muy afectado por la lluvia, niebla y nieve.</p> <p>Buena precisión para conteo de datos.</p> <p>Estándar común para la obtención precisa de medidas de uso de vía.</p>	<p>La instalación requiere cortar la calzada.</p> <p>La mala instalación afecta a la vida útil de la calzada.</p> <p>Instalación y mantenimiento requieren el cierre de la vía.</p> <p>El desempeño se ve afectado por el tráfico y temperatura.</p> <p>Es necesario múltiples lazos para el monitoreo y localización.</p> <p>Poca precisión para detectar diversos tipos de vehículos.</p>
Magnético	<p>Pueden ser usados donde los lazos no son factibles (ej. Cubierta de puentes)</p> <p>Algunos modelos son instalados debajo de las calzadas sin tener que cortar la misma.</p> <p>Menos susceptibles que los lazos inductivos.</p>	<p>La instalación requiere cortar la calzada o una tediosa instalación bajo el pavimento.</p> <p>No se puede detectar la pausa de vehículos a menos que se use un sensor especial y un software para procesar la señal.</p>
Radar Microondas	<p>No se ve afectado por las condiciones ambientales en rangos relativamente cortos.</p> <p>Medición directa de la velocidad.</p> <p>Puede operar en múltiples carriles.</p>	<p>El sensor Doppler de onda Continua no puede detectar cuando se detiene un auto</p>
Infrarrojo Activo (Radar Laser)	<p>Transmite múltiples beams para una medición precisa de la posición del vehículo, velocidad y clase.</p> <p>Puede operar en múltiples carriles.</p>	<p>La operación puede ser afectada por la niebla cuando la visibilidad es menor a 6m o por nieve repentina.</p> <p>Instalación y mantenimiento, incluyendo la limpieza de la lente, requiere el cierre de la vía.</p>
Ultrasónico	<p>Puede operar en múltiples carriles.</p> <p>Capaz de detectar vehículos que sobrepasan la altura.</p>	<p>Los cambios de temperatura y vientos extremos pueden afectar el rendimiento.</p> <p>Largos periodos de repetición del pulso pueden degradar la medida de ocupación de autopistas.</p>
Procesamiento de Imágenes de Video	<p>Monitoreo de múltiples carriles y múltiples zonas de detección zona/carril.</p> <p>Facilidad de añadir y modificar zonas de detección.</p> <p>Proporciona gran cobertura de detección al cambiar a otra cámara para recolectar la información.</p>	<p>El rendimiento puede ser afectado por niebla, nieve y lluvia; sombra de vehículos; contraste vehículos/carretera; agua, manchas y telarañas en la lente.</p> <p>Se requiere montar la cámara de 9 a 15m para optimizar la detección de presencia y la medición de velocidad.</p> <p>Costos elevados cuando se tiene muchas zonas de detección o se requiere datos específicos.</p>

El uso de sensores puede resultar costoso si se tiene grandes zonas que requieran ser analizadas o en casos donde se necesita implementar estrategias de gestión de tráfico. Es necesario un mínimo Ancho de Banda, para comunicaciones donde solo se transmiten datos y comandos de control entre el sensor, controlador y el centro de gestión de tráfico. Por el contrario, se requiere un gran ancho de banda para la transmisión de video en tiempo real a una tasa de 30 *frames/sec*<sup>3</sup>. Para la transmisión de grandes cantidades de datos es necesario un mayor ancho de banda y el medio que soporte tales capacidades como es el caso de la fibra óptica que puede soportar varios gigabit por segundo (Gbits/s), en el caso del video en tiempo real se puede aprovechar mejor el canal de transmisión al comprimir las imágenes. A medida que se aumenta el número y dependiendo del tipo de sensores, es necesario aumentar el ancho de banda. Las siguientes tecnologías de sensores presentan mayor posibilidad de aplicación al proyecto tanto por costo como por disponibilidad en el mercado, de forma que se analizan brevemente a continuación.

### 1.5.2 DETECTORES DE LAZO INDUCTIVO

Este tipo de sensores son ampliamente utilizados en la lectura de datos en tiempo real como flujo de tráfico vehicular, la velocidad de un automóvil, el uso de lugares de parqueo, la longitud y el tipo de auto.



Figura 9. Aplicación del sensor de lazo inductivo en peajes

Fuente: MAPS Informática Industrial. (2010). Recuperado el 21 de noviembre de 2012, de <http://www.maps.es/fntesp/LazoInductivo.htm>

<sup>3</sup> Hace referencia al número de imágenes dentro de un periodo de tiempo (1 seg), para producir el efecto de movimiento.

Los datos obtenidos pueden ser utilizados para actuar sobre dispositivos de control de tránsito, alertar sobre un exceso de velocidad, información del flujo vehicular entre otros. Mediante un lazo simple<sup>4</sup> se puede obtener datos sobre el tiempo de ocupación o el número de autos.

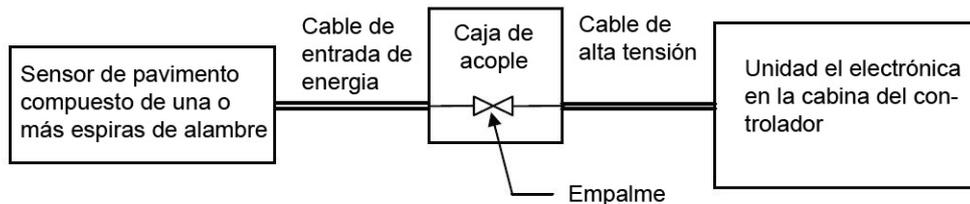


Figura 10. Sistema detector de Lazo Inductivo

Fuente: Adaptado de Department of Transportation, U.S (2006). Traffic Detector Handbook. Georgetown Pike.

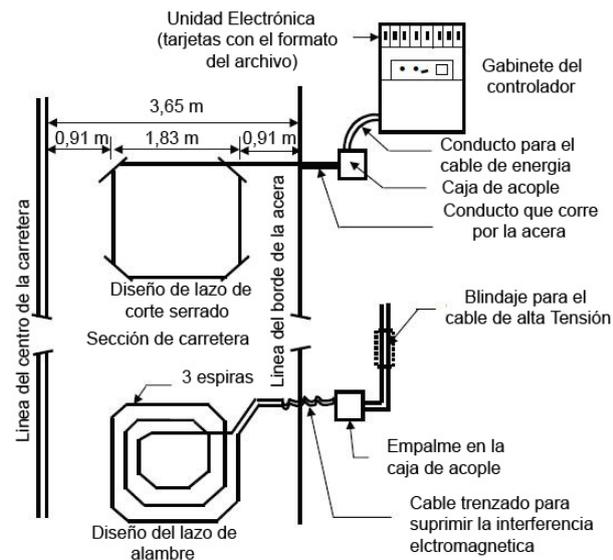


Figura 11. Ejemplo de instalación de un Lazo Inductivo

Fuente: Adaptado de Department of Transportation, U.S (2006). Traffic Detector Handbook. Georgetown Pike.

Un detector de lazo inductivo puede sensar la presencia de un objeto metálico conductivo debido a la corriente inducida en el objeto, la misma que reduce la inductancia en lazo. Los sensores de lazo inductivo son instalados en las superficies de las autopistas. Este tipo de detectores están formados por cuatro componentes: un lazo de alambre, el mismo que puede ser de una o más

<sup>4</sup> Sensor inductivo que posee un solo lazo (espiras) para realizar la detección.

espiras embebidas en el pavimento de la autopista, un alambre de alimentación que va desde el lazo hasta la caja de acceso, un cable de alimentación principal que conecta el alambre de alimentación y la caja de acceso hasta el controlador y el gabinete del controlador donde se encuentra una unidad electrónica como se muestra en la Figura 11.

El controlador reconoce un vehículo cuando la unidad eléctrica detecta un incremento en la frecuencia del oscilador, esto se produce cuando un vehículo pasa por encima o dentro del área encerrada por el lazo, provocando la reducción en la inductancia del lazo y un desbalance en el circuito sintonizador del cual el lazo es parte. La implementación de los lazos inductivos se realiza cortando una cuneta en el pavimento y colocando una o más espiras de alambre dentro de la cuneta y por último se cubre con material sellador. La Figura 11, muestra lo descrito anteriormente.

### **1.5.3 SENSORES MAGNÉTICOS**

Los sensores magnéticos son dispositivos pasivos que detectan la presencia de objetos compuestos por material ferroso a través de las perturbaciones calzadas en los campos magnéticos de la Tierra.

Dos tipos de sensores de campos magnéticos son usados para la medición de parámetros de flujo de tráfico. Los detectores magnéticos son insertados horizontalmente bajo la calzada. La principal desventaja de este tipo de sensores es que solo permiten entregar datos del paso de vehículos pero no del tiempo que ocupan, por tal motivo su uso es limitado a aplicaciones específicas.

### **1.5.4 SENSORES INFRARROJOS**

Los sensores infrarrojo, tanto activos como pasivos, son fabricados para aplicaciones de monitoreo del flujo de tráfico. Los sensores infrarrojos activos

irradian las zonas de detección transmitiendo energía infrarroja de baja potencia a través de diodos laser los cuales operan en la región cercana a los 0.85 nm del espectro electromagnético.

### 1.5.5 PROCESADOR DE IMÁGENES DE VIDEO

La necesidad de monitorear y vigilar el tráfico dio paso a la introducción de cámaras de video debido a la habilidad de transmitir imágenes en un circuito cerrado de televisión que podían ser analizadas por un operador. Actualmente los sistemas modernos utilizan el procesamiento de imágenes de video para automáticamente analizar sucesos de interés y extraer información para la vigilancia y gestión del tráfico, tal como se puede ver en la Figura 12.



Figura 12. Imágenes de un Sistema de Procesamiento de Imágenes de Video

Fuente: Traficon-VIP-IP. (2011). Recuperado el 21 de noviembre de 2012, de <http://www.globalinteractivegroup.com/base/pdf/traficon-VIP-IP.pdf>

Un sistema típico de **Procesamiento de Imágenes de Video** (conocidos como **VIP** por sus siglas en ingles *Video Imagen Processing*) consta de una o más cámaras, un computador para la digitalización y análisis de las imágenes, y el software para interpretar las imágenes y convertirlas en datos de flujo de tráfico. Un VIP puede reemplazar varios lazos inductivos, puede detectar vehículos en más de una carril e incluso su costo puede ser menor, algunos sistemas VIP procesan datos desde más de una cámara.

Parte de la energía es reflejada o dispersada por el chasis de los autos hacia los sensores. La señal modulada impide interferencias de otras fuentes de energía infrarroja, incluyendo la luz solar. Dos sistemas transmisión-recepción miden la velocidad de los vehículos y la altura de los vehículos. A diferencia de los activos, los sensores pasivos no emiten energía por sí mismos, por tal motivo los sensores detectan la energía proveniente de dos fuentes:

- La energía emitida de los vehículos y otros objetos dentro de su campo de visión.
- La energía emitida por la atmosfera y reflejada por los vehículos y otros objetos dentro de campo de visión.

La energía capturada mediante los sensores infrarrojos tanto activos como pasivos, es enfocada por un sistema óptico hacia materia sensible a luz infrarroja, este material transforma la energía emitida y reflejada en señales eléctricas. El uso de uno o varios sensores descritos depende de las condiciones que presenta el área de estudio, para lo cual las Figuras 6 y 7 permiten concluir lo siguiente:

- Las calles del sector están recubiertas de adoquín tipo romano para pavimento.
- No existen elementos que obstruyan la visión como árboles o edificios.
- No existen fábricas o industrias que causen ruido o emitan señales de radiofrecuencia.
- Fácil acceso a la energía eléctrica.

De acuerdo a estas referencias se ha elaborado la Tabla 7, que toma en cuenta las condiciones del área.

De la Tabla 7, se puede determinar que el uso de sistemas VIP es la mejor opción de sensor para implementar, sin embargo, el costo que este implica esta fuera del alcance del presupuesto del proyecto, además es necesario equipos adicionales que son requeridos para este tipo de sensores y que son de

sistemas propietarios los cuales no brindan los datos ni conexiones necesarias para su manipulación. Una explicación más detallada del porque no se usa ningún tipo de sensor, puede verse en el capítulo de conclusiones.

Tabla 7

*Comparación de sensores en función del área de estudio*

Sensor Tipo	Lazo Inductivo	Radar Microondas	Infrarrojo	Ultrasónico	VIP
Requerimientos					
Sobre Asfalto	✓				
Sobre Adoquín					
Paso a desnivel/Poste		✓	✓	✓	✓
Viable	x	✓	✓	✓	✓
Escalable	x	x	x	x	✓
Disponibilidad	x	x	x	x	✓
Costo	Medio	Alto	Medio - Bajo	Medio	Alto

Nota: VIP= Video and Image Processing, Procesamiento de Imagen y Video

## 1.6 INGENIERÍA DE TRÁFICO, CÁLCULOS Y APLICACIONES AL DISEÑO

La ingeniería de Tráfico es importante dentro del desarrollo del sistema, por lo cual es necesario explicar lo que involucra tal ingeniería, sin ahondar demasiado en el asunto, pues es un tema muy extenso, a continuación se presenta una breve explicación de conceptos importantes que se necesitan comprender y recordar.

### 1.6.1 CONCEPTOS BÁSICO

La Ingeniería de Tráfico es una carrera completa que requiere muchos años de estudio como toda ingeniería, sin embargo para el presente proyecto solo se emplea para determinar de forma efectiva los tiempos base del semáforo, por tal motivo es preciso definir ciertos términos utilizados en el desarrollo del documento los cuales serán utilizados en referencias próximas para el análisis de volúmenes de tránsito vehicular, estos conceptos son:

- Volúmenes de tránsito. Número de autos que transitan en una determinada vía durante un periodo determinado.
- Densidad de Tránsito. Número de vehículos que ocupan una unidad de longitud de vía en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro.
- Intensidad o Volumen Medio Diario (VMD). Volumen total que transita por una sección transversal o por un segmento de vía en uno o ambos sentidos durante un año dividido entre el número de días en el año.
- Volumen Horario de Diseño. Volumen horario futuro utilizado para diseño.
- Distribución Direccional. Volumen durante una hora en particular en el sentido predominante expresado como un porcentaje del volumen en ambos sentidos durante la misma hora.
- Composición del Tránsito. Vehículos pesados o de transporte público expresados (excluyendo vehículos livianos, con una relación peso/potencia similar a vehículos privados) como un porcentaje del volumen horario de diseño.
- Volumen de la hora pico (VHP). Es el número máximo de vehículos que pasan por un punto en una carretera durante un periodo de 60 minutos consecutivos.

En cada uno de los accesos de una intersección, el flujo total de vehículos es dividido en diferentes fases de movimiento, estas fases permiten el desplazamiento específico de vehículos. A su vez los movimientos reciben el derecho al uso del espacio por medio de una señal en verde o de siga, mientras que otros son detenidos con una señal en rojo o de alto. Al analizar el control de intersecciones que hacen uso de semáforos y en los requisitos para la distribución de sus tiempos y sincronización, es preciso definir ciertos términos básicos o parámetros de tiempos para impedir posibles confusiones.

- Indicación de señales. La activación de una de las lámparas del semáforo o la combinación de varias de ellas.

- Ciclo o longitud de Ciclo (C). Tiempo empleado para que los indicadores del semáforo efectúe una revolución completa. En otras palabras es el tiempo que se demora en mostrar las señales visuales de verde-ámbar-rojo-verde.
- Movimiento. Maniobra o conjunto de maniobras de un mismo acceso que tienen el derecho de paso paralelamente y forman una misma fila, Figura 13 y 14.

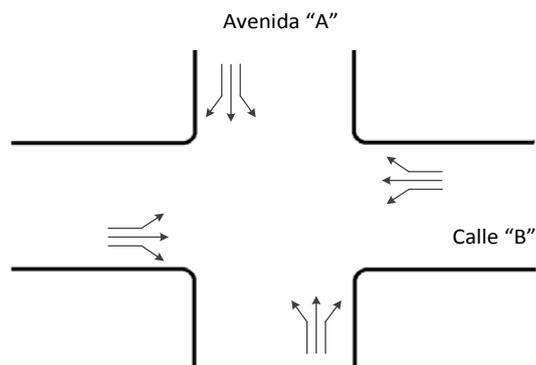


Figura 13. Representación de movimientos permitidos para una intersección

Fuente: El Autor.

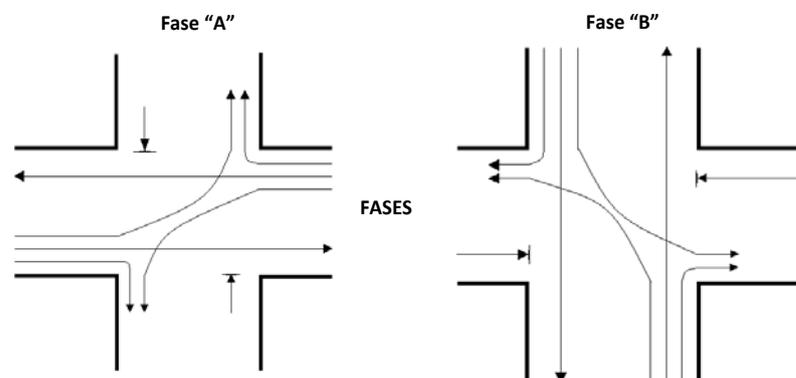


Figura 14. Movimientos de fase para una intersección con presencia de semáforo

Fuente: El Autor.

- Intervalo. División del ciclo en la que la indicación de la señal del semáforo no varía. Ejemplo: intervalo en rojo, intervalo en ámbar o intervalo en verde.
- Fase (F). Parte del ciclo concedido a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos. Una fase puede significar un solo movimiento

vehicular, un solo movimiento peatonal, o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales, una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que ganan. Un movimiento pierde el derecho de paso en el momento de aparecer la indicación ámbar, Figura 15.

- Secuencia de fases. Orden establecido en que ejecutan las fases del ciclo.
- Reparto: una parte de longitud del ciclo medida en porcentaje asignado a cada una de las diversas fases.
- Intervalo verde. Intervalo de derecho de paso durante el cual la indicación de señal es verde.
- Intervalo de cambio. Periodo en el que se visualiza la indicación ámbar del semáforo después del intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.
- Intervalo de despeje o de todo rojo. Es el tiempo que se muestra la señal rojo-stop para el tránsito que espera la señal de ocupación de la vía. Comparte además la fase que recibe el derecho de paso verde y el periodo de ámbar adicional para permitir a los vehículos despejar la intersección. Es usado también para crear una fase que permita el paso de peatones.
- Intervalo de cambio de fase. Intervalo el cual puede estar constituido por un intervalo de cambio ámbar o contener un intervalo anexo de despeje todo rojo.

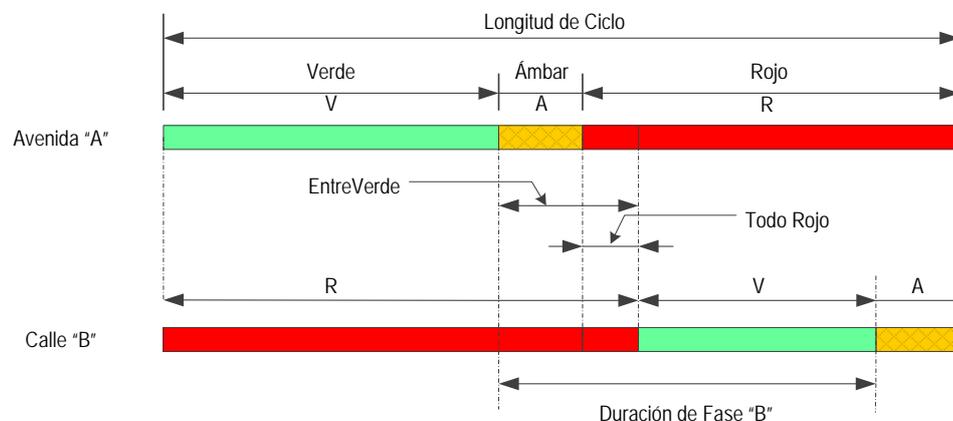


Figura 15. Diagrama de fases para una intersección simple con semáforo

Fuente: Adaptado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

## 1.6.2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE TRÁFICO

En el desarrollo de sistemas que precisan el control de tráfico vehicular, se hace necesario un estudio previo con el fin de determinar valores reales que serán utilizados en mecanismos, para el sincronismo de dispositivos que gestionan el flujo vehicular, de esta manera el presente subtema tiene su base en este criterio y a continuación se muestra este proceso.

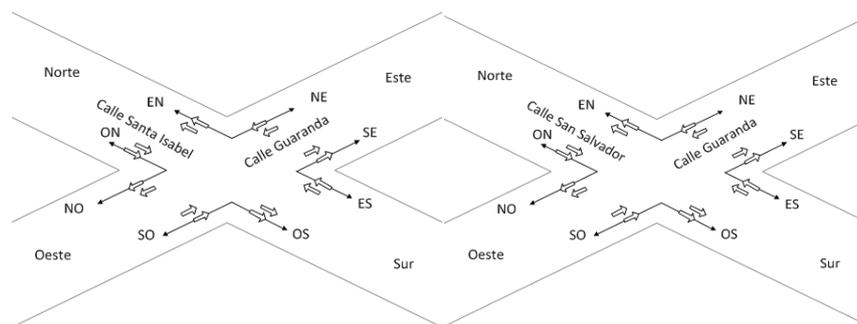


Figura 16. Movimientos de giro en las zonas de estudio

Fuente: El Autor.

Para obtener datos reales del número de autos que circulan en las intersecciones Guaranda – Santa Isabel y Guaranda – San Salvador, se procedió a tomar muestras en intervalos de 15 minutos, que corresponden a cuatro bloques de muestras por hora, esto se realizó por un periodo de dos semanas del 28 de enero de 2013 al 8 de febrero del mismo año, durante los horarios de 07:00 am a 18:00 pm en el día, los datos obtenidos se promediaron y los resultados se muestran en la Tabla 8 y Tabla 9, el formato para la toma de las muestras, así como parte de la demostración de este proceso se puede apreciar en el Anexo C. En la intersección de la calle Guaranda con San Salvador, se tiene un pico en el tráfico vehicular en los horarios de 7:15 a 7:30 am y de 13:15 a 13:30 pm, estos resultados tienen su justificación por ser horarios de ingreso y salida de instituciones educativas y oficinas. De la misma manera se puede observar que el número de automóviles que circulan por este sector disminuye considerablemente llegada las 10:00 am, hasta antes de los horarios de entrada y salida mencionados, lo mismo sucede en la tarde durante las horas de 14:00 pm a 13:00 pm. Lo mencionado puede revisarse en la Tabla 8.

Tabla 8

*Promedio de autos que circulan por la intersección Guaranda-San Salvador*

Fuente: El Autor.

Calle Guaranda y San Salvador						
Hora	Vehículos Livianos		Vehículos Pesados		Motores	Total
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.	M.	
06:00-06:15	10	38	2	6	9	65
06:15-06:30	32	55	3	8	13	111
06:30-06:45	44	78	1	7	17	147
06:45-07:00	43	102	3	8	20	176
07:00-07:15	48	121	5	6	26	206
07:15-07:30	68	127	7	8	18	228
07:30-07:45	65	77	4	9	12	167
07:45-08:00	52	71	6	6	16	151
08:00-08:15	41	73	9	7	13	143
08:15-08:30	45	62	11	8	15	141
08:30-08:45	46	52	6	7	13	124
08:45-09:00	44	52	5	6	12	119
09:00-09:15	29	36	5	7	7	84
09:15-09:30	33	40	7	7	7	94
09:30-09:45	43	40	3	8	5	99
09:45-10:00	28	51	3	6	7	95
10:00-10:15	29	35	8	7	2	81
10:15-10:30	14	22	3	6	1	46
10:30-10:45	30	68	4	10	5	117
10:45-11:00	53	45	5	7	6	116
11:00-11:15	26	30	2	6	7	71
11:15-11:30	37	63	0	8	7	115
11:30-11:45	42	47	3	6	8	106
11:45-12:00	38	41	4	9	4	96
12:00-12:15	35	55	7	5	10	112
12:15-12:30	47	56	4	7	7	121
12:30-12:45	50	68	7	8	11	144
12:45-13:00	37	71	5	6	17	136
13:00-13:15	51	72	10	7	22	162
13:15-13:30	78	70	5	6	14	173
13:30-13:45	66	58	5	7	7	143
13:45-14:00	27	45	6	7	10	95
14:00-14:15	19	18	5	5	11	58
14:15-14:30	22	20	6	4	9	61
14:30-14:45	22	21	7	5	10	65
14:45-15:00	19	24	5	3	8	59
16:00-16:15	40	42	4	8	10	104
16:15-16:30	27	49	5	7	5	93
16:30-16:45	45	61	3	7	6	122
16:45-17:00	29	41	2	7	3	82
17:00-17:15	32	46	4	5	12	99
17:15-17:30	42	38	4	7	5	96
17:30-17:45	38	59	4	6	4	111
17:45-18:00	41	63	5	8	9	126

Este mismo comportamiento se observa en la intersección entre Guaranda y Santa Isabel, durante los dos periodos del día.

Tabla 9

*Promedio de autos que circulan por la intersección Guaranda-Santa Isabel*

Fuente: El Autor.

Calle Guaranda y Santa Isabel						
Hora	Vehículos Livianos		Vehículos Pesados		Motores	Total
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.	M.	
07:00-07:15	20	18	3	6	12	59
07:15-07:30	19	20	2	7	9	57
07:30-07:45	23	21	2	7	10	63
07:45-08:00	19	24	3	8	8	62
12:00-12:15	15	18	3	7	6	49
12:15-12:30	17	20	4	6	7	54
12:30-12:45	13	16	3	7	6	45
12:45-13:00	12	21	2	7	10	52
13:00-13:15	16	21	3	8	7	55
13:15-13:30	17	22	3	6	6	54
13:30-13:45	16	20	2	7	8	53
13:45-14:00	31	39	6	5	7	88
14:00-14:15	26	25	2	2	8	63
14:15-14:30	24	26	2	4	5	61
14:30-14:45	13	35	2	3	6	59
14:45-15:00	14	31	2	4	4	55
15:00-15:15	19	28	2	4	6	59
15:15-15:30	10	30	2	4	4	50
15:30-15:45	12	22	5	4	9	52
15:45-16:00	27	33	1	4	5	70
16:00-16:15	38	10	3	8	10	69
16:15-16:30	32	11	3	7	7	60
16:30-16:45	37	15	2	6	6	66
16:45-17:00	34	13	6	7	8	68
17:00-17:15	29	14	2	7	7	59
17:15-17:30	28	18	2	8	8	64
17:30-17:45	26	25	2	6	5	64
17:45-18:00	21	12	3	7	6	49

### 1.6.3 ASIGNACIÓN DE TIEMPOS PARA EL CAMBIO DE FASE

Con el fin de determinar los tiempos efectivos para su aplicación en los semáforos, se han realizado los siguientes cálculos que permiten una circulación adecuada del tráfico, la intersección Guaranda – San Salvador se ha tomado

como referencia para los cálculos debido a que presenta mayor flujo de tráfico. Este proceso se presenta a continuación:

### 1.6.3.1 Sentido de Circulación Este – Sur

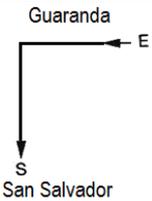
Tomando siempre a la calle Guaranda como referencia, este movimiento es permitido dentro de la intersección con la calle San Salvador. De la Tabla 10 se puede concluir que a partir de las 7:30 a 8:30 am se produce un incremento de automóviles por lo que se toma este periodo como hora pico para realizar los cálculos respectivos.

Tabla 10

*Sentido de Circulación Este – Sur*

Fuente: El Autor..

Hora	Vehículos Livianos		Vehículos Pesados		Motores	Total	VHP
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.	M.		
7:15/7:30	47	69	4	8	10	138	620
7:30/7:45	61	115	7	6	15	204	710
7:45/8:00	53	77	6	6	21	163	650
8:00/8:15	67	70	3	9	17	166	648
8:15/8:30	45	62	5	7	13	132	568
8:30/8:45	39	60	9	6	10	124	556
8:45/9:00	41	53	10	7	10	121	457
9:00/9:15	35	41	6	9	7	98	335
9:15/9:30	29	52	6	8	5	100	469
9:30/9:45	31	36	9	6	8	90	343
9:45/10:00	25	40	4	6	3	78	288
10:00/10:15	20	31	8	8	9	76	322
10:15/10:30	17	45	3	10	5	80	320
10:30/10:45	33	26	11	6	4	80	
10:45/11:00	25	30	8	8	9	80	
11:00/11:15	33	47	6	7	3	96	
Sub Total	601	854	105	117	149	1826	



- Hora Pico (HP): HP= 7:30-8:30
- Sumatoria de Hora pico:  $\sum$  HP = 710+650+648+568=2576
- Volumen de hora pico promedio (VHP<sub>prom</sub>):

$$VHP_{prom} = \frac{(\sum HP)}{NoH} \quad (1)$$

Dónde:  $\sum HP$  = Sumatoria de volúmenes de horas pico y  $NoH$  = Numero de muestras por hora. De tal manera si se aplica la Ecuación 1 se obtiene:

$$VHP_{prom} = 2576/4 = 644$$

– Factor de la hora de máxima demanda (FHMD):

$$FHMD = \frac{\text{volumen durante la hora pico}}{4 \times \text{volumen durante el pico de 15 minutos dentro de la hora pico}} \quad (2)$$

$$FHMx = 644/4(710) = 0,226$$

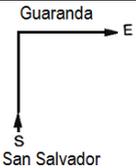
### 1.6.3.2 Sentido de Circulación Este – Sur

Tabla 11

Sentido de Circulación Sur – Oeste

Fuente: El Autor..

Hora	Vehículos Pesados		Vehículos Pesado		Motores	Total	VHP
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.	M.		
7:15/7:30	107	92	6	9	3	217	857
7:30/7:45	103	78	7	9	15	212	725
7:45/8:00	113	94	5	7	9	228	946
8:00/8:15	85	65	8	6	19	183	679
8:15/8:30	90	81	5	10	7	193	796
8:30/8:45	48	66	3	10	14	141	488
9:00/9:15	23	44	7	6	14	94	340
9:30/9:45	49	95	6	10	15	175	646
9:45/10:00	64	72	9	6	8	159	742
10:00/10:15	24	73	10	7	21	135	632
10:15/10:30	71	82	10	10	18	191	757
10:30/10:45	75	61	7	10	3	156	
10:45/11:00	79	43	10	7	19	158	
11:00/11:15	18	51	8	8	11	96	
Sub Total	1098	1118	117	131	212	2676	



(1) Ecuación 1. Calculo para determinar el Volumen de hora pico promedio. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

(2) Ecuación 2. Calculo para determinar el Factor de la hora de máxima demanda. Recuperado Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

Para el sentido de circulación Este-Sur el incremento de autos se ve reflejado en el periodo de 7:15 a 8:15 am.

- Hora Pico: HP= 7:15-8:15
- Sumatoria de Hora pico:  $\sum HP=857+725+946+679=3207$
- Volumen de hora pico promedio: VHPprom=3207/4=801,75
- Factor hora pico: FHP=801.75/4(946) =0.211

### 1.6.3.3 Sentido de Circulación Este – Oeste

Al igual que en el sentido anterior, la hora pico se presenta muy temprano por la mañana de 7:15 a 8:15, donde la mayoría de las personas salen a sus lugares de trabajo e instituciones educativas.

Tabla 12

*Sentido de circulación Este – Oeste*

Fuente: El Autor..

Hora	Vehículos Livianos		Vehículos Pesados		motores	Total	VHP
	Pub.	Priv.	Car	Pas.	Mt.		
7:15/7:30	117	87	3	9	21	237	1034
7:30/7:45	116	69	9	10	11	215	792
7:45/8:00	92	66	9	6	5	178	595
8:00/8:15	111	77	4	7	20	219	720
8:15/8:30	73	18	10	6	17	124	479
8:30/8:45	83	80	9	10	20	202	926
8:45/9:00	64	24	4	7	3	102	463
9:00/9:15	44	16	8	9	10	87	329
9:15/9:30	81	53	10	7	13	164	753
9:30/9:45	94	91	5	10	15	215	867
9:45/10:00	77	82	3	10	4	176	777
10:00/10:15	23	66	7	6	6	108	407
10:15/10:30	59	54	9	7	11	140	498
10:30/10:45	35	27	7	6	5	80	
10:45/11:00	27	87	8	7	12	141	
11:00/11:15	20	48	9	7	12	96	
Sub Total	1116	945	114	124	185	2484	

Guaranda  
 ← E

- Hora Pico: HP= 7:30-8:30
- Sumatoria de Hora pico:  $\sum HP=1034+792+595+720=3141$

- Volumen de hora pico promedio:  $VHP_{prom}=525/4=785,25$
- Factor hora pico:  $FHP=785.25/4(38) =0.189$

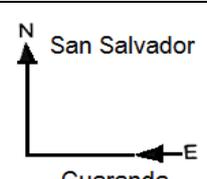
### 1.6.3.4 Sentido de Circulación Este-Norte

Tabla 13

*Sentido de Circulación Este-Norte*

Fuente: El Autor..

Hora	Vehículos livianos		Vehículos Pesados		Motores	Total	VHP
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.	Mot.		
7:15/7:30	40	31	4	7	5	87	397
7:30/7:45	44	42	9	10	8	113	477
7:45/8:00	17	74	7	10	6	114	494
8:00/8:15	65	43	5	6	15	134	568
8:15/8:30	21	46	3	6	13	89	494
8:30/8:45	85	54	5	9	13	166	855
8:45/9:00	48	81	7	10	15	161	644
9:00/9:15	27	64	11	8	15	125	445
9:15/9:30	55	17	6	10	10	98	494
9:30/9:45	65	91	6	6	10	178	626
9:45/10:00	96	83	8	7	12	206	855
10:00/10:15	74	82	5	9	5	175	694
10:15/10:30	84	100	11	10	15	220	937
10:30/10:45	60	82	3	8	13	166	
10:45/11:00	55	75	9	9	8	156	
11:00/11:15	70	33	10	8	10	131	
Sub Total	906	998	109	133	173	2319	



Un menor tráfico vehicular pero igual considerable, se presenta durante las 9:30 hasta las 10:30 de la mañana. Estos valores decaen drásticamente en temporadas de vacaciones y durante los fines de semana. Este sentido corresponde al movimiento de la calle Guaranda hacia el centro del barrio Azaya por la calle Isla San Salvador, sin embargo es más utilizada para la salida de los autos de los habitantes del lugar.

- Hora Pico:  $HP= 9:30-10:30$
- Sumatoria de Hora pico:  $\sum HP=626+855+694+937=3112$
- Volumen de hora pico promedio:  $VHP_{prom}=3112/4=778$
- Factor hora pico:  $FHP=778/4(937) =0.207$

### 1.6.3.5 Sentido de Circulación Norte-Oeste

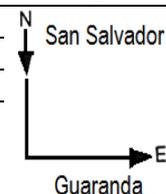
Este sentido de circulación maneja un número relativamente menor a los demás, debido a que se lo emplea como retorno hacia el centro del barrio Azaya lo que es poco habitual, sin embargo como se muestra en la Tabla 14 la hora pico se establece entre las 7:15 y 8:45 de la mañana.

Tabla 14

*Sentido de circulación Norte – Oeste*

Fuente: El Autor..

Hora	Vehículos Livianos		Vehículos Pesados		Motores	Total	VHP
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.	Mot.		
7:15/7:30	107	100	3	10	14	234	874
7:30/7:45	77	95	4	8	6	190	776
8:15/8:30	117	73	8	8	17	223	835
8:30/8:45	40	31	8	8	10	97	363
8:45/9:00	55	79	7	6	8	155	634
9:00/9:15	25	40	4	8	13	90	372
9:15/9:30	40	18	6	8	16	88	345
9:30/9:45	39	18	5	7	4	73	278
9:45/10:00	48	61	7	9	3	128	477
10:00/10:15	16	56	8	6	8	94	382
10:15/10:30	45	39	3	6	16	109	424
10:30/10:45	53	61	9	10	15	148	
10:45/11:00	39	41	6	10	14	110	
11:00/11:15	77	85	6	7	15	190	
Sub Total	778	797	84	111	159	1929	



- Hora Pico: HP= 7:15-8:15
- Sumatoria de Hora pico:  $\sum HP=874+776+835+363=2848$
- Volumen de hora pico promedio: VHPprom=2848/4=712
- Factor hora pico: FHP=712/4(874) =0.203

Es necesario considerar todos los sentidos de la intersección para obtener datos concluyentes y proceder a analizarlos, a pesar de parecer complicados de interpretar no son más que procesos repetitivos como se observa en el siguiente acceso.

### 1.6.3.6 Sentido de Circulación Norte-Sur

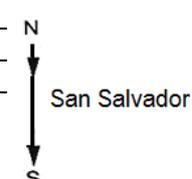
Esta es una ruta alternativa para la salida del barrio y para quienes tiene la intención de evitar congestión y los semáforos presentes en las calles principales. La hora pico se encuentra entre las 9:15 a 10:15 am.

Tabla 15

*Sentido de Circulación Norte-Sur*

Fuente: El Autor..

Hora	Vehículos Livianos		Vehículos Pesados		Motores	Total	VHP
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.	Mot.		
7:15/7:30	35	32	10	7	9	93	387
7:30/7:45	28	71	3	10	4	116	585
7:45/8:00	55	52	4	9	5	125	509
8:00/8:15	68	81	5	10	3	167	694
8:15/8:30	43	31	6	6	11	97	350
8:30/8:45	44	74	4	7	11	140	555
8:45/9:00	28	53	5	6	16	108	487
9:00/9:15	74	47	3	10	16	150	643
9:15/9:30	67	83	7	10	13	180	736
9:30/9:45	90	99	8	8	10	215	794
9:45/10:00	77	109	9	6	12	213	910
10:00/10:15	97	97	5	7	8	214	812
10:15/10:30	51	18	7	9	12	97	393
10:30/10:45	43	75	6	8	6	138	
10:45/11:00	40	55	11	10	11	127	
11:00/11:15	30	78	8	7	4	127	
Sub Total	870	1055	101	130	151	2307	



- Hora Pico: HP= 9:15 - 10:15
- Sumatoria de Hora pico:  $\sum HP=736+794+910+812=3252$
- Volumen de hora pico promedio: VHPprom=3252/4=813
- Factor hora pico: FHP=813/4(910) =0.223

El siguiente sentido es el último en analizar, no es necesario comenzar empezar por alguno en especial, esto depende del criterio de la persona que realiza el aforo de los datos.

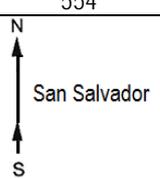
### 1.6.3.7 Sentido de Circulación Sur-Norte

Tabla 16

*Sentido de Circulación Sur-Norte*

Fuente: El Autor..

Hora	Vehículos Livianos		Vehículos Pesados		Motores	Total	VH
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.	Mot.		
7:15/7:30	36	57	4	6	12	115	528
7:30/7:45	72	43	8	6	8	137	495
7:45/8:00	24	77	8	9	9	127	453
8:00/8:15	22	47	10	10	9	98	400
8:15/8:30	17	53	5	9	12	96	350
8:30/8:45	21	86	10	10	16	143	615
8:45/9:00	30	81	3	6	7	127	485
9:00/9:15	99	69	6	8	7	189	808
9:15/9:30	100	89	9	6	5	209	790
9:30/9:45	66	87	4	9	7	173	681
9:45/10:00	73	104	3	8	9	197	714
10:00/10:15	43	32	6	8	8	97	459
10:15/10:30	61	65	7	6	3	142	554
10:30/10:45	66	48	3	8	3	128	
10:45/11:00	59	74	9	8	6	156	
11:00/11:15	34	15	3	6	12	70	
Sub Total	823	1027	98	123	133	2204	



Es el sentido de circulación inverso al anterior mencionado, es utilizado por aquellas personas provenientes del centro de la ciudad, en la mayoría transportes de microempresas. La hora pico se establece entre las 9:00 a 10:00 am.

- Hora Pico: HP= 9:00 - 10:00
- Sumatoria de Hora pico:  $\sum HP=808+790+681+714=2993$
- Volumen de hora pico promedio: VHPprom= $2993/4=748.25$
- Factor hora pico: FHP= $748.25/4(808) =0.231$

Otro dato importante que se debe conocer es acceso de los vehículos por los cuatro accesos con sus respectivos giros. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

**1.6.3.8 Tabla de acceso**

Tabla 17

*Estadística de giros realizados por los automóviles*

Fuente: El Autor.

	Giro	Publico	Privado	Carga	Pasajero	Motores	Total	
N	S	255	474	10	0	15	754	956
	E	37	70	6	0	11	124	
	O	24	45	2	0	7	78	
S	E	106	60	17	2	18	203	1154
	O	391	211	5	0	17	624	
	N	106	197	11	0	13	327	
E	O	682	367	15	6	23	1093	1535
	N	66	36	6	0	7	115	
	S	200	107	9	2	9	327	
O	N	156	84	2	0	6	248	1270
	S	31	18	9	0	17	75	
	E	316	588	14	6	23	947	

Nota: Para llenar la tabla de acceso se procede a calcular el por ciento de cada giro por el total ya afectado.

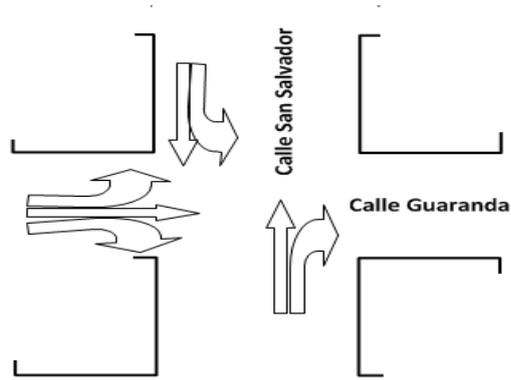


Figura 17. Movimientos permitidos en la intersección Guaranda y San Salvador

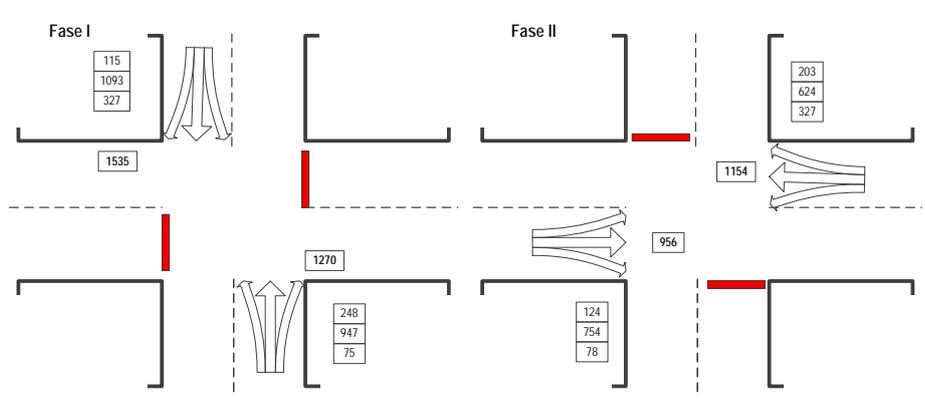


Figura 18. Fase I, II y III de los movimientos de circulación de los automóviles  
Fuente: El Autor.

$$G_x = \% \times TI \quad (3)$$

Si este giro dobla a la derecha se multiplica 1.4 y si dobla a la izquierda por 1.6

$$G_x = \% \times TI (1.4) \text{ Derecha}$$

$$G_x = \% \times TI (1.6) \text{ Izquierda}$$

### – Volumen Crítico

El valor del volumen crítico, se obtiene de dividir el total de giros realizados en una cada fase para el número de carriles en el que se desarrolla la fase.

$$NA = \frac{\text{Cantidad de giros en la fase}}{\text{Número de Carriles}} \quad (4)$$

Donde  $NA$ , no es más que una muletilla para denotar la división. Aplicando la Ecuación 4, se obtiene:

$$NA^1 = \frac{1535 + 1270}{2} = 1402,5$$

$$NA^2 = \frac{956 + 1154}{2} = 1055$$

– Saturación (S): este valor se obtiene de la sumatoria de los volúmenes críticos.

$$S = \sum NA \quad (5)$$

$$S = 1402,5 + 1055 = 2457,5$$

<sup>(3)</sup> Ecuación 3. Calculo para determinar la posibilidad de giros en la intersección. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

<sup>(4)</sup> Ecuación 4. Calculo para determinar el volumen crítico. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

<sup>(5)</sup> Ecuación 5. Calculo para determinar los niveles de saturación. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

- **Flujo de saturación (Fs):** se determina mediante la división de cada valor crítico obtenido para el valor de saturación, se obtiene entonces el flujo de saturación medido en segundos.

$$F_s = \frac{NA}{S} \quad (6)$$

$$F_{s1} = \frac{1402,5}{2457,5} = 0.57 \text{ seg}$$

$$F_{s2} = \frac{1055}{2457,5} = 0.43 \text{ seg}$$

A manera de comprobación, la suma de los flujos de saturación debe ser igual a la unidad (1).

### 1.6.3.9 Diseño de los tiempo del semáforo

Para el diseño de los tiempos en un semáforo es necesario saber ciertos factores con el fin de llevar a cabo el proceso, como por ejemplo: las velocidades a utilizar en el diseño del semáforo son: 40 km/h para el acceso EO-OE y 30 km/h para el acceso SN-NS, estos valores satisfacen las leyes de tránsito dentro del perímetro urbano en Ecuador, la variación de los mismo, afectan directamente al tiempo de encendido de la luz preventiva ámbar la que varía entre 3 y 5 segundos para esta cantidad de flujo vehicular. Los valores deben ser llevados a m/s, de lo que se obtiene que:

$$40 \text{ km/s} = 11.11 \text{ m/s}$$

$$30 \text{ km/h} = 8.33 \text{ m/s}$$

El Ancho de la calle es igual a la distancia que hay de un contén al otro de dicho tramo a cruzar.

$$N-S = 6 \text{ m}$$

$$E-O = 6 \text{ m}$$

---

<sup>(6)</sup> Ecuacion 6. Calculo para determinar el Flujo de saturación. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

Para calcular el intervalo de cambio de fase se hace uso de la Ecuación 7, la cual se obtiene del análisis de la Figura 19.

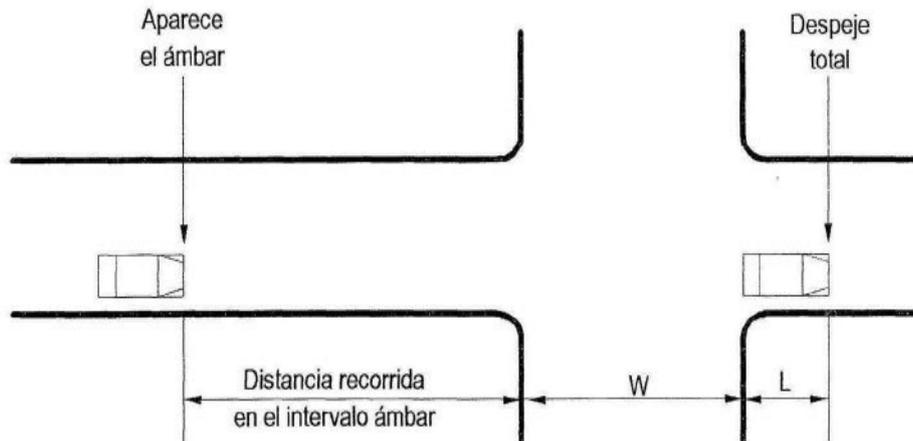


Figura 19. Intervalo de cambio de fase

Fuente: Cal, R., Reyes, M. & Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones* (8va. Ed). México: Alfaomega Grupo Editor

Del análisis de la Figura 19, se puede expresar que:

Intervalo de cambio = Ámbar + Todo Rojo

$$Y = \left( t + \frac{v}{2a} \right) + \left( \frac{W + L}{v} \right) \quad (7)$$

Dónde:

Y = intervalo de cambio de fase, ámbar más todo rojo (s)

t = tiempo de percepción-reacción del conductor (usualmente 1.00 s)

v = velocidad de aproximación de los vehículos (m/ s)

a = tasa de aceleración (valor usual 3.05 m/s<sup>2</sup>)

W= ancho de la intersección (m)

L = longitud del vehículo (dado que en su mayoría son autos, se tomará el valor de 3.5 m como promedio)

<sup>(7)</sup> Ecuación 7. Cálculo para determinar el intervalo de cambio de fase. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones* (7ma. Ed.). México, MX: Alfaomega.

- **Tiempo Amarillo**

Aplicando la Ecuación 7:

$$y_1 = \left[ 1s + \frac{8,33 \text{ m/s}}{2(3,05\text{m/s}^2)} \right] + \left( \frac{6\text{m} + 3.5\text{m}}{8,33\text{m/s}} \right) = 2,3655 + 2.8331 = 3,5 \text{ seg}$$

$$y_2 = \left[ 1s + \frac{11,11 \text{ m/s}}{2(3,05\text{m/s}^2)} \right] + \left( \frac{6\text{m} + 3.5\text{m}}{11,11 \text{ m/s}} \right) = 2,8213 + 2.1242 = 3,67 \text{ seg}$$

Si se lleva al número más próximo cada resultado, el tiempo en ámbar o amarillo será:

$$Y_1 = 4 \text{ seg}$$

$$Y_2 = 4 \text{ seg}$$

- **Tiempo total periodo por ciclo (L)**

$$L = Y_1 + Y_2$$

$$L = 4 + 4 = 8 \text{ seg}$$

- **Calculo ciclo optimo**

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\Phi} Y_i} \quad (8)$$

Dónde:

$C_o$  = tiempo óptimo de ciclo (s)

$L$  = Tiempo total periodo por ciclo (s)

$Y_i$  = Máximo valor de saturación

$\Phi$  = número de fases

$$C_o = \frac{1.5(8) + 5}{1 - 0.57} = \frac{17}{0,43} = 39,53 \text{ seg}$$

$$C_o = 40 \text{ seg}$$

---

<sup>(8)</sup> Ecuación 8. Calculo para determinar el Tiempo Total del periodo por ciclo. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

- **Verde total**

Para determinar el tiempo en verde se usa la Ecuación 9, que está dada por:

$$g_T = C - L \quad (9)$$

Dónde:

$G_T$  = tiempo verde efectivo total por ciclo disponible para todos los accesos

$C$  = longitud actual del ciclo (redondeando  $C_0$  a los 5 segundos más cercanos)

$$g_T = 40 - 8 = 32 \text{ seg}$$

- **Tiempo del verde**

$$g_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^{\phi} Y_i} (g_T) = \frac{Y_i}{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{\phi}} (g_T) \quad (10)$$

$$g_1 = \frac{0,57}{1} (32) = 18 \text{ seg}$$

$$g_2 = \frac{0,43}{1} (32) = 14 \text{ seg}$$

Nota: La suma de los tiempos en verde de cada fase debe ser igual al verde total.

$$G_1 + G_2 = 32 \text{ seg}$$

$$18 + 14 = 32 \text{ seg}$$

- **Tiempo del rojo**

El tiempo en rojo se localiza haciendo una simple combinación de suma entre el tiempo en verde y el amarillo:

---

<sup>(9)</sup> Ecuación 9. Calculo para determinar el periodo de Verde Total. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

<sup>(10)</sup> Ecuación 10. Calculo para determinar el periodo de verde de fase. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Transito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

$$R = G_x + Y_x + G_i + Y_i \quad (11)$$

$$R_1 = G_2 + Y_2$$

$$R_1 = 14 + 4 = 18 \text{ seg}$$

$$R_2 = G_1 + Y_1$$

$$R_2 = 18 + 4 = 22 \text{ seg}$$

### Comprobación de los tiempos

Para la comprobación de los tiempos del diseño de semáforo, se debe hacer con mucho cuidado, debido a que la suma de los tres tiempos de cada fase debe ser igual a ciclo:

$$C_t = G + Y + R = C \quad (12)$$

Tabla 18

*Asignación de tiempos para cada fase*

Fuente: El Autor.

Fase	V	A	R	Ciclo
I	18	4	18	40
II	14	4	22	40

A partir de estos datos, se tiene una base para el diseño del sistema en cuanto al tema de sincronización se refiere. Como se ha mencionado en el título de este proyecto, el uso de redes inalámbricas para la transferencia de información de sincronismo es la principal ventaja en relación a los sistemas antiguos basados en controladores PLC para el control del tráfico vehicular, de tal manera el siguiente capítulo hace referencia a este método de transmisión de información.

<sup>(11)</sup> Ecuación 11. Cálculo para determinar el periodo de rojo de fase. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

<sup>(12)</sup> Ecuación 12. Cálculo para comprobar la concordancia de los tiempos. Recuperado de Cal, R. & Reyes M., (1994). *Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones (7ma. Ed.)*. México, MX: Alfaomega.

## **CAPÍTULO II**

# **MÓDULOS INALÁMBRICOS Y SU APLICACIÓN EN EL PROYECTO**

Como se menciona en el título de este documento, el uso de módulos inalámbricos es parte importante y uno de los principales componentes dentro del sistema, razón por la cual este capítulo comprende información relacionada con las tecnologías inalámbricas consideradas para el desarrollo del proyecto; el análisis, comparación y los motivos por los que se ha optado por una de estas tecnologías también es abordado. Además de las tecnologías y módulos inalámbricos, en este capítulo se detalla los requerimientos/requisitos del sistema y una descripción breve de cada subsistema del cual está compuesto.

### **2.1 TECNOLOGÍA INALÁMBRICA**

Las tecnología inalámbricas se han ganado su lugar dentro de los medios de comunicación por sus grandes beneficios, el más evidente es el no requerir cables para la comunicación lo que permite ahorrar espacio y costos, por su gran desarrollo en los últimos años se puede transmitir grandes cantidades de datos de manera segura y confiable, al punto que ha dejado de ser una solución de respaldo en usuarios móviles, para convertirse en la opción más utilizada aun cuando existe la posibilidad conectarse mediante redes cableadas. A continuación se describe las principales características de las tecnologías que se encierran dentro de las Redes Inalámbricas de Área Personal o WPAN (Wireless Personal Area Network) consideradas para el diseño, así como las ventajas y desventajas en comparación con sus similares.

#### **2.1.1 TECNOLOGÍA BLUETOOTH**

La necesidad de eliminar el uso de múltiples cables para la transferencia de información entre varios dispositivos móviles hizo que en 1994 la compañía

Ericsson comenzara una investigación para el desarrollo de una nueva interfaz de bajo consumo y costo que solucionara esta problemática. En 1998 las compañías Ericsson, IBM, Intel, Toshiba y Nokia formaron un consorcio y adoptaron Bluetooth como nombre para su especificación, un año después se lanzó la primera versión, Bluetooth 1.0.



Figura 20. Grupo SIG (Special Interest Group)

Fuente: Seguridad Mobile. (2011). Recuperado el 15 de octubre de 2013, de <http://www.seguridadmobile.com/bluetooth/especificacion-bluetooth/estandar-bluetooth/index.html>

Bluetooth trabaja en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) a la frecuencia de 2.4 GHz con 79 canales a 1 MHz de ancho de banda por canal, los cuales van desde los 2402 a 2480 MHz. Debido a que la frecuencia de 2.4 GHz es utilizada en redes 802.11, hornos microondas, mandos a distancia, etc., la posibilidad de interferencia es muy alta, por lo cual Bluetooth hace uso del sistema llamado Frequency Hop Spread Spectrum (FHSS) que se traduce como Salto de Frecuencia en Espectro Ensanchado, este sistema realiza 1600 saltos por segundo entre los 79 canales de radio.

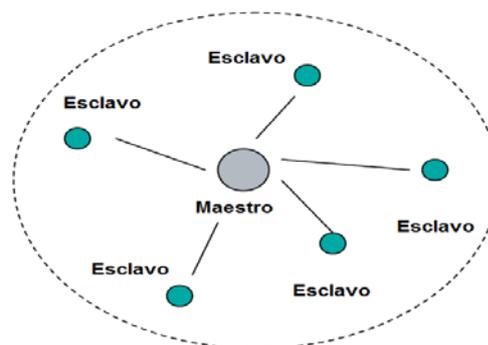


Figura 21. Arquitectura Maestro – Esclavo de una piconet

Fuente: Adaptado de WI-FI™, BLUETOOTH™, ZIGBEE™ and WIMAX™, Labiod H., Afifi H., De Santis S., 2007, pag 91.

Para una comunicación Bluetooth, preliminarmente se requiere: primero conocer los dispositivos que se encuentran dentro del área o vecindario

(descubrimiento) y segundo un circuito pre-establecido. La comunicación está basada en el principio de maestro-esclavo.

A una red Bluetooth se la conoce como piconet, dicha red está compuesta por ocho dispositivos, donde uno toma el papel de dispositivo maestro tal como se muestra en la Figura 21. Los dispositivos esclavos no pueden comunicarse directamente entre sí, excepto durante la fase de descubrimiento. La unión de varias piconets se denomina Scatternet o Red Dispersa, Figura 22.

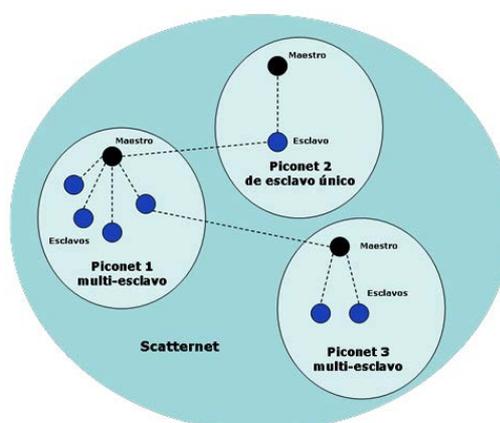


Figura 22. Tipología de una red Bluetooth

Fuente: Seguridad Mobile. (2011). Recuperado el 15 de octubre de 2012, de <http://www.seguridadmobile.com/bluetooth/especificacion-bluetooth/estandar-bluetooth/index.html>

### 2.1.1.1 Capacidad de Transmisión y Versión

Existen varias versiones de la especificación, la versión 1.0 ofrecía un ancho de banda poco menos de 1 Mbps (723.1Kbps), para un rango cercano a los 10 m de distancia, la versión 2 ofrece desde 2 a 3 Mbps de ancho de banda. El alcance depende de la clase a la que pertenece el equipo, esta categorización toma como referencia la potencia de transmisión del producto sin perder la compatibilidad unos con otros, lo que da paso a la siguiente clasificación:

- Clase 1: son diseñados para dispositivos de alto alcance (~100 m), tales como puntos de acceso Bluetooth, potencia característica: 20 dBm (100mW).

- Clase 2: para PCs normales y dispositivos portátiles (~10 m), potencia característica: 4dBm (2.5mW).
- Clase 3: para dispositivos de bajo consumo (rangos menores a 1m), potencia característica: 0dBm (1mW).

La Tabla 19, presenta la evolución de Bluetooth y sus características implementadas en cada versión.

Tabla 19

*Versiones de Bluetooth*

Fuente: Aspectos Técnicos de Bluetooth. (2012). Recuperado el 21 de octubre de 2012, de [http://bt3info.site11.com/aspectos\\_tecnicos.html](http://bt3info.site11.com/aspectos_tecnicos.html)

<i>Bluetooth v.1.1</i> 1994, Ericsson	Nueva interfaz de bajo costo y consumo para interconectar inalámbricamente dispositivos móviles y otros accesorios, basado en un chip de radio.
<i>Bluetooth v.1.2</i>	Convive con Wi-Fi en la banda 2.4 GHz, es más segura, calidad de voz, configuración más rápida de comunicación con otros dispositivos de largo rango. Velocidades hasta de 1Mbps.
<i>Bluetooth v.2.0 + EDR</i>	Especificación separada, velocidades hasta de 3Mbps y soluciona errores de la especificación 1.2.
<i>Bluetooth v.2.1</i>	Pasos simplificados para conexión y 5 veces menor consumo de potencia.
<i>Bluetooth v3.0 y v4.0</i>	Velocidades hasta de 24 Mbps, Compatibilidad con Wi-Fi.

Tabla 20

*Características Técnicas Bluetooth*

Fuente: Aspectos Técnicos de Bluetooth. (2012). Recuperado el 18 de noviembre de 2012, de [http://bt3info.site11.com/aspectos\\_tecnicos.html](http://bt3info.site11.com/aspectos_tecnicos.html)

Banda de Frecuencia	2,4 GHz
Potencia de Tx	1mW ( 0 dBm)
Tecnología	Spread Spectrum
Canales de voz	3 por piconet max.
Canales de datos	7 por piconet max.
Velocidad de datos	721Kbps por piconet
Cobertura	10 m.
Número de dispositivos	8 por piconet
Alimentación	3,7 voltios
Interferencia	Bluetooth minimiza la interferencia potencial al emplear saltos rápidos en frecuencia.

### 2.1.1.2 Características Técnicas

La Tabla 20, proporciona una lista de características técnicas básicas del estándar Bluetooth.

### 2.1.2 TECNOLOGÍA ZIGBEE

ZigBee es un estándar de comunicación inalámbrica de bajo consumo, baja tasa de transmisión y coste reducido el cual está basado en el estándar IEEE 802.15.4 y dentro de las redes WPAN. ZigBee es promovido y desarrollado por ZigBee Alliance, conformado por más de 300 empresas y por el IEEE Task Group 4.

Tabla 21

Características de ZigBee

Fuente: Valverde, J. Universidad Nacional de Trujillo. *El Estándar Inalámbrico ZigBee*. Recuperado el 15 de agosto de 2012, de <http://www.seccperu.org/files/ZigBee.pdf>

Características	
Velocidad de Datos	Entre 20 Kb/s y 250 Kb/s
Cobertura	De 10 m a 75 m
Bandas de Frecuencia	Bandas libres ISM (6) de 2,4 GHz (Mundial), 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU).
Numero de Dispositivos	En teoría 16.000 redes diferentes en un mismo canal y cada red puede estar constituida por hasta 65.000 nodos, en condiciones reales estos valores son afectados por límites físicos (memoria disponible, ancho de banda, etc.)
Alimentación	Dependiendo de la función que cumple en la red un sensor equipado con un transceiver ZigBee consume muy poca energía (dos pilas AA durante al menos 6 meses y hasta 2 años)
Topología	Estrella, punto a punto, malla, árbol
Control de acceso al medio	CSMA/CA (acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones).
Escalabilidad de red	Un mejor soporte para las redes más grandes, ofreciendo más opciones de gestión, flexibilidad y desempeño.
Fragmentación	Nueva capacidad para dividir mensajes más largos y permitir la interacción con otros protocolos y sistemas.

De manera concreta ZigBee Alliance se encarga de la definición de las capas de Red y Aplicación y su principal objetivo es desarrollar redes inalámbricas con la capacidad de monitoreo y control que sean confiables, de bajo

consumo de energía y costos bajos, que funcione vía radio y de modo bidireccional, basándose en un estándar público global de manera que cualquier fabricante pueda crear productos que sean compatibles entre ellos. Las principales características que presenta ZigBee se muestran en la Tabla 21.



*Figura 23.* Logo de la ZigBee Alliance

Fuente: ZigBee. (2012). Recuperado el 18 de noviembre de 2012, de <http://www.zigbee.org>

### **2.1.2.1 Tipos de Dispositivos de la Red Zigbee**

Existen tres tipos de dispositivos dentro estas redes. Estos son:

- El Coordinador (ZigBee Coordinator, ZC): Descrito en la recomendación del estándar del 2003 para dispositivos IEEE 802.15.4, es el dispositivo encargado de la asociación y des-asociación de los dispositivos dentro de la red. Debe existir uno por red.
- El Router (ZigBee Router, ZR): Encargado de extender el alcance de la red, gestionar los caminos de conexión y crear nuevos caminos en el caso de congestión en algún nodo y/o la caída del mismo. Puede conectarse directamente con el coordinador u otros routers.
- Dispositivo Final (ZigBee End Device, ZED): Solo pueden comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router) para enviar y recibir datos. No tiene la capacidad de enrutamiento.

Basándose en su funcionalidad, puede plantearse una segunda clasificación:

- Dispositivo de funcionalidad completa (FFD): Es también conocidos como nodo activo y tiene la capacidad de recibir mensajes en formato 802.15.4. Una memoria adicional y la capacidad de computar le permiten funcionar como Coordinador o Router ZigBee.

- Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD): A este tipo de dispositivo se lo denomina nodo pasivo. Como su nombre lo indica tiene capacidad y funcionalidad limitadas (especificada en el estándar) con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

Los nodos ZigBee (tanto pasivos como activo) permanecen la mayor parte del tiempo dormidos lo que les permite reducir el consumo de energía, como nota interesante estos pueden permanecer en este estado durante varios días seguidos. El tiempo requerido para que un nodo se reactive es de 15 ms aproximadamente y solo cambian a este estado cuando se requiere de su uso.

Otros tiempos que son importantes y que se deben tener en cuenta son: el tiempo empleado por el coordinador para una nueva enumeración de los nodos esclavos es de aproximadamente 30 ms y el acceso al canal entre un nodo activo y uno pasivo es aproximadamente 15 ms.

### **2.1.2.2 Topología**

ZigBee soporta las topologías estrella, árbol, malla y punto-punto. A continuación se describe cada una de estas topologías.

- Topología Estrella.- la principal características de esta topología es la presencia de un dispositivo FFD hacienda las funciones de coordinador con varios FFD y/o RFD como dispositivos finales. Todos los dispositivos finales se comunican directamente con el coordinador encargado de iniciar y gestionar la red. A diferencia de los dispositivos finales, este consume más energía debido al mayor número de funciones que cumple por eso se recomienda que esté conectado a la red eléctrica. La cobertura de esta red está limitada al rango de alcance del coordinador.
- Topología Malla.- la comunicación no está restringida únicamente con el coordinador, se puede establecer comunicación directa entre cualquier par de nodos. Cualquier router que primero forme parte de la red toma el

control de la misma, debido a que el coordinador no realiza funciones muy diferentes a las que realiza el dispositivo router. Gracias a esta característica la fiabilidad de la red en este tipo de topología aumenta. El algoritmo para el encaminamiento utiliza un protocolo de pregunta-respuesta (request-response) para eliminar rutas no óptimas, este proceso conlleva un aumento de computación que debe realizarse a nivel de red. La red final puede tener hasta 254 nodos.

- Topología Punto a Punto.- existe un solo dispositivo FFD coordinador, la diferencia con la topología estrella está en que cualquier dispositivo puede comunicarse con otro que se encuentre dentro del rango circundante. Aplicaciones al monitoreo y control industrial, redes de sensores inalámbricos, entre otros, son ampliamente utilizados por estas redes.
- Topología Árbol.- en este tipo de redes, los routers mueven datos y mensajes de control a través de la red haciendo uso de una estrategia de ruteo jerárquico. Al igual que la topología en malla, esta permite expandir la red y de igual manera se recomienda que los dispositivos coordinador y router estén conectados a una fuente de energía permanente.

### 2.1.3 TECNOLOGÍA 802.11 - WI-FI

El estándar internacional IEEE 802.11 es la especificación que define las características de una red inalámbrica WLAN; Wi-Fi (que significa “Fidelidad Inalámbrica”) es el nombre de la certificación otorgado por la Wi-Fi Alliance, esta organización sin fines de lucro se formó en 1999 con el objetivo de impulsar el uso de las redes inalámbricas de área local de alta velocidad.



Figura 24. Logo de Wi-Fi Alliance

Fuente: Introducción a Wi-Fi (802.11 o WiFi). (2012). Recuperado el 25 de agosto de 2012, de <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifiintro.php3>

El estándar 802.11 define el uso de las dos capas inferiores del modelo OSI<sup>5</sup> (Capa Física y de Enlace de Datos), especificando las normas de funcionamiento dentro de una WLAN.

### **2.1.3.1 Capa física 802.11**

La capa física del 802.11, también abreviada capa PHY, ofrece varios servicios a la capa superior (Capa de Enlace de Datos) a través de los Puntos de Acceso al Servicio denominados SAP. La capa física está compuesta por dos subcapas, las cuales son:

- La Subcapa Física de Procedimiento de Convergencia, (PLCP, Physical Layer Convergence Procedure)
- La subcapa Dependiente del Medio Físico, (PMD, Physical Medium Dependent)

La subcapa PLCP tiene la función de adaptar las capacidades del sistema físico dependiente del medio (PDM), además de definir una forma de mapeo de las unidades de datos MAC (MPDUs) en un formato susceptibles de ser transmitidas o recibidas entre diferentes estaciones que posean una interfaz inalámbrica (STASs). La subcapa PMD se encarga de transmitir y recibir los bits comunicados por PLCP al medio a través de las antenas.

### **2.1.3.2 Tecnología de Transmisión**

Existen tres tecnologías para la capa física de la especificación 802.11, dos de las cuales ofrecen técnicas para la transmisión en frecuencia de radio en espectro ensanchado y una para las transmisiones infrarrojas.

Respecto a las técnicas para la transmisión en frecuencia de radio, estas trabajan bajo el concepto de Espectro Enanchado o Spread Spectrum (SS), la

---

<sup>5</sup> OSI Open System Interconnection (Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos)

cual consisten en difundir la información a lo largo de todo el ancho de banda disponible, forzando a la señal a repartirse por toda la banda en vez de concentrarse alrededor de una portadora en concreto. Existen dos tipos de tecnologías de espectro ensanchado:

- Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS)
- Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia (FHSS)



Figura 25. Capas del modelo OSI definidas por el estándar IEEE 802.11

Fuente: Milagro, F., Los Santos, A. (2009). Comparativa de IEEE 802.11 e IEEE 802.16: capas física y de enlace. (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Vigo, Pontevedra, España.

### 2.1.3.3 Rango y flujo de datos

Los estándares 802.11a, 802.11b y 802.11g, llamados "estándares físicos", son modificaciones del estándar 802.11 y operan de modos diferentes, lo que les permite alcanzar distintas velocidades en la transferencia de datos según sus rangos.

Tabla 22

#### Variantes de 802.11

Fuente: Introducción a Wi-Fi (802.11 o WiFi). (2012). Recuperado el 25 de agosto de 2012, de <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifiintro.php3>

Estándar	Frecuencia	Velocidad	Rango
WiFi a (802.11a)	5 GHz	54 Mbit/s	10 m
WiFi B (802.11b)	2,4 GHz	11 Mbit/s	100 m
WiFi G (802.11g)	2,4 GHz	54 Mbit/s	100 m
WiFi N (802.11n)	2,4 y 5 GHz	600 Mbit/s (En teoría)	100 m

## 2.2 COMPARACIÓN TÉCNICA Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA INALÁMBRICO

En los numerales anteriores se ha descrito las principales características de las tecnologías Bluetooth, ZigBee (802.15.4) y Wi-Fi (802.11), como paso previo a la comparación de estas tecnologías y la concerniente elección de una de ellas.

Tabla 23

*Comparativa de las Tecnologías Inalámbricas*

Fuente: El Autor.

	Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi
Velocidad de Datos	hasta de 24 Mbps	20 Kbps - 250 Kbps	80 a 100 Mbps
Cobertura	Máximo 100 m	Máximo 120 m	Máximo 100
Bandas de Frecuencia	2,4 GHz	2.4 GHz	2.4 y 5 GHz
Numero de Dispositivos	8 por picored	hasta 65.000 nodos teóricamente	Depende del equipo
Alimentación	3,7 voltios	2.8 -3.4 voltios	Depende del equipo
Topología	Maestro - Esclavo	Estrella, punto a punto, malla, árbol	Ad-Hoc e Infraestructura
Complejidad del sistema	Baja	Media-Baja	Alta
Costo de implementación	Baja	Baja	Media

Las características de mayor interés son la capacidad de transmisión, el alcance o cobertura, la complejidad del sistema, disponibilidad en el mercado, la seguridad, el consumo de energía y costo de implementación.

Las necesidades de transmisión de datos del sistema son mínimas, además se requerir que el consumo de energía y costos sean bajos, por lo que de acuerdo a la Tabla 23, la tecnología ZigBee es la que mejor se ajusta a las necesidades para desarrollar el sistema.

### 2.2.1 MÓDULO XBEE-PRO ZB SERIE 2

La empresa Digi Internacional fabrica módulos RF de tecnología ZigBee, uno de sus productos de la familia Xbee de marca MaxStream, es el Xbee-pro ZB S2, es un módulo inalámbrico con la homologación de ZigBee Alliance por cumplir

con determinados parámetros de operatividad e interoperabilidad en aplicaciones industriales y equipos de otras marcas que usan este tipo de tecnología inalámbrica.

El módulo ha sido elegido por la facilidad de manipulación, por su disponibilidad en el mercado y su bajo costo. Las características técnicas que presenta este módulo es el principal motivo por el que se eligió el Xbee-Pro ZB S2 y no su versión preliminar el S. La Tabla 24 muestra estas características del S2.



Figura 26. Módulo Xbee Pro ZB S2

Fuente: XBee® ZB. (2013). Recuperado el 4 de junio de 2013, de <http://www.digi.com/images/products/xbee-pro-rpsma-connector.jpg>

Tabla 24

*Comparación entre módulos Xbee Pro S1 y S2*

Fuente: Adaptado de The Major Differences in the XBee Series 1 vs. the XBee Series 2. (2013). Recuperado el 4 de junio de 2013, de <http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2213>

	XBee Serie 1	XBee Serie 2
Cobertura en interiores	Arriba de los 30m	Arriba de los 40m
Exteriores, con línea de vista	Arriba de los 100m	Arriba de los 120m
Potencia de transmisión	1 mW (0dbm)	2 mW (+3dbm)
Tasa de datos RF	250 Kbps	250 Kbps
Sensibilidad del receptor	-92dbm (1% PER)	-98dbm (1% PER)
Voltaje de alimentación	2.8 - 3.4 V	2.8 - 3.6 V
Corriente de transmisión	45 mA (@ 3.3 V)	40 mA (@ 3.3 V)
Corriente de recepción	50 mA (@ 3.3 V)	40 mA (@ 3.3 V)
Corriente de apagado	10 uA	1 uA
Frecuencia	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensión	0.0960" x 1.087"	0.0960" x 1.087"
Temperatura de operación	-40 a 85 C	-40 a 85 C
Opciones de antena	PCB, Integrated Whip, U.FL, RPSMA	PCB, Integrated Whip, U.FL, RPSMA
Topología de red	Punto a punto, Estrella, Malla (con firmware DigiMesh)	Punto a punto, Estrella, Malla
Número de canales	16 Canales de Secuencia Directa	16 Canales de Secuencia Directa
Opciones de filtración	PAN ID, Canal & Fuente/Destino	PAN ID, Canal & Fuente/Destino

La diferencia entre módulos es mínima respecto a características físicas, siendo la potencia de transmisión la diferencia más evidente en el S2 lo que permite tener un mayor alcance. La principal diferencia radica en el firmware del S2, debido a que este tiene la capacidad de crear redes con dispositivos diferenciados propios de ZigBee, no así el S1 que solo puede crear redes homogéneas de un solo tipo de nodo.

## **2.3 RED DE SENSORES INALÁMBRICOS WSN**

En los numerales anteriores se explica de manera breve las tecnologías inalámbricas consideradas para el desarrollo del proyecto, así como sus principales características, ventajas y desventajas. Se ha elegido la tecnología inalámbrica ZigBee por sus características de bajo consumo, coste y su capacidad de transmisión, puedes además añadirse un sensor PIR como mecanismo de detección de tráfico vehicular, esta combinación de elementos permite desarrollar lo que se denomina Red de Sensores Inalámbricos o WSN por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network. Las redes WSN están conformadas por múltiples sensores que envían datos de monitoreo y control como temperatura, humedad, presión, etc. Una Red de Sensores Inalámbricos o WSN, no es más que un conjunto de pequeños dispositivos capaces de medir un fenómeno físico a través de sensores, y enviar esta información mediante enlaces inalámbricos hacia el dispositivo o persona que gestiona dicha red.

### **2.3.1 DISPOSITIVOS SENSORES**

Un dispositivo sensor o nodo sensor, es un dispositivo con pocas o limitadas capacidades de cómputo, comunicación y monitorización, pero que a su favor tiene costes bajos y poco consumo energético, por lo general suele usarse baterías como fuente de energía. De estos dispositivos existe al menos uno en la red con mejores capacidades de procesamiento, mayor potencia de transmisión y por tanto mayor consumo de energía, que requiere mejores características en la batería o una conexión permanente a la energía eléctrica. Un nodo sensor esa

compuesto por un bloque de procesamiento, memoria, sensor y comunicación (Transmisión (TX)/Recepción (RX)).

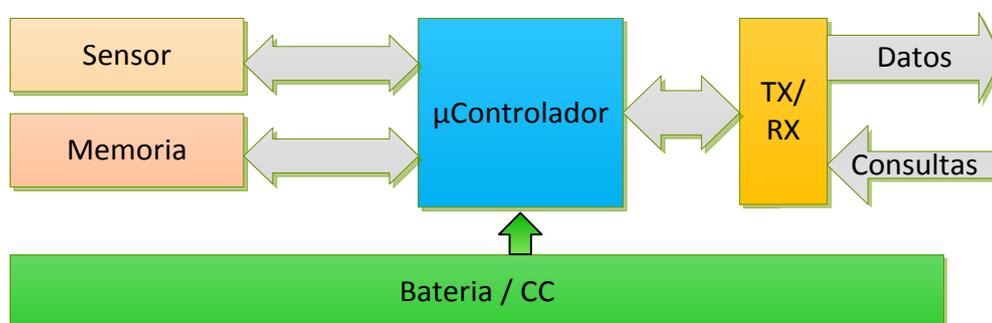


Figura 27. Arquitectura de un nodo sensor

Fuente: Lino Ramírez, C. (2012). *Diseño de una arquitectura para redes de sensores con soporte para aplicaciones de detección de eventos*. (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Informática de Sistemas y Computadores, Valencia, España.

La Figura 27, muestra los bloques mencionados, el procesador es quien controla las tareas de ejecución y convierte los datos provenientes del bloque de sensor o sensores que miden las variables del medio monitorizado. El bloque de memoria sirve para almacenar datos de procesamiento de programa o los datos medidos por los sensores, además cuenta con un módulo de comunicación (TX/RX) por radiofrecuencia con su respectiva antena.

En la mayoría de los casos, este tipo de dispositivos cuentan con una fuente independiente que les suministra energía, habitualmente es una batería que debe ser utilizada eficientemente para obtener el mayor tiempo de duración que se traduce en mayor tiempo de vida útil en la red. Una Red de Sensores Inalámbricos está definida por el tipo de evento o situación que se desea monitorizar a través de los sensores, estos eventos son registrados solo en las áreas que el sensor cubre siempre y cuando se produzca cambios o movimientos en el ambiente, los mismos que pueden ocurrir en un lugar cerrado o abierto. Al determinarse el tipo de evento y las medidas a monitorizar, el siguiente paso es organizar los sensores de tal manera que cubra todo el sector o ambiente de interés, este proceso da como resultado la topología de la red de sensores que según el tipo de evento deben asociarse en grupos de monitoreo.

Una ventaja de los sensores inalámbricos es su autonomía en señalados procesos, lo que les permite trabajar de manera casi independiente de la gestión de la red sin afectar su correcto funcionamiento. Los nodos tienen la capacidad de recolectar los datos y encaminarlos hacia el nodo principal denominado dren, el nodo dren cuenta con mejores características que los demás nodos y que puede estar en un lugar fijo o ser móvil, este tiene la capacidad de conectar la red de sensores a una red que permita acceder a los datos medidos por los mismos.

La distribución de los nodos sensores no precisan un diseño específico, pero si requiere que sean colocados de manera que los sensores pueden detectar los eventos para los cuales fueron configurados, esta característica implica que los nodos sensores tienen la capacidad de auto-organizarse, capacidad que se cumple a través de protocolos. La información que envían los nodos es procesada previo a su envío, debido a que no cuentan con procesadores muy potentes los datos pre-procesados son más fáciles de transmitir.

### **2.3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO DE LAS WSN**

Existen varios factores que influyen dentro del diseño de una red de sensores inalámbrica, según Ramírez C. (2012) incluyen “, escalabilidad, costes de producción, ambientes de operación, topología de la red, restricciones de hardware, medios de transmisión y consumo de energía. Estos factores son importantes porque sirven de guía para diseñar un protocolo o un algoritmo para WSNs.” (p.11), los mismos que son considerados a continuación.

#### **2.3.2.1 Tolerancia a fallas**

En cualquier tipo de red ya sea esta inalámbrica o de infraestructura, se presentan problemas como fallas en los equipos provocadas por daños físicos o por fallas de energía, pérdida de comunicación debido a ruptura de cables o interferencia del entorno, etc., además las redes inalámbricas son más susceptibles a fallos y las WSN no están exceptas por lo que es necesario

mantener un mínimo de fiabilidad o torrencial a fallas para no comprometer el funcionamiento global de la red sensora. La fiabilidad  $R_K(t)$  de los nodos sensores se puede modelar usando la distribución de Poisson para determinar la probabilidad de no tener un fallo dentro de un intervalo de tiempo (0, t):

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t) \quad (13)$$

Donde  $\lambda_k$  es la tasa de fallo de un sensor k en un periodo de tiempo t.

### 2.3.2.2 Escalabilidad

En teoría, se estima que se puede tener 65.000 nodos en una red y en un mismo canal, por lo que no es de sorprenderse que ciertas redes estén compuesta por cientos y en forma exagerada por millones de nodos sensores dependiendo del tipo de evento que se desee registrar, este alto número de nodos implica un reto a la hora de gestionar y administrar la red. Pueden existir varios nodos dentro de una región distribuidos a menos de 10 metros de distancia, la densidad se puede calcular mediante la ecuación:

$$\mu(R) = (N\pi R^2)/A \quad (14)$$

Donde N es el número de sensores distribuidos dentro de la región A y R es la distancia máxima de transmisión.

### 2.3.2.3 Costes de producción

Como es sabido, una red WSN puede estar constituida por varios sensores, por lo que resulta de vital importancia el coste individual del nodo para justificar el coste total de las redes del sistema. Si el coste de este tipo de redes es superior al coste de implementación de sensores tradicionales, desde el punto

---

<sup>(13)</sup> Ecuación 13. Calculo para determinar la Tolerancia a fallas de las redes WSN.

<sup>(14)</sup> Ecuación 14. Calculo de escalabilidad de las redes WSN.

de vista económico este tipo de redes no son justificables. Se debe entonces procurar que los nodos mantengan un mínimo coste.

#### **2.3.2.4 Limitaciones del Hardware**

El hardware del nodo consta de cuatro partes esenciales, tal como se puede observar en la Figura 27, estas son: la unidad de procesamiento, la unidad de adquisición de eventos, la unidad de transmisión/recepción y una unidad de energía. Cierta tipo de nodos dependen de componentes adicionales, como sistemas de localización, movimiento y generadores de energía.

La unidad de adquisición de eventos está compuesta por dos subsistemas: el sensor y el Convertidor Análogo-Digital (ADC). Los eventos capturados a través de los sensores, que son señales analógicas, son convertidos a datos digitales mediante el ADC y enviados a la unidad de procesamiento para su análisis. Una parte fundamental del hardware del nodo es la unidad de energía, esta restringe en cierta medida la capacidad del nodo debido a que debe ser lo suficientemente capaz de brindar la energía necesaria a los componentes, un mayor número de módulos proporcionan mejores características al nodo pero demanda mayor consumo de energía. La unidad de energía puede estar constituida por algún tipo de generador como por ejemplo celdas solares.

## **2.4 ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN DE LAS WSNS**

Dentro de una WSN los nodos sensores desplegados recolectan la información y la envían hacia el nodo principal o nodo drenó mediante múltiples saltos, el nodo drenó tiene la capacidad de comunicarse con el administrador mediante una conexión vía internet o satelital.

En la pila de protocolos que implementan estos dispositivos consta la capa de aplicación, capa de transporte, capa de red, capa de enlace, capa física además del plano de gestión de energía, movilidad y gestión de tareas. Esta pila

de protocolos permite al nodo hacer uso de la energía de manera adecuada, encaminar e integrar los datos a la red, optimizar el medio de transmisión y coordinar los nodos.

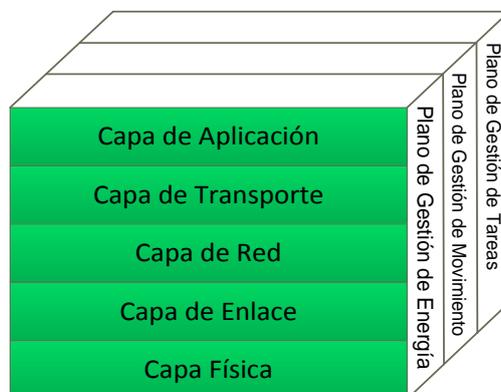


Figura 28. Pila de Protocolo de la red de sensores

Fuente: Lino Ramírez, C. (2012). *Diseño de una arquitectura para redes de sensores con soporte para aplicaciones de detección de eventos*. (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Informática de Sistemas y Computadores, Valencia, España.

La capa de Transporte permite gestionar el flujo de datos, de manera que estos lleguen a su destino, la capa de red facilita el encaminamiento de los datos a los nodos dreno, el protocolo de Control de Acceso al Medio (MAC) debe hacer uso adecuado de la energía y regular el uso del medio físico que comparte con sus vecinos para evitar colisión de paquetes broadcast.

La capa física en este tipo de redes se encarga de la modulación de la señal, la transmisión al medio y recepción. Con respecto al plano de gestión, este se encarga de la asignación de tareas a los nodos sensores, el plano de gestión de energía controla el uso de la energía por parte del sensor, el plano de gestión de movilidad garantiza que no se pierda la ruta hacia al administrador por cambios de ubicación de los nodos, este plano permita al nodo conocer cuáles son sus vecinos. El plano de gestión de tareas coordina las actividades de los nodos para determina región.

En conjunto estos planos permiten a los nodos trabajar de formar coordinada, eficiente y aprovechar los recursos de la red.

## **2.5 ESTÁNDAR IEEE 802.15.4**

Toda comunicación a través de redes está sujeta a algún criterio o norma que la regula, define y determinados parámetros para que esta se pueda facilitar, el estándar IEEE 802.15.4 a través de sus protocolos permite la transmisión de bajas tasas de datos en redes de área personal inalámbricas denominadas LR-WPAN. Existen otros protocolos que realizan esta misma tarea, sin embargo, este estándar es el más empleado en redes WSN. ZigBee por su parte adopta este protocolo e implementa los niveles superiores que la pila del 802.15.4, debido a que este solo define la capa física y el control de acceso al medio de redes inalámbricas. Las LR-WPAN tienen como ventaja su fácil instalación, costos bajos, seguridad en la transmisión de datos, bajo consumo de energía, así como simplicidad y flexibilidad del protocolo.

### **2.5.2 CAPA FÍSICA DEL ESTÁNDAR IEEE 802.14.5**

La capa física (PHY) se encarga de proporcionar la conexión entre los dispositivos inalámbricos a través del envío de datos (bits) al medio, tales datos son transformados en impulsos electromagnéticos para luego ser transmitidos y recibidos a través de canal de radio físico. Esta capa PHY provee dos servicios: el servicio de datos PHY y el servicio de administración PHY, que interactúan con la entidad de administración de la capa física (PLME) mediante el punto de acceso SAP. Entre las tareas principales de la capa PHY está la activación y desactivar el transceptor de radio, seleccionar el mejor canal, detector de energía (ED), indicador de la calidad del enlace (LQI), determinar que canal está libre (CCA) y por supuesto la de transmitir y recibir paquetes de datos a través del medio físico.

Las bandas de frecuencia no licenciadas en la que opera la capa física del 802.15.4, se encuentran limitadas por las leyes de cada país, así mismo cada banda de frecuencia tienen su propia tasa de transferencia de datos, siendo la frecuencia de 2.4 GHz la de mayor capacidad con 250 kbps debido a que hace

uso de la modulación por desplazamiento de fase (O-QPSK) como técnica de modulación esta frecuencia está libre para ser utilizada en todo el mundo, la frecuencia de 915 MHz está delimitada para Estado Unidos a una tasa 40 kbps y por último la frecuencia de 868 MHz para países europeos a una tasa de transferencia de 20 kbps.

El formato del paquete PDU que contiene las tramas inicia con un preámbulo de 4 bytes. El campo preámbulo sincroniza el transceptor con una señal de entrada y se ajusta a cero. Después del preámbulo se encuentra el inicio del campo delimitador de trama (SFD). El SFD es de 8 bits de longitud e indica el fin de la sincronización, que se compone de una secuencia fija. El campo de longitud es la longitud de la carga útil. Si el campo SFD es igual 5 significa que es una trama de confirmación y su valor no debe superar los 127 bytes.

### 2.5.2.1 Subcapa MAC

La subcapa de control de acceso al medio (MAC), proporciona los servicios para que los dispositivos se asocien o desasocien de la red, controlar el acceso a los canales compartidos, reconocer la entrega de tramas, garantizar el uso de los slots de tiempo. La Subcapa MAC proporciona dos tipos de servicios: el servicio de datos MAC y el servicio de administración MAC interconectados a la entidad de administración de la subcapa MAC (MLME), los cuales son accedidos mediante puntos de acceso al servicio denominados SAP (MLME-SAP). El servicio de datos MAC permite la transmisión y recepción de unidades de datos de protocolo MAC (MPDUs) a través del servicio de datos PHY.

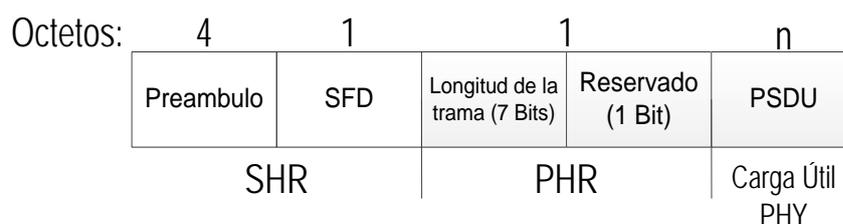


Figura 29. Trama MAC

Fuente: Adaptado de WI-FI™, BLUETOOTH™, ZIGBEE™ and WIMAX™, Labiod H., Afifi H., De Santis S., 2007, pag 127.

### 2.5.2.1.1 Acceso al canal

Para controlar que los nodos no transmitan al mismo tiempo, se utiliza mecanismos que asignan el uso del canal de comunicación. Hay dos maneras como el estándar permite controlar el acceso al canal. Una de las maneras es mediante el acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones o simplemente CSMA-CA, mediante este mecanismo cada nodo debe analizar la red para poder transmitir, si existe una comunicación en proceso el nodo debe esperar un determinado periodo de tiempo para hacer uso del canal.

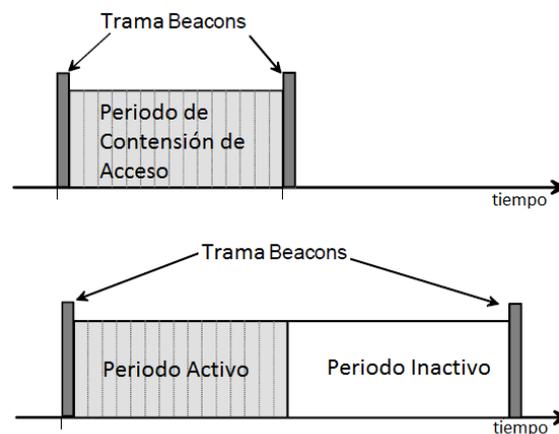


Figura 30. Estructura de la Supertrama sin GTSs

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

Garantía de ranura de tiempo (GTS), es el segundo mecanismo de control de acceso al canal, en este, el nodo central o drenos es quien fija los slots de tiempo para cada nodo, de modo que los nodos saben cuándo transmitir. Este estándar permite el uso opcional de una estructura de supertrama. El formato de la supertrama es definido por el nodo coordinador. La supertrama está delimitada por beacons de red enviadas por el coordinador (Figura 31) y divididas en 16 ranuras de tamaños iguales. La supertrama puede además tener una porción de tiempo inactivo, tal como se puede observar en la Figura 30 (parte inferior), durante este período inactivo el nodo coordinador entra en modo de bajo consumo. La trama beacon que se utiliza para difundir la presencia e información

de una red PAN y despertar los nodos que se encuentran en modo de bajo consumo, se envía al inicio de cada supertrama. Si un coordinador no envía supertramas, las tramas beacon podrían dejar de ser transmitidas, lo que implica que los dispositivos conectados pierdan el sincronismo. Cualquier dispositivo que desea comunicarse durante el período de contención de acceso (CAP) entre dos beacons, compite con otros dispositivos que utiliza un mecanismo CSMA-CA ranurado. Todas las transacciones son completadas por el tiempo de la siguiente beacons de red. Para cierto tipo de aplicaciones que requieren un ancho de banda específico o aplicaciones de baja latencia, el nodo coordinador puede dedicar parte activa de la supertrama para este tipo de aplicaciones. Esta porción activa se denomina ranura de tiempo garantizado o GTS, los GTSs forman el periodo libre de contención (CFP) y están presentes al final de la parte activa de la supertrama, comenzando en un límite de ranura inmediatamente después del CAP (Figura 31).

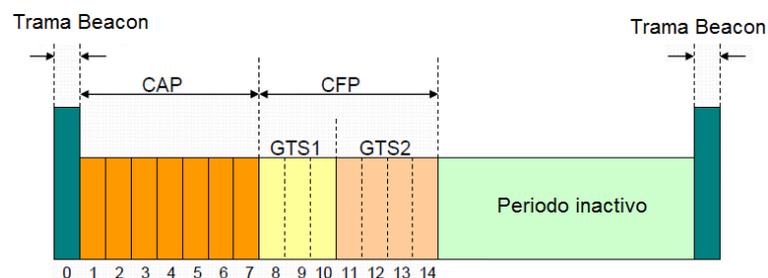


Figura 31. Estructura Supertrama con GTS

Fuente: Chessa, S. (2011). Reti ad Hoc & Reti di Sensori. *The IEEE 802.15.4 and ZigBee standards*. Recuperado el 15 de enero del 2013 de [http://didawiki.cli.di.unipi.it/lib/exe/fetch.php/rhs/slides-05\\_ieee802.15.4\\_zigbee\\_2011.pdf](http://didawiki.cli.di.unipi.it/lib/exe/fetch.php/rhs/slides-05_ieee802.15.4_zigbee_2011.pdf)

#### 2.5.2.1.2 Modelo de transferencia de datos

Existen tres maneras en las que los dispositivos se comunican entre sí para transferir datos. En la primera, el coordinador recibe los datos que un dispositivo le transfiere, en la segunda operación el coordinador transfiere datos al dispositivo y por último, en donde se transfieren datos entre dispositivos pares. Cuando se utiliza topología estrella, solo dos de estas transacciones pueden darse, debido a que el coordinador es el intermediario de la comunicación. En la topología punto-punto se puede emplear las tres formas de transferencia.

a) Transferencia de datos a un coordinador

Cuando un dispositivo, en una red PAN con beacon habilitado, requiere enviar datos al coordinador, este primero escucha las beacons de red. Una vez que se descubre la beacons, el dispositivo se sincroniza a la supertrama y usando ranura CSMA-CA transmite la trama de datos en el momento apropiado hacia el nodo coordinador. Opcionalmente el coordinador puede enviar una confirmación de que se recibió satisfactoriamente los datos, a esta confirmación se le llama señal ack. Este proceso se muestra en la Figura 32.

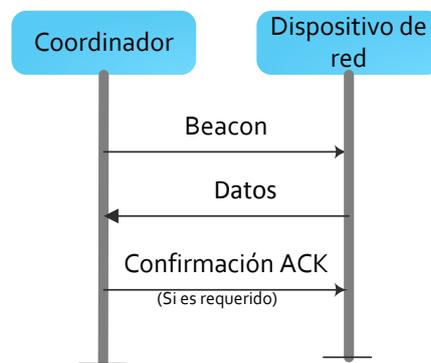


Figura 32. Comunicación con un Coordinador en un PAN con beacon

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

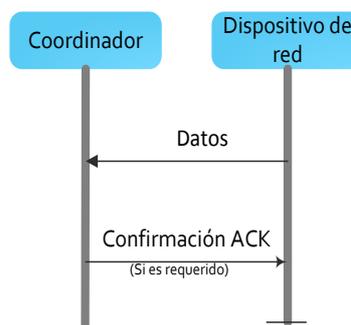


Figura 33. Comunicación con un Coordinador en un PAN no beacon

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

Cuando un dispositivo desea transferir datos a un coordinador de una red PAN no habilitada para beacons, el dispositivo simplemente transmite la trama de datos haciendo uso de CSMA-CA no ranurado. El coordinador responde con una trama de confirmación de que los datos se han recibido correctamente (Figura 33).

b) Transferencia de datos a un coordinador

Cuando un coordinador requiere transferir datos hacia un dispositivo dentro de una red PAN con beacons, la beacon de red se usa para indicar que el mensaje de datos se encuentra pendiente.

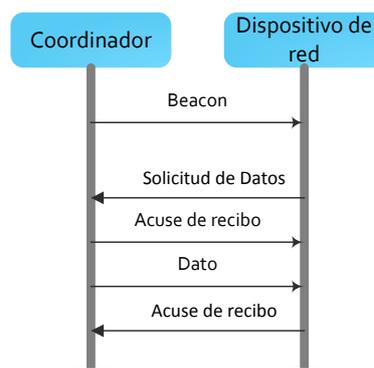


Figura 34. Comunicación de un coordinador de una PAN con beacon habilitado

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

El dispositivo escucha periódicamente las beacons de red y si tiene un mensaje pendiente transmite un comando MAC solicitado el dato usando CSMA-CA. El coordinador reconoce la recepción exitosa de la petición de datos, mediante la transmisión de una trama de confirmación. La trama de datos pendiente es entonces enviada usando CSMA-CA ranurado o, si es posible, inmediatamente después de haber confirmado la recepción. El dispositivo puede reconocer la recepción exitosa de los datos mediante la transmisión de una trama de confirmación opcional. La transacción es ahora completada. Al completar con éxito la transacción de datos, el mensaje se elimina de la lista de mensajes

pendientes en la beacon. Esta secuencia se resume en la Figura 34. Si un coordinador dentro de una red PAN sin beacons, desea transferir datos, este almacena los datos para el dispositivo apropiado para hacer contacto y solicitar datos.

Un dispositivo puede hacer contacto transmitiendo un comando MAC de solicitud de datos, usando CSMA-CA no ranurado, a su coordinador a una tasa definida por la aplicación. El coordinador reconoce la recepción exitosa de la petición de datos mediante la transmisión de una trama de confirmación. Si una trama de datos está pendiente, el coordinador transmite la trama de datos, utilizando CSMA-CA no ranurado, para el dispositivo. Si una trama de datos no se encuentra pendiente, el coordinador indica este hecho, ya sea en la trama de confirmación después de la solicitud de datos o en una trama de datos con una carga útil de longitud cero. Si se solicita, el dispositivo reconoce la recepción exitosa de la trama de datos mediante la transmisión de una trama de confirmación. Esta secuencia se resume en la Figura 35.

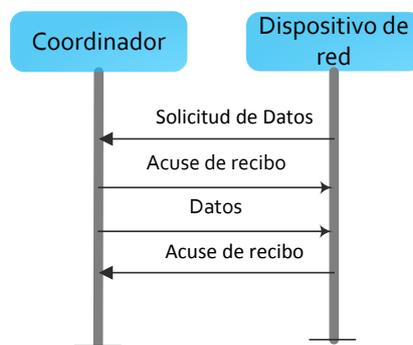


Figura 35. Comunicación desde un coordinador en una PAN no beacons.

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

### c) Transferencia de datos punto a punto

En una red PAN punto a punto, todos los dispositivos pueden comunicarse con los demás dispositivos dentro del radio de alcance de la señal. La mejor

manera para que se pueda transferir los datos sin que se presenten problemas de comunicación es mediante la sincronización entre dispositivos o recibir constantemente información entre sí. En el primer caso, el dispositivo simplemente puede transmitir sus datos utilizando CSMA-CA no ranurado. En este último caso, otras medidas deben tomarse con el fin de lograr la sincronización. Estas medidas están más allá del alcance de esta norma.

### **2.5.2.2 Estructura de la trama**

La estructura de la trama se ha diseñado tratando de mantener un mínimo de complejidad pero lo suficientemente robusta para transmitir en condiciones de ruido. Cada capa de protocolo sucesiva, añade a la estructura cabeceras de capa específica. Esta norma define cuatro estructuras de trama:

#### **a) Trama Beacon**

Esta trama es usada por el coordinador para transmitir beacons. La figura 34 muestra la estructura de la trama beacon, que inicia desde la subcapa MAC. Un coordinador puede transmitir beacons de red en una PAN con beacons habilitados. La carga útil MAC contiene especificaciones de la supertrama, campos GTS, campos de direcciones pendientes y carga útil de beacon. La carga útil MAC está precedida por una cabecera MAC (MHR) y se añade un pie de trama MAC (MFR). El MHR contiene el campo de control de trama MAC, el número de secuencia de beacon (BSN), campos de direccionamiento y opcionalmente una cabecera auxiliar de seguridad. El MFR contiene una secuencia de verificación de trama de 16 bits (FCS). El MHR, carga útil MAC y MFR juntos forman la baliza de trama MAC (ejemplo, MPDU).

La trama beacon MAC es empaquetada a la capa Física como la unidad de datos del servicio PHY (PSDU) y se convierte en la carga útil de PHY. La carga útil de paquete de capa Física PHY, está precedida por los campos de secuencia de preámbulo e inicio de delimitación de trama que conforman la cabecera de sincronización, una cabecera PHY (PHR) que contiene la longitud de la carga útil

PHY en octetos. El SHR, PHR y carga PHY en conjunto forman el paquete PHY (es decir, PPDU).

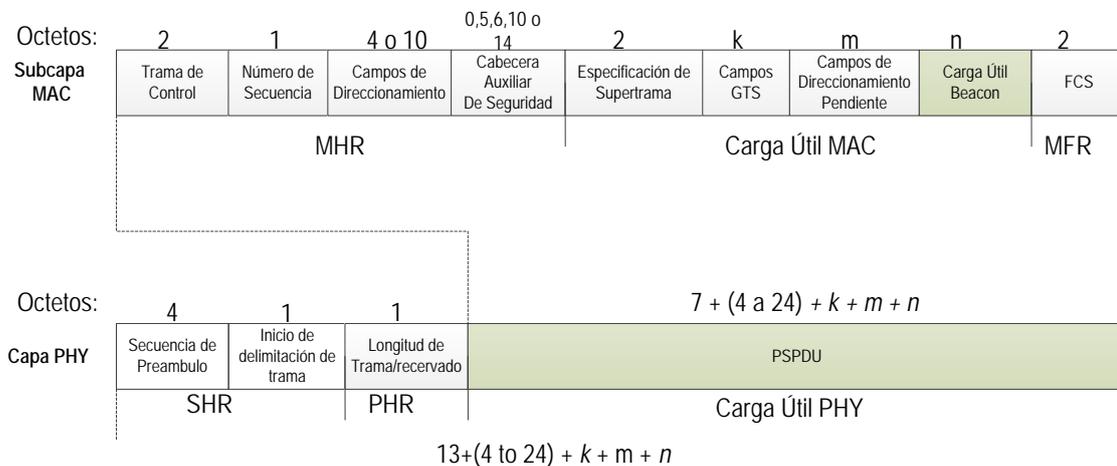


Figura 36. Vista esquemática de la trama Beacon y paquete de capa PHY

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

## b) Trama de Datos

La carga útil de datos se empaqueta en la subcapa MAC y se conoce como la unidad de datos de servicio MAC (MSDU). La carga útil de MAC se precede con un MHR y añade con una MFR. El MHR contiene el campo de trama de control, el número de secuencia de datos (DSN), los campos de direccionamiento, y opcionalmente el encabezado de seguridad auxiliar. El MFR se compone de una FCS de 16 bits. El MHR, carga útil MAC y MFR juntos forman la trama de datos MAC, (es decir, MPDU).

El MPDU se pasa a la PHY como la PSDU, que se convierte en la carga útil PHY. La carga útil PHY se precede con un SHR, que contiene la secuencia de preámbulo y los campos SFD, y un PHR que contiene la longitud de la carga útil PHY en octetos. La secuencia de preámbulo y los datos SFD permiten al receptor

lograr la sincronización de símbolos. El SHR, PHR, y carga útil PHY, forman el paquete PHY, (es decir, PPDU).

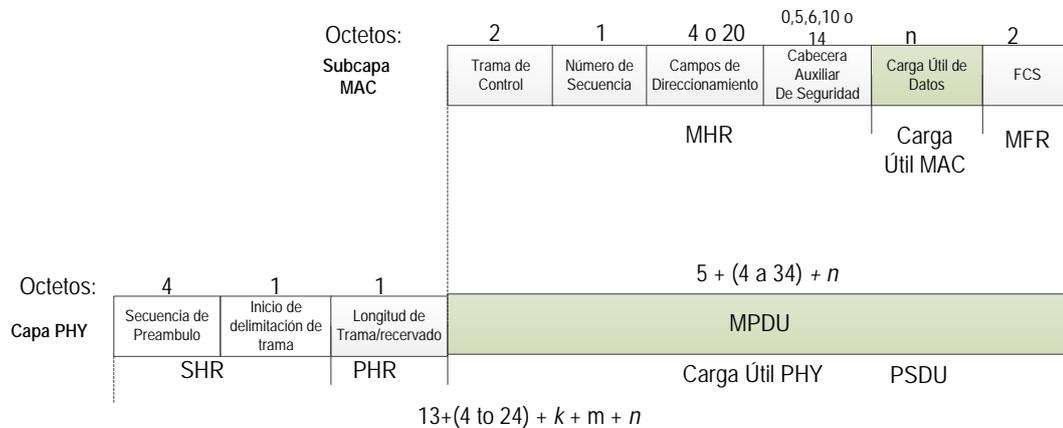


Figura 37. Vista esquemática de la trama de datos y el paquete PHY

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Sytems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Phsical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Peronal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

c) Trama ACK (Acknowledgment)

La estructura de la trama ACK o de confirmación se origina en la subcapa MAC. Esta trama está constituida por un MHR y un MFR, el MHR contiene el campo de control de trama MAC y DSN. El MFR se compone de una FCS de 16 bits. El MHR y MFR forman la trama de confirmación MAC (es decir, MPDU). La descripción de la trama se observa en la Figura 38.

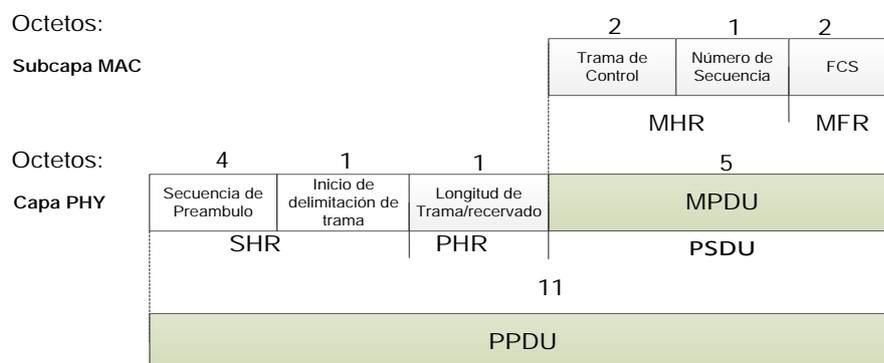


Figura 38. Vista esquemática de la Trama ACK

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange

between Sytems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Phsical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Peronal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

#### d) Trama de instrucciones MAC

La carga útil MAC de esta trama, contiene el campo del tipo de instrucción y la carga útil de la instrucción. La carga útil MAC está compuesta por una sección MHR y una MFR. El contenido de la sección MHR está compuesto por los campos control de trama MAC, DSN, campos de direccionamiento y en algunos casos un campo de seguridad auxiliar. La sección MFR contiene 16 bits FCS. Las tres secciones (MHR, carga útil MAC y MFR) conforman la trama de instrucciones MAC (MPDU). La Figura 39 muestra un esquema de la trama de instrucciones MAC.

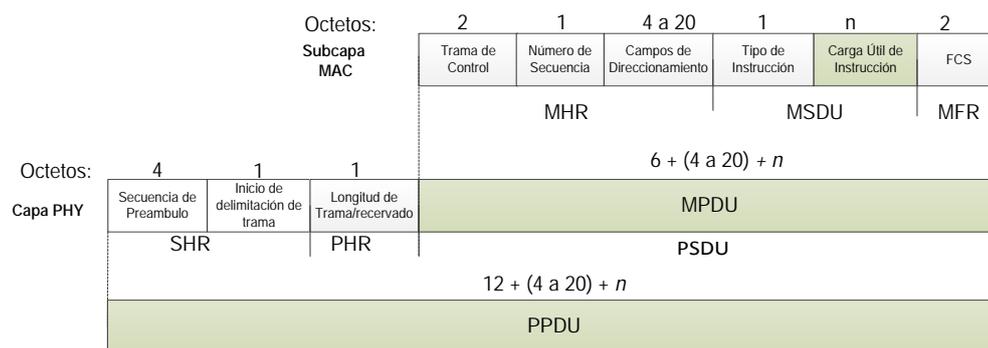


Figura 39. Vista esquemática de la Trama de Instrucciones MAC

Fuente: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Sytems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Phsical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Peronal Area Networks (WPANs). New York: IEEE Press. 2003

### 2.5.2.3 Seguridad

Respecto al tema de seguridad, las redes ad hoc no son diferentes de las demás redes inalámbricas. Existen vulnerabilidades en ataques de escucha pasiva y potencialmente manipulaciones activas, debido a que no se requiere de cables para participar en las comunicaciones. La naturaleza de las redes ad hoc y sus objetivos de bajo costo, imponen restricciones de seguridad adicionales que

hacen de estas redes entornos más difíciles de asegurar. Los dispositivos, como se ha mencionado, son de bajo costo y con capacidades limitadas en términos de poder de computación, almacenamiento disponible y gasto de energía, además no se puede asumir que dispongan de una base informática de confianza ni tampoco de un generador de números aleatorios a bordo. Las comunicaciones no son seguras en su totalidad debido a que no existe una infraestructura fija por la que los dispositivos puedan comunicarse de manera segura todo el tiempo, por el contrario los dispositivos participan en relaciones de corto plazo con dispositivos vecinos que quizá nunca iniciaron una comunicación antes. Estas restricciones limitan la elección de algoritmos y protocolos criptográficos, que influyen directamente en el diseño de la arquitectura de seguridad debido a que el establecimiento y mantenimiento de relaciones de confianza entre los dispositivos deben ser abordados con cuidado. El tema de la vida útil de las baterías y las limitaciones de costos, ponen límites severos en cuanto al gasto de seguridad que estas redes pueden tolerar, algo que es de menos interés para las redes de mayor ancho de banda. El mecanismo criptográfico en esta norma se basa en la criptografía de clave simétrica y utiliza claves que son proporcionados por los procesos de capa superior. El establecimiento y mantenimiento de estas claves esta fuera del ámbito de aplicación de esta norma. El mecanismo admite una implementación segura de las operaciones de cifrado además de la seguridad y almacenamiento del material clave auténtico. El mecanismo criptográfico proporciona combinaciones particulares de los siguientes servicios de seguridad:

- a) Confidencialidad de los datos: garantía de que la información transmitida sólo se da a conocer a las partes para las que está destinado.
- b) La autenticidad de los datos: Seguridad de la fuente que transmite la información (y, en el receptor, que la información no se ha modificado en tránsito).
- c) Protección Replay: La garantía de que se detecta la información duplicada.

La Tabla 25 ofrece una breve visión general de las posibles combinaciones y configuraciones. La seguridad es principalmente especificada en la pila ZigBee,

pero se basa en el cifrado y código de autenticación de mensajes con llave-hash (HMAC) en la capa MAC IEEE 802.15.4.

Tabla 25

*Características de modulación de la capa física*

Fuente: Adaptado de WI-FI™, BLUETOOTH™, ZIGBEE™ and WIMAX™, Labiod H., Afifi H., De Santis S., 2007, pag 131.

Frec	AB	Velocidad de símbolo		Características de los Datos		
		Vel. seg kseg/s	Modulación	Vel. de bit Kbit/s	Vel. símbolo ksímbolo/s	Símbolos
865/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binario
	902-928	600	BPSK	40	40	Binario
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16 Ortog.

Nota: Frec = Frecuencia; AB= Ancho de Banda; Vel. Seg = Velocidad de segmento; Ortg = Ortogonal; BPSK= Modulación por desplazamiento binario de fase; O-QPSK = Modulación offset por desplazamiento de fase en cuadratura.

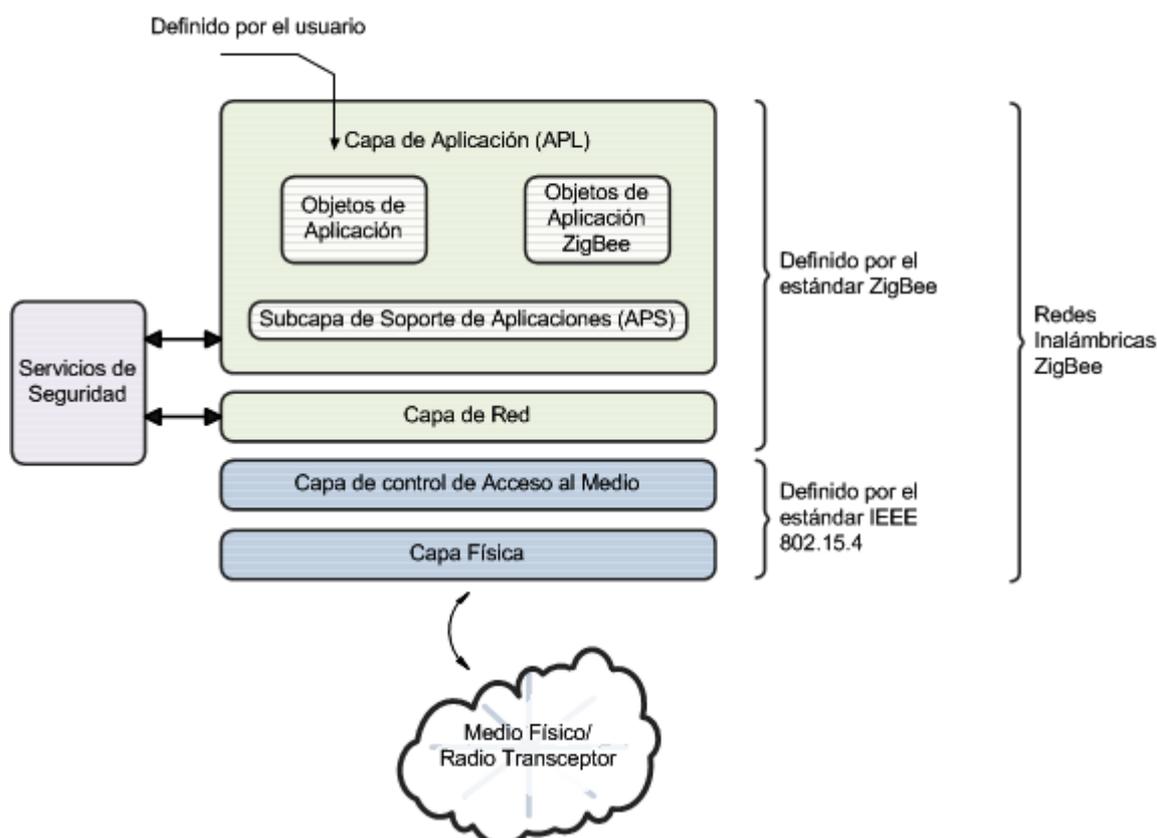


Figura 40. Capas del protocolo de red inalámbrica ZigBee

Fuente: Adaptado de Zigbee Wireless Networks and Transceivers, Farahani S., 2008, pag 5.

## 2.6 ESTÁNDAR ZIGBEE

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de comunicación inalámbrica de alto nivel, es especialmente utilizado para aplicaciones de radiodifusión digital de bajo consumo, esta base en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal Area Network o WPAN) que define las capas física y de control de acceso al medio para redes LR-WPAN, como se muestra en la Figura 40. ZigBee usa las capas PHY (Physical) y MAC (Medium Access Control) del estándar IEEE 802.15.4 e implementa una solución propia para las capas de red, aplicación y seguridad.

El objetivo de ZigBee son las aplicaciones para redes inalámbricas que requieren comunicaciones seguras y fiables con baja tasa de envío de datos y reducido consumo energético. El estándar ZigBee es una tecnología desarrollada para redes de sensores inalámbricas, con las siguientes características.

- Soporta velocidades entendidas entre los 20 kb/s y 250 kb/s.
- Área de cobertura de 10 m a 120 m.
- Opera en banda las bandas libres ISM de 2,4 GHz (Mundial), 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU).
- Tiene la capacidad de soportar 255 nodos coordinadores (un coordinador por red), donde cada red podrá tener hasta 255 nodos.
- La duración la batería puede ser de hasta dos años.
- Soporta las topologías de red de tipo estrella, punto a punto, malla y árbol
- Acceso al canal mediante CSMA/CA (acceso múltiple por detección de portadora que evita colisiones).
- Red escalable.
- Gestión automatizada de direcciones de dispositivos.

Algunas ventajas:

- Conveniente en caso de conexiones punto a punto y punto a multipunto.

- Diseñado para el direccionamiento de información y la actualización de la red.
- Opera en banda las bandas libres ISM 2.4 GHz para conexiones inalámbricas.
- Adecuado en redes de baja tasa de transferencia de datos.
- Direccionamiento de 16 bits a 64 bits.
- Reduce tiempos de espera en el envío y recepción de paquetes.
- Proporciona mecanismos de detección de energía (ED).
- Soporta múltiples topologías de red.
- Hasta 65.000 nodos en una red.

Algunas desventajas:

- La tasa de transferencia es muy baja y en ocasiones limitante.
- Comparado con otras tecnologías inalámbricas los paquetes son pequeños.
- Cobertura inalámbrica de pocos metros porque pertenece a la familia de redes WPAN.

### **2.6.2 LA CAPA DE RED**

Tres tipos de dispositivos se identifican en la tecnología ZigBee, los cuales se diferencian por la tarea que desempeñan dentro de la red. El dispositivo ZigBee final, también conocido como ZigBee End Device (ZED), es análogo al dispositivo IEEE RFD (Reduced function Device), realizando tareas simples de comunicación únicamente con el nodo drenó (coordinador o router) y no con sus vecinos. El tiempo de vida de la batería que alimenta al nodo, es mayor porque este tipo de nodo permanece inactivo la mayor parte del tiempo.

Un dispositivo ZED, tiene requerimientos mínimos de memoria y es, consecuentemente, más barato. El router ZigBee (ZR) es equivalente a la variante IEEE FFD (Full-Function Device), por la capacidad de encaminamiento de

paquetes hacia el nodo principal, además, puede interconectar dispositivos dentro de la topología de red y proporciona un nivel de aplicación para la ejecución de código del usuario. El coordinador ZigBee (ZC), al igual que el anterior dispositivo, es equivalente al IEEE FFD, sin embargo, este gestiona toda la red.

Las capacidades de procesamiento son mayores para este tipo de dispositivo, por lo que puede considerarse el más completo y complejo de los tres. Dentro de sus funciones está controlar la red, gestionar las rutas por donde se deben enviar los paquetes de datos y controlar la comunicación entre dispositivos.

Mediante la capa de red, ZigBee puede soportar topologías estrella, árbol y malla. Esta capa cumple con las funciones de encaminamiento multi-salto, descubrimiento y mantenimiento de rutas, seguridad, asociación y disasociación a la red y la asignación de direcciones físicas de 16 bits.

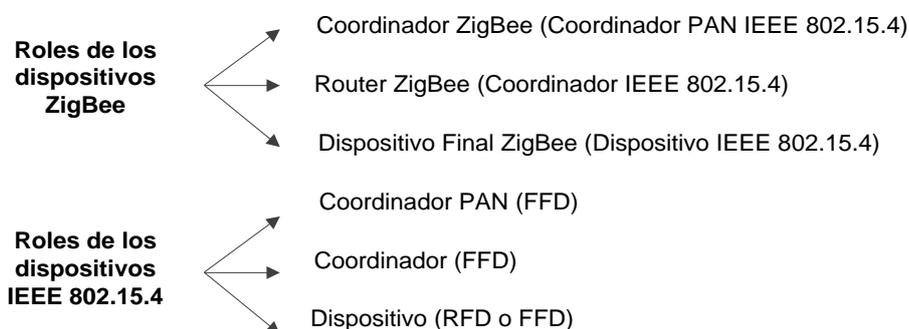


Figura 41. Roles de los dispositivos IEEE 802.15.4 y estandar ZigBee

Fuente: Adaptado de Zigbee Wireless Networks and Transceivers, Farahani S., 2008, pag 9.

### 2.6.2.1 Descubrimiento de la ruta

Con el propósito de establecer comunicación entre nodos, se realiza el reconocimiento de las rutas o descubrimiento de ruta, para determinar el camino de flujo de los datos. Este parámetro se almacena en la memoria del coordinador a manera de tabla de encaminamiento. ZigBee utiliza el protocolo bajo demanda basado en el enrutamiento por vector distancia o AODV<sup>6</sup>. Siempre que un nodo

<sup>6</sup> AODV Ad hoc On Demand Distance Vector

requiere una ruta para llegar a cierto destino, emite mensajes de solicitud de ruta (RREQ<sup>7</sup>) que se propaga a través de la red hasta que llega al destino.

El mensaje RREQ incorpora un ID\_RREQ<sup>8</sup>, el cual se incrementa cada vez que se envía un nuevo RREQ. El ID\_RREQ junto con la dirección de origen se usa como referencia única para descubrir una ruta. El nodo que recibe el mensaje RREQ, busca en su tabla de encaminamiento la ruta que coincida con lo solicitado, si se encuentra la ruta, el nodo compara la ruta del mensaje RREQ con el valor almacenado en la entrada de la tabla de encaminamiento. Si la métrica (num\_seq) almacenado es mayor, reenvía el mensaje RREQ hacia la red. De otra manera, registra el nuevo valor en la entrada de la tabla de encaminamiento. Para el caso de no existir tal ruta se crea una nueva entrada en la tabla de encaminamiento.

### 2.6.3 LA CAPA DE APLICACIÓN

De acuerdo a la Figura 40, la capa de aplicación está conformada por: La capa de soporte de Aplicación (APS), el dispositivo objeto ZigBee (ZDO) y los objetos de aplicación definidos por el fabricante. Los APS, son responsable de almacenar las direcciones en tablas, utilizadas para enlazar y enviar mensajes entre dispositivos asociados.

La capacidad de asociar o ligar (Binding), que es la habilidad de unir dos dispositivos basados en sus servicios y sus necesidades es parte de esta capa, además de ser responsable de descubrir otros dispositivos que operan en el área local. El ZDO es quien define las funciones de los dispositivos presentes en la red ZigBee (coordinador de red, router, dispositivo de red).

El dispositivo objeto ZigBee es también responsable de iniciar y responder peticiones de unión a una red. Los objetos de aplicación son definidos por el

---

<sup>7</sup> RREQ Route Request

<sup>8</sup> ID\_RREQ Identify Route Request

fabricante que implementa la aplicación. La pila de protocolo de ZigBee soporta arriba de 30 distintas aplicaciones implementadas al mismo tiempo.

#### **2.6.4 SEGURIDAD EN ZIGBEE**

La seguridad en ZigBee incluye métodos para el establecimiento y transporte de claves, protección de tramas y administración de dispositivos. La arquitectura ZigBee incluye mecanismos de seguridad en las capas MAC, de red y sub-capa de aplicación de la pila de protocolos. Además, la sub-capa de aplicación proporciona servicios para el establecimiento y mantenimiento de conexiones seguras.

Dado que los dispositivos de una WSN tienen limitaciones en recursos de comunicación y poder computacional, ciertos mecanismos de seguridad en la red no pueden ser aplicados. Se puede obtener mayor seguridad mediante cifrado eficiente de datos lo que incrementaría la longitud de los mensajes, sin embargo, esto implicaría mantener mayor tiempo activados los nodos, incurriendo en mayor consumo energético por lo que la sobrecarga de comunicación deberá ser mínima.

Los requerimientos de seguridad de las WSNs son:

- **Confidencialidad de los datos:** la confidencialidad de los datos implica mantener en secreto la información importante transmitida de personas no autorizadas. Un requisito indispensable para redes que se comunican mediante radiofrecuencia, debido a la facilidad de interceptar los datos. La confidencialidad puede lograrse cifrando la información antes de ser transmitida, de tal manera que sólo personas autorizadas puedan descifrar dicha información.
- **Autenticidad de los datos:** provee un medio para detectar mensajes de nodos no autorizados. Evita que nodos no autorizados participen en la red. Esta característica permite al receptor verificar que la fuente de los datos

es legal. Además, impide que los nodos procesen información inyectada por nodos cercanos, lo que evita que desperdicien recursos de procesamiento.

- **Integridad de los datos:** proporciona un medio para que el receptor del mensaje identifique si los datos han sido manipulados durante el trayecto antes de llegar al destino. La integridad de los datos está relacionada con la autenticación de datos desde la MAC, usada para autenticar datos y también proporcionar integridad de los mismos. El receptor de los datos calcula la MAC y la compara con una transmitida por el emisor. Si las dos capas MACs concuerdan, se asegura que los datos no fueron alterados.
  
- **Actualización de datos:** se asegura que los mensajes recibidos son reciente, y que no han sido manipulados durante el trayecto. Generalmente, se hace uso de contadores que se incrementan con cada mensaje recibido y rechaza cualquier mensaje con valores del contador anteriores.

### **2.6.5 ENCAMINAMIENTO**

Dentro de las WSN, mantener una estructura jerárquica no es práctico. La topología de red puede variar por fallos en los nodos o cambio de los mismos a otras áreas. Los nodos no cuentan con espacio de memoria necesario para mantener las tablas de encaminamiento por sobrecarga de mensajes.

Los protocolos de encaminamiento en redes de sensores inalámbricas deben cubrir las siguientes características:

- Mantener una tabla de encaminamiento razonablemente pequeña,
- Elegir la mejor ruta para un destino dado (ya sea el más rápido, confiable, de mejor capacidad o la ruta de menor coste),
- Mantener la tabla actualizada debido a fallos de nodos, cambios de posición o inserción de nuevos nodos.

## **2.7 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA**

De acuerdo al ambiente de trabajo donde opera el dispositivo, se ha considerado factores que pueden afectar el buen funcionamiento del mismo, tales como inclemencias del tiempo, interferencias electromagnéticas y pérdida de conexión por obstáculos.

Estas consideraciones han sido convertidas a requerimientos que se incorporan en el dispositivo.

### **2.7.2 DESCRIPCIÓN GENERAL**

El dispositivo es un sistema microprocesado capaz de sincronizar datos relacionados a los tiempos de cambio de fase en los semáforos avanzados y la capacidad de crear una red inalámbrica mediante dispositivos ZigBee.

De acuerdo a la función para la que se desarrolla el dispositivo, este se constituye en un prototipo orientado a la gestión del tráfico vehicular.

Para realizar diversas funciones, el sistema utiliza elementos electrónicos y tecnología inalámbrica que le permiten:

- Detectar y comunicarse con los demás dispositivos en el área de cobertura.
- Enviar información necesaria para la sincronización.
- Crear las conexiones inalámbricas necesarias para la red WSN

### **2.7.3 REQUISITOS DEL SISTEMA**

Los requisitos que cumple el sistema se basan en las condiciones del ambiente de trabajo, las especificaciones de potencia y las actividades que realiza.

#### **2.7.3.1 Requisitos en base al ambiente de operación**

- Inmunidad a interferencia de radiofrecuencia generada por dispositivos cercanos.
- Línea de vista entre dispositivos inalámbricos.
- Impacto mínimo al ambiente por emisión de radiofrecuencia.
- Moderada sensibilidad de recepción de señales de radiofrecuencia enviadas al dispositivo maestro

#### **2.7.3.2 Requisitos en base a especificaciones de potencia**

- Alimentación de los módulos con corriente continua para el funcionamiento.
- Protección contra conexión invertida y sobre-voltajes.

### **2.8 REQUISITOS EN BASE AL DESEMPEÑO SOLICITADO**

- Accesibilidad a los elementos empleados y costo de adquisición relativamente bajo.
- Margen de error pequeño en la lectura e interpretación de señales desde los sensores.
- Velocidad de adquisición, procesamiento y ejecución moderados.
- Vida útil larga con mantenimiento mínimo.

#### **2.8.2 APROXIMACIÓN EN BLOQUES**

Los subsistemas que componen el hardware se agrupan de acuerdo a las funciones de procesamiento, comunicación remota, respuesta y alimentación. La Figura 42, muestra los bloques de los subsistemas que componen el dispositivo.



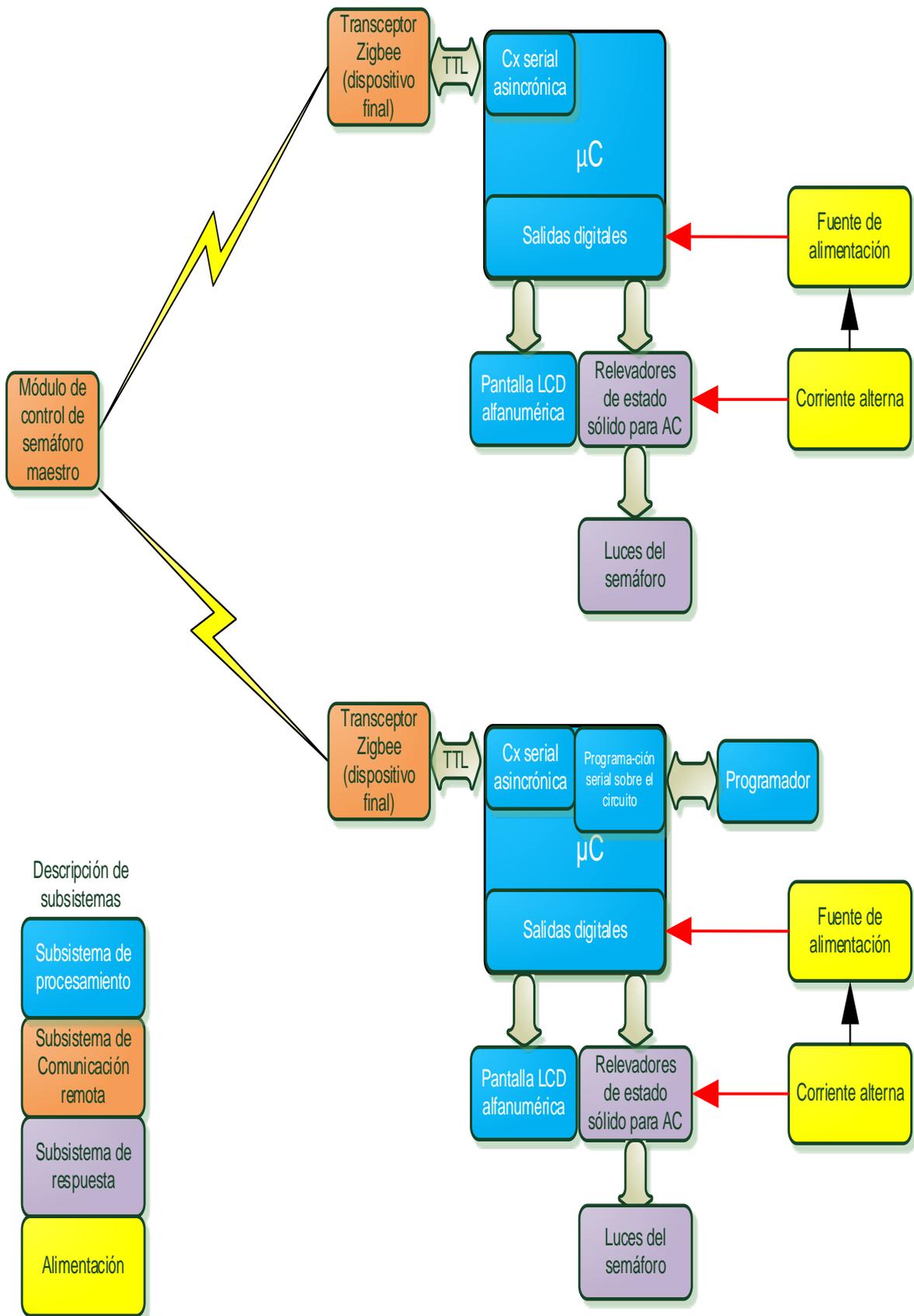


Figura 42. Diagrama de bloques del sistema.

Fuente: El Autor.

### **2.8.2.1 Subsistema de Procesamiento**

Orientados a moderar la comunicación de los módulos inalámbricos y digitalizar información pertinente de la misma, los microcontroladores incorporan el hardware y firmware necesario para efectuar con las siguientes funciones:

- Convertir la información enviada por el dispositivo maestro en señales que actúen sobre el subsistema de respuesta.
- Convertir los valores numéricos en caracteres ASCII para visualizado información del estado de la comunicación.

El subsistema incorpora el hardware necesario para grabar la programación en el microcontrolador sin la necesidad de retirar el integrado de la base de montaje.

### **2.8.2.2 Subsistema de Comunicación Remota inalámbrica**

La información que se requiere para modificar el cambio de estado de las señales visuales en los semáforos es transmitida por los módulos inalámbricos. Los datos que se envían no exigen gran capacidad de transmisión lo que motiva al uso de dispositivos inalámbricos con características de transmisión moderada y de bajo consumo.

Las distancias entre cada dispositivo no superan los 150 metros, rango suficiente para que el dispositivo maestro establezca una conexión con los dispositivos finales y de esta manera crear una red mesh capaz de transportar información de control y datos. Para diferenciarse entre dispositivos cada uno cuenta con una dirección única lo que permite establecer la función que realiza.

La Tabla 26 muestra la información que se envía dentro de la red WSN.

Los datos obtenidos por los módulos inalámbricos ZigBee provenientes del operador o por el microcontrolador del semáforo avanzado son recibidos de forma

serial por puerto de comunicación del microcontrolador tanto en el dispositivo maestro como en los dispositivos finales.

Tabla 26

*Información transmitida dentro de la red WSN*

Fuente: El Autor.

Sentido de Comunicación	Primitivas
Maestro - esclavo	Solicitud de Conexión al nodo esclavo para establecer la conexión inalámbrica
Maestro - esclavo	Envío de señal de reloj para sincronizar los tiempos
Maestro - esclavo	Envío de información para determinado día de la semana
Maestro - esclavo	Desconexión de la red

### 2.8.2.3 Subsistema de Respuesta

Toda la información procesada previamente de la sincronización inalámbrica, es enviada a través de las salidas digitales del subsistema de procesamiento como señales de control hacia los relevadores de estado sólido que se encargan de activar o desactivar las luces del semáforo.

### 2.8.2.4 Subsistema de alimentación

El dispositivo requiere ser energizado mediante una fuente de corriente continua para el funcionamiento de los elementos electrónicos, posee además la circuitería ante conexión inversa y sobre voltaje.

### 2.8.2.5 Subsistema de Visualización

Este subsistema comprende al dispositivo que permite visualizar (en caracteres alfanuméricos), los valores de las variables de tiempo de la fase. Esto permite verificar la coherencia los datos de sincronización.

Para tal propósito el modulo LCD es utilizado para mostrar valores recibidos del sincronismo.

Una vez analizado las diferentes tecnologías inalámbricas y haber seleccionado una en especial en la que se basa el presente proyecto, el siguiente paso lógico es el diseño del dispositivo final considerando los requerimientos de cada subsistema ya antes mencionados.

A través del diseño se evidencia los elementos necesarios para poder cumplir con los objetivos de cada subsistema, optando siempre por la selección de los mejores elementos que contribuyan al buen desempeño del sistema.

De tal manera, el siguiente capítulo aborda en detalle los elementos que constituyen cada bloque del sistema en general y que se justifican en la comparación de varios elementos de similares características.

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO DE LA RED WSN**

El presente capítulo contiene información relacionada al diseño del hardware y software, así como el criterio para la selección de los elementos que conforman el dispositivo necesarios para la realización de la red WSN.

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DEL HARDWARE**

El dispositivo ha sido concebido para que trabaje de manera genérica de forma que pueda ser utilizado en cualquier intersección de baja demanda de vehicular. Mediante pequeñas modificaciones en el hardware y firmware se prevé su aplicación en intersecciones más complejas.

A continuación se realiza la determinación de los componentes y su configuración, de manera que puedan apegarse a los requisitos del sistema y a las funciones concebidas en el diagrama de bloques.

##### **3.1.1 SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO**

Este subsistema es la base de funcionamiento del resto del sistema ya que es el centro de procesamiento de los datos. En este apartado se describe el criterio para el uso de un determinado microcontrolador.

###### **3.1.1.1 Unidad de procesamiento**

Existen diversos tipos de microcontroladores con características específicas diseñados para determinadas aplicaciones, en la mayoría de los casos estos componentes son usados dentro de sistemas embebidos<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> En un sistema embebido la mayoría de los componentes se encuentran incluidos en la placa base y son diseñados para cubrir necesidades específicas.

Debido a que la aplicación no requiere grandes capacidades de procesamiento, se ha considerado solo microcontroladores de 8 bits, de los cuales existen varios en el mercado. Así mismo existen varias empresas dedicadas a desarrollar este tipo de elementos, entre los más conocidos se encuentran los microcontroladores PIC de Microchip, el ATMEGA de ATMEL y el M68HC de Motorola. A continuación, en la Tabla 27, se presenta una comparación entre microcontroladores de las principales características consideradas necesarias en el sistema.

Tabla 27

*Comparación de microcontroladores*

Fuente: Hoja de datos de los dispositivos.

Dispositivo	M. Flash Bytes	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	INT	USART	Ent/Sal Digitales	Max. Frec.	Volt.
Atmega8	8K	1K	512	3	1	3 Puertos 28 pines	16 MHz	2.7-5.5
Atmega32	32K	2K	1K	3.	1	4 Puertos 40 pines	16 MHz	2.7-5.5
Atmega324P	32K	2K	1K	32.	2	4 Puertos 40 pines	20 MHz	1.8-5.5
PIC16F628	1K	224	128	10	1	2 Puertos 18 pines	20 MHz	3.3-5.5
PIC16F877	8K	368	256	15	1	4 Puertos 40 pines	20 MHz	2 - 5.5
PIC18F252	32K	16	256	17	1	3 Puertos 28 pines	40 MHz	2 - 5.5
68HC11E-X Motorola	0 - 768		0 - 2K	18	1	5 Puertos 56 pines	2 MHz	3.3-5.5

Nota: M. Flash=Memoria de Programa Flash; INT=Interrupciones, Max.Frec=Máxima Frecuencia; Volt=Voltaje

Los microcontroladores analizados en la Tabla 27, se han elegido por la disponibilidad en el mercado, además de la facilidad de programación de los mismos. Se ha considerado para la comparación ocho características que son importantes en el desarrollo del proyecto y que se justifican por los siguientes motivos:

Memoria de Programación Flash: es el espacio donde se almacena las instrucciones del programa para ser ejecutadas, de manera que se ha de considerar un tamaño suficiente para este propósito. De los microcontroladores

analizados, tres de ellos cuentan con la capacidad de 32 Kbyte de memoria Flash que es un tamaño razonable para el desarrollo del proyecto.

**Memoria de Datos SRAM:** es un espacio de memoria que se usa para almacenar variables que son modificadas por el programa principal durante la ejecución de los procesos, los datos almacenados en esta memoria se pierden al retirar la alimentación del circuito. Bajo el mismo criterio con respecto a la memoria Flash, la capacidad de la SRAM debe permitir un correcto funcionamiento del sistema.

**Memoria EEPROM:** en esta memoria se localizan los datos que son importantes y que pueden servir de base para el funcionamiento del sistema. Puesto que los datos que se almacenan en esta memoria no se borran al suprimir la fuente que energiza el circuito, pueden ser útiles para que al reiniciar el funcionamiento, el microcontrolador sea capaz de seguir sus operaciones con normalidad. Para este caso en especial, se requiere una buena capacidad, debido a que datos de temporización de las luces del semáforo no se deben perder en caso de existir una falla en la alimentación de la energía eléctrica.

**Interrupciones:** las interrupciones no son más que señales que le indican al procesador que debe interrumpir sus operaciones normales para atender a una petición especial. Respecto a este parámetro, resulta de mucha importancia puesto que la mayoría de las operaciones a ejecutar dentro del sistema, se las realiza a través de interrupciones prioritarias, tal es el caso de la interrupción por recepción de bit al momento de recibir información mediante los módulos inalámbricos o la interrupción por desbordamiento del Timer utilizado para temporizar el tiempo base del sistema.

**USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter):** es un módulo de comunicación para la transferencia de datos en forma serial, este módulo es importante debido a que los datos obtenidos mediante los dispositivos

inalámbricos son entregados a través de comunicación serial hacia el microcontrolador.

**Entradas/Salidas Digitales:** son líneas de conexión con las que el procesador puede comunicarse con el mundo exterior, estas pueden ser configuradas como entradas de datos o salida de los mismos y de ser necesario operar de forma diferente cada pin del encapsulado. Se requiere por tanto, tener el número suficiente de entradas/salidas para controlar el sistema de semaforización, visualización y las comunicaciones entre módulos inalámbricos.

**Frecuencia de operación y Voltaje:** el primero de estos factores define la velocidad en que procesa las instrucciones el microcontrolador, a mayor frecuencia más instrucciones procesa y el segundo factor hace referencia al consumo energético del encapsulado que se debe tener en cuenta para diseñar la placa base.

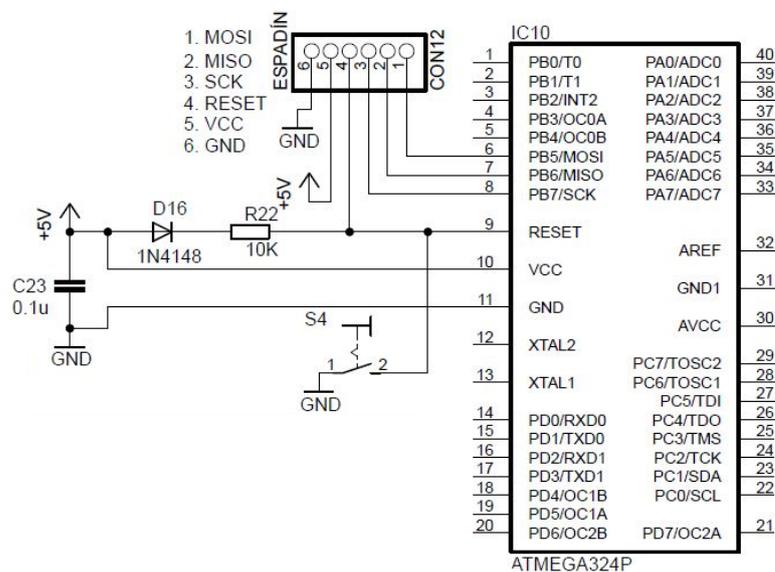


Figura 43. Circuito de conexión del microcontrolador

Fuente: El Autor.

En concordancia a lo expuesto, el microcontrolador que cumple con la mayoría de los requerimientos es el ATMEGA324P, el cual tiene suficiente capacidad de memoria tanto para programa como para datos, cuenta con módulos de comunicación serial y suficientes entradas/salidas para conectar los

diferentes periféricos necesarios. La información de este microcontrolador se encuentra en el Anexo A. La Tabla 28 describe las conexiones que se desprenden de cada uno de los pines del Microcontrolador e identifica si se tratan de entradas digitales o analógicas. En la Figura 43 se puede apreciar la distribución de los pines mencionados en la Tabla 28. Con el propósito de evitar la tarea de desmontar el microcontrolador de la placa base y reprogramarlo nuevamente, el circuito cuenta con la circuitería para actualizar el firmware mediante comunicación serial SPI.

Tabla 28

*Configuración de los puertos del microcontrolador ATmega 324P*

Fuente: Hoja de datos del microcontrolador ATmega324P.

	NOMBRE	PIN	E/S	A/D	FUNCIÓN / OBSERVACIÓN
PORTA	PA0/ADC0	40	S	D	RS LCD
	PA1/ADC1	39	S	D	RW LCD
	PA2/ADC2	38	S	D	E LCD
	PA3/ADC3	37	--	--	--
	PA4/ADC4	36	S	D	D4 LCD
	PA5/ADC5	35	S	D	D5 LCD
	PA6/ADC6	34	S	D	D6 LCD
	PA7/ADC7	33	S	D	D7 LCD
PORTB	PB0/T0	1	--	--	--
	PB1/T1	2	--	--	--
	PB2/INT2	3	--	--	--
	PB3/OC0A	4	--	--	--
	PB4/OC0B	5	--	--	--
	PB5/MOSI	6	E	D	ENTRADA DE DATOS DE PROGRAMACIÓN VÍA SPI RESPUESTA DEL MICROCONTROLADOR A LA PROGRAMACIÓN VÍA SPI
	PB6/MISO	7	S	D	SEÑAL DE RELOJ DE CONEXIÓN SP
PORTC	PC0/SCL	22	S	D	17 ULN2803
	PC1/SDA	23	S	D	18 ULN2803
	PC2/TCK	24	--	--	--
	PC3/TMS	25	--	--	--
	PC4/TDO	26	--	--	--
	PC5/TDI	27	--	--	--
	PC6/TOSC1	28	--	--	--
PC7/TOSC2	29	--	--	--	
PORTD	PD0/RXD0	14	E	D	RX MÓDULO INALÁMBRICO
	PD1/TXD0	15	S	D	TX MÓDULO INALÁMBRICO
	PD2/RXD1	16	S	D	11 ULN2803
	PD3/TXD1	17	S	D	12 ULN2803
	PD4/OC1B	18	S	D	13 ULN2803
	PD5/OC1A	19	S	D	14 ULN2803
	PD6/OC2B	20	S	D	15 ULN2803
	PD7/OC2A	21	S	D	16 ULN2803

Nota: E/S = ENTRADA/SALIDA; A/D = ANÁLOGO/DIGITAL

### 3.1.2 SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN REMOTA INALÁMBRICA

Este subsistema se basa en el uso de tecnología ZigBee mediante módulos que incorporan las características de esta tecnología, la información obtenida del medio inalámbrico es enviada al microcontrolador a través de comunicación serial incorporada en el módulo inalámbrico.

Tabla 29

*Comparación de módulos inalámbricos*

Fuente: Hoja de datos de los dispositivos.

Características Principales	XBEE-PRO S2B	ZIGDUINO R2	MICROCHIP
Microcontrolador	MC9S08QE32	Atmega128RFA1	MRF24J40MC
Voltaje de funcionamiento	3.3	3,3	3.3
De voltaje de entrada (máximo)	3.6	6-30V (transitorios de 20V y V-60)	3.6
Digital pines I / O	20	14 + auxiliar 3	12
Pines de entrada analógica	4	6 (0-1.8V)	--
E / S Protección	--	± 30V transitoria y - 2.5V a 5.8 V continuos	--
Corriente CC por pin de E/S	4 mA	20 mA	--
Corriente CC a 5 V por pin	--	250 mA	--
Corriente CC a 3,3 V por pin	200mA	200 mA	--
Memoria Flash	32 KB	128 KB de los cuales 2 KB son utilizados por el gestor de arranque	912 Bytes
SRAM	2 KB	16 KB	
EEPROM	--	4 KB	
Velocidad de reloj	50.33 MHz	16 MHz	20 MHz
Potencia de transmisión RF	10 dBm	3.5 dBm	
Sensibilidad del receptor	-102 dBm	-100 dBm	-95 dBm
Ganancia de la antena	-0.5 dBi	2 dBi	5 dBm
Cobertura	1500 m	100 m	1000 m
Consumo de corriente	117 mA (Transmisión) 47 mA (Recepción)	30 mA (transmisión, USB, no hay conexiones de E / S) 15 mA (transmisión, sin USB, sin conexiones de E / S) 6 mA (radio, no USB, no hay conexiones de E / S)	23 mA (Transmisión) 19 mA (Recepción)
Velocidad de datos	3.5 uA (en espera) 250 Kbps	250 mA (en espera) 250 Kbps – 2 Mbps	2 uA (en espera) 250 Kbps
Frecuencia de operación	2.4 GHz Banda ISM	2.4 GHz Banda ISM	2.4 GHz Banda ISM
Precio	59.90 USD	69.99 USD	43.86 USD

Se han considerado tres dispositivos de diferentes proveedores que incorporan la tecnología Zigbee y se ha elaborado una comparación para facilitar la elección del elemento que mejor se acople al diseño del proyecto. El Xbee-Pro S2B de Digi, Zigduino r2 de Logos Electromechanical y el MRF24J40MC desarrollado por la empresa Microchip son los tres dispositivos a comparar, estos han sido elegidos debido a la versatilidad que disponen para el desarrollo de aplicaciones. A continuación se muestra en la Tabla 29 las características de cada elemento.

El primero de los requerimientos tiene que ver con las necesidades de alimentación del módulo inalámbrico, debido a que el diseño de la placa se basa en voltajes que no supera los 12 voltios, el dispositivo a emplear no debe consumir más energía de la suministrada al circuito en general.

Al igual que el microcontrolador, el dispositivo inalámbrico debe contar con suficiente memoria para gestionar los datos transmitidos para la sincronización de los semáforos. Por último, el requerimiento más importante a considerar es la potencia de salida de los módulos y el alcance de los mismos, debido a que se necesita cubrir como mínimo una distancia de 100 metros entre semáforo y semáforo, el dispositivo debe contar con la potencia y el mayor alcance posible.

Los tres dispositivos cuentan con características específicas que los diferencian entre sí, en el caso del MRF24J40MC de Microchip su mayor ventaja es que acopla fácilmente a los microcontroladores PIC y su bajo precio, sin embargo su capacidad de memoria es reducida, el alcance que promocionan ha sido cuestionado por los usuarios de los módulos y solo cuenta con salidas y entradas para la comunicación con el microcontrolador lo que reduce el número de aplicaciones de este módulo. El Xbee-Pro S2B opera con voltajes de 3.3v lo que no supera el máximo voltaje de la placa base, su capacidad de memoria es suficiente para manejar los datos transmitidos, la potencia de salida le permite alcanzar distancia de 100 metros con mucha facilidad y con conexiones muy

fiables y su precio es relativamente económico además de contar con un número considerable de pines de entrada/salida para varias aplicaciones.

Para el caso del Zigduino r2, su mayor ventaja está en la capacidad de envío de información que casi alcanza los 2 Mbps, cuenta con muy buena capacidad de memoria y pines de entrada/salida para aplicaciones varias pero su mayor desventaja está en el alcance que tiene de solo 100 metros en condiciones perfectas y su precio es un poco alto. De este análisis se establece que el mejor módulo es el Xbee-Pro S2B por las características presentadas mencionadas y presentadas en la Tabla 29.

Respecto a la conexión entre el microcontrolador y el módulo Xbee es simple y la forma en que intercambian datos es mediante la comunicación serial UART, tal como se puede observar en la Figura 44.

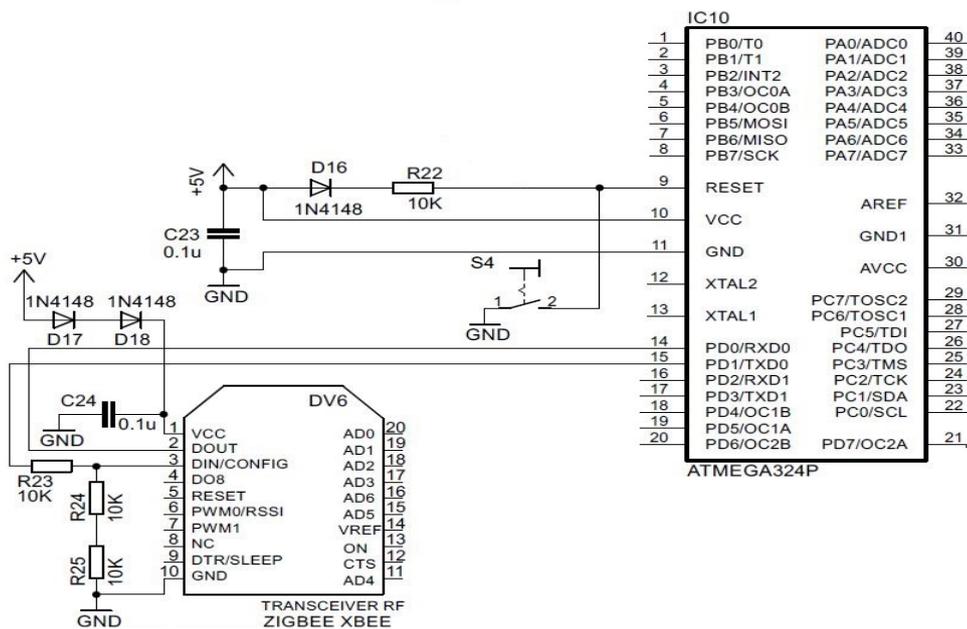


Figura 44. Conexión del módulo Xbee

Fuente: El Autor.

El transceptor ZigBee debe ser alimentado con un voltaje máximo de hasta 3.6v como indica la Tabla 29, debido a que se tiene una única fuente reguladora de voltaje a 5v para todo el circuito, los diodos D12 y D13 (1N4148) conectados

en serie reducen el voltaje a 3.6v que ingresa al pin 1 (VCC) del transceptor por la suma de la caída de tensión en cada diodo. La caída de tensión típica para este tipo de diodo es de 0.7v, determinando así el voltaje del transceptor:

$$V_{CC\text{Transceptor}} = V_{DD} - V_{\text{DIODOS}}$$

$$V_{CC\text{Transceptor}} = 5\text{v} - 2(0.7\text{V})$$

$$V_{CC\text{Transceptor}} = 3.6\text{v}$$

El microcontrolador opera con voltajes de entre 2.7v y 5.5v, por tal razón las señales enviadas hacia el módulo transceptor deben ser ajustadas para evitar daños en la electrónica del módulo. Para este propósito las resistencias R17, R18 y R19 forman un divisor de voltaje 2/3, calculado mediante la Ecuación 15.

$$V_{R_{xZB}} = V_{T_{xMICRO}} \left[ \frac{R_{17} + R_{19}}{(R_{17} + R_{19}) + R_{18}} \right] \quad (15)$$

$$V_{R_{xZB}} = 5.12\text{V} \left[ \frac{(10+10)\text{K}\Omega}{((10+10) + 10)\text{K}\Omega} \right] = 3.41\text{V}$$

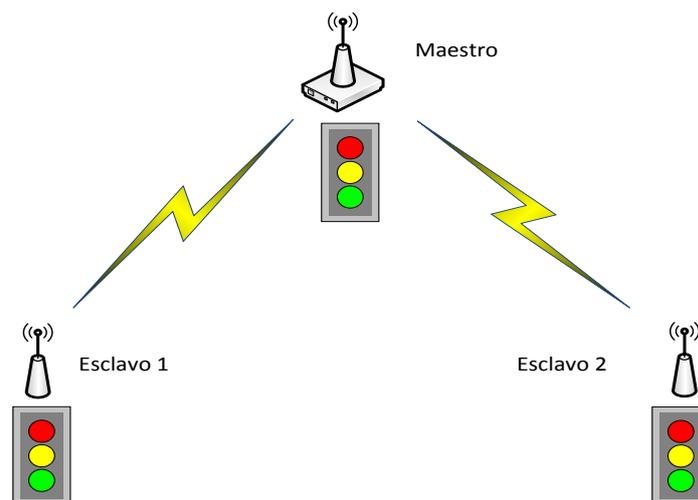


Figura 45. Diagrama de red inalámbrica ZigBee

Fuente: El Autor.

<sup>(15)</sup> Ecuación 15. Cálculo del voltaje de alimentación del módulo ZigBee

Los datos de sincronismo son enviados en forma de tramas a 2400 bps hacia los dispositivos esclavo mediante los enlaces inalámbricos como se muestra en la Figura 45.

### 3.1.3 SUBSISTEMA DE RESPUESTA

Las salidas del puerto del microcontrolador tienen suficiente intensidad de corriente como para encender un led, sin embargo no para mover un motor o excitar la bobina de un relé. Debido a esta razón se aumenta la cargabilidad del sistema mediante un driver de potencia, que permite obtener hasta 500mA por pin de salida del integrado, aplicando tensiones a la carga, en este caso los SSR<sup>10</sup> D4840 que enciende y apagan las luces del semáforo.

Tabla 30

#### *Comparación de drivers de potencia*

Fuente: Hoja de datos de los dispositivos.

ULN200X			
Símbolo	Parámetros	Valores	Unidades
Vo	Voltaje de salida	50	V
Vin	Voltaje de entrada (para ULN2002A/D - 2003A/D - 2004A/D)	30	V
Ic	Corriente continua en Colector	500	mA
Ib	Corriente continúen en la Base	25	mA
Tamb	Rango de operación en temperatura ambiente	- 20 to 85	°C
Tstg	Rango de temperatura de retención	- 55 to 150	°C
ULN280X			
VO	Voltaje de salida	50	V
VI	Voltaje de entrada (Excepto ULN2801)	30	V
IC	Corriente continua en Colector	500	mA
IB	Corriente continúen en la Base	25	mA
TA	Rango de operación en temperatura ambiente	0 to +70	°C
Tstg	Rango de temperatura de retención	- 55 to +150	°C

La elección del integrado para realizar esta acción se fundamenta en la comparación de dos drivers, estos son el ULN2803 y el ULN2003, que como ya se misiono sirven para activar los SSR, sin embargo no hay mucha diferencia

<sup>10</sup> **SSR**= Solid State Relay (Relé de Estado Solido)

entre ambos a no ser por el fabricante, a continuación se presenta la Tabla 30 de características que comparten ambos integrados.

Cualquiera de estos integrados puede ejecutar la acción requerida, de manera que se ha elegido el ULN2803 por un costo relativamente menor.

Como se puede apreciar en la Figura 46, este subsistema es la conexión entre la parte lógica del proyecto con la parte de potencia, aislando y previniendo daños mayores en la parte lógica que gobierna el proyecto.

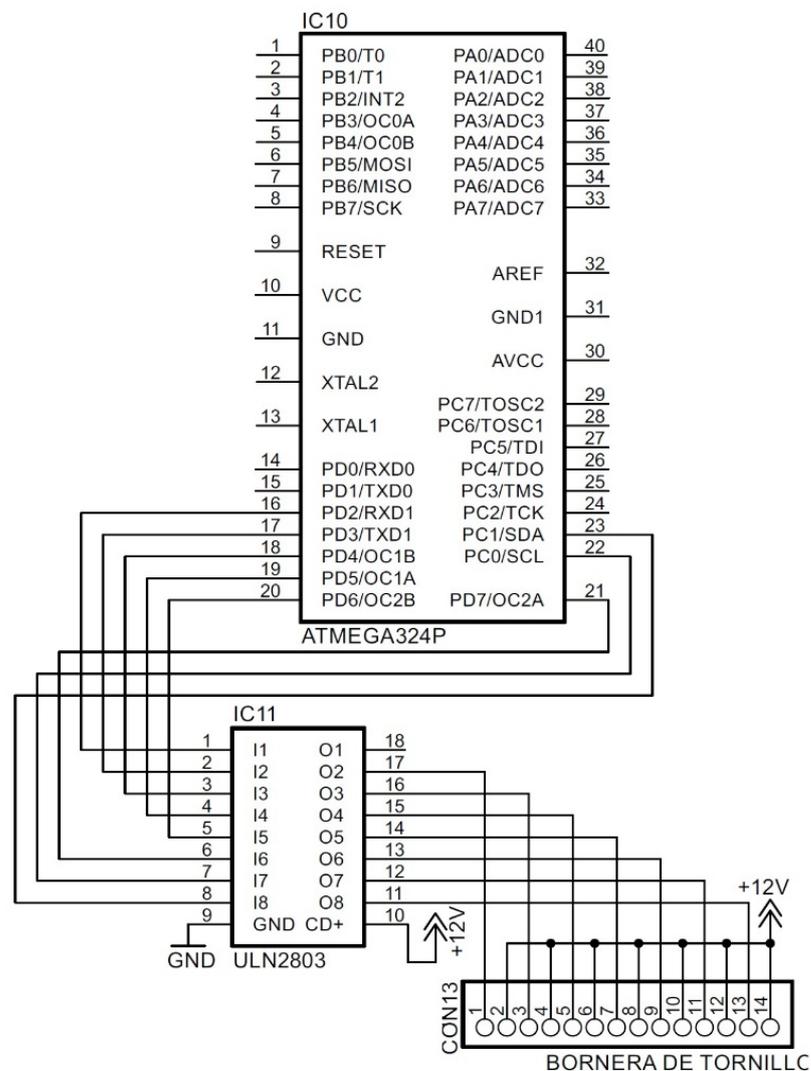


Figura 46. Conexión del driver de potencia ULN2803

Fuente: El Autor.

### 3.1.4 SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El voltaje de alimentación del circuito es regulado en dos etapas, la primera etapa está compuesta por un regulador que transforma la corriente alterna tomada desde la línea de baja tensión de 110v a 12v de corriente continua, este proceso lo realiza el regulador. La segunda etapa es donde se convierten los 12v de la etapa anterior en 5v para alimenta a todo el circuito, la Figura 49 muestra lo descrito. El diodo 1N5408 representado en la Figura 47 como D15, es utilizado como protección contra voltaje inverso en el caso de conectarse de forma inversa los polos positivo y negativo provenientes del regulador de 12v.

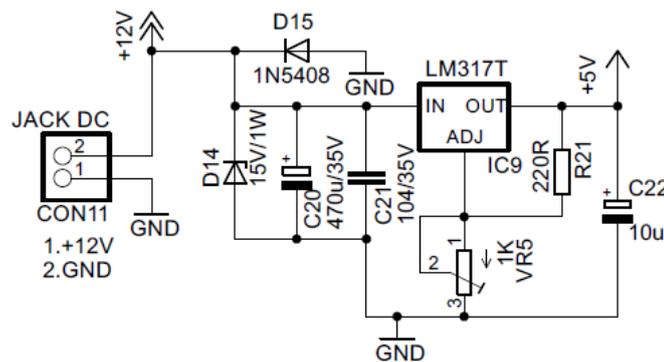


Figura 47. Circuito regulador de voltaje de alimentación

Fuente: El Autor.

El diodo zener D14, protege al circuito de variaciones de voltajes instantáneos o sobrealimentación, el filtro de desacoplo formado por C20 filtra la señal evitando el paso de altas frecuencias que puedan causar interferencia en las comunicaciones del microcontrolador. Finalmente el LM317T es un regulador de voltaje variable, entres sus características esta la limitación de corriente y la protección térmica contra sobrecargas, el voltaje de salida proporcionado por este integrado está dado por la *Ecuación 16* y representado por la Figura 48.

$$V_{out} = 1,25V \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (16)$$

<sup>(16)</sup> Ecuación 16. Calculo del voltaje de salida del LM317T

Considerando  $1K\Omega$  de resistencia variable como valor para R2,  $220\Omega$  para R1 y aplicando la *Ecuación 16*, se puede obtener un voltaje máximo de salida de 7v, los condensadores C21 y C22 responden a la configuración óptima de funcionamiento del regulador.

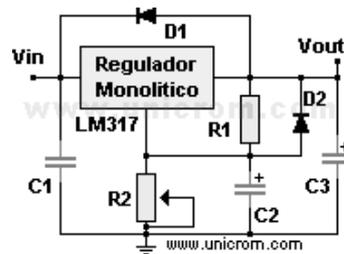


Figura 48. Configuración electrónica del regulador LM317T

Fuente: Características del regulador de voltaje LM317. Recuperado el 12 Diciembre del 2012, de [http://www.unicrom.com/Tut\\_LM317.asp](http://www.unicrom.com/Tut_LM317.asp)

### 3.1.5 SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN

La interacción entre los dispositivos electrónicos y los operadores, requiere interfaces que faciliten la comprensión del sistema, por lo que se hace necesario algún tipo de pantalla que muestre información del funcionamiento, a fin de actuar de acuerdo a situación presentada.

Los dispositivos secundarios, al ser esclavos, solo presentan la información de los tiempos de temporización de las luces del semáforo en determinado instante de tiempo, además solo se muestran las iniciales de las variables V de verde, A de ámbar y R de rojo junto con los tiempos de fase.

Para elegir el display que servirá de interfaz, se comparan dos tipos de LCD's basadas en el chip HD44780 que funciona mediante comunicación paralela al microcontrolador, a continuación la Tabla 31 muestra las características.

Como las variables a visualizar ocupan poco espacio no se requiere una pantalla demasiado grande, por tal motivo la LCD de 8 líneas por 2 filas cumple satisfactoriamente con las necesidades de visualización.

Tabla 31

Comparación de dispositivos de visualización

Fuente: Hoja de datos de los dispositivos.

Rango Máximo Absoluto 16x2					
ITEM	Symbol	Min	Tipo	Max	Unidad
Voltaje de Operación	VDD	4.5	5.0	5.5	V
Corriente de Operación	IDD	1.0	1.3	1.5	mA
Voltaje de LED	VLED	1.5	5.0	5.5	V
Corriente de LED	ILED	75	140	200	mA
Temp. Operación	Topr	-20	-	+70	°C
Temp. retención	Tsto	-30	-	+80	°C

Características Eléctricas 8x2						
ITEM	SYMBOL	CONDITION	STANDARD VALUE			UNIT
			MIN.	TYP.	MAX.	
Voltaje de Entrada	VDD	VDD = + 5 V	4.7	5.0	5.3	V
Corriente de la fuente	IDD	VDD = + 5 V	1.0	1.2	1.5	mA
Voltaje de LED	VF	25 °C	-	4.2	4.6	V
Corriente de LED	IF	25 °C	-	70	140	mA
Corriente de la fuente de alimentación	IEL	VEL = 110 VAC, 400 Hz	-	-	5.0	mA

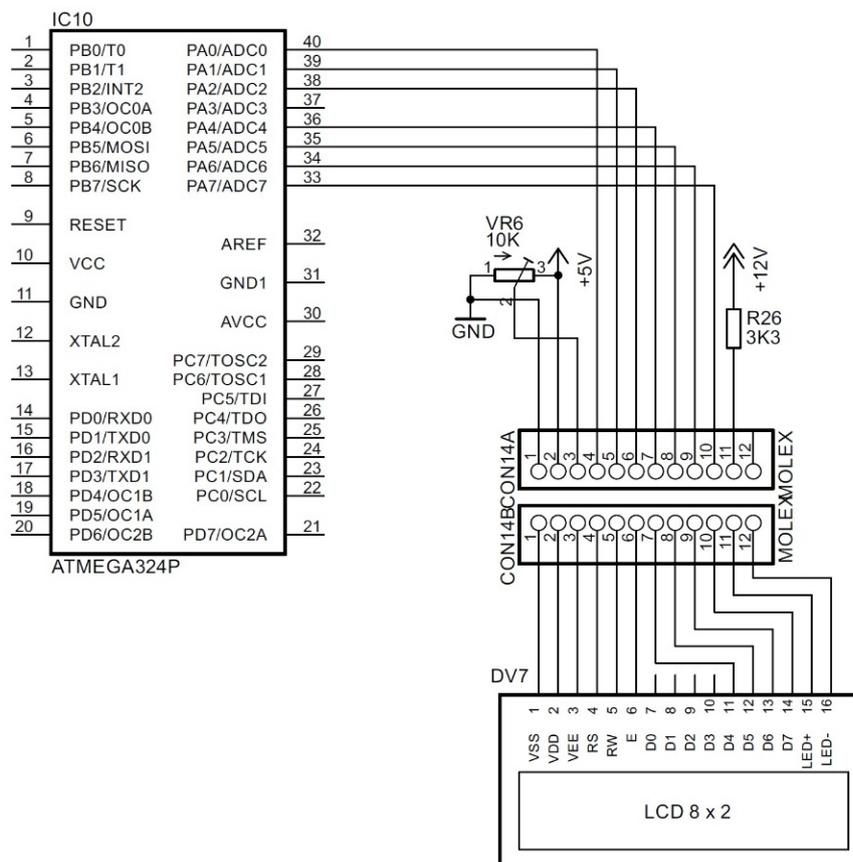


Figura 49. Diagrama de conexión pantalla LCD 8x2 y micro controlador

Fuente: El Autor.

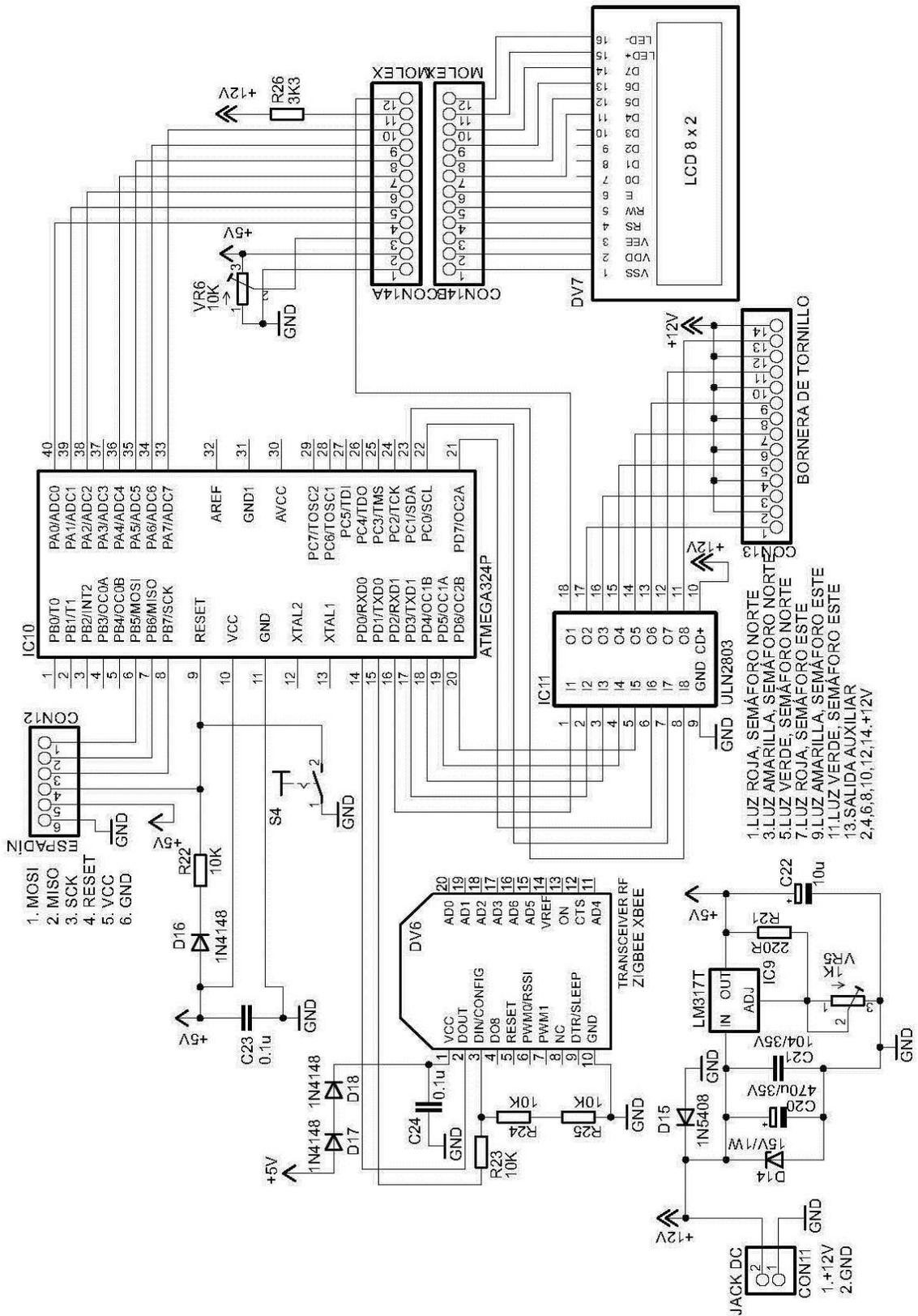


Figura 50. Diagrama general del circuito

Fuente: El Autor

La Figura 49, muestra la conexión y configuración entre el microcontrolador y la LCD, se puede observar que se utiliza el Puerto A del microcontrolador exclusivamente para manejar la LCD, los tres primeros pines son de control PA<0:2> y los pines PA<4:7> son utilizados como bus de datos.

La retroiluminación de la pantalla LCD se obtiene mediante los LEDs alimentados con el voltaje de entrada de la primera etapa de regulación de 12v, con el fin de limitar la corriente y evitar quemar los LEDs, la resistencia R26 de 3K3Ω limita la corriente evitando el consumo excesivo en los LEDs.

El contraste se ajusta mediante el potenciómetro VR6 que tiene como voltaje de referencia 5v el mismo que hacer funcionar la LCD.

### **3.2 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO GENERAL**

La Figura 50, muestra una vista general del conjunto de subsistemas asociados al circuito, así como los elementos electrónicos necesarios para el funcionamiento del hardware tales como pulsadores, borneras y elementos más importantes como condensadores de desacoplo, diodos y resistencias.

### **3.3 DISEÑO DE LA PLACA DEL CIRCUITO IMPRESO**

El diseño de la placa está realizado mediante el programa Eagle, procurando optimizar el espacio de la placa, de manera que sea fácil de instalar y manipular. Las rutas del circuito, así como los elementos que componen la placa se muestran en las Figuras 51 y 52 respectivamente, hay que mencionar que las figuras muestran la vista superior del circuito. Ambas figuras se combinan en la Figura 53, para mostrar una vista completa de la placa.

El diseño de la placa es la misma para los dos nodos que componen el sistema, por lo que solo se muestra el diseño de una sola placa, donde lo que varía son la numeración de los elementos.

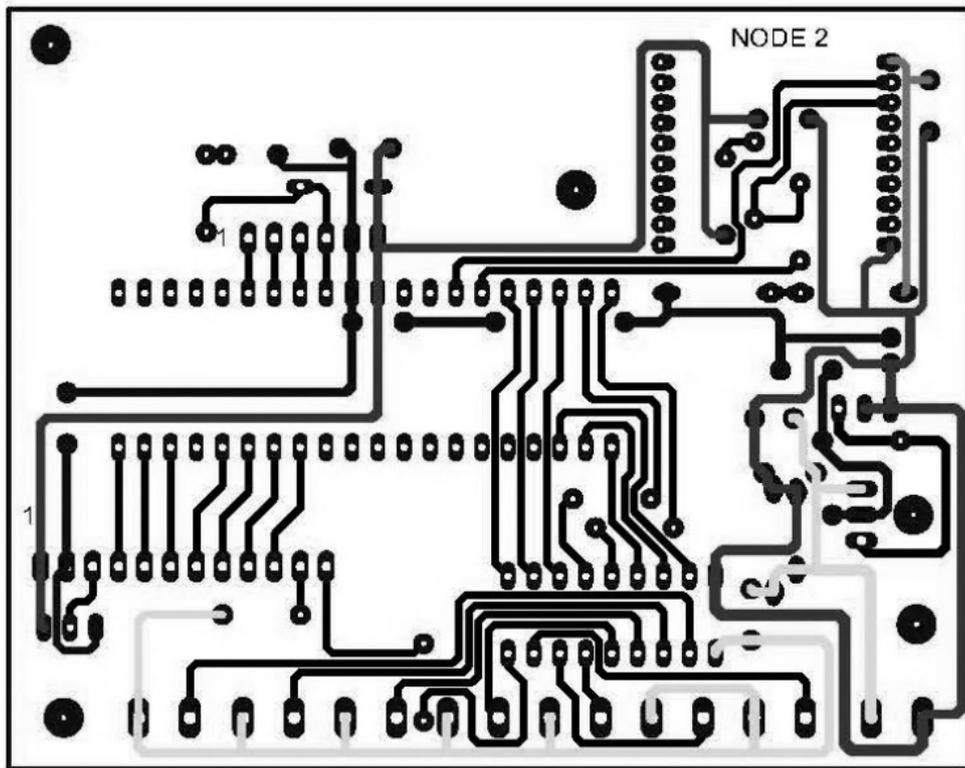


Figura 51. Diagrama de las rutas del circuito de uno de los nodos.

Fuente: El Autor.

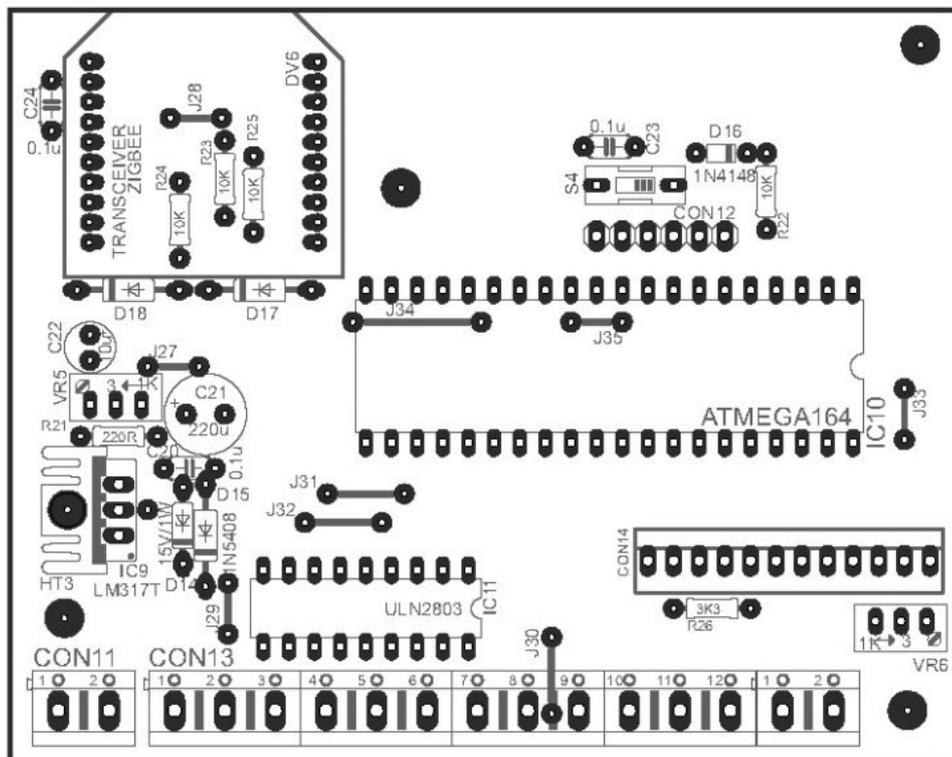


Figura 52. Elementos que componen el dispositivo nodo.

Fuente: El Autor.

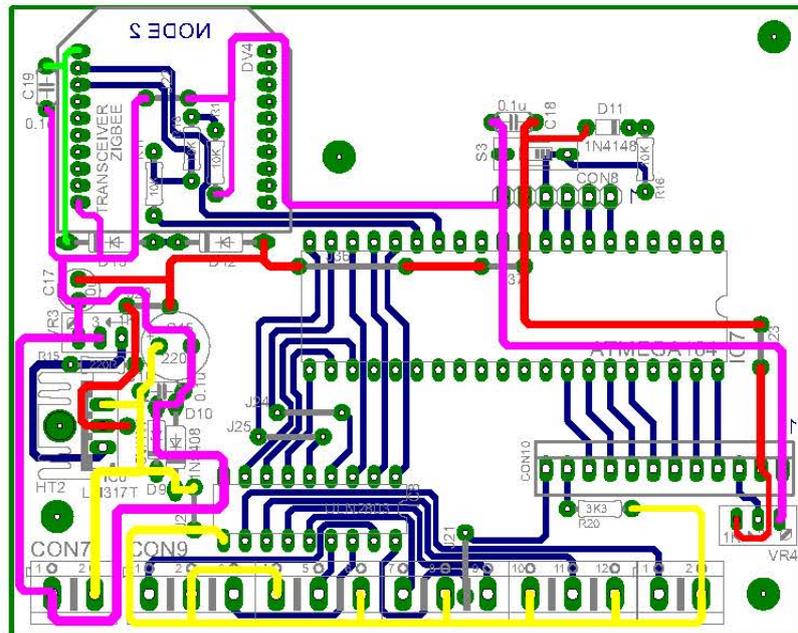


Figura 53. PCB de la placa principal de uno de los nodos.

Fuente: El Autor.

### 3.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FIRMWARE

El firmware es el bloque de instrucciones de máquina, que controla el funcionamiento del hardware. Existen diversos compiladores para la programación de microcontroladores de cualquier marca y tipo, siendo los compiladores en lenguaje C los más empleados a la hora de desarrollar.

El lenguaje C para microcontroladores es de nivel intermedio e incorpora muchos elementos propios del lenguaje ensamblador, permitiendo acceder a los registros del sistema y manipulación de las direcciones de memoria incorporadas al integrado, pero con la ventaja de poder utilizar estructuras de datos y realizar operaciones más legibles y otras características de los lenguajes de alto nivel.

Los requerimientos que se busca en un lenguaje de programación están relacionados con los siguientes criterios:

- La incorporación del uso de constructores de alto nivel.
- La capacidad de utilizar instrucciones de bajo nivel (ensamblador).

- La capacidad de general programas eficientes.
- La flexibilidad del usarse con varios dispositivos (microcontrolador).

Las aplicaciones que traducen el lenguaje de alto nivel a lenguaje maquina se denominan compiladores.

Entre los compiladores para microcontroladores AVR está el compilador CODEVISION AVR, basado en lenguaje C, e incluye un generador de código automático llamado CODEWIZARD AVR que genera todo el código necesario para la inicialización de los periféricos internos de los microcontroladores AVR, así como de algunos periféricos externos (usando librerías que también incluye).

Dichas librerías dan soporte a un gran número de aparatos frecuentemente usados como son pantallas LCD, relojes de tiempo real RTC, sensores de temperatura, UART, entre otros.

### **3.4.1 PROGRAMA PRINCIPAL**

El siguiente diagrama de flujo representado por la Figura 54, describe el funcionamiento del programa principal, como se puede observar el esquema es sencillo, debido a que las operaciones más complejas se las realiza en las subrutinas e interrupciones. El firmware que gobierna el microcontrolador, ejecuta acciones que dependen del cambio de determinada acción o evento, a lo que se denomina máquina de estados. El programa principal después de inicializar variables y registros, permanece en un bucle infinito en espera de comandos que indiquen que se debe realizar cambios en el comportamiento del semáforo, permitiendo utilizar eficientemente el procesamiento del microcontrolador.

Los comandos recibidos de manera inalámbrica y son enviados al microcontrolador a través del módulo de comunicación serial asincrónico UART, que activa la interrupción por recepción UART.

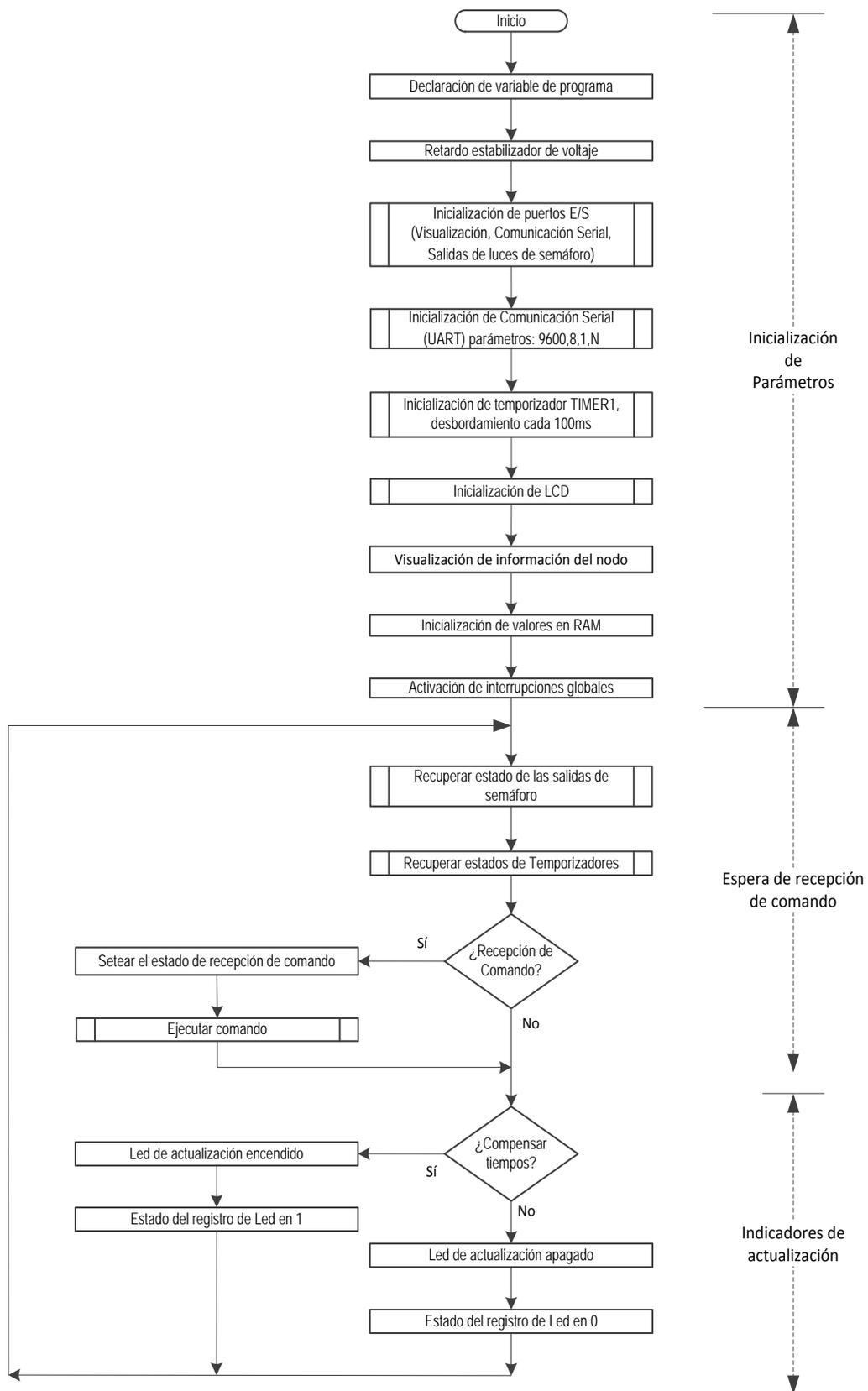


Figura 54. Diagrama de flujo del Programa Principal

Fuente: El Autor.

La Tabla 32, resume las configuraciones presentes en los módulos del microcontrolador.

Tabla 32  
Parámetros de configuración de los módulos del microcontrolador  
Fuente: El Autor.

Módulo	Configuración
MÓDULO UART	9600bps, 8 bits de datos, 1 bit de parada, ningún método de paridad, interrupción por recepción de byte.
COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	2400bps, 8 bits de datos, 1 bit de parada, ningún método de paridad, interrupción por recepción de byte.
TIMER1	Desbordamiento cada 100ms, interrupción por desbordamiento.

A manera de estandarizar o generalizar el programa, la mayoría de las funciones que realiza el microprocesador se las realizan en pequeños programas llamados subrutinas, las cuales van desde la configuración de los puerto de E/S hasta el manejo de las luces del semáforo ejecución de comandos.

### 3.4.2 SUBRUTINAS

Como se ha mencionado, se emplea subrutinas para determinadas funciones, entre las que se encuadra el control de encendido de las luces del semáforo y la actualización de los estados del mismo.

#### 3.4.2.1 Subrutina de encendido de las luces del semáforo

Se ejecuta dentro de la interrupción por desbordamiento de TIMER1 y es la respuesta al modo de intermitencia a la que se ha configurado el semáforo.

Los estados de las salidas activadas o desactivadas son registrados en la memoria RAM del microcontrolador, estos estados son utilizados para visualizar la animación de las luces del semáforo en la LCD.

El funcionamiento de esta subrutina se describe en la Figura 55, donde se muestra el proceso que se sigue para cada estado del semáforo.

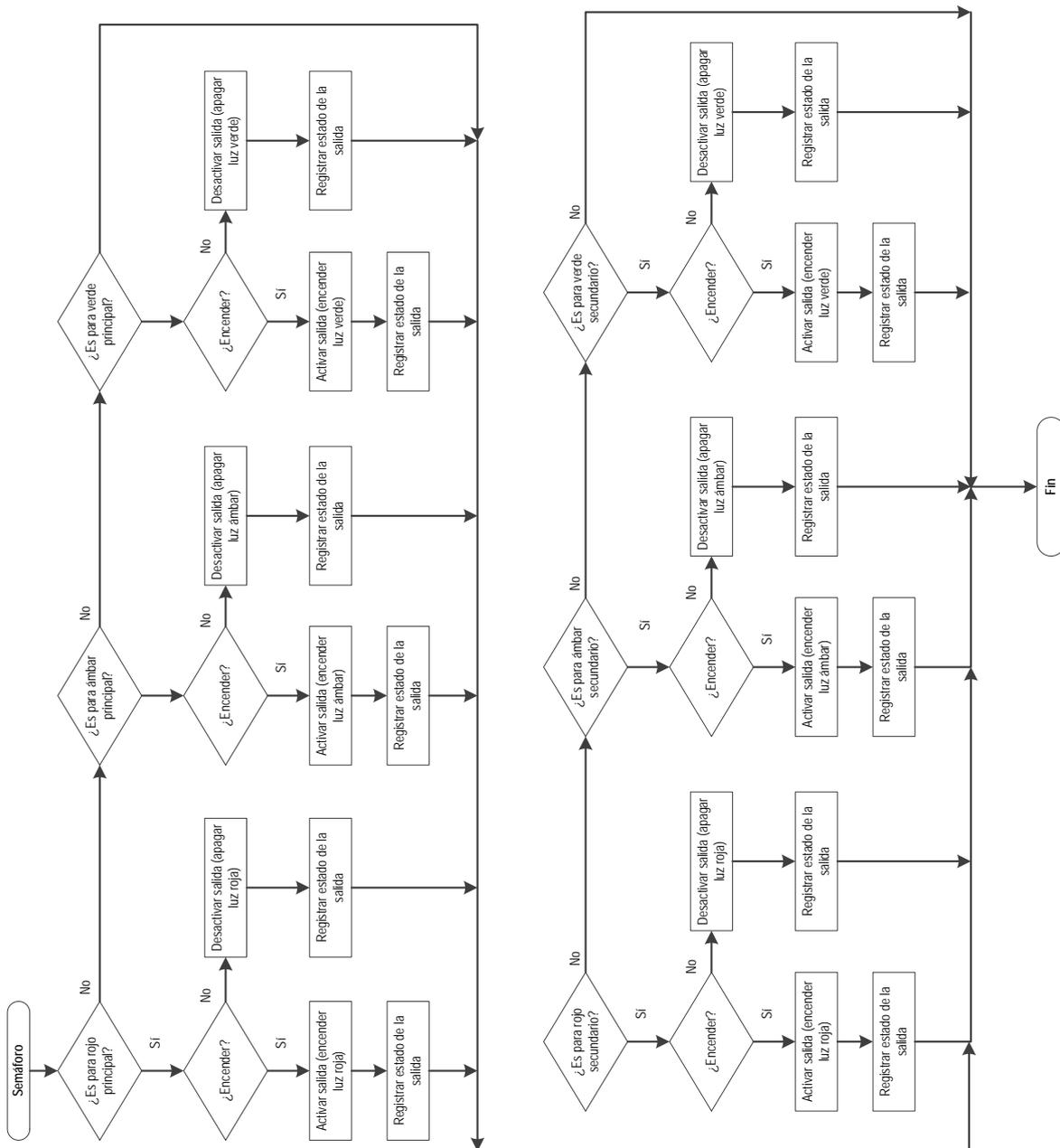


Figura 55. Subrutina para el encendido de las luces del semáforo

Fuente: El Autor.

### 3.4.2.2 Subrutina de actualización de configuración de estados

Dentro de esta parte del programa se modifica o actualiza los tiempos correspondientes a los modos de operación del semáforo, así por ejemplo se ha de modificar para el modo normal, solo los tiempos de verde principal y rojo secundario, puesto que estos son los dos parámetros principales de los que se

obtiene el resto de los tiempos. Respecto a las intermitencias, estas hacen referencia al periodo que permanecerá apagado el foco del semáforo y luego vuelve a prenderse. En el modo normal el color ámbar permanece constante con un periodo de 3 segundos como base, este periodo solo se puede modificar por programa y no por operación externa. Para los casos de intermitencia simple y dual el color ámbar se pueden modificar igual que el resto de tiempos.

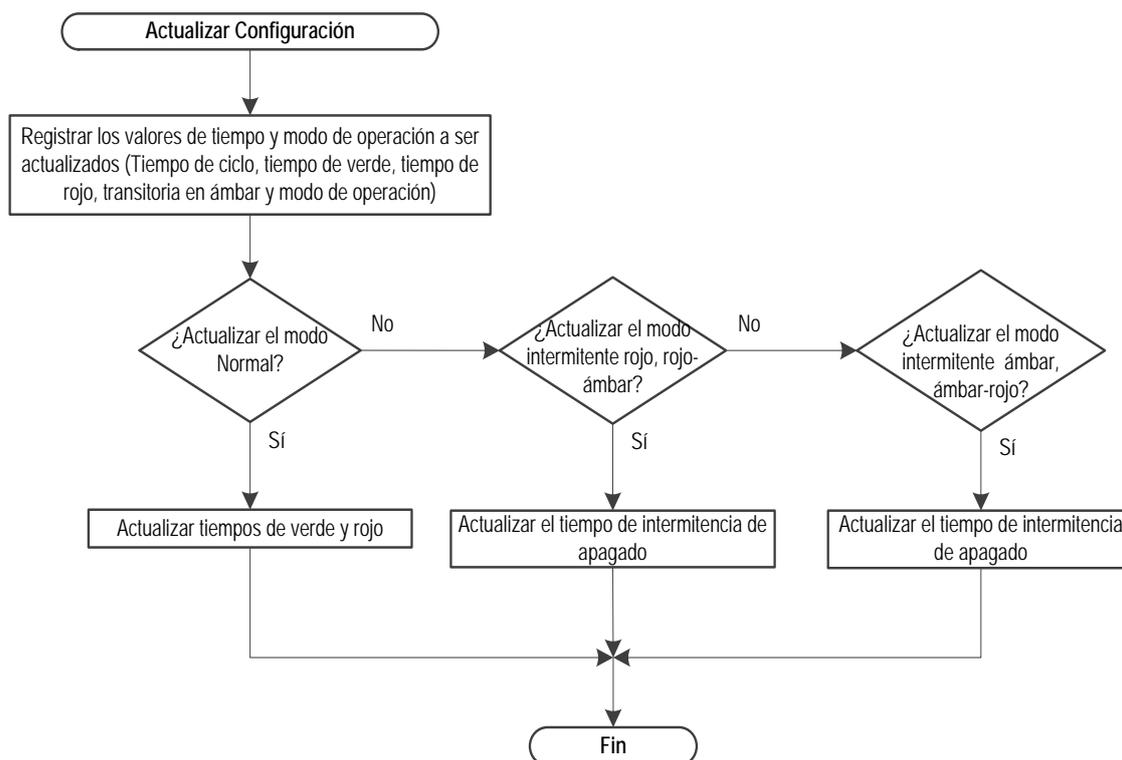


Figura 56. Subrutina de actualización de configuración de estados

Fuente: El Autor.

### 3.4.2.3 Subrutina de ejecución de comandos

El arreglo de programa que permite realiza cambios directos sobre el funcionamiento del semáforo, es representado a través del siguiente diagrama de flujo en la Figura 57. Esta subrutina realiza cálculos simples para determinar los tiempos de temporización de las luces del semáforo, además activa el permiso de actualización utilizado dentro de la interrupción por desbordamiento de TIMER1 como se observa más adelante en el tema de interrupciones.

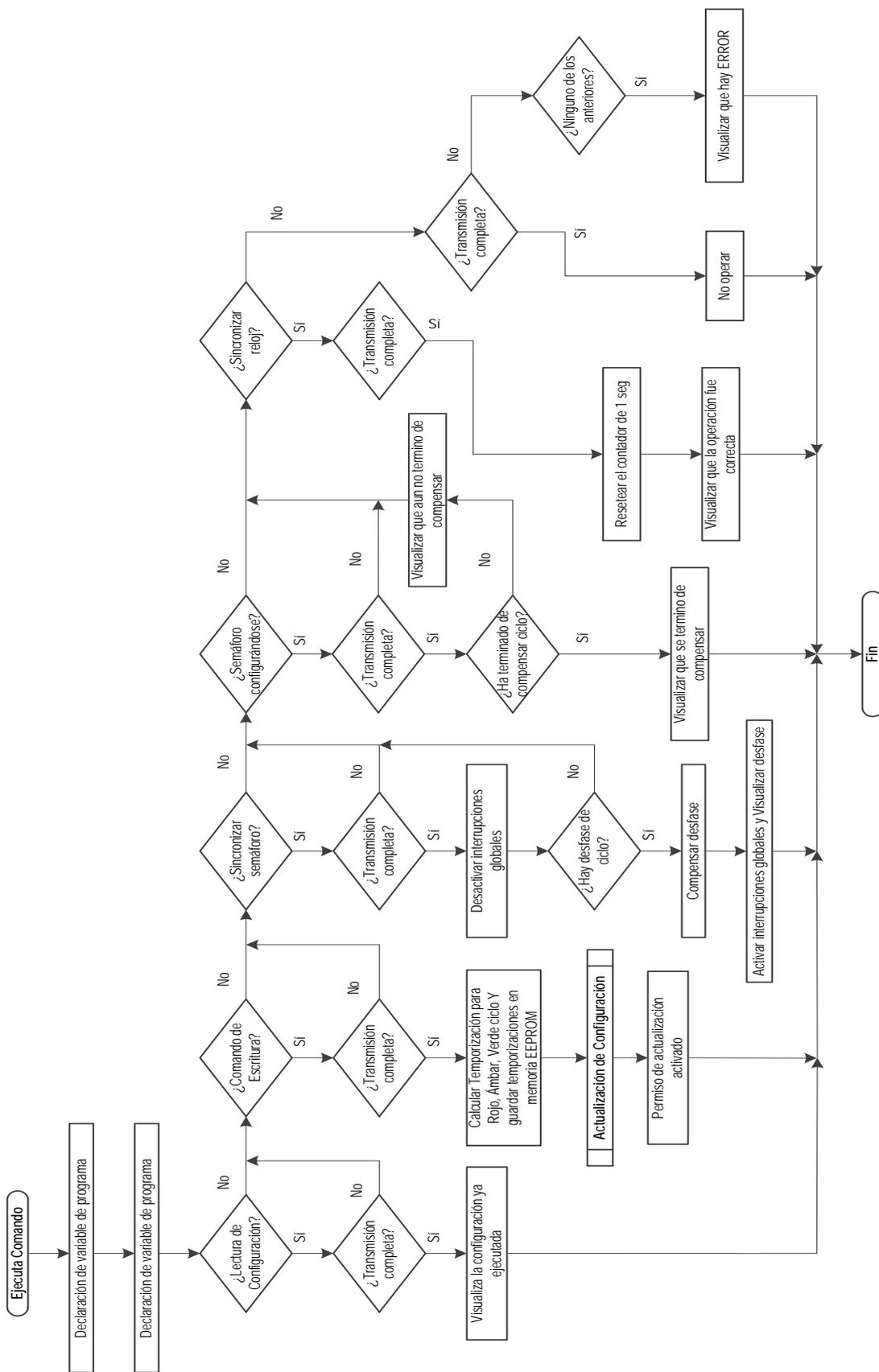


Figura 57. Subrutina de ejecución de comandos

Fuente: El Autor.

### 3.4.3 INTERRUPCIONES

Los procesos más representativos del proyecto, se realizan mediante las interrupciones de programa. Se distinguen dos interrupciones las cuales se ejecutan por discriminación de prioridad, las mismas que son:

- Recepción del dato por el módulo UART<sup>11</sup>.
- Desbordamiento del TIMER1.

#### 3.4.3.1 Recepción de dato por el módulo UART

Esta interrupción se encarga de la recepción y verificación de datos provenientes del módulo Zigbee. La información proveniente de los módulos Xbee-PRO ZB Serie2, es recibida bit a bit. Cada mensaje o comando termina con el símbolo “\$” de fin de trama.

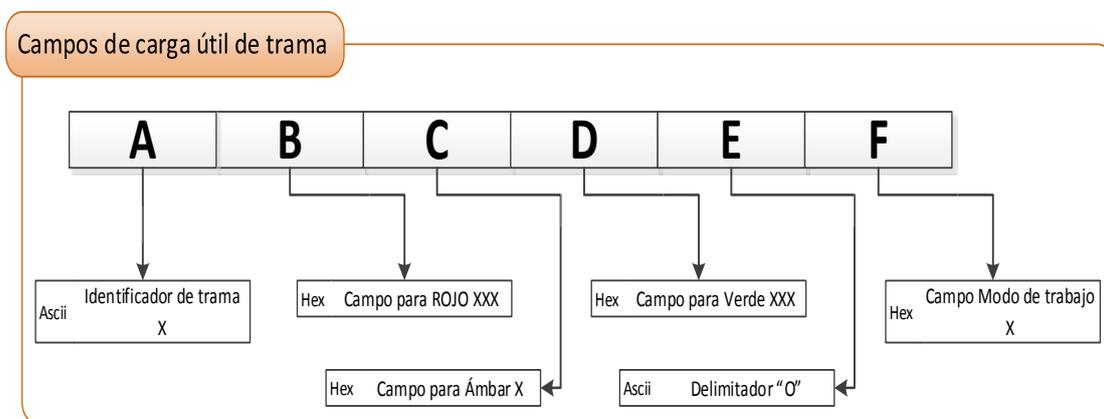


Figura 58. Trama de sincronismo de Estado de Semáforo

Fuente: El Autor.

Los datos son almacenados en un buffer temporal mientras se completa la trama, luego son procesados para ser utilizados en la subrutina ***ejecutar\_comando***, de donde se obtiene los tiempos reales para ser aplicados al

<sup>11</sup> **UART**= Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal)

semáforo. La estructura de esta subrutina se puede apreciar en la Figura 59. La trama de datos está compuesta por seis campos que pueden apreciarse en la Figura 58, estos campos ocupan cerca de 4 bytes de carga útil. La Tabla 33 describe con más detalle los campos de la trama.

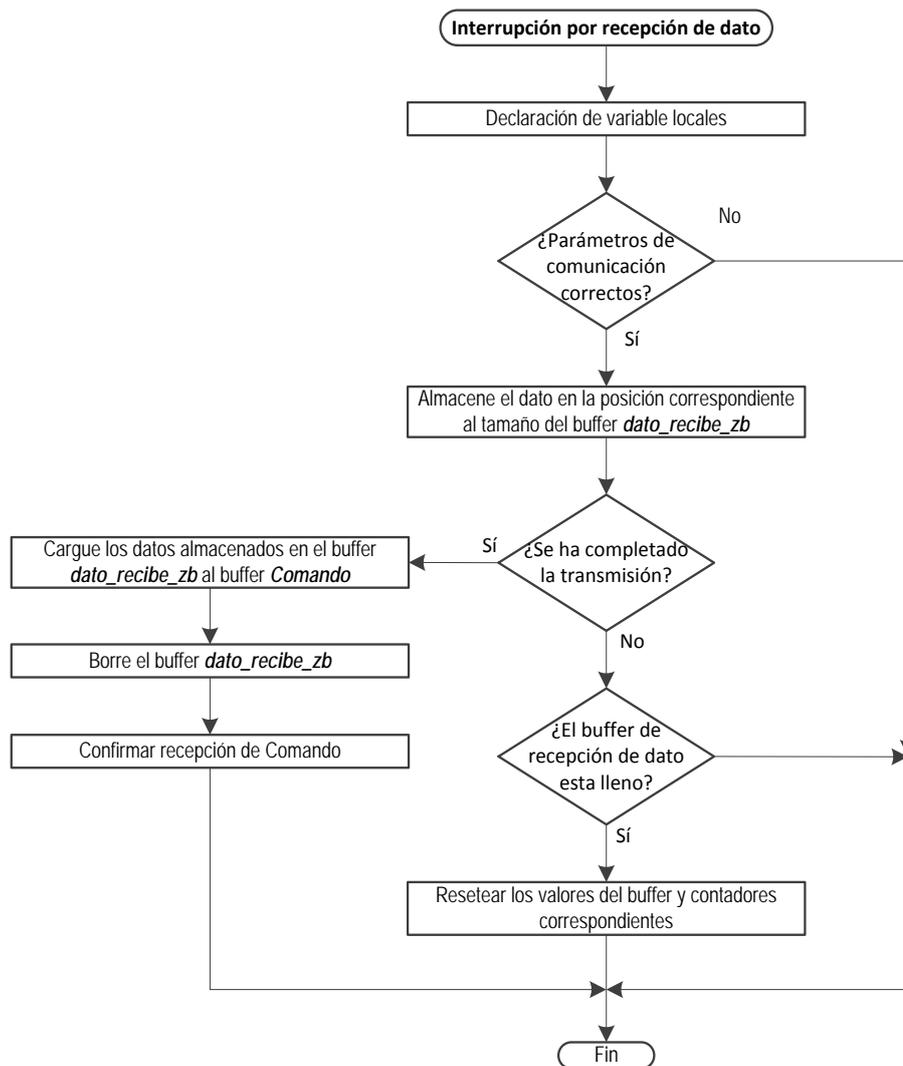


Figura 59. Diagrama de flujo de Interrupción por recepción de dato en el módulo UART

Fuente: El Autor.

### 3.4.3.2 Desbordamiento de TIMER1

El TIMER1 está programado para que induzca un desbordamiento del temporizador y provoque una interrupción cada 100ms periódicamente, dentro del programa de la interrupción se espera 10 bucles o ciclos para obtener un tiempo 1

segundo, periodo que constituye la base de tiempo del sistema. Como se puede apreciar en la Figura 60, existen varios modos de intermitencia del semáforo, estos modos son descritos en la Tabla 33.

Tabla 33  
Representación de los datos de trama  
Fuente: El Autor.

Campos de la Trama de sincronismo		
A	L	Comando de lectura de configuración
	E	Comando de escritura
	K	Comando de sincronización de contadores
	S	Comando de sincronización de semáforos
B	De 000 a 120	Temporizador de ROJO P
C	De 0 a 5	Temporizador de Ámbar
D	De 000 a 120	Temporizador de Verde P
E	Letra "O"	Delimitador de campo de trama
F	-> 0	Modo Normal
	-> 1	Modo Intermitente Rojo
	-> 2	Modo Intermitente Amarillo
	-> 3	Modo Intermitente Rojo-Amarillo
	-> 4	Modo Intermitente Amarillo-Rojo
	-> 5	Modo Constante Rojo
	-> 6	Modo Constante Amarillo
	-> 7	Modo Constante Rojo-Amarillo
	-> 8	Modo Intermitente Rojo-Amarillo
	-> 9	Modo Apagado

Tabla 34  
Modos de funcionamiento del semáforo  
Fuente: El Autor.

Modo	Descripción	Semáforo	
		Principal	Secundario
Modo de intermitencia Normal	Es el modo de trabajo típico de un semáforo cualquiera	Verde Ámbar Rojo	Verde Ámbar Rojo
Modo intermitencia	En este modo se tiene dos tipos de intermitencia: ROJO y ÁMBAR utilizado para determinados casos.	Rojo intermitente	Rojo intermitente
Modo intermitencia dual	Se usa una combinación de luces que previenen a los conductores en ambas vías.	Ámbar intermitente	Ámbar intermitente
Modo de intermitencia constante	Este modo se compone de cuatro modos constantes, dos simétricos y los otros dos duales	Rojo constante Ámbar constante	Rojo constante Ámbar constante
		Rojo constante Ámbar constante	Ámbar constante Rojo cantante

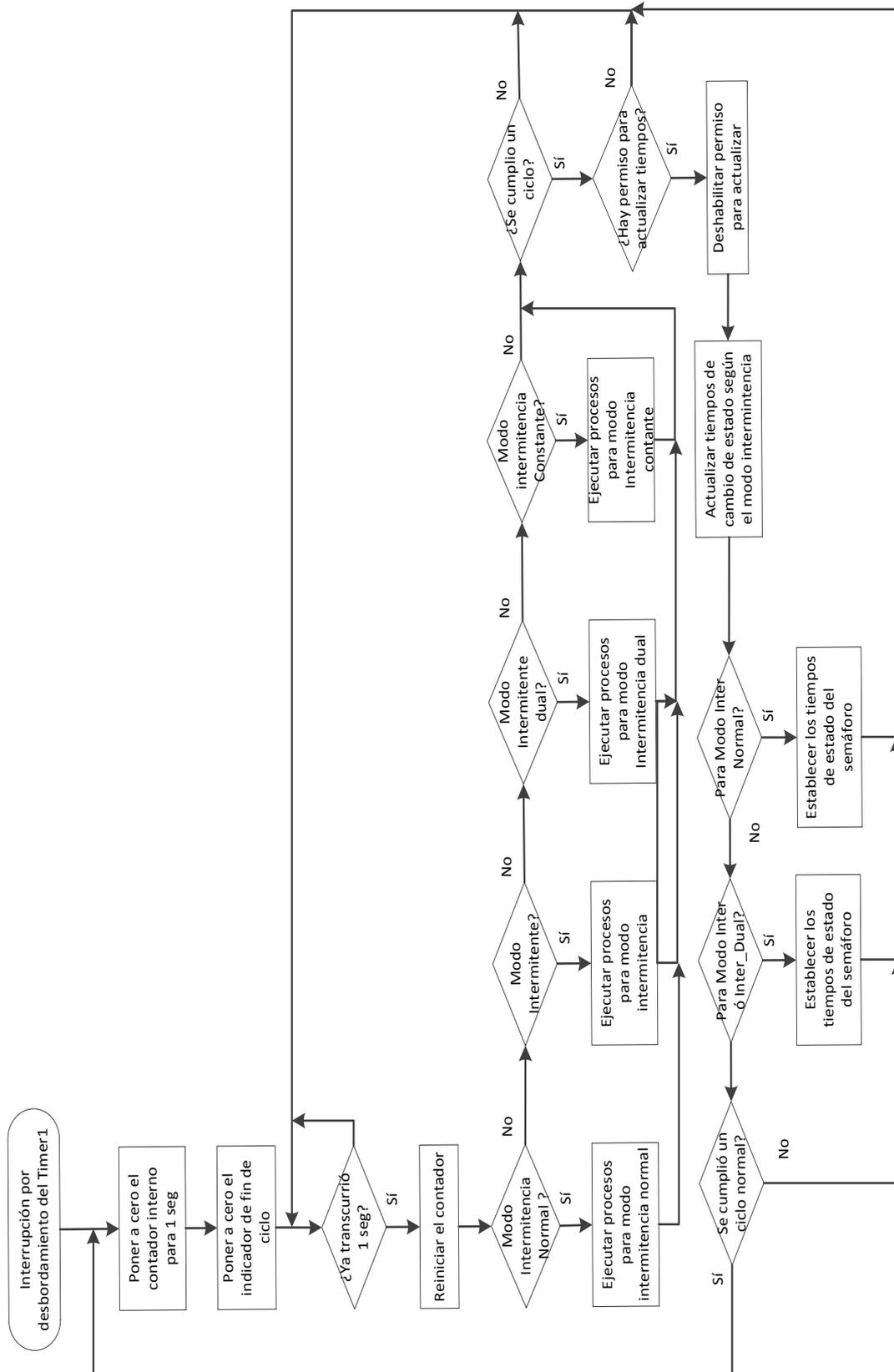


Figura 60. Interrupción por desbordamiento de TIMER1

Fuente: El Autor.

Debido a que el sistema está compuesto por un nodo central, el cual es compartido con el trabajo de fin de carrera denominado SEMÁFORO AVANZADO CON CONEXIÓN A RED INALÁMBRICA WSN PARA EL MEJORAMIENTO DEL TRÁFICO VEHICULAR EN LA CIUDAD DE IBARRA, propuesto por Irma Karina Yépez Reyes de la facultad de Ingeniería en Ciencia Aplicadas, Carrera de Electrónica y Redes de Comunicación, parte de código de programa necesario para el sincronismo, esta implementado en el microcontrolador PIC 18F4525 que gobierna el sistema mencionado. Por tal motivo, a continuación se describe las rutinas implementadas en el PIC 18F452

#### **3.4.3.3 Subrutina Ejecuta\_configuración en el PIC18F4525**

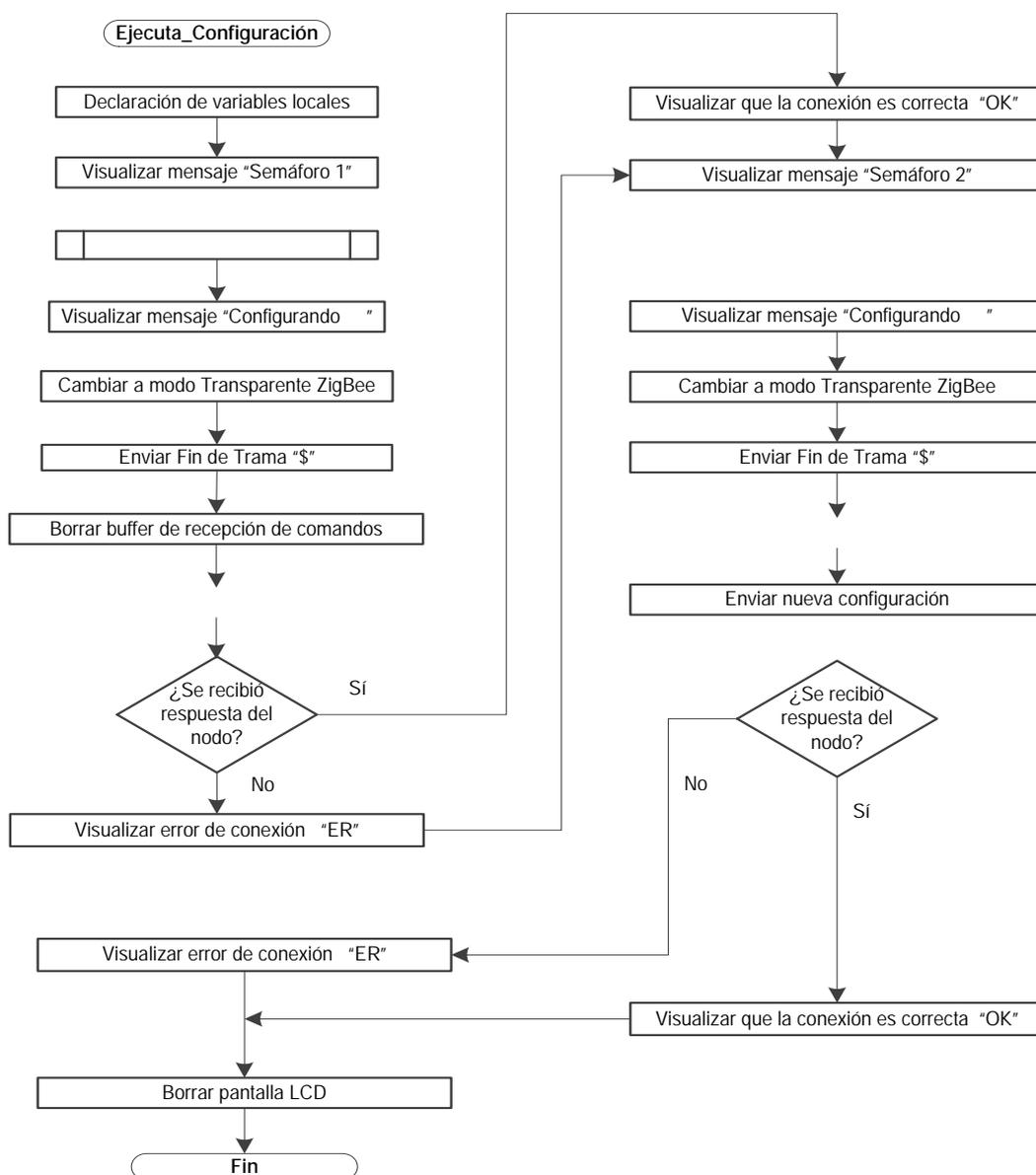
Como se ha mencionado, esta parte de código se encuentra en el PIC18F4525, y el objetivo de esta subrutina es enviar la información que se encuentra vigente el nodo principal. La información correspondiente a las temporizaciones de Verde, Ámbar y Rojo, así como el modo de operación, son enviadas a los nodos secundarios, esta información es recibida por los secundarios cada 30 minutos para mantener actualizada la tabla de temporizaciones. En el caso de que el nodo principal presentara una falla o dejara de operar, los nodos secundarios no cambian su modo de trabajo ni temporizaciones hasta que reciban nuevamente la actualización de los tiempos. Tan pronto como la información es recibida por los nodos secundarios, estos comienzan a operar con la nueva información, sin que se encuentren correctamente sincronizados entre los tres nodos. La Figura 61, representa el diagrama de operación de esta subrutina

#### **3.4.3.4 Subrutina Ejecuta\_sincronización**

Esta subrutina es la que permite sincronizar los semáforos. El nodo principal envía el comando "K", el cual es interpretado por los nodos secundarios como comando de sincronización, como puede observarse en la Figura 62, este proceso se lo realiza mediante el uso de contadores internos en cada nodo

### 3.4.3.5 Subrutina de conexión entre nodos (enlaza\_nodo)

Esta sección de código es la encargada de buscar y conectar los nodos dentro de la red, para ello envía comandos AT que son entendidos por los nodos ZigBee, los cuales responden con un mensaje de confirmación de conexión. El funcionamiento de esta subrutina está descrita en el diagrama representado por la Figura 63.



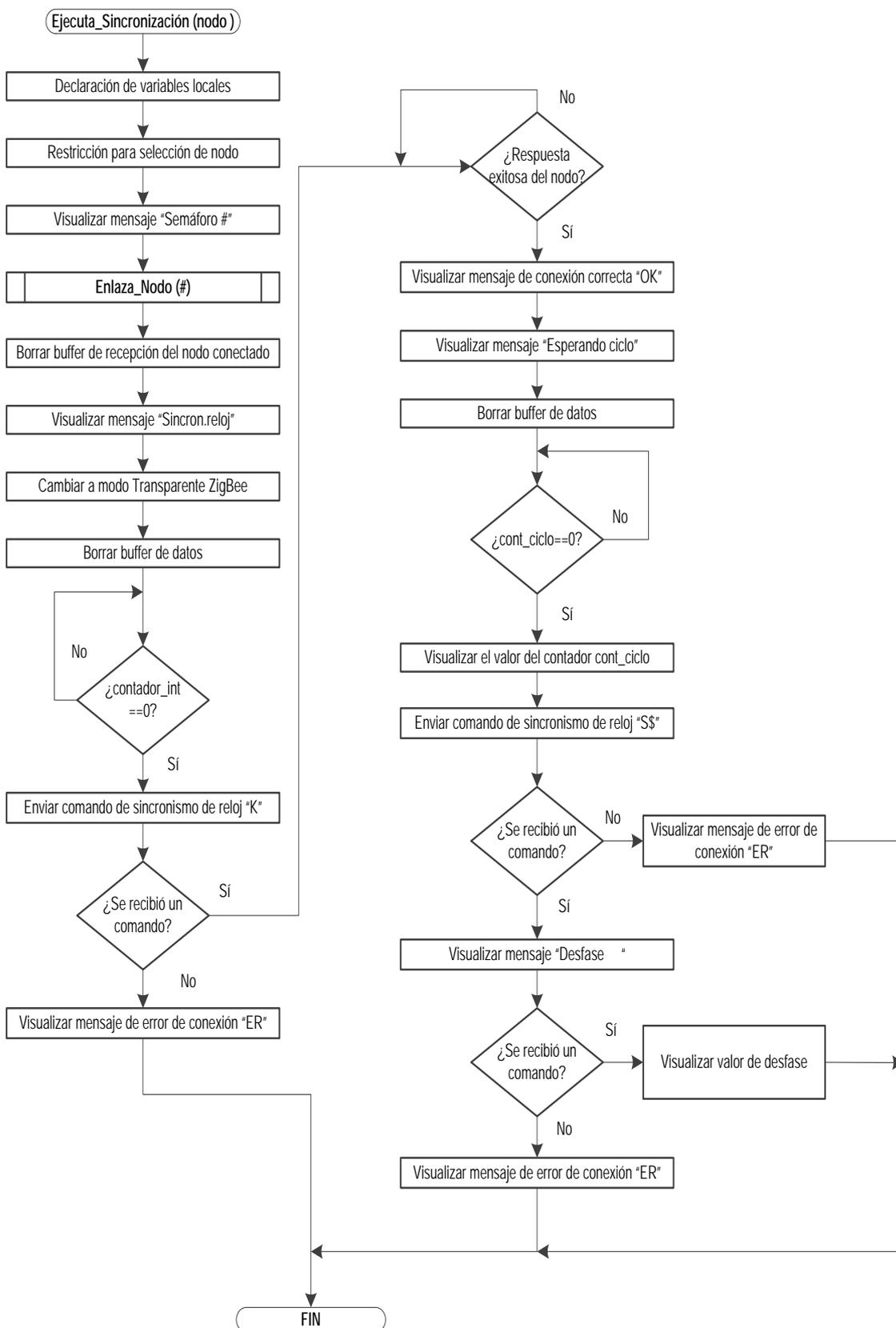


Figura 62. Subrutina de sincronización de semáforos

Fuente: El Autor.

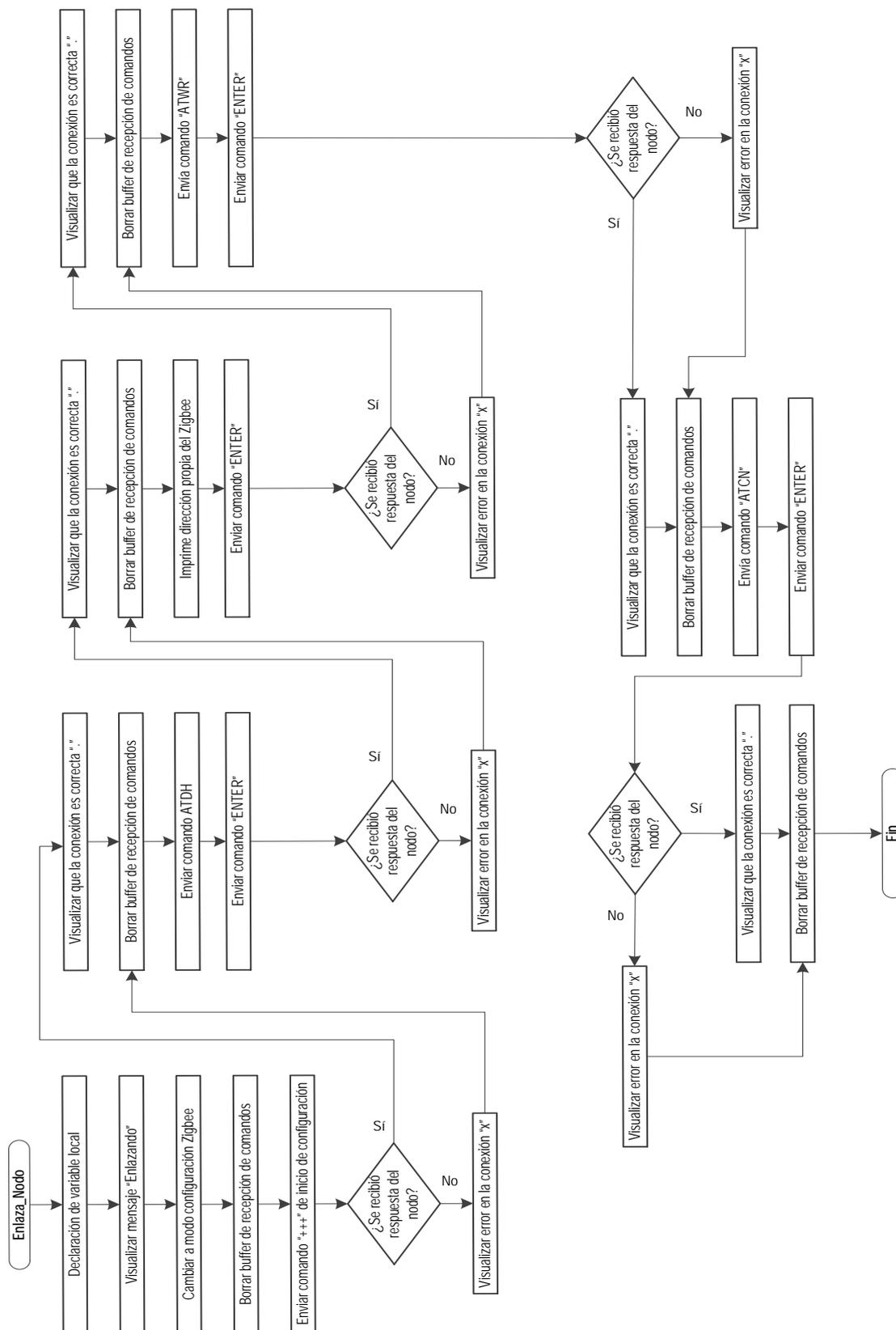


Figura 63. Subrutina de conexión entre nodos

Fuente: El Autor.

El diseño de la placa base conformada por los diferentes elementos elegidos con el fin de obtener el mejor desempeño de sistema, son complementados mediante el desarrollo del firmware enclavado en el microcontrolador ATmega324P que gobierna todo el sistema.

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de los dispositivos, el envío de información mediante los módulos inalámbricos ZigBee y corregir posibles fallas en el sistema, la implementación y pruebas de funcionamiento son de vital importancia en el desarrollo del presente proyecto, por tal motivo el siguiente capítulo detalla toda la información necesaria para la puesta en marcha del proyecto en un ambiente real de trabajo.

## **CAPITULO IV**

### **IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

El presente capítulo tiene el propósito de describir el proceso seguido para la implementación física del sistema, tales como la ubicación de los nodos inalámbricos, la configuración correcta de la red eléctrica que lo alimenta, el envío y recepción de la información mediante la comunicación inalámbrica, así como las pruebas de hardware y firmware que permitan evaluar la fiabilidad y desempeño general del sistema.

#### **4.1 PARAMETROS DE CONFIGURACIÓN**

Para logra una comunicación exitosa entre módulos Xbee se requiere configurar ciertos parámetros básicos, que permita el intercambio de información a través de los enlaces inalámbricos. Tales parámetros se describen a continuación:

##### **4.1.1 ESTABLECER EL TIPO DE NODO**

Con se explicó en el Capítulo II, existen tres tipos de dispositivos dentro de una red ZigBee, esto son: Coordinador, Router y dispositivo final. Para configurar un nodo Xbee-PRO S2B como uno de estos dispositivos, es necesario contar con el firmware correcto que contiene las funciones específicas de cada tipo de nodo, así por ejemplo para el modulo Xbee-PRO S2B de la serie XBP24-BZ7 existen cuatro versiones del firmware la 2270, 228C, 22A0 y 22A7 .

Las actualizaciones del firmware pueden hacerse mediante la descarga de un paquete Zip, de la página principal de DIGI o actualizar directamente mediante el programa X-CTU. Como recomendación es necesario que todos los elementos de la red tengan la misma versión de actualización, debido a que se puede

presentar problemas para establecer una conexión correcta entre diferentes actualizaciones del firmware.

#### **4.1.2 IDENTIFICADOR DEL NODO (NI)**

Es una cadena de caracteres ASCII, que sirve para asignar un nombre identificador a un nodo dentro de la red, así por ejemplo, se puede poner una descripción del nodo para conocer las funciones que realiza.

Para el caso específico de este proyecto los nodos están nombrados como SEMAFORO SECUNADRIO1, SEMAFORO SECUNDARIO2 Y SEMAFORO PRINCIPAL.

#### **4.1.3 IDENTIFICADOR DE RED (PAN ID)**

Es un número variable de 0 a 65535 posibilidades e identifica a la red de otra circundante. Este número es único para cada red, de manera que si un nuevo dispositivo desea formar parte, es necesario configurarlo con el mismo identificador puesto que de no ser así, el nuevo dispositivo jamás podrá interactuar dentro de la red.

#### **4.1.4 ESCANEEO DEL CANAL (SC)**

Determinar el canal que se debe escanear de entre 16 canales posibles de utilizar, al canal elegido es usado por el Coordinador para formar una red ZigBee. Por ejemplo, si el canal de operación es el 0x0B el valor de parámetro del SC debe ajustarse a 0x0001 y si el canal es el 0x17 se deberá ajustar a 0x1000.

Estos tres parámetros son básico para establecer una comunicación inalámbrica ZigBee, existen además otros parámetros como los de seguridad, tiempo de escaneo de canal, tiempo de espera antes de entrar en modo de bajo

consumo, etc.; que el desarrollador considerará o no importantes configurar en los módulos. Si bien es cierto, lo antes mencionado puede configurarse mediante el Hyperterminal del sistema operativo Windows, los módulos Xbee-Pro S2B tienen su propio programa para facilitar la configuración además de proporcionar el hardware que funciona conjuntamente con el programa X-CTU.

## 4.2 CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE PRO S2B

La configuración de los módulos Xbee, se realiza mediante el programa X-CTU del propio fabricante del módulo, el cual se puede descargar de la página oficial de Digi Internacional. Una vez instalado, el programa se puede abrir a través del acceso directo creado en el escritorio similar al que se muestra en la Figura 64.



*Figura 64.* Acceso directo del programa X-CTU

Fuente: El Autor.



*Figura 65.* Módulo Xbee Explorer

Fuente: Hobbytronics (2013). Xbee Explorer USB. Recuperado el 15 de enero del 2013 de [http://www.hobbytronics.co.uk/image/cache/data/sparkfun/xbee\\_explorer\\_usb-250x250.jpg](http://www.hobbytronics.co.uk/image/cache/data/sparkfun/xbee_explorer_usb-250x250.jpg)

Al abrirse la aplicación se muestra una ventana en la que se elige la opción USB Serial Port, donde el puerto COM varía dependiendo del computador. Una representación de lo mencionado puede observarse en la Figura 66. Esta aplicación trabaja junto con el módulo Xbee Explorer USB del mismo fabricante y es una base donde se coloca el Xbee Pro S2B, la Figura 65 muestra una la parte física del módulo. Al presionar el botón Test/Query muestra una información básica, como la versión de firmware, la dirección física del ZigBee y el tipo de

modulo, para el ejemplo se ha tomado el modulo del nodo secundario 1 y que se muestra en la Figura 69.

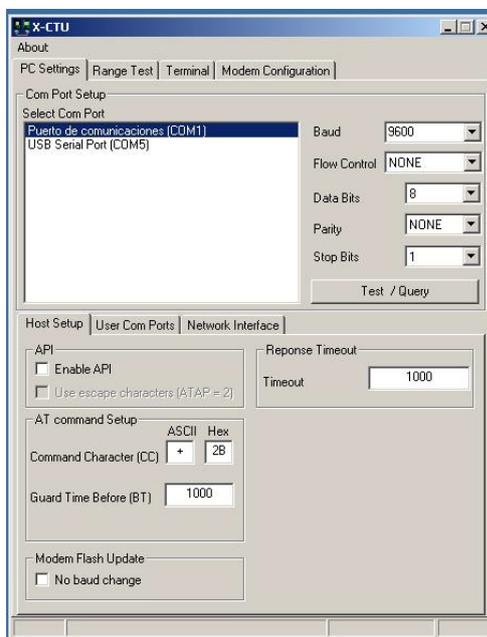


Figura 66. Ventana de la aplicación X-CTU

Fuente: El Autor.



Figura 67. Información básica del módulo Xbee

Fuente: El Autor.

En la pestaña Modem Configuración, se debe modificar los campos correspondientes al Identificador de la Red o PAN ID, el Canal que se utilizara para la comunicación, además de asignar un nombre que facilite la identificación del nodo. Estos parámetros son guardados en la memoria del módulo, mediante el botón de Write, una ventana similar a lo descrito se muestra en la Figura 68.

Una vez configurado todos los parámetros de la red inalámbrica en los módulos, se realizó la prueba de comunicación entre dos nodos que componen el sistema, enviando un mensaje de prueba que se aprecia en las Figuras 69 y 70,

para ambos casos las letras en color rojo son caracteres enviados y las letras en color azul son caracteres recibidos. De esta manera se comprueba que los módulos están correctamente configurados y que operan dentro de la red establecida.

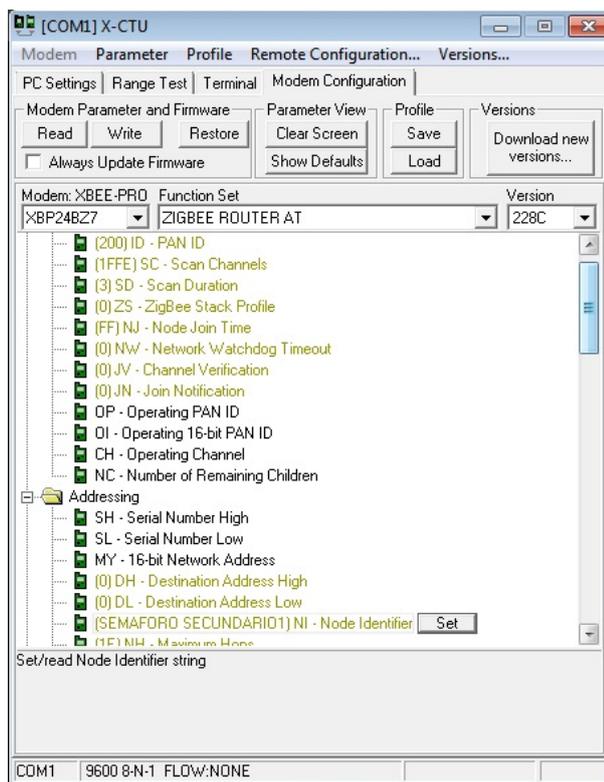


Figura 68. Ventaja de configuración del módulo Xbee

Fuente: El Autor.

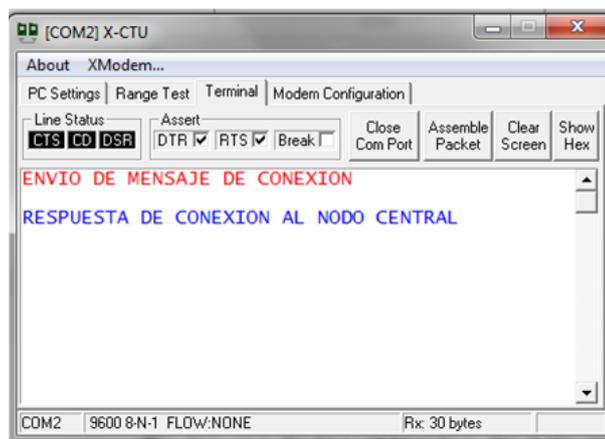


Figura 69. Envío de mensaje para prueba de conexión

Fuente: El Autor.

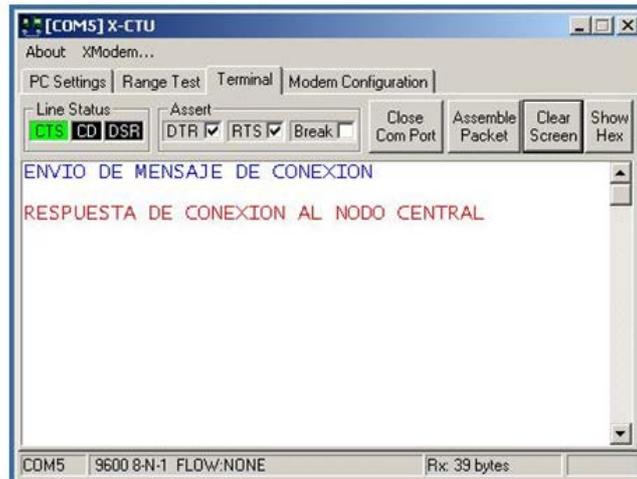


Figura 70. Respuesta de mensaje de prueba de conexión

Fuente: El Autor.

### 4.3 MONTAJE FÍSICO

Las placas que corresponden a los dos nodos secundarios tienen la misma configuración electrónica y distribución de elementos, diferenciándose entre sí por el módulo ZigBee, el cual tiene una dirección física diferente y única. La Figura 71, muestra la placa con los elementos que la integran.

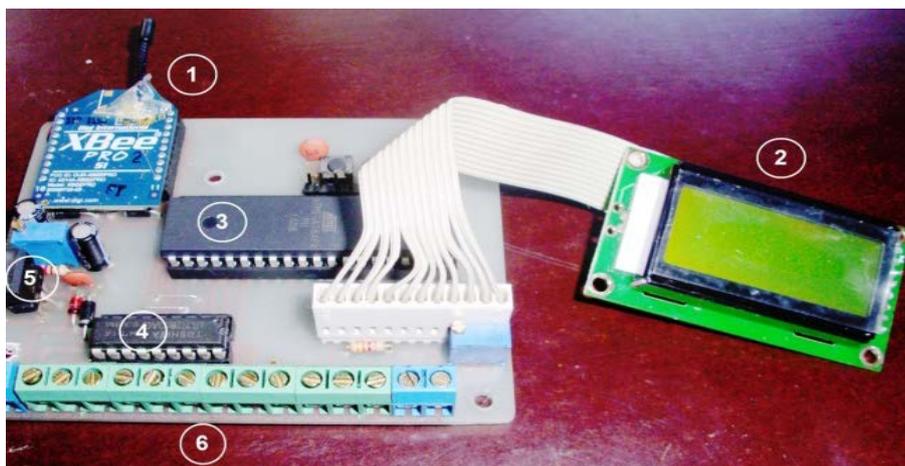


Figura 71. Placa nodo secundario

Fuente: El Autor.

Como puede apreciarse en la Figura 71, los elementos están numerados para facilitar la descripción mostrada en la Tabla 35, donde se listan los principales elementos que componen uno de los nodos secundarios. Como

circuitería, el sistema no cuenta con grandes elementos debido a que la mayor parte del funcionamiento se encuentra programado en el microcontrolador quien gobierna la mayoría de las operaciones.

Las placas son colocadas en pequeñas cajas dentro de un gabinete metálico (Figura 72), junto con la fuente reguladora (parte izquierda Figura 73), así como los relés de estado sólido SCR (parte baja Figura 73).

Tabla 35

Elementos que componen las placas de los nodos secundarios

Fuente: El Autor.

Numeración	Elemento	Descripción
1	Módulo Xbee ZigBee PRO 2	Módulo inalámbrico tecnología ZigBee
2	Pantalla LCD	Pantalla de visualización de mensajes
3	$\mu$ C Atmega324P	Parte lógica del sistema
4	ULN2803	Driver de potencia para las salidas
5	LM317T	Regulador de voltaje ajustable
6	Borneras	Entrada y salida de voltajes

Con el fin de mejorar el alcance de los módulos Xbee, se hace uso de antenas para exteriores de 9dBi, puesto que como se observa en la Figura 74, los módulos inalámbricos quedan dentro de las cajas metálicas, lo que disminuye u obstaculiza la señal inalámbrica, causando pérdida de datos, errores de conexión o desconexión definitiva de la red.



Figura 72. Gabinete metálico

Fuente: El Autor.



Figura 73. Elementos distribuidos en el tablero

Fuente: El Autor.



Figura 74. Montaje de las placas y demás elementos en el gabinete metálico

Fuente: El Autor.

La Figura 75 muestra el sistema en funcionamiento con los tres módulos operando sincronizados en modo normal.



Figura 75. Sistema operando en modo normal

Fuente: El Autor.

#### 4.4 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Las pruebas realizadas al sistema fueron enfocadas hacia la fiabilidad de la comunicación inalámbrica entre dispositivos, así como la independencia de cada módulo. De las pruebas realizadas durante 180 horas en funcionamiento continuo, se obtuvieron los siguientes resultados respecto a la comunicación inalámbrica (Tabla 36):

Tabla 36

Tiempo promedio de conexión

Fuente: El Autor.

Enlace entre nodos		Tiempo promedio
Principal – Nodo Secundario 1		3 segundos
Principal – Nodo Secundario 2		3 segundos
Procesamiento de Información		Tiempo promedio
Nodo secundario 1		1 segundo
Nodo secundario 2		1 segundo

De estos tiempos puede deducirse la siguiente representación matemática mediante la Ecuación 17:

$$T_{\text{sinc}} = T_{\text{enlace N1}} + T_{\text{enlace N2}} + T_{\text{espera}} + T_{\text{desfase N1}} + T_{\text{desfase N2}} \quad (17)$$

Dónde:

$T_{\text{sinc}}$  = Tiempo de sincronización

$T_{\text{enlaceN1}}$  = Tiempo de enlace entre principal y nodo 1 (3seg)

$T_{\text{enlaceN2}}$  = Tiempo de enlace entre principal y nodo 2 (3seg)

$T_{\text{espera}}$  = Tiempo de espera de respuesta de nodos (30 seg)

$T_{\text{desfaseN1}}$  = Tiempo de desfase nodo 1 (depende del tiempo de ciclo)

$T_{\text{desfaseN2}}$  = Tiempo de desfase nodo 2 (depende del tiempo de ciclo)

El tiempo de desfase del nodo 1 y del nodo 2, dependen del ciclo que este programado en ese instante, así por ejemplo, en el mejor de los casos, si el desfase es de cero para ambos nodos, se tendría un tiempo de sincronización de:

$$T_{\text{sinc}} = 3+3+30+0+0$$

$$T_{\text{sinc}} = 36 \text{ segundos}$$

En los casos en que los tiempos tienen cambios muy pronunciados de una hora a otra, los desfases son más evidentes y generan un retardo de por lo menos un tiempo de ciclo completo, lo que se refleja en un espacio más extenso de sincronización.

#### 4.4.1 PRUEBAS DE FIABILIDAD DE LA COMUNICACIÓN

Esta prueba consiste en verificar la correcta recepción de la información enviada por el nodo central y que representan los datos de actualización de temporizaciones y los comandos de sincronización entre nodos, para la cual se

---

<sup>(17)</sup> Ecuación 17. Cálculo del tiempo promedio de sincronización

procedió a enviar los datos desde el nodo central mediante la interfaz gráfica diseñada en el programa Labview desarrollado para el trabajo SEMÁFORO AVANZADO CON CONEXIÓN A RED INALÁMBRICA WSN PARA EL MEJORAMIENTO DEL TRÁFICO VEHICULAR EN LA CIUDAD DE IBARRA, parte del diseño en Labview, así como la opción de sincronización de semáforos puede verse en la Figura 76.



Figura 76. Sincronización mediante la interfaz en Labview

Fuente: El Autor.

Para mostrar el efecto de sincronización, se tomó los siguientes tiempos de temporización en modo de operación normal del semáforo y que se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37

Tiempo de temporización para prueba  
Fuente: El Autor.

Tiempo en Rojo P	Tiempo en Ámbar P	Tiempo en Verde P	Modo de Operación	Total del ciclo
22 seg	3 seg	15 seg	Normal	40 seg

La Figura 77, muestra la configuración ejecutándose en el nodo principal, quien envía los tiempos a los nodos secundarios al momento de sincronizar los datos.

Una vez recibida la orden de sincronizar semáforos, el nodo principal busca a los nodos secundarios mediante el proceso de enlazar nodos, tal como se observa en la Figura 78. Una vez creada la conexión entre los nodos, se envía la nueva información a cada uno de los nodos esclavos, este proceso puede verse en la Figura 79, si el envío es éxito se muestra en la pantalla el mensaje “OK”, caso contrario se visualiza el mensaje “ER” de error.



Figura 77. Configuración para prueba de sincronización

Fuente: El Autor.



Figura 78. Proceso de búsqueda de nodos

Fuente: El Autor.



Figura 79. Envío de nuevas temporizaciones

Fuente: El Autor.



Figura 80. Periodo de espera de 30 segundos

Fuente: El Autor.

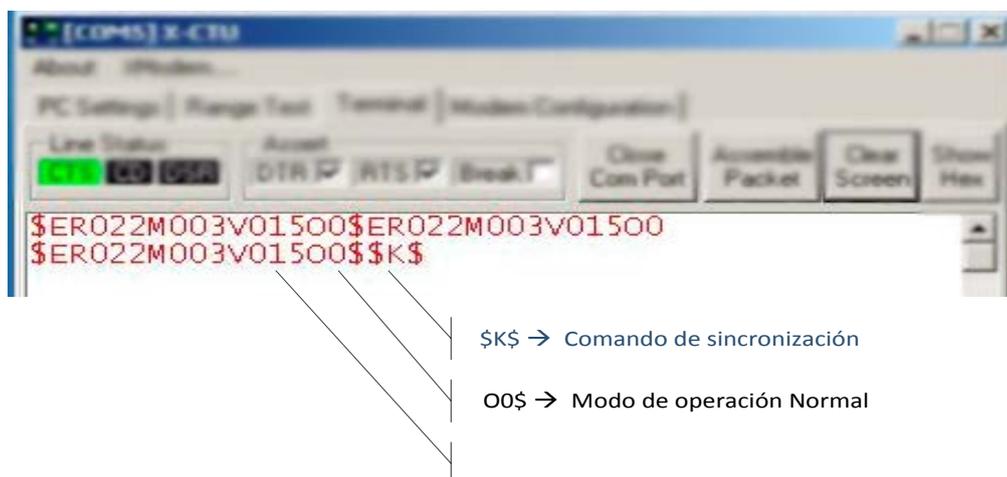
Como se menciona en los párrafos anteriores, existe un tiempo de espera para que los nodos procesen la información recibida y dura 30 segundos (Figura 80). Terminado este tiempo prudencial, se envía el comando de sincronización de

semáforos, donde cada nodo responde con el desfase que tiene en aquel instante. La integridad de los datos enviados puede verificarse mediante la aplicación X-CTU, al colocar uno de los módulos y recuperar la información enviada por el nodo central, tal como se observa en la Figura 81.

Figura 81. Información enviada por el nodo central

Fuente: El Autor.

La Figura 82, muestra claramente la trama de información enviada, donde se puede observar fácilmente cada campo de temporización correspondiente a la luz del semáforo. La información enviada corresponde con los datos de la Tabla 34.



## 4.5 PRUEBA DE CONSERVACIÓN DE SINCRONISMO

Estas pruebas se realizaron debido a que se observó variaciones en la velocidad de procesamiento de los microprocesadores ATmega324P utilizados dentro de los nodos secundarios.

A pesar de tener la misma configuración de firmware y distribución de elementos electrónicos, uno de los nodos secundarios presenta una respuesta más rápida ante la ejecución de procesos, esta variación de velocidad de procesamiento afecta en el tiempo a la sincronización.

Se ha realizado las siguientes Tablas 38,39 y 40, con el fin de cuantificar el margen de error que esto produce a la sincronización.

Tabla 38

Calibración de temporización entre nodos secundarios  
Fuente: El Autor.

Tiempo de Ciclo	Temporización base Nodo Sec 1	Temporización base Nodo Sec 2	Desfase entre nodos (seg) (medido en 15 min)	% de error
< 10 seg	100 ms	100 ms	5	50
	100 ms	99 ms	3	30
	100 ms	98 ms	-1	-10
De 10 a 30 seg	100 ms	100 ms	3	De 10 a 30
	100 ms	99 ms	1	De 3 a 10
	100 ms	98 ms	-2	De -20 a -7
De 30 a 120 seg	100 ms	100 ms	2	De 2 a 7
	100 ms	99 ms	1	De 0.83 a 3.33
	100 ms	98 ms	-2	De -2 a -7

Nota: La base de tiempo del sistema es de 100ms, este tiempo se repite 10 veces para obtener 1 segundo de tiempo completo.; Los valores negativos en la columna de desfase representan un adelanto en comparación con el Nodo 1.; Para obtener la variación de error se ha considerado que % de error es directamente proporcional al desfase entre nodos e inversamente proporcional al tiempo de ciclo ( $\%error = \text{desfase} * 100 / \text{Tiempo de ciclo}$ )

Tabla 39

Calibración de temporizadores entre nodo Principal y nodo Secundario 1  
Fuente: El Autor.

Tiempo de Ciclo	Temporización base Nodo Princ	Temporización base Nodo Sec 1	Desfase entre nodos (seg) (medido en 15 min)	% de error
< 10 seg	100 ms	100 ms	3	30
De 10 a 30 seg	100 ms	100 ms	2	De 7 a 20
De 30 a 120 seg	100 ms	100 ms	1	De 0.83 a 7

Tabla 40

Calibración de temporizadores entre nodo Principal y nodo Secundario 2

Fuente: El Autor.

Tiempo de Ciclo	Temporización base Nodo Princ	Temporización base Nodo Sec 2	Desfase entre nodos (seg) (medido en 15 min)	% de error
< 10 seg	100 ms	100 ms	1	10
De 10 a 30 seg	100 ms	100 ms	1	De 3.33 a 10
De 30 a 120 seg	100 ms	100 ms	-1	De 1 a 3.33

Se determinó que el microprocesador del nodo Secundario 1, se adelanta en relación al nodo Principal y que el nodo Secundario 2, se retrasa en relación al nodo Principal; esto se puede comprobar con los datos presentados en la Tabla 38, donde se han modificado los valores del temporizador del nodo secundario 2, de manera que trabaje lo más sincronizado posible con el otro nodo.

Las Tablas 39 y 40, muestran los valores de desfase que se producen entre los nodos, cuando se trabaja con los valores normales de operación. A manera de ejemplo, la Figura 83 muestra la diferencia entre la velocidad de respuesta de cada microprocesador, donde se observan los desfases producidos entre procesos.

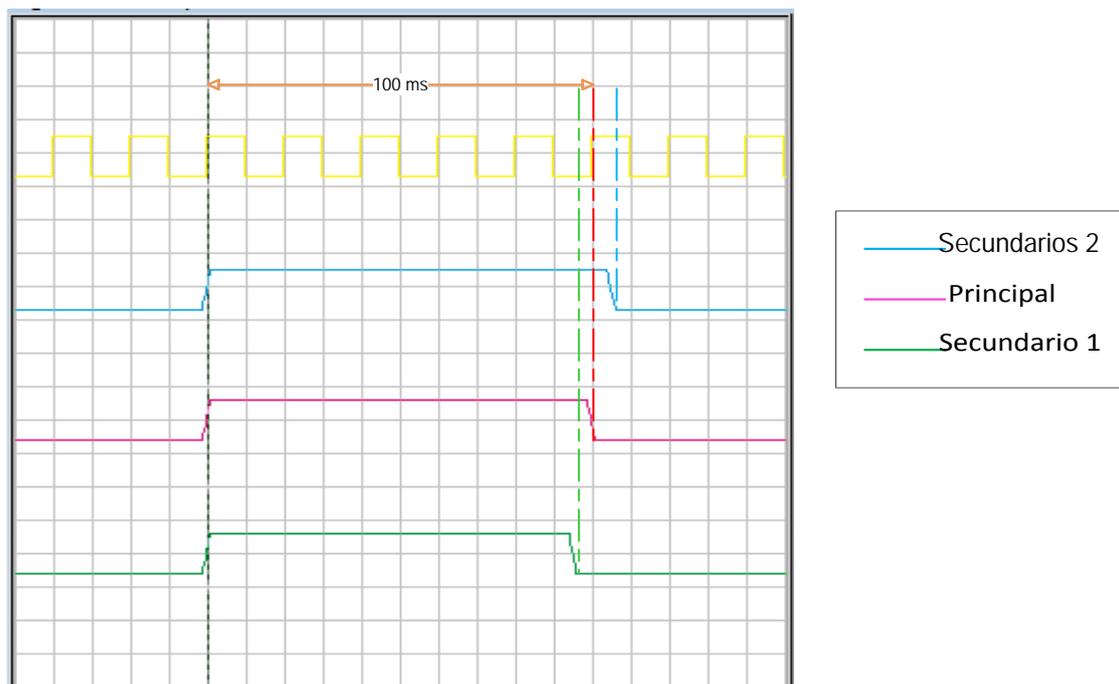


Figura 83. Velocidad de respuesta al procesamiento en los nodos

Fuente: El Autor.

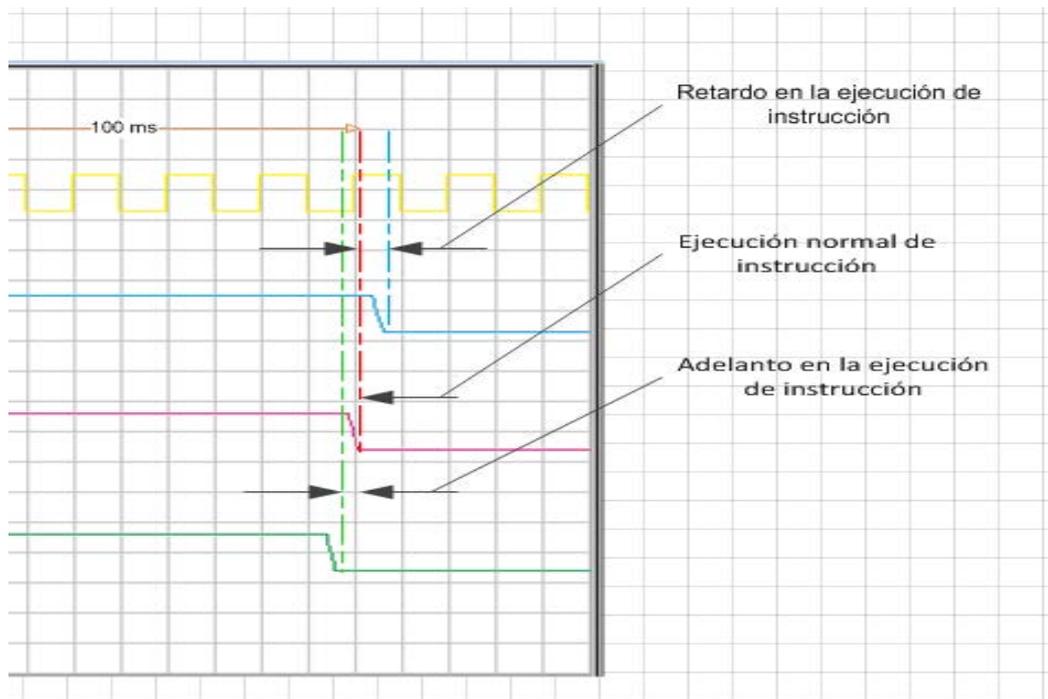


Figura 84. Desfase entre procesos

Fuente: El Autor.

En la Figura 84 se ha resaltado los desfases producidos entre nodos; se observa que el nodo principal trabaja con mayor precisión debido a que en su circuitería cuenta con un integrado que trabaja como reloj en tiempo real (RTC DS1307) y usa un cristal oscilador externo que le brinda mayor precisión en el tiempo. Esta brecha de desfases entre nodos es corregida en el firmware del sistema, además de establecer a 30 minutos el periodo de actualización y sincronización de los semáforos.

## 4.6 PRUEBAS DE COBERTURA

Estas pruebas se realizaron para determinar el alcance de la señal de los módulos inalámbricos a diferentes distancias mediante la aplicación X-CTU, obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la Tabla 41.

De acuerdo a las Figuras 85 y 86, así como la Tabla 41, se puede observar una disminución en la fiabilidad de la señal representada en el aumento de la tasa de error, de igual manera la potencia de la señal, como se esperaba, disminuye

conforme se aumenta la distancia, sin embargo, el nivel suficiente para establecer una comunicación confiable.

Tabla 41

Pruebas de cobertura

Fuente: El Autor.

Distancia (m)	Tasa de error [%]	Nivel (RSSI)
10	0,00	-10
30	1,00	-15
50	2,00	-23
70	4,00	-35
90	5,00	-48
110	7,00	-63

Nota: RSSI= Received Signal Strength Indication [Indicador de fuerza de señal de recepción]

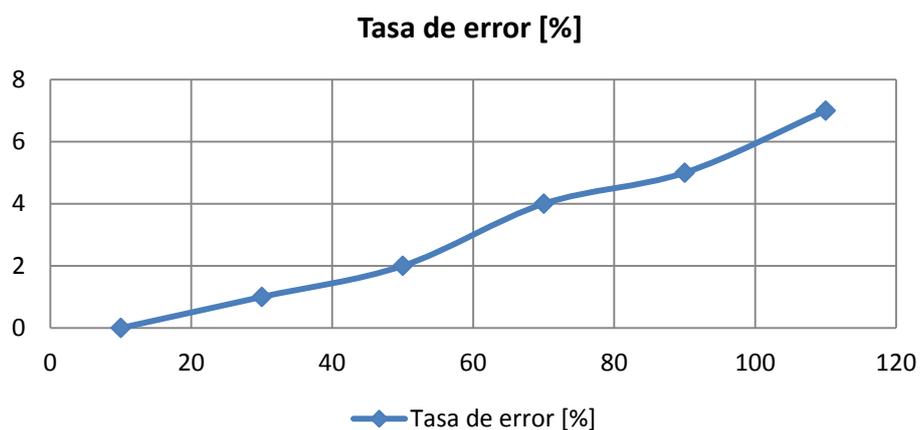


Figura 85. Relación Distancia vs Error

Fuente: El Autor.

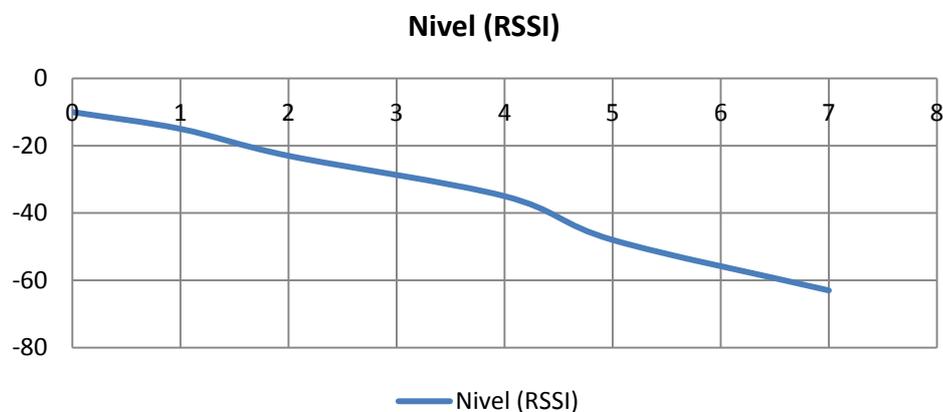


Figura 86. Relación Distancia vs Potencia de la señal recibida

Fuente: El Autor.

Los módulos operan a su máxima capacidad en lo referente a potencia de salida de transmisión, para el caso de los Xbee Pro S2B International la máxima potencia de salida es de 10mW o lo mismo 10dBm, en la Figura 87 se visualizan varios comandos y la respuesta del nodo, en este caso el nodo2.



Figura 87. Comandos AT y respuestas del nodo

Fuente: El Autor.

Adicionalmente la Tabla 42, detalla el nombre y la descripción del comando y los valores que representan.

Tabla 42

Comandos AT y respuesta del nodo

Fuente: Hoja de datos del dispositivo.

Comando AT	Nombre y Descripción	Tipo de nodo	Parámetros	Respuesta del Nodo
NI	<b>Identificador de Nodo.</b> El nombre con el que se identifica dentro de la red	CRE	20 Bytes en ASCII	<b>SEMAFORO SECUNDARIOX</b>
CH	<b>Canal de Operación.</b> Lee el canal que se está usando para transmitir y recibir entre módulos	CRE	XBee-PRO (S2B) 0, 0x0B - 0x19 (Channels 11-25)	<b>14</b> [2,4175 Inferior; 2,4200 Central; 2,4225 Superior]

Tabla 42  
Comandos AT y respuesta del nodo  
Fuente: Hoja de datos del dispositivo.

Comando AT	Nombre y Descripción	Tipo de nodo	Parámetros	Respuesta del Nodo
ID	<b>Identificador de Red.</b> Lee y modifica el identificador de red	CRE	0 - 0xFFFFFFFFFFFFFFFF	200
OP	<b>Operación Extendida del Identificador de Red.</b> Lee el identificador de red extendido de 64 bits, para valores >0 el OP es el mismo que el ID	CRE	0x01 - 0xFFFFFFFFFFFFFFFF	200
SC	<b>Escaneo de Canal.</b> Lee y modifica la lista de canales para escanear	CRE	XBee-PRO (S2B) 1-0x7FFF (el bit 15 no es permitido)	1FFE
PL	<b>Nivel de Potencia.</b> Selecciona y lee el nivel de potencia al que transmite el modulo	CRE	XBee-PRO (S2B) (International Variant) 4 = 10dBm; 3 = 8dBm 2 = 6dBm; 1 = 4dBm 0 = 2dBm	4
DB	<b>Potencia de la Señal Recibida.</b> Este comando informa de la intensidad de la señal recibida del último paquete de datos recibidos	CRE	XBee-PRO: 0x1A - 0x58	30 [equivalente a -48 dBm]
%V	<b>Voltaje de Alimentación.</b> Lee el voltaje en el pin Vcc. Escala de 1200/1024 para convertir a las unidades de mV. Por ejemplo, una lectura %V de 0x900 (2304 decimal) representa 2700mV o 2.7V.	CRE	-0x-0xFFFF [solo lectura]	B04 [ equivalente a 3.3V ]
TP	Lee la temperatura del módulo en grados Celsius. 1° C = 0x0001 y -1° C = 0xFFFF.	CRE	0x0-0xFFFF	1E [equivalente a 30°C]
AI	<b>Indicación de Asociación.</b> Leer información con respecto a la última petición de la estación en unirse:		0 - 0xFF [solo lectura]	0 [0x00 - Con éxito formado o unido a una red. (C forman una red, R y E se unen a una red.)]

Nota: Tipo de nodo que soportan los comandos C=Coordinador R=Router E=Dispositivo Final;

# CAPITULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- ❖ El incremento del número de automóviles, tanto públicos como privados, ha incentivado la idea de mejorar la fluidez del tráfico vehicular mediante sofisticados y complejos sistemas de semaforización, sin embargo, cualquier esfuerzo por mejorar este problema resulta inútil sin la educación de conductores y peatones, quienes son los autores directos y la solución a este tipo de problemas.
  
- ❖ Del análisis de tráfico vehicular, se puede determinar que para las zonas alejadas del centro de la ciudad, no se requiere grandes planes de control de tráfico, por lo que se pueden programar los semáforos de forma que en determinada hora del día cambie el modo de operación, sin necesidad de supervisarlos continuamente durante varios meses.
  
- ❖ Se determinó que el uso de sensores no es aplicable para este tipo de ambientes, debido a las características de calzada de la que está constituido, en principio se pretendía hacer uso de los sensores de lazo inductivo, pero este tipo de sensores solo pueden usarse en pavimento en donde su movilidad es nula, lo que alarga su vida útil, además deben estar a no más de 10 cm de profundidad lo que en calles con adoquinado no es posible; el uso de sensores infrarrojos constituye un excesivo gasto si se desea tener datos fiables del tráfico vehicular, por lo que el GAD-IBARRA no está interesado en invertir en sectores donde el tráfico puede fácilmente controlarse con semáforos de programación fija, además los sensores IR comunes usados en proyectos de electrónica, no respondieron a las necesidades requeridas por lo que implementarlos habría ocasionado mayores conflictos. Por último los sistemas de

procesamiento de video requieren elementos adicionales para su funcionamiento, además que no permiten obtener datos ya que en su mayoría son sistemas propietarios.

- ❖ El uso de la tecnología ZigBee mediante los módulos XBEE PRO S2B, resulta acertada por las prestaciones que brinda a través de las redes mesh, donde fácilmente puede añadirse más dispositivos sin mayores dificultades por la organización jerárquica que presenta la tecnología ZigBee, estableciéndose claramente nodos Coordinadores, Routers y dispositivos finales. Además como se pudo apreciar en todo el documento, la cantidad de información necesaria para el funcionamiento del sistema es mínima, teniendo en el Xbee PRO un ancho de banda más que suficiente para la transferencia de información. Así también, otra de las claras ventajas del uso de redes inalámbricas es la rápida expansión de la red de semáforos, puesto que no está limitada a la conexión por cables que dificultan y demoran su implementación.
- ❖ La aplicación de redes inalámbricas para este tipo de trabajos, muestra sus ventajas no solo en la disminución de costos por cableado, evitando así tender varios pares de cables colgados entre postes, sino también evitando añadir más ruido visual al ambiente ya saturado por cables sobre todo en el centro del ciudad.
- ❖ El mecanismo por el cual se logra la sincronización de los semáforos es práctico y eficiente, sin embargo, existen otros parámetros fuera de la lógica de programación, que afectan directamente a la conservación de este estado, como el tipo de microprocesador, la frecuencia de operación, el uso de osciladores externos y las condiciones ambientales en las que opera el sistema. Un claro ejemplo de lo mencionado, es el caso de los microprocesadores utilizados en este proyecto, los cuales siendo de la misma familia y modelo, presentan marcadas diferencias en la velocidad de procesamiento.

- ❖ El sistema a pesar de que se encuentra terminado, requiere pasar por numerosas pruebas a mayor tiempo, debido a que se encuentra aún en estado de prueba tanto de hardware como de firmware, además está restringido al uso en vías de uno solo o máximo hasta dos carriles y con niveles de tráfico vehicular relativamente constantes o bajo flujo vehicular, esto con el fin de evitar posibles accidentes causados por inconsistencias en el sistema.
- ❖ Luego de haber realizado el diseño del sistema para la interconexión y sincronización inalámbrica de semáforos, de forma tal que puedan operar interconectados y/o de forma independiente, y después de haberlo sometido a pruebas de funcionamiento, se concluye que el presente proyecto, si bien es cierto no cumple en su totalidad con el objetivo planteado de hacer uso de sensores por los motivos ya antes expuestos, funciona eficientemente y representa un modelo base que puede entrar en operación en zonas de bajo tráfico vehicular, si la Dirección de Tránsito y Transporte del GAD-IBARRA así lo decide, además no se descarta el uso de sensores y otro tipo de complementos que pueden ser añadidos por los interesados en este proyecto.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- ❖ Las autoridades encargadas de controlar la movilidad vial dentro de las ciudades, necesitan constantemente analizar el flujo vehicular cada año, con el fin de mejorar y proponer alternativas que beneficien a la movilidad en toda la ciudad, así por ejemplo el GAD-IBARRA mediante el nuevo sistema de semaforización y el incentivo de hacer uso de medios de transporte más ecológicos a través de lo que se denomina ciclo-paseos, pretende crear conciencia en los ciudadanos y conductores para hacer un uso correcto de este medio tan como es el automóvil.

- ❖ Dentro de lo referente al sistema, se recomienda trabajar con osciladores externos debido a que el tipo de oscilador RC (Resistencia-Condensador) interno con el que cuenta el ATmega324P, no es lo suficientemente estable para el caso de aplicaciones que requieren precisión del tiempo, así mismo de ser posible utilizar microcontroladores del mismo lote, debido a que existen pequeñas diferencias en la velocidad de procesamiento entre un lote y otro.
  
- ❖ Incorporar algún tipo de integrado que proporcione mayor precisión en los tiempos, como es el caso del IC DS1307, el cual es un reloj en tiempo real que proporciona datos muy fiables, cerca de 1 segundo de retraso al año, esto con el fin de darles mayor independencia a los nodos secundarios.
  
- ❖ El uso de la tecnología ZigBee para este tipo de aplicaciones, donde no se requiere manejar grandes volúmenes de datos, pero si se necesita redes inalámbricas robusta que son fácilmente de crear y gestiona, sobre todo mediante los módulos XBEE de la marca DIGI los cuales brindan grandes prestaciones.
  
- ❖ Utilizar dispositivos que posean la potencia necesaria para una mayor cobertura; en el caso de utilizar el mismo tipo de módulos inalámbricos que se usa dentro del presente proyecto, se ha de considerar los módulos XBEE PRO S2B que no sea de la versión internacional, debido a que estos están limitados en potencia para cumplir con las normas legales internacionales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

### LIBROS

- Cal, R., Reyes, M. Semaforización. Cal & Mayor. (7<sup>ma</sup> Ed.), Ingeniería de tránsito fundamentos y aplicaciones. México (pp. 386-432).
- Labioud, H., Afifi, H., De Santis S. 2010. Wi-Fi TM, Bluetooth TM, Zigbee TM and Wimax TM. The Netherlands
- Farahani, S. 2008. (1<sup>ra</sup> Ed.), Zigbee Wireless Networks and Transceivers. United States of America.
- Tanenbaum, A., Wetherall, D. (2011). Computer Networks. (5ta Ed.). United States of America.

### TESIS

- Batiste Troyano, A. (2011). Protocolos de encaminamiento en redes Inalámbricas mesh: un estudio teórico y experimental. (Tesis de maestría, Universitat Oberta De Catalunya). Recuperado de [http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/8164/1/abatistet\\_TFM\\_0611.pdf](http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/8164/1/abatistet_TFM_0611.pdf)
- Gil Jiménez, M. (2009). Estudio de la eficiencia de encaminamiento del protocolo AODV en redes ad hoc inalámbricas de gran escala. (Trabajo de fin de carrera). Recuperado de [http://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/2546/1/PFC\\_MariaElenaGilJimenez.pdf](http://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/2546/1/PFC_MariaElenaGilJimenez.pdf)

### RECURSOS BIBLIOGRÁFICOS EN LINEA

- Chessa, S. (2011). Reti ad Hoc & Reti di Sensori. The IEEE 802.15.4 and ZigBee standards. Recuperado de [http://didawiki.cli.di.unipi.it/lib/exe/fetch.php/rhs/slides-05\\_ieee802.15.4\\_zigbee\\_2011.pdf](http://didawiki.cli.di.unipi.it/lib/exe/fetch.php/rhs/slides-05_ieee802.15.4_zigbee_2011.pdf)
- Seguridad Mobile. (Octubre 2012). Recuperado de <http://www.seguridadmobile.com/bluetooth/especificación-bluetooth/estándar.-bluetooth/index.html>

SEDESOL, (2002, 19 de Febrero), Programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas. Extraído el 13 de enero del 2012 desde <http://www.sedesol.gob.mx/48372000-ing-transito.pdf>

The Major Differences in the XBee Series 1 vs. the XBee Series 2. (Junio 2013). Recuperado de <http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2213>

Traffic Detector Handbook Vol. I (2006, October). US. Department of Transportation. Recuperado de [www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/index.cfm](http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/index.cfm)

Traffic Detector Handbook Vol. II (2006, Octubre). US. Department of Transportation. Recuperado de [www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/index.cfm](http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/index.cfm)

## RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. 2003. New York: IEEE Press.

ZigBee Standards Organization. Zigbee Specification, 2008. San Ramon, CA: US. Recuperado de [http://www.zbsigj.org/download/085224r00ZB\\_MG-ZigBee-Specification-053474r17\\_Japanese\\_08120.pdf](http://www.zbsigj.org/download/085224r00ZB_MG-ZigBee-Specification-053474r17_Japanese_08120.pdf)

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**OSI:** El modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI Open System Interconnection) es un modelo que cubre todos los aspectos de las redes de comunicación, siendo un sistema abierto un modelo que permite que dos sistemas diferentes se puedan comunicar entre si independientemente de la arquitectura subyacente.

**AODV:** (Ad hoc On-demand Distance Vector), Vector de Distancia ad hoc bajo Demanda, es un protocolo de enrutamiento utilizado en redes ad-hoc, como pueden ser las redes mesh. Ha sido desarrollado por Nokia, la Universidad de California y la Universidad de Cincinnati, por C. Perkins, E. Belding-Royer y S. Das.

**RREQ:** (Route Request), Solicitud de Ruta, cuando un nodo quiere enviar información a un nodo que del que no conoce la forma de llegar a él, envía este mensaje en forma de Broadcast a la red, buscando que llegue al nodo destino.

**ID\_RREQ:** Identificador del mensaje RREQ, es un numero de secuencia que junto con el nodo origen idéntica la petición de manera única.

**SSR:** (Solid State Relay), Relé de Estado Sólido, es un elemento que permite aislar eléctricamente el circuito de entrada o mando y el circuito de salida.

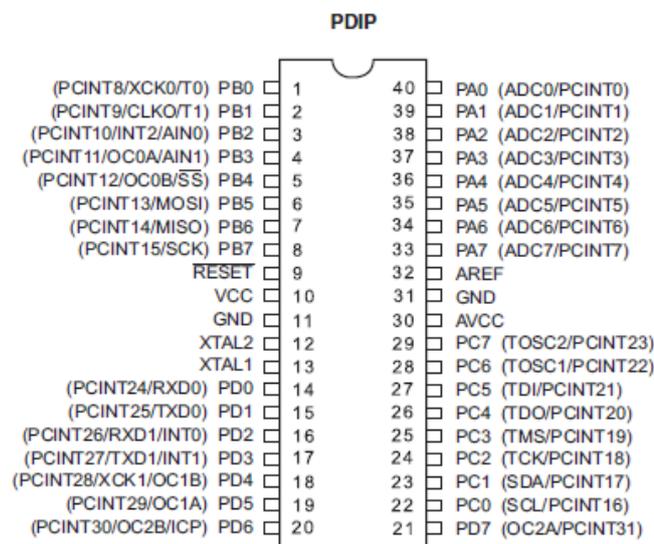
**UART:** (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), Transmisor-Receptor Asíncrono Universal, modulo de ciertos sistemas digitales cuyo principal objetivo es convertir los datos recibidos en forma paralela, a forma serial, con el fin de comunicarse con otro sistema externo. También realiza el proceso inverso.

## ANEXO A

### CARACTERÍSTICAS MICROCONTROLADOR ATMEGA324P

Las siguientes son varias de las características con las que cuenta el integrado:

- Memoria FLASH de 32Kbytes.
- Memoria RAM de 2Kbytes.
- Tres módulos temporizadores (TIMER0 a TIMER2).
- Módulo UART (Transmisor receptor asincrónico universal), con registros de trabajo independientes para transmisión y recepción.
- Conversor análogo – digital de hasta 8 canales con resolución de 10 bits y tiempo de adquisición programable.
- Oscilador interno RC calibrado de 8Mhz con un THROUGHPUT de 8MIPS.
- Multiplicación en hardware en un ciclo de instrucción.
- Arquitectura optimizada para compilación en lenguaje C, con set extendido de instrucciones.
- Rango de voltaje de operación entre 2.7V y 5.5V.
- Capacidad de retención de datos de 100 años a 25°C.



Esquema del encapsulado del microcontrolador ATmega324P

El siguiente diagrama detalla la estructura interna del integrado ATmega 324P. El voltaje de alimentación del integrado a diferencia del resto de elementos que conforman el dispositivo, es de 5v con la excepción

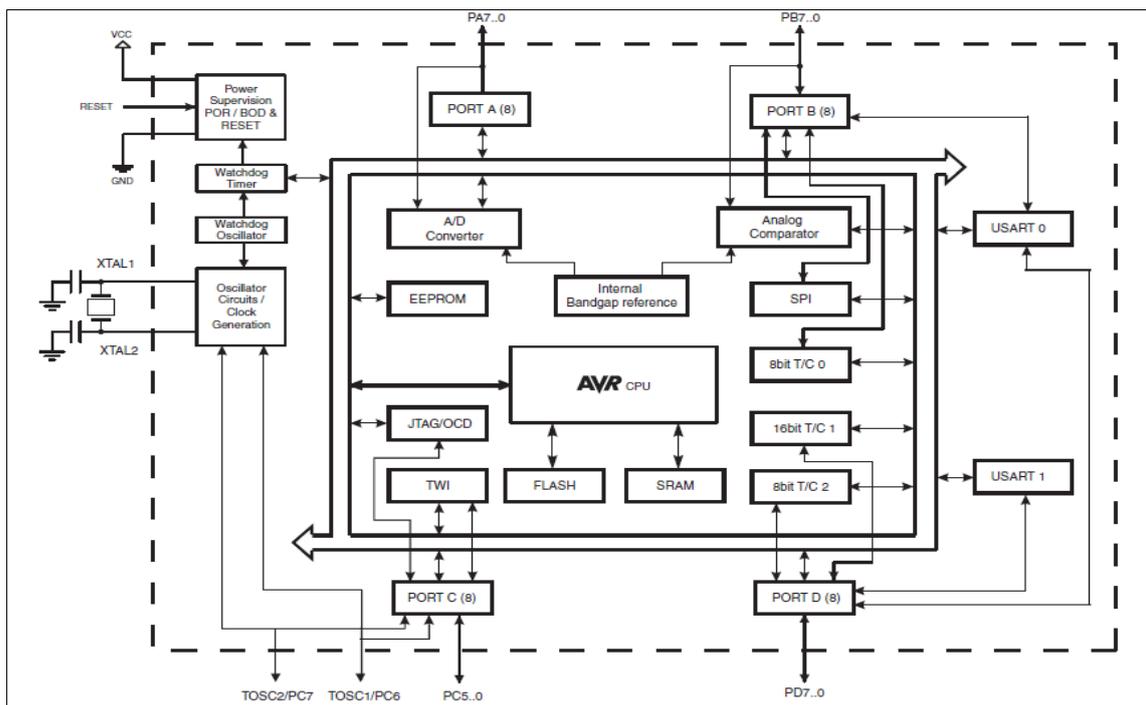
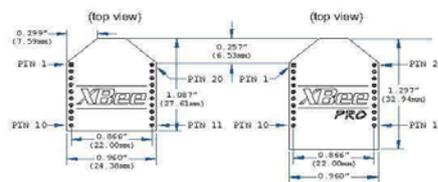
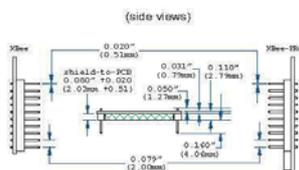
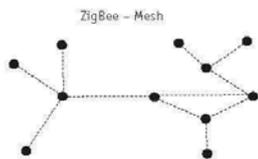


Diagrama de Bloques Atmega 324p del subsistema de visualización que es el mismo.

# ANEXO B

## CARACTERÍSTICAS XBEE-PRO

Platform	XBee® ZB	XBee-PRO® ZB	Programmable XBee-PRO® ZB
<b>Performance</b>			
RF Data Rate	250 Kbps		
Indoor/Urban Range	133 ft (40 m)	300 ft (90 m)	
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	400 ft (120 m)	2 miles (3200 m) / Int'l 5000 ft (1500 m)	
Transmit Power	1.25 mW (+1 dBm) / 2 mW (+3 dBm) boost mode		63 mW (+18 dBm) / Int'l 10 mW (+10 dBm)
Receiver Sensitivity (1% PER)	-96 dBm in boost mode		-102 dBm
<b>Features</b>			
Adjustable Power	Yes		
I/O Interface	3.3V CMOS UART, ADC, DIO		3.3V CMOS UART, SPI, I2C, PWM, DIO, ADC
Configuration Method	API or AT commands, local or over-the-air		
Frequency Band	2.4 GHz		
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)		
Serial Data Rate	1200 bps - 1 Mbps		
ADC Inputs	(4) 10-bit ADC inputs		
Digital I/O	10		
Antenna Options	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA	PCB Embedded Antenna, Wire Whip, U.FL, RPSMA	
Operating Temperature	-40° C to +85° C, 0-95% humidity non-condensing		
<b>Programmability</b>			
Memory	N/A		32 KB Flash / 2 KB RAM
CPU/Clock Speed	N/A		HCS08 / Up to 50.33 MHz
<b>Networking &amp; Security</b>			
Encryption	128-bit AES		
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments		
IDs and Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 16 channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 15 channels	
<b>Power Requirements</b>			
Supply Voltage	2.1 - 3.6VDC		2.7 - 3.6VDC
Transmit Current	35 mA / 45 mA boost mode @ 3.3VDC	205 mA	220 mA
Receive Current	38 mA / 40 mA boost mode @ 3.3VDC	47 mA	62 mA
Power-Down Current	<1 uA @ 25° C	3.5 uA @ 25° C	4 uA @ 25° C
<b>Regulatory Approvals</b>			
FCC, IC (North America)	Yes		
ETSI (Europe)	Yes		
C-TICK (Australia)	Yes		
TELEC (Japan)	Yes	Yes (intl unit only)	



Visit [www.digi.com](http://www.digi.com) for part numbers.

**DIGI SERVICE AND SUPPORT** - You can purchase with confidence knowing that Digi is here to support you with expert technical support and a one-year warranty. [www.digi.com/support](http://www.digi.com/support)

- |  |  |  |   |   |
|--|--|--|---|---|
| <b>Digi International</b><br>877-912-3444<br>952-912-3444<br>info@digi.com | <b>Digi International France</b><br>+33-1-55-61-98-98<br>www.digi.fr | <b>Digi International KK</b><br>+81-3-5428-0261<br>www.digi-intl.co.jp | <b>Digi International (HK) Limited</b><br>+852-2833-1008<br>www.digi.cn | <b>Digi m2m Solutions India Pvt. Ltd</b><br>+91-80-4287-9887<br>info@digi.com |
|--|--|--|---|---|



91001471  
03/511

BUY ONLINE • [www.digi.com](http://www.digi.com)

© 2008-2011 Digi International Inc. All rights reserved. Digi, Digi International, the Digi logo, the Making Wireless M2M Easy logo, ConnectPort, XBee and XBee-PRO are trademarks or registered trademarks of Digi International Inc. in the United States and other countries worldwide. All other trademarks are the property of their respective owners. All information provided is subject to change without notice.



## ANEXO C

### FORMATO PARA RECOLECCION DE DATOS DEL FLUJO VEHICULAR

Hora	Vehículos Livianos		Vehículos Pesado		Motores	Giros
	Pub.	Priv.	Car.	Pas.		
16:15/16:30	27	49	5	7	5	
16:30/16:45	45	61	3	7	6	
16:45/17:00	29	41	2	7	3	
17:00/17:15	32	46	4	5	12	
17:15/17:30	42	38	4	7	5	
17:30/17:45	38	59	4	6	4	
17:45/18:00	41	63	5	8	9	

## **ANEXO D**

### **FIRMWARE DE LOS MICROCONTROLADORES**

Este anexo contiene el código de programa que gobierna a los microcontroladores y les permite operar de la manera solicitada. A continuación se describe la lógica de programa diseñada para los semáforos secundarios basados en el ATmega324P.

### **CÓDIGO EN LOS ATMEGA324P**













































Esta sección de código pertenece microprocesador PIC452, destinado a realizar los procesos de enlazar los módulos Zigbee, enviar la información correspondiente a las temporizaciones y la sincronización.

### **CODIGO EN EL MICROCONTROLADOR PIC452**







