

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**



**DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL
MONITOREO REMOTO DE VARIABLES FÍSICAS EN ÁREAS
AGRÍCOLAS PARA EL DESARROLLO AGROTECNOLÓGICO DEL PAÍS**

**REALIZADO POR:
LEÓN CASTILLO HECTOR JOSÉ**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

INGENIERO ELECTRICISTA.

PUERTO LA CRUZ, ABRIL DE 2009.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL
MONITOREO REMOTO DE VARIABLES FÍSICAS EN ÁREAS
AGRÍCOLAS PARA EL DESARROLLO AGROTECNOLÓGICO DEL PAÍS

REALIZADO POR:

HECTOR J. LEÓN C.

ASESOR:

Prof. José B. Peña.

PUERTO LA CRUZ, ABRIL DE 2009.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL
MONITOREO REMOTO DE VARIABLES FÍSICAS EN ÁREAS
AGRÍCOLAS PARA EL DESARROLLO AGROTECNOLÓGICO DEL PAÍS**

JURADO CALIFICADOR:

El jurado hace constar que asignó a esta tesis la calificación de:

Prof. José B. Peña.

Asesor Académico

Prof. Luis Parraguez

Jurado Principal

Prof. Eulogio Hernández

Jurado Principal

PUERTO LA CRUZ, ABRIL DE 2009.

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son de propiedad exclusiva de la Universidad y sólo podrán ser utilizados a otros fines, con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado principalmente a Dios por haber hecho posible la realización del mismo, gracias a él por haber puesto en mi camino a las personas que formaron parte de la realización de este proyecto, por siempre darme la fortaleza necesaria para levantarme de las caídas que tuve, por darme la sabiduría para entender ciertas situaciones y descubrir la falla o el error de las mismas, gracias Señor por tu ayuda, y a la Virgen del Valle por no desampárame, por ayudarme siempre a no perder la esperanza.

A mis Padres: Bertha y Editó, mi más apreciados tesoros que Dios me ha dado. Les debo parte de lo que soy en la vida, y sobretodo, les doy gracias por sobreprotegerme cuando era niño y adolescente.

A mis Hermanos: Editó y Liliana, mis compañeros en la casa, mis amigos, gracias por su ayuda, espero algún día poder pagarles lo que han hecho por mí.

A mis Tíos, a todos los que siempre han formado parte de mi vida.

A mis Abuelos por darme padres que tengo. A mi abuela Ana de León que desde el cielo me cuida.

A mi primo Jesús León por ser culpable de que me gustará la electrónica y por lo que me inicie en este hermoso y complicado campo de la Ingeniería.

A mis amigos, en especial a mis compañeros de estudio, que gracias a Dios son muchos, por su apoyo, colaboración y amistad durante toda mi vida universitaria.

A mis alumnos, que siempre estuvieron pendientes de mi trabajo, especialmente a mis estudiantes de la Extensión Centro Sur Anaco, por su gran cariño y afecto hacia mi persona, los aprecié demasiado, gracias por su amistad.

A las personas que se rinden fácilmente, crean y confíen en Dios, todo tiene solución.

Hector J. León C.

AGRADECIMIENTOS.

A Dios y la Virgen del Valle por haberme dado los conocimientos necesarios para la realización de esta Tesis. Gracias señor por todas las cosas que me han pasado en la vida. Eres lo más maravilloso en el Universo.

A mis Padres por siempre apoyarnos aunque no lo digan, por su educación y por su amor.

A mis hermanos por el apoyo que me han dado durante la realización de este proyecto.

A todos mi familiares, primos, tíos, abuelos, padrinos, que siempre han estado pendiente de mi.

A la Señora Jenny Ramos y señorita Lorena, por haber importado los diferentes componentes necesarios para completar los circuitos de los diferentes equipos, gracias, sin su ayuda, tal vez aún no habría terminado.

A mi asesor académico Prof. José B. Peña por su asesoría y consejos dados.

A la profesora Margarita Heraoui por su colaboración y su ayuda.

Al profesor William García, coordinador de Laboratorio II de Física por su apoyo y por el permiso para la utilización de los equipos de laboratorio y especialmente por haberme permitido ser el preparador de las secciones de la Extensión Centro Sur Anaco.

Al profesor Carlos Millán por su amistad.

A todos los profesores del departamento de Electricidad por sus conocimientos, consejos y amistad.

A todos los profesores que formaron parte de mi desarrollo como estudiante universitario en la ilustre Universidad de Oriente.

A las secretarias del departamento de Electricidad **Carmen y Mari**, gracias por su ayuda y amistad.

A mi principal grupo de estudio durante mi carrera universitaria a Jhon Acosta “el Pire” y a Juan Ruiz. Gracias por ser mis amigos y hermanos.

A todos mis compañeros de estudio del departamento de Electricidad, principalmente a Luis Tilleró, Mariana Morin, Jacknell Carolis, Liliana Borotoche “Lilitext”, Maricarmen, José Figueroa “Cheo”, Giancarlo Alexis “el italiano”, Jesús “Chui bicicleta”, Claudio, Vanessa Hernández e Ivan Farías también compañeros de bachillerato, Katy Rivera, Aldgelmir, José Salazar, Amulio, Katherine, Karla, Osmel, Miguel, Neal, Robert, Marinel, Rosybelt, José Lozada, Juan, Hoover, Guillermo, Ana Julia, Adriana Méndez, Daniel, Nelson, Juan y aquellos cuyos nombres no recuerdo en este momento pero que saben que estuvieron ahí, gracias por su amistad.

A todos mi amigos y conocidos del departamento de Electricidad, en especial a: Martha, Ayleen, María León “prima”, Mili, Vanessa Pérez, Daniel Sulbaran, María José, Adriana, Pedro Bello, Vicente, Otilio, David, Antonio, Zailus, Valeria, Sobeida, Jackmelin, las Dianas, Daniela, Daniel, Joel, Neify, Nelsi, Victor, Guillermo, Silvio, Stanlin, José, Reivis, los otros José, Ángela, Gaby, Eimy, Libia, Gina, Juleidis, Jesús, Juan, José Luis, Karen, Nesmil, Alejandra, Thairis, Loicy, Anderson, Emma, Mariangel, Fabiola, Amanda Ceijas, Emniella, Mariangel Tomassi y amigas, Rosmerys, Andrea Liz, los del CEDIE, Sergio, Gabriel, Daniel, Migdalia, Esteban, los de la sala de Lectura y de Micros, y todos aquellos cuyos nombres no los recuerdo en este instante pero que han estado ahí conmigo de alguna u otra forma ayudándome o apoyándome. En especial a la señorita Giyeli que me ayudo a realizar una prueba de máxima distancia.

Un especial y enorme agradecimiento a mis alumnas de la Extensión Centro Sur Anaco por su gran cariño y amistad hacia mi persona, muy especialmente a (sin orden de preferencia): Francis Gelvis, Mercedes Solorzano, Rosangela Venturella, Mari de Jesús, Rosmary Vivas, Yolimar, Amanda, Kristy, Adina, María José López,

Carla López, Yarismel Machado, Osmary Rojas, Isabela, Andrea, Airem, Adriana, Adri, Isabel, Petrilitza, Marialvic, Jamilet, Mayerlin, Rosnaellys, Mariobis, Geraldine, Isamar Maholy, Luzmirla, Luisa, Fiorina, Nilsa, Eleynnis, Gabriela, las demás Marías, las demás Francis, Cecilia, Carla, Vanessa Berdayes, Fabiola Dos Santos, Carmen, Natasha, Fabiola, las Carlas, Cinthia, Rosalía, Alicia, Mariana, Marianny, Lisset, Rosmary, Manrosy, Jeniree, Jenifer, Rogbelits, Ana, Xioribet, Patricia, Antonieta, Aura, Daniela, Naireth Guayamo gracias por ayudarme a realizar una prueba de transmisión, Génesis, Enilus, Valeska, Karla, Yolimar Rojas, Cleith, Franchesca, Rosmary, Sandra, Adrianny, Osmary, Jenny, Jenire, Jorgelis, Ligris, Jessica, Joysamar, Andreina, Emilia, Andreina, Dayana y todas aquellas cuyos nombres no recuerdo gracias por su amistad y apoyo, y a los amigos también, gracias por su amistad.

A mis amigas de ingeniería de Petróleo: Patricia, María Eugenia, Maira, Lourdes, Graciela, el trío Liliana, Carmen y Laurent, Elenitza, Liliana, María Cecilia compañera de estudio de bachillerato, Jenny, gracias por su amistad.

A mis amigos de ingeniería de Mecánica, en especial Aristóbulo, Kenia, Audrey, Isabela, Coni, Ana, Andreina, Carol, Astrid, Silvia, Daniela, Antoni Paruta también compañero de bachillerato, Edsolena, Johana, Crisleydy, Claudia, Milangela, Maybel, Leimy, Yairubiyu, y todos aquellos cuyos nombres no recuerdo, gracias por su amistad y apoyo.

A mis amigos de ingeniería de Química, en especial María Graciela, Edianny, Vicelis, Estela, Liliana, Yalimar, Mersoilis, Misnel, Ana, Dayana, Aleyska, Francis, Inés, Alejandra Tomassi, Marielle, Rosi, Isabel, Adriana, Mariangel, Eucarina, Emelis, Julianny, Helen, Miguel, Natalia, Xiomaida, María Gabriela, Milagros, Airam, Santi, Gabriela, Yamira, Oriana, Daniela, Vanessa, María, Mariana, Adriana, Marilu y sus amigas, Claribel, Jhoanny, Johana, Marcos, Geraldine, Daniela, y todas aquellas cuyos nombres no recuerdo gracias por su amistad y apoyo.

A mis amigos de ingeniería Industrial, en especial: María Virginia, Rossana, Andrea, Jhoanny, María de los Ángeles, Aurora, Devora, Isis, Maricela, Michelle, Carla, Carlita, Ana, Elizabeth, Vanessa, Estefany, Emirlen, Wendy, Jenifer, Emirlen (también compañera de bachillerato) Gaby, Diana, Desiree, María, Loreanny, Pía, Daliangeles, Jennifer, Yelitza, Yillianny, Osmarina, Dehiglis, Aromaya, Andreina, Norka, Rosangeles, Milagros, Gabriela, María, Judeilys, Yudithsi, Charlotte, Erika, Wisli y todos aquellos cuyos nombres no recuerdo, pero que formaron parte de mi vida udista, gracias por su amistad y apoyo.

A mis amigos de ingeniería de Computación y Sistemas, en especial Virginia, Yubraska, Giliam y sus amigas, Ferlis, Rocío, Liz, Daniela, Gaby, Gabriela, Johana, gracias por su amistad.

A mis amigas de ingeniería Civil, en especial: Todas las Marías que conozco, Yukcelin, Ayreen, Samira, Maricarmen, Iliana y Simón también compañeros de bachillerato, Luis, Dennys, Iliá, Luisana, Daniela, Aniuska y todos aquellos cuyos nombres no recuerdo, pero que formaron parte de mi vida udista, gracias por su amistad.

A mis amigas de la ECA: Deisy, Andry, también compañeras de bachillerato, Dargelis, Flor, María, Karina gracias por su amistad.

A mis amigos de Medicina: Ivon, Ismery, Desire, Luisnar, también compañeros de bachillerato, July, Joicy, María (prima), Iris, gracias por su amistad.

A mis amigos de Tecnología Electrónica: Argenis, Víctor, también compañero de bachillerato, Lorenzo, gracias por su amistad.

A la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui.

RESUMEN

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) son una tecnología innovadora del siglo XXI que tendrá grandes impactos en la sociedad y el mundo. En éste trabajo de investigación se desarrolla una aplicación para la agricultura, la cual consiste en monitorear remotamente la temperatura ambiente, la humedad del suelo y el nivel de luminosidad de un terreno cultivado. Esta aplicación está constituida por nodos sensores, encargados de sensar las variables anteriores y de transmitir los datos inalámbricamente a un nodo coordinador y luego a un nivel de control donde se visualizan los datos. El agricultor supervisará su cultivo y en base a la información recibida tomará sus decisiones, con el fin de optimizar la producción agrícola. Para esto se seleccionan los diferentes sensores, el microcontrolador en base a recursos/precio, se desarrolla un programa para ser compilado y luego grabado en la memoria del microcontrolador, se diseña un protocolo de comunicaciones, se configuran los diferentes equipos y se implementa la red para verificar los resultados de campo con respecto a los estimados teóricos. Se puede extender la cobertura de la WSN a mayores extensiones de terreno con pequeñas modificaciones del diseño.

CONTENIDO

RESOLUCIÓN	IV
DEDICATORIA	V
Agradecimientos.	VI
Resumen.....	X
Contenido.....	XI
Índice de figuras.....	XVI
Índice de tablas.....	XX
Capítulo I.....	1
Introducción.	1
1.1 La nueva tecnología emergente (WSN).....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivos	4
Capítulo II.....	6
Sensores, procesadores de datos digitales y comunicaciones.	6
2.1 La medida y los sistemas de medidas.	6
2.1.1 Variables y señales.....	6
2.1.2 Sistemas de medida.....	7
2.1.2.1 Funciones de un sistema de medida.....	8
2.2 Los Sensores.	11
2.2.1 Características estáticas de los sensores.....	12
2.2.1.1 Curva de calibración (Static Transfer Function).....	12
2.2.1.2 Errores: exactitud, veracidad y precisión.....	16
2.2.1.3 Calibración.....	18
2.2.2 Tipos de sensores.	20
2.2.2.1 Sensores capacitivos.	24

2.2.2.1.1	Sensores capacitivos en silicio.....	25
2.2.3	Criterios para la selección de sensores.....	25
2.2.3.1	Medida de temperatura.....	26
2.2.3.2	Sensor de humedad.	26
2.3	Procesadores digitales de señal.....	29
2.3.1	Microprocesadores (μ P).....	29
2.3.2	Microcontrolador (μ C).....	29
2.3.2.1	Ventajas de los microcontroladores.....	30
2.3.2.2	Herramientas de desarrollo.	32
2.3.2.3	Elegir un modelo concreto de microcontrolador.....	32
2.3.2.4	Fabricantes y modelos de microcontroladores.....	32
2.3.3	Procesadores Digitales de Señales (DSP).....	33
2.4	Las comunicaciones.....	34
2.4.1	Un modelo para las comunicaciones.....	34
2.4.2	Transmisión de datos.	35
2.4.2.1	Transmisión de datos analógicos y digitales.....	36
2.4.3	Modos de transmisión de datos.....	36
2.4.3.1	Paralelo.....	36
2.4.3.2	Serie.	37
2.4.4	Tipos de comunicación.....	37
2.4.4.1	Simplex.	37
2.4.4.2	Duplex o Semi-duplex.	38
2.4.4.3	Full Duplex.	38
2.4.5	Perturbaciones en una transmisión.....	38
2.4.5.1	Atenuación.....	39
2.4.5.2	Ruido.....	39
2.4.5.3	Distorsión de retardo.....	40
2.4.5.4	Interferencia.....	40
2.4.6	Medios de transmisión.....	41

Capítulo III.....	43
Diseño de la red de sensores inalámbricos.....	43
3.1 Parámetros utilizados para el diseño de la red de sensores inalámbricos. ..	43
3.2 Arquitectura de la red de sensores inalámbricos diseñada.....	43
3.2.1 Nivel de campo.	44
3.2.1.1 Nodo sensor (NS).....	45
3.2.1.2 Nodo coordinador (NC).	46
3.2.2 Nivel de comunicaciones.	48
3.2.3 Nivel control.	48
3.3 Topología.	49
3.4 Módulos de radio.	52
3.4.1 Antenas.....	57
3.5 Sensores.	59
3.5.1 Medición de temperatura.....	60
3.5.2 Medición de humedad.	61
3.5.3 Medición de iluminancia e irradiancia.....	64
3.6 Circuitos Acondicionadores de señal.....	67
3.6.1 Circuitos de acondicionamiento de señal para los sensores de temperatura.....	67
3.6.1.1 El sensor LM335.....	68
3.6.1.2 El sensor LM35.....	73
3.6.1.3 El sensor NTC.....	75
3.6.2 Circuitos de acondicionamiento para el sensor de humedad.	77
3.6.3 Circuitos de acondicionamiento para el sensor de iluminancia.	79
3.6.4 Circuito de acondicionamiento para el estado de la batería.....	82
3.7 Procesador digital de señal.....	83
3.7.1 Selección del microcontrolador.....	83
3.7.2 La familia de microcontroladores PIC.....	84
3.7.3 Clasificación de los microcontroladores PIC.....	86

3.7.3.1	Microcontroladores PIC de 8 bits.	86
3.7.3.2	Microcontroladores PIC de 16 Bits.	86
3.7.3.3	Microcontroladores PIC de 32 bits.	87
3.8	Cobertura de la WSN.	89
3.9	Alimentación de los equipos.	90
Capítulo IV	.....	92
Tecnologías de comunicaciones y Protocolos	.....	92
4.1	Protocolos de comunicaciones.	92
4.1.1	Protocolos de comunicaciones seriales.	92
4.1.2	Protocolos de comunicaciones para redes inalámbricas.	93
4.1.2.1	WLAN.	93
4.1.2.1.1	Pila de protocolos.	93
4.1.2.2	WPAN.	94
4.1.2.2.1	WiMedia/UWB.	95
4.1.2.2.1.1	Tecnología.	96
4.1.2.2.2	Zigbee.	97
4.1.2.2.2.1	Topología de red.	98
4.1.2.2.2.2	Arquitectura.	99
4.1.2.2.2.3	Pila de protocolos.	100
4.1.2.2.3	HomeRF.	101
4.1.3	Protocolo de comunicación de radio diseñado.	102
Capítulo V	.....	107
Configuración de los equipos de la red de sensores inalámbricos	.....	107
5.1	Configuración del Nodo Sensor.	107
5.2	Configuración del Nodo Coordinador.	111
5.3	Configuración del equipo de visualización.	117
Capítulo VI	.....	125
Implementación y prueba de la red de sensores inalámbricos	.....	125
6.1	Prueba del alcance de los módulos de radio.	125

6.2	Programación de los microcontroladores.....	128
6.3	Implementación de la red de sensores inalámbricos.....	133
6.4	Prueba de la red de sensores inalámbricos.....	134
	Conclusiones.....	141
	Recomendaciones.....	143
	BIBLIOGRAFÍA.....	144
	Anexo A.....	¡Error! Marcador no definido.
	Programa del microcontrolador del nodo sensor.....	¡Error! Marcador no definido.
	Anexo B.....	¡Error! Marcador no definido.
	Programa del microcontrolador del nodo coordinador.....	¡Error! Marcador no definido.
	Anexo C.....	¡Error! Marcador no definido.
	Programa del microcontrolador del equipo de monitoreo.....	¡Error! Marcador no definido.
	Anexo D.....	¡Error! Marcador no definido.
	Costo de la red de sensores inalámbricos.....	¡Error! Marcador no definido.
D.1	Precio de un nodo sensor.....	¡Error! Marcador no definido.
D.2	Precio de un nodo coordinador.....	¡Error! Marcador no definido.
D.3	Precio del equipo de visualización.....	¡Error! Marcador no definido.
D.4	Presupuesto de la red de sensores inalámbricos.....	¡Error! Marcador no definido.
D.5	Análisis del costo de la red de sensores inalámbricos.....	¡Error! Marcador no definido.
	Anexo E.....	¡Error! Marcador no definido.
	Pruebas realizadas.....	¡Error! Marcador no definido.
	Anexo F.....	¡Error! Marcador no definido.
	Pruebas de la implementación de la WSN.....	¡Error! Marcador no definido.
	Glosario de términos.....	¡Error! Marcador no definido.
	METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	156

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1. Tipos de variables.....	7
Figura 2.2. Objeto de un sistema de medida.....	8
Figura 2.3. Funciones principales de un sistema de medida electrónico.....	9
Figura 2.4. Elementos de un sistema de medida.....	10
Figura 2.5. Ejemplos de curva de calibración.....	12
Figura 2.6. Representación de parámetros sobre la curva de calibración.....	13
Figura 2.7. Curva de calibración que presenta histéresis.....	14
Figura 2.8. Curva de calibración que comienza a saturarse por encima de X_{sat}	15
Figura 2.9. Relación entre la salida y la tensión de entrada de un ADC de 3 Bits	15
Figura 2.10. Representación de la curva de calibración ideal.....	18
Figura 2.11. Calibración del cero y de la ganancia.....	19
Figura 2.12. Construcción de un sensor de humedad capacitivo.....	28
Figura 2.13. Sensor de humedad HIH-3610 de Honeywell.....	29
Figura 2.14. Diagrama de bloques simplificado de un procesador digital.....	30
Figura 2.15. Sistema de adquisición basado en un DSP.....	34
Figura 2.16. Modelo simplificado para las comunicaciones.....	35
Figura 2.17. Transmisión en paralelo.....	37
Figura 2.18. Transmisión serie.....	37
Figura 2.19. Comunicación simplex.....	38
Figura 2.20. Comunicación duplex o full duplex.....	38
Figura 2.21. Efecto del ruido en una señal digital.....	40
Figura 2.22. Espectro electromagnético para las telecomunicaciones.....	42
Figura 3.1. Arquitectura diseñada de la WSN.....	44
Figura 3.2. Estructura del nivel de campo de la WSN diseñada.....	45
Figura 3.3. Esquema general de un nodo sensor.....	45
Figura 3.4. Esquema general de un nodo coordinador.....	46

Figura 3.5. Esquema general del equipo de monitoreo.....	49
Figura 3.6. WSN con topología en estrella	50
Figura 3.7. WSN con topología en estrella extendida.....	51
Figura 3.8. WSN con combinación de topologías	52
Figura 3.9. Nivel de potencia versus voltaje de alimentación	54
Figura 3.10. Variación de la sensibilidad del receptor versus la temperatura	54
Figura 3.11. Antena seleccionada. ANT-433-PW-LP de Antenna Factor.....	57
Figura 3.12. Otros tipos de antenas para 433-434 MHz	58
Figura 3.13. Sensores de temperatura seleccionados.....	61
Figura 3.14. Curva típica del sensor HS1101 de Humirel.	62
Figura 3.15. Curva típica del sensor HCH-1000-002 de Honeywell.	63
Figura 3.16. Aspecto físico del sensor de humedad HM1500LF de Humirel.	63
Figura 3.17. Sensores de humedad	64
Figura 3.18. Sensor de humedad capacitivo de Honeywell.....	64
Figura 3.19. Sensores utilizados en fotometría	65
Figura 3.20. Aspecto físico de los sensores para la medida de iluminancia	65
Figura 3.21. Curva característica del sensor LLS05-A.....	66
Figura 3.22. Curva característica del sensor BH1603FVC	66
Figura 3.23. Amplificador diferencial con Op Amp.....	68
Figura 3.24. Amplificador no inversor con Op Amp.....	69
Figura 3.25. Circuito acondicionador para el sensor LM335	69
Figura 3.26. Señales del sensor y del ADC para el LM335.....	70
Figura 3.27. Esquema de un divisor de voltaje.....	72
Figura 3.28. Sensor de temperatura LM33	73
Figura 3.29. Señales del sensor y del ADC.....	74
Figura 3.30. Sensor de temperatura LM35D.....	75
Figura 3.31. Circuito acondicionador de señal para un termistor NTC.	76
Figura 3.32. Circuito convertidor capacitancia – voltaje.....	77
Figura 3.33. Formas de onda del convertidor capacitancia – voltaje.....	78

Figura 3.34. Capacitancia vs V_o	78
Figura 3.35. Circuito de acondicionamiento de señal del sensor LLS05-A.	80
Figura 3.36. Circuito de acondicionamiento de señal del sensor BH1603FVC	80
Figura 4.37. Divisor de voltaje para la medida del voltaje de las baterías.....	82
Figura 3.38. Distribución de las ventas de microcontroladores PIC.....	84
Figura 3.39. La variedad de dispositivos PIC	85
Figura 3.40. Los microcontroladores PIC de 8 bits	86
Figura 3.41. Aspecto físico de los microcontroladores seleccionados.	88
Figura 3.42. Terreno con una superficie de 1 hectárea, cobertura de la WSN.	90
Figura 3.43. Diferentes tipos de baterías.	91
Figura 4.1. Pila de protocolos IEEE 802.11.....	94
Figura 4.2. Nuevos mercados de las WPAN.....	95
Figura 4.3. Supertrama piconet IEEE 802.15.3.	95
Figura 4.4. Transmisión UWB.....	97
Figura 4.5. Ejemplos de topologías Star y Peer-to-Peer.	99
Figura 4.6. Arquitectura de un dispositivo LR-WPAN.	100
Figura 4.7. Capas del protocolo ZigBee.	101
Figura 4.8. Formato de la trama.....	102
Figura 4.9. Formato de la trama para un byte de información.....	102
Figura 4.10. Esquema del protocolo de comunicaciones diseñado para NS y NC..	105
Figura 4.11. Esquema del protocolo de comunicaciones diseñado para NC y NC..	106
Figura 5.1. Microcontrolador del Nodo Sensor	109
Figura 5.2. Diagrama eléctrico del Nodo Sensor.....	110
Figura 5.3. Esquema del microcontrolador del nodo coordinador.....	115
Figura 5.4. Diagrama eléctrico del circuito del nodo coordinador.	116
Figura 5.5. Esquema del microcontrolador del equipo de monitoreo.....	122
Figura 5.6. Diagrama eléctrico del equipo de monitoreo.....	123
Figura 5.7. Configuración de la LCD.	124
Figura 5.8. Configuración del teclado.....	124

Figura 6.1. Diagrama eléctrico del circuito para probar la comunicación.....	125
Figura 6.2. Ubicación del “nodo sensor” para la realización de la prueba..	127
Figura 6.3. Fotos de la prueba realizada a 10 m de distancia..	127
Figura 6.4. Fotos de la segunda prueba realizada a 120m de distancia.	128
Figura 6.5. Foto donde se aprecia la transmisión errada.....	128
Figura 6.6. Interfaz Gráfica de Usuario del MPASM v5.14 para NS.....	129
Figura 6.7. Resultado de la compilación para el programa del Nodo Sensor.	130
Figura 6.8. Interfaz Gráfica de Usuario del MPASM v5.14 para NC.....	131
Figura 6.9. Resultado de la compilación para el programa del Nodo Sensor.	131
Figura 6.10. Interfaz Gráfica de Usuario del MPASM v5.14 Nivel de Control	132
Figura 6.11. Resultado de la compilación para el programa del Nodo Sensor.	132
Figura 6.12. Aspecto físico del programador iPROG18.....	133
Figura 6.13. Ubicación de los equipos de la WSN para su prueba.	134
Figura 6.14. Equipo de visualización o monitoreo.	135
Figura 6.15. Visualización de los datos del 1 ^{er} ciclo.....	135
Figura 6.16. Circuito multivibrador astable.....	136
Figura 6.17. Cronometraje del tiempo de temporización.....	138
Figura 6.18. Valor de la batería del NC calculado por su microcontrolador	139
Figura 6.19. Valor de la batería del NC medido por un multímetro.	139

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1. Naturaleza y tipos de variables..	8
Tabla 2.2. Diferentes tipos de sensores según su magnitud física.	22
Tabla 2.3. Comparación entre diferentes sensores de temperatura.	27
Tabla 3.1. Módulos utilizados en redes de sensores inalámbricos.	53
Tabla 3.2. Especificaciones técnicas del MO-SAWR.	55
Tabla 3.3. Especificaciones técnicas del MO-RX3400.	56
Tabla 3.4. Especificaciones eléctricas de la antena ANT-433-PW-LP.	58
Tabla 3.5. Parámetros de los sensores para la medición de temperatura.	60
Tabla 3.6. Principales características técnicas de los sensores seleccionados	60
Tabla 3.7. Principales características técnicas de los sensores de humedad.	61
Tabla 3.8. Principales aspectos técnicos de los sensores de humedad elegidos.	62
Tabla 3.9. Características de los sensores de iluminancia.	66
Tabla 4.1. Estándares de la familia IEEE 802.11.	94
Tabla 4.2. Características básicas de Zigbee.	98
Tabla 4.3. Bandas de frecuencias y tasas de datos.	98
Tabla 4.4. Características de los dispositivos Zigbee.	99
Tabla 6.1. Resultados de la primera prueba realizada.	126
Tabla 6.2. Resultados de la segunda prueba realizada.	126
Tabla 6.3. Resultados de la prueba de la red de sensores inalámbricos.	139
Tabla 6.4. Cuadro comparativo, estimados teóricos vs. resultados de campo.	140

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.

1.1 La nueva tecnología emergente (WSN).

Las nuevas tecnologías están facilitando que cada vez haya más sensores a nuestro alrededor, capaces de procesar enormes cantidades de datos para ayudar a mejorar el funcionamiento de las fábricas, el control de los procesos productivos, el mantenimiento de las cosechas, o incluso para detectar terremotos.

Los investigadores hablan ya de una nueva generación de sensores, capaces de organizarse así mismos y conectarse en red de manera inalámbrica, y que podrían generar una revolución similar a la que tuvo la aparición de Internet en los años 70 del siglo pasado. Si a eso se le une los avances realizados en Inteligencia Artificial, algunos expertos vaticinan que en los próximos cinco años podrían incluso crearse sensores con inteligencia compleja. "La mayoría del tráfico de datos ya no se realizará entre seres humanos, sino entre estas cucarachas de silicio", avanza Bob Metcalfe, investigador de la empresa Ember, con sede en Boston, que trabaja en el desarrollo de este tipo de sensores.

La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA), la misma institución dependiente del Departamento de Defensa estadounidense que tuvo un papel determinante en la creación de la red de redes, está apostando por su creación y desarrollo, financiando este tipo de investigaciones. Evidentemente, los investigadores de DARPA trabajan en tecnologías con usos eminentemente militares, aunque como en el caso de Internet, dichas tecnologías suelen adaptarse posteriormente en la vida civil.

En este caso, se trataría de seguir el concepto de "polvo inteligente", una idea desarrollada hace algunos años por investigadores de dicha agencia, que consiste en diseminar en el campo de batalla miles de diminutos sensores conectados por una red inalámbrica. Así, estos sensores controlan los movimientos de las tropas y los vehículos del enemigo sin alertarle de su presencia. Al tratarse de una red autoorganizada e inteligente, los sensores filtran toda la información en bruto que reciben antes de enviar los descubrimientos importantes a la base central de operaciones. De esta manera, los mandos militares podrían evitar posibles bajas en sus tropas al detectar por ejemplo posibles amenazas de armas químicas o biológicas. De hecho, el ejército de los Estados Unidos ya ha experimentado en la vida real con estos prototipos.

El monitoreo por sensores en la agricultura podrá servir para controlar humedad, temperatura y medir la acidez del suelo, con objeto de mejorar la productividad. Su aplicación se extenderá a la medicina, deporte, control de tránsito y otras actividades humanas que potencialmente pueden ser mejoradas con esta tecnología.

El MIT identificó en Febrero de 2003 las diez tecnologías emergentes que cambiarán el mundo, en donde las redes de sensores inalámbricos aparece en el primer lugar de esa clasificación.

1.2 Planteamiento del problema

La actividad agrícola fue predominante para las economías durante miles de años antes de la revolución industrial. La aparición de las máquinas facilitan e incrementan la producción de alimentos, tal incremento depende del tratamiento que se le de a cada planta.

Existe una gran diversidad de plantas que necesitan ciertos recursos naturales para su proliferación, como lo son agua, abono, tierra fértil, fertilizantes, entre otros; estos recursos deben ser colocados en el momento preciso de acuerdo a la necesidad de la planta para lograr su óptimo desarrollo para incrementar la productividad, pero en un cultivo de vegetales de gran envergadura, ¿Cómo se sabe en realidad en que momento la planta requiere de estos recursos? La respuesta no es fácil de conocer, esto origina la desatención de las mismas, causando a la vez pérdidas de las cosechas de manera frecuente en los procesos agrícolas. Es por ello que hoy en día se observa con preocupación que el desarrollo de la agricultura aunado al crecimiento de la industria agrícola se está viendo afectado, es decir; la falta de comunicación entre la planta y el agricultor está originando lentamente el fin de esta actividad milenaria como lo es la agricultura, la cual representa el sustento de muchos países. Por este motivo surge la necesidad de diseñar una red de sensores inalámbricos que permita mantener las plantas en condiciones óptimas de desarrollo.

Para poder hacer uso racional de los recursos hídricos es necesario conocer el contenido de humedad del suelo bajo diferentes sistemas de manejo agronómico. Este parámetro es uno de los más dinámicos del suelo, tanto en el espacio como en el tiempo, por lo que se requieren altas intensidades de muestreo, lo que implica una inversión elevada en términos de tiempo, monetarios y de recursos humanos. El monitorear el contenido de agua en el suelo es esencial para ayudar a los agricultores a optimizar la producción, conservar agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero. El monitorear la humedad del suelo le puede ayudar a tomar mejores decisiones en la programación del riego, tales como el determinar la cantidad de agua a aplicar y cuándo aplicarla. También le puede ayudar a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada con el riego; y así evitar pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos o bien evitar aplicar una cantidad insuficiente. El exceso de irrigación puede incrementar el consumo de energía y los costos de agua, aumentar el movimiento de fertilizantes por debajo de la

zona radicular, producir erosión y transporte de suelo y partículas de químicos a los canales de drenaje. El riego insuficiente puede reducir la producción de las cosechas.

En la actualidad ya existen equipos en el mercado que son capaces de realizar ciertas aplicaciones específicas. Estos equipos son muy costosos y a la vez realizan una sola operación, representando una gran desventaja para las empresas que lo adquieren. Por este motivo este trabajo está enfocado en el diseño de estos equipos a través de un Controlador de Interfaz Periférico ó microcontroladores PIC (*Peripheral Interface Controller*), ya que son mucho más económicos y pueden realizar múltiples funciones programadas.

En este trabajo se procederá al diseño y construcción de un dispositivo que se inserta en el terreno y se deja en esa localidad para la toma de datos de humedad relativa, temperatura e iluminancia (o nivel de luminosidad), con periodos de muestreo predeterminados y su posterior transmisión remota a un punto de control, donde luego el agricultor tomará sus decisiones (regar, otras). Soportadas en información de campo recibidas en tiempo real. Este proyecto tiene como finalidad contribuir al desarrollo agrotecnológico y de la industria agrícola, a la vez que contribuye con el desarrollo sustentable de la tierra para el beneficio económico del país y sus habitantes.

1.3 Objetivos

Objetivo Principal

Diseñar una red de sensores inalámbricos para el monitoreo remoto de variables físicas en áreas agrícolas, para el desarrollo agrotecnológico del país.

Objetivos Específicos

1. Definir los parámetros de diseño de la red de sensores inalámbricos.
2. Seleccionar la arquitectura, topología y los diferentes dispositivos que constituyen la red.
3. Establecer los protocolos de comunicaciones para el correcto funcionamiento de la red.
4. Configurar los diferentes tipos de sensores y equipos que integran la red.
5. Implementar la red diseñada para la verificación de los estimados teóricos versus los resultados de campo.

CAPÍTULO II

SENSORES, PROCESADORES DE DATOS DIGITALES Y COMUNICACIONES.

2.1 La medida y los sistemas de medidas.

La medida consiste en la determinación de una magnitud por comparación con un estándar. Aunque algunos de nuestros sentidos puedan parecernos, a priori, extraordinariamente desarrollados, la percepción y medida de magnitudes físicas no puede realizarse con precisión. En primer lugar, no todos perciben de la misma forma, por lo que se hace muy difícil cuantificar con objetividad. Además, los sentidos son incapaces de estimar ciertas variables físicas; por ejemplo: no se pueden percibir ondas sonoras de una frecuencia superior a 20 kHz, ni tampoco ondas electromagnéticas que salgan fuera del reducido espectro visible. Para suplir estas deficiencias se recurre a los instrumentos de medida. Los instrumentos son capaces de cuantificar de forma sistemática y de “ver” lo que el hombre no es capaz de ver.

2.1.1 Variables y señales.

La información de las variables que se pretenda capturar se almacena en algún tipo de variable eléctrica, generalmente tensión. Esa variable eléctrica es lo que se denomina señal. La naturaleza de las variables y de las señales que las contienen puede ser igual o distinta: en el primer caso, variable y señal coinciden (o son proporcionales) mientras que, en el segundo, la variable es almacenada “dentro” de alguno de los parámetros de la señal. En cualquiera de los casos, variables y señales pueden clasificarse siguiendo varios criterios, destacándose los interesantes desde el punto de vista de instrumentación electrónica. De esta forma se tienen:

- a) Variables analógicas, cuando los datos constituyen matemáticamente un conjunto denso, es decir, que puede tener cualquier valor dentro de un intervalo según se indica en la figura 2.1a, lo que implica que el número total de valores es infinito.
- b) Variables digitales, cuando los datos constituyen un conjunto finito de valores; un caso particular de este tipo de variables es el sistema binario que permite dos valores diferentes, denotados normalmente por el “0” y “1” (figura 2.1b).

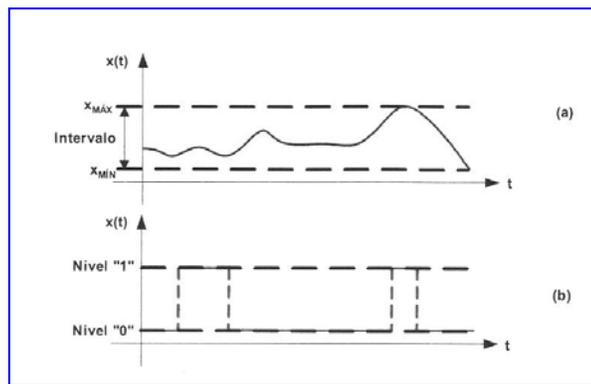


Figura 2.1. Tipos de variables. Representación de: (a) una variable analógica y (b) una variable digital binaria. [5]

2.1.2 Sistemas de medida

Un sistema de medida electrónico es aquel equipo cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en la forma adecuada a un observador o a otro sistema técnico de control (figura 2.2). Existen multitud de magnitudes físicas susceptibles de ser medidas, si bien cada una de ellas podría considerarse dentro de los tipos de variables que muestra la tabla 2.1.



Figura 2.2. Objeto de un sistema de medida. [5]

Tabla 2.1. Naturaleza y tipos de variables. Fuente: Tomada de referencia [5].

Naturaleza de la variable	Tipo de variable
Mecánica	Desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza, par, presión, masa, flujo, otro.
Térmica	Temperatura, calor, entropía, otro.
Magnética	Campo magnético, flujo, permeabilidad magnética, otro.
Eléctrica	Carga, corriente, tensión, resistencia, conductancia, capacidad, permitividad dieléctrica, polarización, frecuencia, otro.
Óptica	Rayos gamma, rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas.
Química	Humedad, pH, concentración iónica, análisis de gases, otro.
Biológica	Proteínas, hormonas, antígenos, otro.

2.1.2.1 Funciones de un sistema de medida.

Si se considera el sistema de medida como una caja negra, la entrada sería el valor verdadero de la variable a medir y la salida, el valor medido. Sólo en el caso ideal, la diferencia entre ambos valores será nula por lo que siempre se cometerá un error de medida. Las causas de este error son de origen diverso: ruido del sistema de medida, interferencias exteriores, desviaciones de los parámetros de componentes, mala calibración, entre otros. En un sistema de medida se pueden distinguir tres funciones principales: adquisición de datos, procesamiento de datos y distribución de los datos (figura 2.3):



Figura 2.3. Funciones principales de un sistema de medida electrónico. [5]

- **Adquisición de datos.** La información de las variables a medir es adquirida y convertida en una señal eléctrica. De esta etapa dependerá en gran medida las prestaciones del sistema de medida.
- **Procesamiento de datos.** Consiste en el procesamiento, selección y manipulación de los datos con arreglo a los objetivos perseguidos. Esta función suele ser realizada por un procesador digital, tipo microcontrolador o procesador digital de señal (Digital Signal Processor o DSP).
- **Distribución de datos.** El valor medido se presenta a un observador (por ejemplo, mediante un display), se almacena (por ejemplo, en disco o en un *chip* de memoria) o bien se transmite a otro sistema.

A su vez, la función de adquisición de datos puede ser dividida en unidades funcionales más pequeñas como se muestra en la figura 2.4. En primer lugar, la variable del mundo físico es convertida en una señal eléctrica mediante un dispositivo sensor a fin de poder ser procesada adecuadamente. Con frecuencia, la señal procedente del sensor tiene unas características que la hacen poco adecuada para ser procesada: señal de pequeño nivel, espectro grande, falta de linealidad, otros. Se hace falta de una etapa de acondicionamiento de la señal. Este acondicionamiento consiste en realizar algunas de las siguientes operaciones básicas:

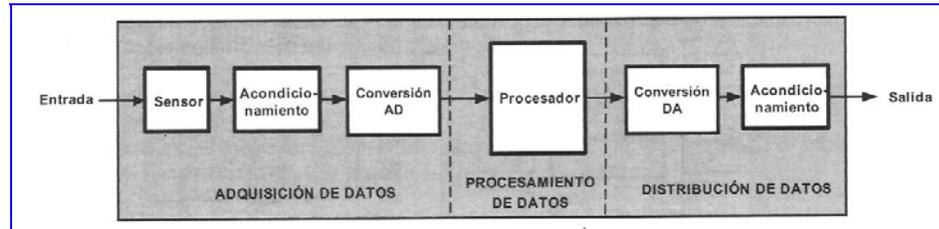


Figura 2.4. Elementos de un sistema de medida. [5]

- **Amplificación:** incrementar el nivel de potencial de la señal.
- **Filtrado:** Eliminar las componentes de la señal no deseadas.
- **Linealización:** obtener una señal de salida que varíe linealmente con la variable que se desea medir.
- **Modulación/Demodulación:** modificar la forma de la señal a fin de poder transmitirla a largas distancias o a fin de reducir su sensibilidad frente a interferencias durante el transporte.

En un esfuerzo por simplificar el diseño, ahorrar espacio, eliminar fuentes de errores y reducir costos, los sensores suelen incluir circuitería de acondicionamiento, dando lugar a sensores integrados, que incluso proporcionan una salida digital. Después del acondicionamiento, la señal es convertida del mundo analógico al dominio digital mediante un convertidor analógico-digital (ADC). La salida del ADC se procesa mediante un procesador digital de señales, que en muchas ocasiones puede integrar el ADC. Una vez procesada la señal puede ser necesario entregar la información en forma analógica, en cuyo caso es necesario proporcionar otra interfaz desde el dominio digital al mundo analógico mediante un convertidor digital-analógico (DAC). Finalmente, la señal del procesador se puede enviar a un observador para su visualización, almacenada en memoria o enviar a otro equipo de medida o sistema de control.

2.2 Los Sensores.

Las nuevas tecnologías están facilitando que cada vez haya más sensores a nuestro alrededor, capaces de procesar enormes cantidades de datos para ayudar a mejorar el funcionamiento de las fábricas, el control de los procesos productivos, el mantenimiento de las cosechas, o incluso para detectar terremotos.

Un **transductor** es un dispositivo que transforma un tipo de variable física (por ejemplo, fuerza, presión, temperatura, velocidad, entre otros) en otro.

Un **sensor** es un transductor que se utiliza para medir una variable física de interés, es decir, su misión es capturar la variable de proceso (variable física), y convertirla en una señal eléctrica (preferiblemente en un voltaje).

Los transductores y los sensores pueden clasificarse en dos tipos básicos, dependiendo de la forma de la señal convertida. Los dos tipos son: transductores analógicos y transductores digitales.

- **Los transductores analógicos** proporcionan una señal analógica continua, por ejemplo voltaje o corriente eléctrica. Esta señal puede ser tomada como el valor de la variable física que se mide.
- **Los transductores digitales** producen una señal de salida digital, en la forma de un conjunto de bits de estado en paralelo o formando una serie de pulsaciones que pueden ser contadas. En una u otra forma, las señales digitales representan el valor de la variable medida. Los transductores digitales suelen ofrecer la ventaja de ser más compatibles con las computadoras digitales que los sensores analógicos en la automatización y en el control de procesos.

2.2.1 Características estáticas de los sensores.

El comportamiento de un sensor o de un instrumento de medida se puede definir, en general, mediante la función de transferencia, que indica tanto el comportamiento en régimen estático como dinámico. El primero corresponde a la relación entre la entrada y la salida cuando la entrada es constante o cuando ha transcurrido un tiempo suficiente para que la salida haya alcanzado el valor final o régimen permanente. El segundo indica la evolución del sistema hasta que la salida alcanza el valor final ante una variación en la entrada.

2.2.1.1 Curva de calibración (Static Transfer Function).

La curva de calibración es la relación entre la entrada al sensor o sistema y su salida en régimen estático (figura 2.5). Para definir la curva adecuadamente se necesita como mínimo indicar su forma y sus límites. Estos últimos se especifican con algunos de los siguientes parámetros (figura 2.6).

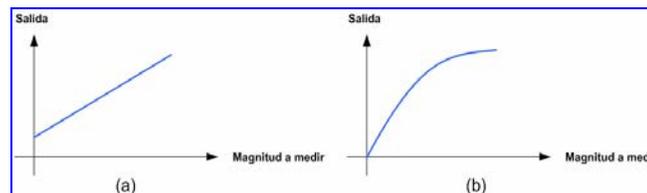


Figura 2.5. Ejemplos de curva de calibración. (a) Curva de calibración lineal. (b) Curva de calibración no lineal. [5]

- **Campo de medida** (*range*): conjunto de valores comprendidos entre los límites superior e inferior entre los que puede efectuarse la medida. Por ejemplo, si se dispone de un termómetro diseñado para medir entre -20 y 60 °C, el campo de medida es de $-20^{\circ}\text{C}/60^{\circ}\text{C}$. También se conoce como rango dinámico, aunque este término se emplea más frecuente para indicar la diferencia entre el límite superior e inferior expresada en decibelios.

- **Zona muerta** (*dead zone*): es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación. También se define como la región de la curva de calibración que presenta una sensibilidad nula.
- **Histéresis** (*hysteresis*): es la diferencia en la medida dependiendo del sentido en el que se ha alcanzado (figura 2.7). Por ejemplo, si se dispone de una báscula cuyo campo de medida es 0-100 kg y se va incrementando el peso sobre la misma gradualmente hasta llegar al máximo, es probable que la indicación del peso no sea la misma que si se va disminuyendo desde el máximo. Si ante 50 kg, en el primer caso marca 49 kg y en el segundo 51 kg, la histéresis es de 2 kg o bien, expresada respecto del fondo de escala, es del 2%.

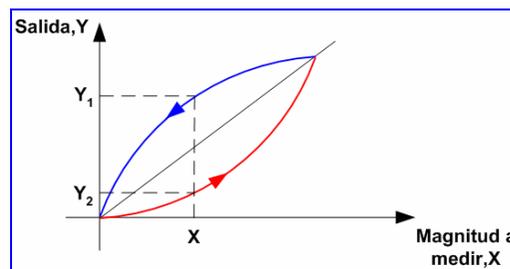


Figura 2.7. Curva de calibración que presenta histéresis. [5]

- **Deriva** (*drift*): es la variación de algún aspecto de la curva de calibración con respecto a algún parámetro ambiental (temperatura, humedad, entre otros, siempre que el propio parámetro no sea el objeto de la medida) o con respecto al tiempo. Para caracterizar los sistemas suele ser muy habitual indicar la deriva en algún punto significativo como, por ejemplo, el que corresponde al cero. Normalmente se expresa en % sobre el fondo de escala de salida.
- **Saturación** (*saturation*): es el nivel de entrada a partir del cual la sensibilidad disminuye de forma significativa (figura 2.8).

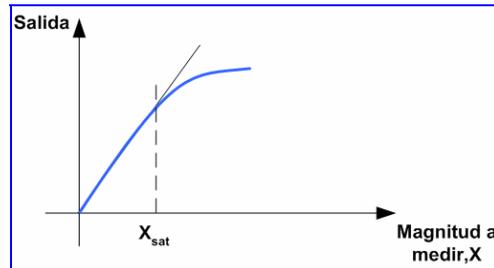


Figura 2.8. Curva de calibración que comienza a saturarse por encima de X_{sat} . [5]

- **Resolución** (*resolution*): en algunos sensores e instrumentos de medida, una variación continua de la señal de entrada no da lugar a una variación continua en la salida, más bien parece tener una forma escalonada. La resolución se define como el incremento mínimo de la variable de entrada que ofrece un cambio medible a la salida. Es un parámetro también muy importante, por ejemplo, en los convertidores analógicos a digital o en aquellos equipos de medida que utilicen estos convertidores como paso previo a la visualización de los resultados (figura 2.9). Habitualmente, se suele expresar como un valor en tanto por ciento sobre el fondo de escala. Por ejemplo, en un potenciómetro bobinado de 100 espiras, la resolución es del 1%.

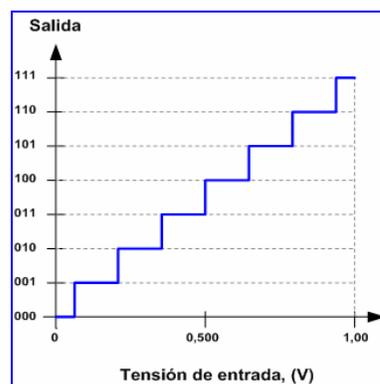


Figura 2.9. Relación entre la salida y la tensión de entrada de un convertidor analógico a digital de 3 bits de 0-1 V. [5]

2.2.1.2 Errores: exactitud, veracidad y precisión.

Un principio básico de todo sistema de instrumentación electrónica es medir una magnitud con el menor error posible. Siempre existe un grado de incertidumbre puesto que es imposible realizar una medición sin modificar en mayor o menor grado lo que se mide. Esto se debe a que se realizan aproximaciones en las medidas, siempre que el error cometido sea aceptable para una aplicación específica. Además, las variables incontroladas, entre ellas el ambiente, el envejecimiento de los componentes, el ruido, entre otros, añaden nuevos errores.

Los términos más elementales para cuantificar el error son, el error absoluto y el error relativo:

- **Error absoluto:** diferencia entre el valor medido y el valor exacto en valor absoluto.
- **Error relativo:** error absoluto dividido entre el valor exacto.

Por otra parte, los errores se suelen clasificar en sistemáticos y aleatorios. Los primeros se mantienen constantes en valor absoluto y signo después de medidas repetidas por lo que pueden ser evitados, mientras que los segundos permanecen aún después de haber corregido los primeros. Ambos son, en principio, independientes por lo que el error sistemático en la medida de una magnitud x es $\pm k_1 x$ y el aleatorio es $\pm k_2 x$, el error total es:

$$e = \sqrt{(k_1 x)^2 + (k_2 x)^2} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Una mejor definición del comportamiento del sistema en lo referente al error exige cuantificar el error de forma que pueda detectarse el origen del mismo. Así, en las normas UNE82009 se definen los siguientes términos para cuantificar el error.

- **Veracidad** (*trueness*): es el grado de concordancia entre el valor medio obtenido de una gran serie de resultados y el valor verdadero o el aceptado como referencia. En muchos métodos de medición no se conoce el valor verdadero, pero es posible contar un valor aceptado para la propiedad que se va a medir. La veracidad se suele expresar en términos de **desviación**.
- **Precisión** (*precision*): es el grado de concordancia entre los resultados. La precisión no implica necesariamente la veracidad. Los resultados de muchas medidas pueden ser muy similares pero, sin embargo, pueden ser muy diferentes del valor verdadero.
- **Exactitud** (*accuracy*): este término se utiliza para referirse conjuntamente con la veracidad y a la precisión, es decir, a la correspondencia de los resultados entre sí y, además, al valor verdadero. Aunque es habitual denominar como precisión a la exactitud, las diferencias son notables.

El término general para definir la variabilidad entre mediciones repetidas es la precisión. Existen diferentes factores que pueden contribuir a la variabilidad de un método de medición, entre ellos, los siguientes:

- El operador que realiza la medición.
- Los equipos.
- La calibración de los equipos.
- El ambiente (temperatura, humedad, otros).
- El intervalo temporal entre las mediciones.

2.2.1.3 Calibración.

La calibración de un sistema consiste en establecer, con la mayor exactitud posible, la correspondencia entre las indicaciones de un instrumento de medida y los valores de la magnitud que se mide con él. Las tolerancias de los componentes y las no idealidades de los circuitos electrónicos conducen a que dos sensores o dos instrumentos de medida aparentemente idénticos no presenten nunca curvas idénticas de calibración. Además, la curva de calibración de los instrumentos varía a lo largo del tiempo y del grado de utilización de los mismos.

En los sistemas con curvas de calibración lineales, las diferencias más notables se suelen centrar en dos aspectos: el nivel (offset) y la sensibilidad (figura 2.10). Estas diferencias conducen a errores sistemáticos que pueden ser minimizados siempre que exista posibilidad de calibrar el equipo. Los métodos de calibración más sencillos son la calibración a un punto y la calibración del cero y de la sensibilidad:

- **Calibración a un punto:** consiste en actuar sobre el sistema de medida de forma que para un punto concreto la salida sea lo más exacta posible. Por ejemplo, las básculas de baño analógicas incorporan un mando para ajustar el cero. Las básculas digitales lo hacen automáticamente.

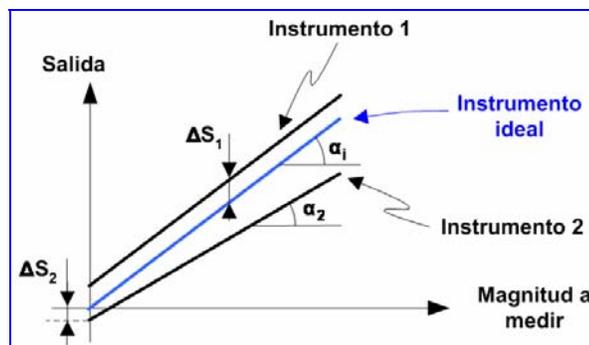


Figura 2.10. Representación de la curva de calibración ideal y la que corresponde a dos instrumentos reales. [5]

En muchos sistemas, la calibración a un punto suele efectuarse sobre el valor cero de la variable de entrada porque suele ser uno de los puntos para los que más fácilmente suele ser conocido el valor verdadero, como en el caso del ejemplo de la báscula, los velocímetros, acelerómetros, sistemas para medir desplazamiento, entre otros.

- **Calibración del cero y de la sensibilidad:** para ajustar perfectamente una curva de calibración lineal se necesitarían ajustar dos puntos o un punto y la pendiente o sensibilidad. Muchos instrumentos de medida incorporan esta posibilidad de calibración. El ajuste se realiza mediante dos mandos, uno permite modificar el nivel (offset) y el otro la sensibilidad o ganancia del sistema (gain). El procedimiento debe realizarse ajustando primero el cero (figura 2.11b) y, a continuación, la ganancia (figura 2.11c). Para este último ajuste es necesario medir en otro punto y ajustar la ganancia de forma que en este segundo punto la salida sea la deseada.

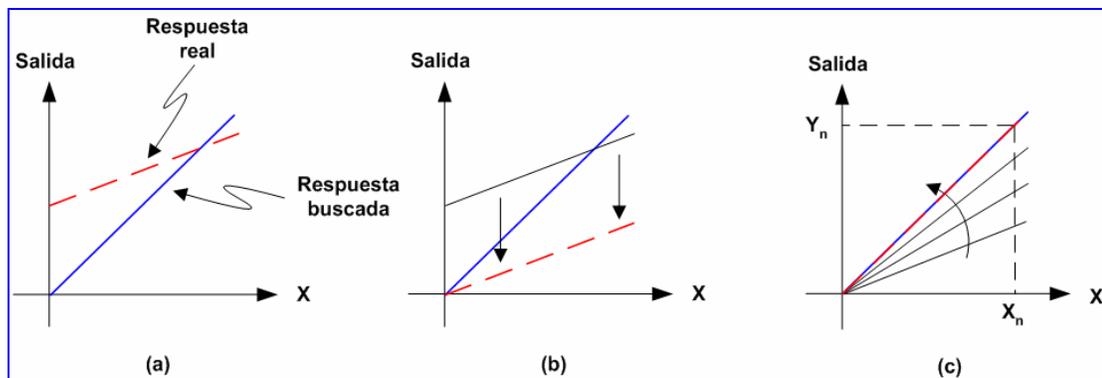


Figura 2.11. Calibración del cero y de la ganancia. (a) Situación original. (b) En el primer paso se ajusta el nivel de cero. (c) Seguidamente se mide a otro punto y se ajusta la ganancia hasta que la salida coincide con la esperada. [5]

La utilización de microcontroladores y microprocesadores permite técnicas de calibración más complejas como la calibración a varios puntos realizando el ajuste mediante mínimos cuadrados o mediante el auto-ajuste del equipo realizando una calibración a dos puntos cualesquiera.

2.2.2 Tipos de sensores.

Los sensores son tan diversos como los principios físicos en los que se basan. En la actualidad para medir cualquier variable física tenemos diversos tipos de sensores, con sus ventajas y desventajas. Debido al gran número de sensores se deben clasificar de acuerdo con algún criterio. Entre estos tenemos:

- **Según el aporte de energía**, los sensores se pueden dividir en **moduladores** y **generadores**. En los sensores moduladores o activos, la energía de la señal de salida procede, en su mayor parte, de una fuente de energía auxiliar. La entrada solo controla la salida. En los sensores generadores o pasivos, en cambio, la energía de salida es suministrada por la entrada.
- **Según la señal de salida**, los sensores se clasifican en **analógicos** o **digitales**. En los analógicos la salida varía, a nivel macroscópico, de forma continua. La información está en la amplitud, si bien se suelen incluir en este grupo los sensores con salida en el dominio temporal. En los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos. No requieren conversión A/D, y la transmisión de su salida es más fácil. Tienen también mayor fidelidad y mayor fiabilidad, y muchas veces mayor exactitud, pero lamentablemente no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés.
- **Atendiendo al modo de funcionamiento**, los sensores pueden ser **de defección** o **de comparación**. En los sensores que funcionan por defección, la magnitud medida produce algún efecto físico, que engendra algún efecto similar, pero opuesto, en alguna parte del instrumento, y que está relacionado

con alguna variable útil. En los sensores que funcionan por comparación, se intenta mantener nula la defección mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir. Hay un detector del desequilibrio y un medio para restablecerlo.

- **Según el tipo de relación entrada-salida**, los sensores pueden ser de **orden cero, de primer orden, de segundo orden o de orden superior**. El orden está relacionado con el número de elementos almacenadores de energía independientes que incluye el sensor, y repercute en su exactitud y la velocidad de respuesta. Esta clasificación es de gran importancia cuando el sensor forma parte de un sistema de control en lazo cerrado.

Los sensores se pueden clasificar de acuerdo con la magnitud medida. Sensores de temperatura, de presión, caudal, humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, entre otros. Sin embargo, esta clasificación difícilmente puede ser exhaustiva ya que la cantidad de magnitudes que se puede medir es prácticamente inagotable.

Desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, es más atractiva la clasificación de los sensores de acuerdo con el parámetro variable: resistencia, capacidad, inductancia, añadiendo luego los sensores generadores de tensión, carga o corriente, y otros tipos no incluidos en los anteriores grupos. En la tabla 2.2 se recogen los sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes.

En este trabajo de investigación solo se describen los posibles sensores a utilizar; esto se debe a que hay una gran cantidad de ellos, de varios tipos y variables, por lo que describirlos a todos significaría una gran cantidad de información que haría éste proyecto muy extenso. Por tal razón solo son mencionados.

Tabla 2.2. Diferentes tipos de sensores según su magnitud física. Fuente: Tomada de referencia [22].

Sensores	Posición Distancia Desplazamiento	Velocidad	Aceleración Vibración	Temperatura	Presión	Caudal Flujo	Nivel	Fuerza	Humedad
Resistivos	Potenciómetros Galgas Magnetorresistencias		Galgas	RTD Termistores NTC, PTC	Potenciómetros	Galgas Termistores	Potenciómetros Termistores LDR	Galgas	Humistor
Capacitivos	Capacitor diferencial				Capacitor variable Diafragma		Capacitor variable	Galgas capacitivas	Capacitor variable
Inductivos y electromagnéticos	LVDT Resolvers Efecto Hall	LVDT Efecto Hall	LVDT		LVDT Reluctancia variable Piezoeléctricos	LVDT	LVDT	Magneto- elástico LVDT Piezoeléctricos	
Generadores			Piezoeléctricos	Termopares Piroeléctricos Osciladores de cuarzo		Vórtices			SAW
Digitales	Codificadores incrementales absolutos	Codificadores incrementales							
Uniones p-n	Fotoeléctricos			Diodo Transistor			Fotoeléctricos		
Ultrasonidos	Reflexión	Efecto Doppler				Efecto Doppler	Reflexión Absorción		

Entre los tipos de sensores se tienen (según la clasificación desde el punto de vista de la ingeniería electrónica):

- Sensores resistivos.
 - Sensores potenciométricos.
 - Sensores de temperatura de resistencia metálica (RTD).
 - Galgas extensiométricos.
 - Termistores (NTC y PTC).
 - LDR.
 - Sensores de gases de óxidos metálicos semiconductores.
 - Magnetorresistencias.
 - Higrómetros resistivos.
- Sensores capacitivos.
 - Capacitor (variación de alguno de sus parámetros: área de las placas, separación entre ellas, dieléctrico).
 - Capacitor diferencial.
 - Sensores capacitivos en silicio.
- Sensores inductivos.
 - Sensores inductivos básicos.
 - El transformador diferencial lineal (LVDT).
 - Otros sensores inductivos.
- Sensores electromagnéticos.
 - Sensores electromagnéticos lineales.
 - Sensores electromagnéticos rotativos.
 - Sensores electromagnéticos rotativos de velocidad angular.
 - Sensores electromagnéticos rotativos de posición angular.
- Sensores piezoeléctricos.
 - Materiales piezoeléctricos como sensores de presión, fuerza y aceleración.

- Sensores de ultrasonidos.
- Sensores piroeléctricos.
- Sensores optoelectrónicos generadores de señal.
 - Fotodiodos.
 - Fototransistores.
 - LEDs.
 - Dispositivos de acoplamiento de carga (CCDs).
 - Fotomultiplicadores.
- Sensores de efecto Hall.
- Termopares.
- Otros tipos de sensores.
 - Sensores de fibra óptica.
 - Biosensores.
 - Sensores de Ion selectivo.
 - Entre otros (los de más reciente generación).

2.2.2.1 Sensores capacitivos.

Los sensores capacitivos están basados en la variación de la capacidad entre dos o más conductores entre los que se encuentran un dieléctrico, en respuesta a la variación de alguna magnitud física. Aunque las aplicaciones más conocidas están asociadas con medida de movimiento lineal y angular, los sensores capacitivos se emplean también para la medida de humedad, presión, nivel, aceleración, entre otros.

Las principales características que presentan son:

- Permiten detectar muy pequeños desplazamientos (hasta 10^{-10} mm).
- Son fácilmente integrables en un “chip” de silicio.
- No se ven afectados por la temperatura o el alineamiento mecánico.

- Son muy estables en entornos hostiles.
- Tienen muy bajo consumo.

Sin embargo, a pesar de estas y otras ventajas que poseen, sus aplicaciones se ven ralentizadas por diversos factores: necesidad de circuitos de acondicionamiento especializados, creencia de que son no lineales y de que no pueden operar con humedades extremas, así como un cierto desconocimiento de la tecnología. El elemento sensor básico de los sensores capacitivos está constituido por un capacitor de capacidad C.

2.2.2.1.1 Sensores capacitivos en silicio.

La tecnología de fabricación de circuitos integrados en silicio está siendo empleada de forma masiva en el desarrollo de sensores (microsensores de silicio). La integración en silicio permite sustanciales ventajas: mayor sensibilidad, reducción de peso, ahorro de peso, ahorro en los costes de fabricación, mayor número de aplicaciones, otras. Adicionalmente se tienen ventajas como: reducción de los problemas derivados de la temperatura, humedad, capacidades parásitas y de los terminales, además de proporcionar alta impedancia de entrada.

2.2.3 Criterios para la selección de sensores.

Para seleccionar un sensor para una aplicación específica se deben tomar en cuenta diversos factores (ambiente, económicos, otros), así como las características propias de los sensores. Entre las características deseables de los transductores y sensores se tienen:

Exactitud	Precisión	Velocidad de respuesta
Rango de funcionamiento	Calibración	Fiabilidad

2.2.3.1 Medida de temperatura.

Existen infinidad de procesos industriales en los que resulta imprescindible controlar la temperatura, e incluso en el ámbito doméstico es una de las magnitudes de mayor interés. La elección del sensor adecuado para cada aplicación no es evidente, por lo que se deben comparar los más comunes:

Resistencias metálicas (RTD).	Termopares.	Termistores
Sensores de silicio.	Sensores de radiación.	

Los sensores de radiación tienen aplicaciones más definidas, por lo que no suelen entrar en competencia con otros sensores de temperatura. En la tabla 2.3 se muestra una comparación entre RTDs, termopares, NTCs y sensores de silicio.

2.2.3.2 Sensor de humedad.

Los sensores capacitivos de humedad relativa (RH) se usan en numerosas aplicaciones industriales. Es necesario controlar la humedad en la industria textil, maderera, alimentación, fabricación de papel, almacenaje, entre otros.

Existen muchos tipos y variantes de sensores de humedad, según sea la composición de las placas del capacitor, el material dieléctrico y el sustrato. El dieléctrico puede ser de óxido de aluminio, silicio poroso o un material polímero. El sustrato es normalmente cerámico, de cristal o de silicio. La figura 2.12 muestra la estructura de un sensor de humedad en el que el dieléctrico es un material polímero y el sustrato es de silicio. El material polímero tiene la habilidad de absorber moléculas de agua lo cual se traduce en un cambio en la permitividad dieléctrica del capacitor. En los sensores con dieléctrico de silicio la porosidad del silicio puede ser controlada en un proceso de anodinado.

Tabla 2.3. Comparación entre diferentes sensores de temperatura. Fuente: Tomado de referencia [5].

Características	RTD de platino de película	RTD de platino bobinada	Sensor Termopar	Termistor	Silicio
Costo del sensor	Moderado a bajo	Moderado	Bajo	Bajo a moderado	Bajo
Costo del sistema	Moderado	Moderado	Alto	Bajo a moderado	Bajo
Campo de medida	- 200 a 750 °C (560 °C máx, típicamente)	- 200 a 850 °C (600 °C máx, típicamente)	- 270 a 1800 °C	- 100 a 500 °C (125 °C máx, típicamente)	- 40 a 125 °C
Intercambiabilidad	±0,1%, ±0,3 °C	±0,05%, ±0,2 °C	±0,5%, ±2 °C	±10%, ±0,2 °C	±1%, ±3 °C
Estabilidad	Excelente	Excelente	Pobre	Moderada	Moderada
Sensibilidad	0,39%/°C	0,39%/°C	40μV/°C	-4%/°C	10mV/°C
Sensibilidad relativa	Moderada	Moderada	Baja	Muy elevada	Moderada
Linealidad	Excelente	Excelente	Moderada	No es lineal	Moderada
Pendiente	Positiva	Positiva	Positiva	Negativa	Positiva
Susceptibilidad al ruido	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja

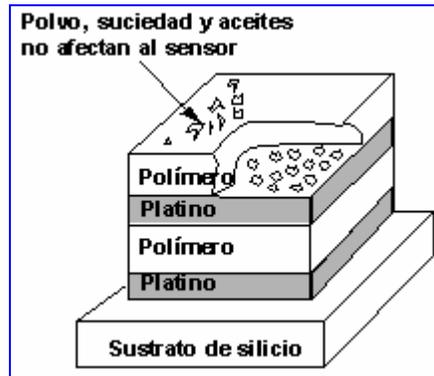


Figura 2.12. Construcción de un sensor de humedad capacitivo. [5]

El cambio incremental en la permitividad dieléctrica de un sensor de humedad capacitivo es proporcional a la humedad relativa del entorno que le rodea. La variación de la capacidad se encuentra entre 0,2 y 0,5 pF por 1%RH.

Los sensores capacitivos de humedad se caracterizan por un coeficiente de temperatura bajo, capacidad para trabajar a altas temperaturas (hasta 200 °C), recuperación rápida de condensación y una buena compatibilidad química. Una característica importante es su estabilidad química, ya que en algunas aplicaciones el vapor de agua contiene contaminantes (por ejemplo, monóxido de carbono) o bien la medida de humedad se realiza en una muestra de gas en lugar de aire. En estos casos, si el dieléctrico es silicio, las características del sensor no se ven afectadas por dichos gases.

La circuitería de acondicionamiento consiste normalmente en un oscilador CMOS que excita el sensor, obteniendo una relación lineal entre la tensión de salida y la humedad relativa. En la figura 2.13 se muestra un ejemplo de sensor de humedad capacitivo, el HIH-3610 de Honeywell.

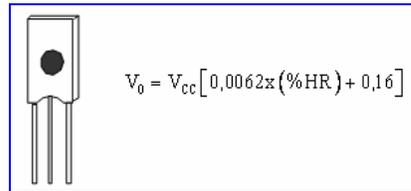


Figura 2.13. Sensor de humedad HIH-3610 de Honeywell.

2.3 Procesadores digitales de señal.

Los procesadores digitales de señales son circuitos programables integrados en una única pastilla de silicio que realiza las funciones encomendadas a un procesador digital. Existen principalmente tres tipos: el Microprocesador, el Microcontrolador y el DSP (Digital Signal Processors ó Procesador Digital de Señal).

2.3.1 Microprocesadores (μ P).

Un microprocesador (μ P) es un circuito programable integrado en una única pastilla de silicio que realiza las funciones encomendadas a un **procesador digital**. La figura 2.14 muestra el diagrama de bloques de un procesador digital genérico, donde se distinguen dos partes fundamentales: **la unidad de control**, que interpreta las instrucciones y genera la secuencia de señales para su ejecución, y **la unidad aritmético-lógica**, que efectúa operaciones con los datos. La CPU también incluye un conjunto de registros y un conjunto de líneas, los buses, que permiten la comunicación con el exterior.

2.3.2 Microcontrolador (μ C).

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador y que contiene todos los componentes fundamentales de un computador, aunque de limitadas prestaciones y que se suele destinar a gobernar una sola tarea.

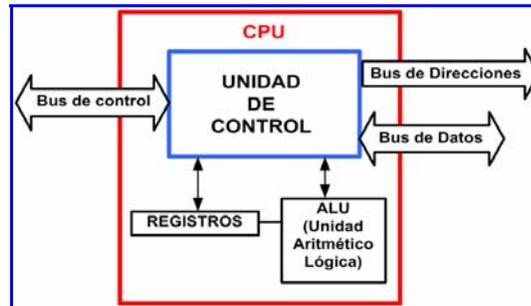


Figura 2.14. Diagrama de bloques simplificado de un procesador digital o CPU (Unidad Central de Proceso) compuesto por la unidad de control y la ALU. [5]

En su memoria sólo reside un programa que controla el funcionamiento de una tarea determinada, sus líneas de entrada/salida se conectan a los sensores y actuadores del dispositivo a controlar y, debido a su pequeño tamaño, suele ir integrado en el propio dispositivo al que gobierna. Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes:

- Procesador o CPU (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/EPROM/EEPROM/Flash.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, puertos serie y paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

2.3.2.1 Ventajas de los microcontroladores.

Los productos que para su regulación incorporan un microcontrolador disponen de las siguientes ventajas:

- **Aumento de prestaciones:** un mayor control sobre un determinado elemento representa una mejora considerable en el mismo.
- **Aumento de la fiabilidad:** el microcontrolador reemplaza un elevado número de elementos, disminuyendo el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.
- **Reducción del tamaño en el producto acabado:** La integración del microcontrolador en un circuito integrado disminuye el volumen, la mano de obra y los stocks.
- **Mayor flexibilidad:** las características de control están programadas por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

Otras de las principales ventajas en el diseño de un circuito utilizando microcontrolador son:

- El circuito impreso es más pequeño ya que muchos de los componentes se encuentran dentro del circuito integrado.
- El costo del sistema es mucho menor, al reducir el número de componentes.
- Los problemas de ruido que pueden afectar los sistemas con microprocesadores se eliminan, debido a que todo el sistema principal se encuentra en un solo encapsulado.
- El tiempo de desarrollo de un sistema se reduce notablemente.

Debido a su reducido tamaño es posible montar el controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de controlador empotrado (embedded controller). Cuando una aplicación o problema que se va a solucionar sobrepase las características de un microcontrolador, como capacidad de memoria, velocidad de proceso, número de pines o líneas de entrada y salida, entre otras; se debe recurrir a un sistema con microprocesador o a una microcomputadora completa.

2.3.2.2 Herramientas de desarrollo.

Las herramientas de desarrollo están formadas por un conjunto de programas e interfaces que permiten realizar los proyectos de la forma más eficiente posible. Las principales herramientas de ayuda al desarrollo de sistemas basados en microcontroladores son:

Ensamblador y compilador.	Placas de evaluación y emuladores en circuito.
Simulador.	Programador y Paquetes IDE.

2.3.2.3 Elegir un modelo concreto de microcontrolador.

Una vez se decida que tipo o familia de microcontroladores se van a emplear se debe elegir el modelo de microcontrolador concreto para la aplicación y resulta imprescindible analizar los requisitos de la aplicación:

Entradas, salidas y recursos internos.	Velocidad y consumo.
Memoria., ancho de palabra.	Disponibilidad.
Diseño del circuito y de la PCB.	Precio

2.3.2.4 Fabricantes y modelos de microcontroladores.

Los principales fabricantes de microcontroladores a nivel mundial son: Microchip Inc., Freescale (antiguos Motorola), Atmel y Texas Instruments. También existen otros fabricantes como: Intel, Parallax INC., Philips Semiconductor, Zilog, Ubicom, Renesas, Toshiba, Dallas Semiconductor, National Semiconductors, entre otros.

Cada fabricante posee una o varias familias de microcontroladores y varios modelos, cada uno con características y prestaciones diferentes o similares.

2.3.3 Procesadores Digitales de Señales (DSP).

Un DSP (*Digital Signal Processors*) es un procesador digital cuyo hardware y conjunto de instrucciones está optimizado para la implementación eficiente de aplicaciones de procesamiento numérico intensivo a alta velocidad. Este tipo de procesadores ejecutan, generalmente, los algoritmos típicos de procesamiento digital de señal (*Digital Signal Processing*) como el filtrado digital y el análisis espectral, entre otros. Este tipo de algoritmos se requieren a menudo en sistemas que procesan señales analógicas en tiempo real. Con tiempo real se quiere indicar que el sistema debe dar una respuesta en un tiempo establecido y predecible. Por ejemplo, un escenario habitual es un sistema que adquiera datos muestreando una señal analógica para someterla a un determinado procesamiento, por ejemplo, el filtrado. Si el procesamiento de cálculo es muy complejo, deberán utilizarse procesadores especializados para esa tarea porque, de otra forma, se perderían muestras.

Las aplicaciones de los DSP son muy variadas: procesamiento de señales de audio (compresión de audio, filtrado, TV digital), procesado de habla (reconocimiento de voz, compresión de voz, grabadores digitales de habla), comunicaciones (teléfonos móviles, módems, fax, GPS), multimedia (compresión de video, audio, imagen digital), control industrial (cancelación de ruido, control de motores, fuentes de alimentación) y muchas otras aplicaciones.

También tienen diversas aplicaciones en el campo de la instrumentación. Las funciones básicas que se requieren de un DSP en este campo son: FFT (transformada rápida de Fourier), filtrado, síntesis de ondas, filtros adaptativos, cálculos numéricos a alta velocidad, otros. Las aplicaciones incluyen: equipos de test y medida, análisis de vibraciones, tarjetas de E/S para PCs (tarjetas de adquisición de datos), analizadores de señal, generadores de funciones, otros. En la figura 2.15 se muestra el diagrama bloques de un sistema basado en un DSP.

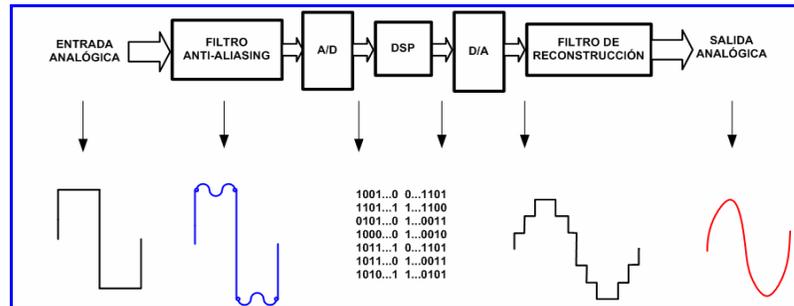


Figura 2.15. Sistema de adquisición basado en un DSP. [5]

2.4 Las comunicaciones.

Una de las tecnologías más interesantes de la industria actual probablemente sea el mundo de las comunicaciones inalámbricas. Hoy en día, toda la gente habla sobre el futuro del mundo inalámbrico y de las posibilidades para comunicarse en general.

2.4.1 Un modelo para las comunicaciones.

En la figura 2.16a se muestra un modelo sencillo de un sistema de comunicación, en la que se propone un diagrama de bloques.

El objetivo principal de todo sistema de comunicaciones es intercambiar información entre dos entidades. La figura 2.16b muestra un ejemplo particular de comunicación entre una estación de trabajo y un servidor a través de una red telefónica pública. Otro posible ejemplo consiste en el intercambio de señales de voz entre dos teléfonos a través de la misma red anterior. Los elementos claves en este modelo son:

- **La fuente.** Este dispositivo genera los datos a transmitir. Ejemplos de fuentes pueden ser un teléfono o un computador personal.

- **El transmisor.** Normalmente los datos generados por la fuente no se transmiten directamente tal y como son generados. Al contrario, el transmisor transforma y codifica la información, generando señales electromagnéticas susceptibles de ser transmitidas a través de algún sistema de transmisión. Por ejemplo, un módem convierte las cadenas de bits generadas por un computador personal y las transforma en señales analógicas que pueden ser transmitidas a través de la red de telefonía.
- **El sistema de transmisión.** Puede ser desde una sencilla línea de transmisión hasta una compleja red que conecte a la fuente con el destino.
- **El receptor.** El receptor acepta la señal proveniente del sistema de transmisión y la transforma de tal manera que pueda ser manejada por el dispositivo de destino. Por ejemplo, un módem captará la señal analógica de la red o línea de transmisión y la convertirá en una cadena de bits.
- **El destino.** Toma los datos del receptor.

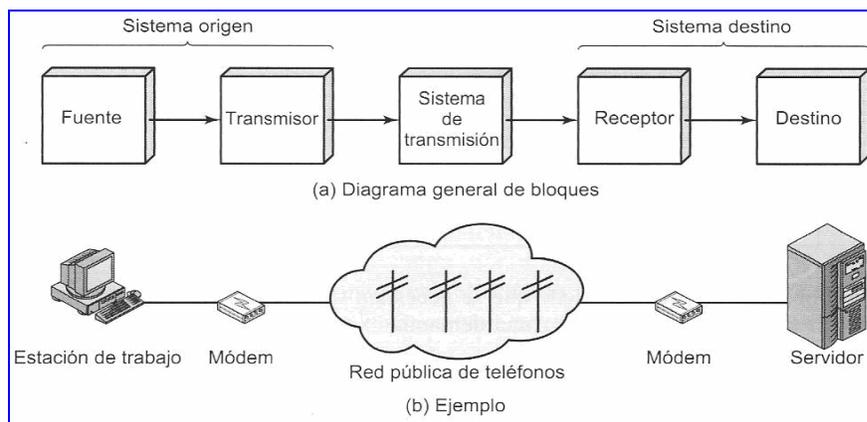


Figura 2.16. Modelo simplificado para las comunicaciones. [9]

2.4.2 Transmisión de datos.

La transmisión de datos entre un emisor y un receptor siempre se realiza a través de un medio de transmisión. Los medios de transmisión se pueden clasificar

como guiados o no guiados. En ambos casos, la comunicación se realiza usando ondas electromagnéticas.

2.4.2.1 Transmisión de datos analógicos y digitales.

Los términos analógico y digital corresponden respectivamente, por lo general, a continuo y discreto. Estos dos términos se aplican con frecuencia en el marco de las comunicaciones en al menos tres contextos diferentes: datos, señalización y transmisión.

Escuetamente, se define **dato** como cualquier entidad capaz de transportar información. Las **señales** son representaciones eléctricas o electromagnéticas de los datos. La **señalización** es el hecho de la propagación física de las señales a través de un medio adecuado y la **transmisión** se define como la comunicación de datos mediante la propagación y el procesamiento de señales.

2.4.3 Modos de transmisión de datos.

La comunicación en los medios informáticos se realiza de dos maneras:

2.4.3.1 Paralelo.

Todos los bits se transmiten simultáneamente (figura 2.17), existiendo luego un tiempo antes de la transmisión del siguiente bloque. Este tipo de transmisión tiene lugar en el interior de una maquina o entre maquinas cuando la distancia es muy corta. La principal ventaja de este modo de transmitir datos es la velocidad de transmisión y la mayor desventaja es el costo.

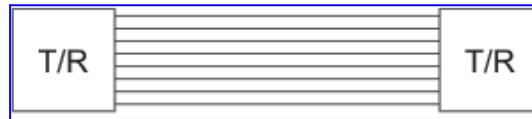


Figura 2.17. Transmisión en paralelo. [29]

2.4.3.2 Serie.

En este caso los n bits que componen un mensaje se transmiten uno detrás de otro por la misma línea, ver figura 2.18. La secuencia de bits transmitidos es por orden de peso creciente y generalmente el último bit es de paridad. Un aspecto fundamental de la transmisión serie es el sincronismo, entendiéndose como tal al procedimiento mediante el cual, transmisor y receptor reconocen los ceros y unos de los bits de igual forma.

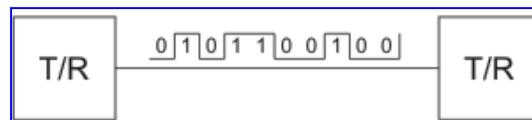


Figura 2.18. Transmisión serie. [29]

El sincronismo puede tenerse a nivel de bit, de byte o de bloque, donde en cada caso se identifica el inicio y finalización de los mismos. Dentro de la transmisión serie existen dos formas:

2.4.4 Tipos de comunicación.

2.4.4.1 Simplex.

En este caso el transmisor y el receptor están perfectamente definidos y la comunicación es unidireccional. Este tipo de comunicaciones se emplean usualmente en redes de radiodifusión, (figura 2.19).



Figura 2.19. Comunicación simplex. [29]

2.4.4.2 Duplex o Semi-duplex.

En este caso ambos extremos del sistema de comunicación cumplen funciones de transmisor y receptor y los datos se desplazan en ambos sentidos pero no simultáneamente. Este tipo de comunicación se utiliza habitualmente en la interacción entre terminales y un computador central (figura 2.20).



Figura 2.20. Comunicación duplex o full duplex. [29]

2.4.4.3 Full Duplex.

El sistema es similar al duplex (figura 2.20), pero los datos se desplazan en ambos sentidos simultáneamente. Para ello ambos transmisores poseen diferentes frecuencias de transmisión o dos caminos de comunicación separados, mientras que la comunicación semi-duplex necesita normalmente uno solo.

2.4.5 Perturbaciones en una transmisión.

En cualquier sistema de comunicaciones la señal que se recibe difiere de la señal transmitida debido a varias dificultades y perturbaciones sufridas en la transmisión. En las señales analógicas, estas dificultades pueden degradar la calidad de la señal. En las señales digitales, se generarán bits erróneos: un 1 binario se transformará en un 0 y viceversa. Las dificultades o perturbaciones más significativas son:

Atenuación.

Ruido.

Distorsión de retardo.

Interferencia.

2.4.5.1 Atenuación.

En cualquier medio de transmisión la energía de la señal decae con la distancia. En medios guiados, esta reducción de la energía es por lo general exponencial y, por tanto, se expresa generalmente como un número constante en decibelios por unidad de longitud. En medios no guiados, la atenuación es una función más compleja de la distancia y es dependiente, a su vez, de las condiciones atmosféricas. Se pueden establecer tres condiciones respecto a la atenuación. Primera, la señal recibida debe tener suficiente energía para que la circuitería electrónica en el receptor pueda detectar la señal adecuadamente. Segunda, para ser recibida sin error, la señal debe conservar un nivel suficientemente mayor que el ruido. Tercera, la atenuación es habitualmente una función creciente de la frecuencia.

2.4.5.2 Ruido.

Son señales no deseadas que ingresan al sistema de comunicaciones y que no pueden evitarse. Generalmente se deben a las características eléctricas del sistema de comunicaciones o del medio a través del cual se transmite. Dichas señales producen variaciones en la amplitud de la señal de datos. En la figura 2.21 se muestra un ejemplo del efecto del ruido sobre una señal digital. Aquí el ruido consiste en un nivel relativamente pequeño de ruido térmico más picos ocasionales de ruido impulsivo. Las señales de ruido tienen determinadas frecuencias que dependen de los dispositivos eléctricos del sistema. Cuando las señales de ruido abarcan todo el espectro de frecuencias se denomina **ruido blanco**.

Según su origen se puede clasificar al ruido en las siguientes categorías:

Ruido térmico.

Ruido de intermodulación.

Ruido impulsivo.

Diafonía.

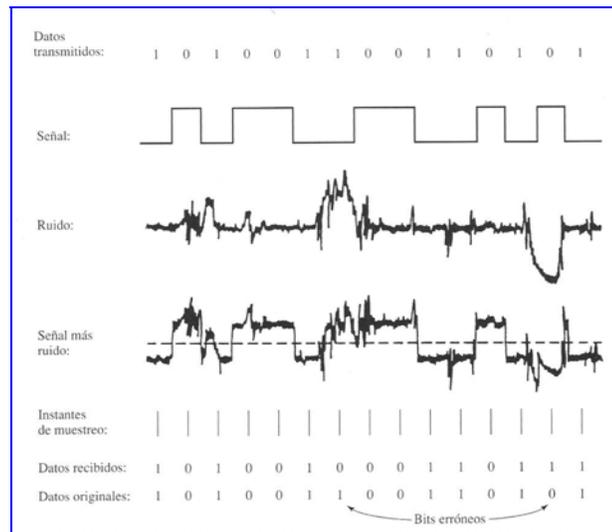


Figura 2.21. Efecto del ruido en una señal digital. [9]

2.4.5.3 Distorsión de retardo.

La distorsión de retardo es un fenómeno debido a que la velocidad de propagación de una señal a través de un medio guiado varía con la frecuencia. Para una señal limitada en banda, la velocidad tiende a ser mayor cerca de la frecuencia central y disminuye al acercarse a los extremos de la banda. Por tanto, las distintas componentes en frecuencia de la señal llegarían al receptor en instantes diferentes de tiempo, dando lugar a desplazamientos de fase entre las diferentes frecuencias.

2.4.5.4 Interferencia.

Dicha perturbación es debida a señales provenientes de otras transmisiones, las cuales debido a la proximidad de las frecuencias se mezclan con las de la señal que se transmite.

2.4.6 Medios de transmisión.

En los sistemas de transmisión de datos, el medio de transmisión es el camino físico entre el transmisor y el receptor. En los medios guiados las ondas electromagnéticas se transmiten a través de un medio sólido, como por ejemplo un par trenzado de cobre, un cable coaxial o una fibra óptica. En los medios no guiados, la transmisión inalámbrica se realiza a través de la atmósfera, el espacio exterior o el agua.

Las características y calidad de la transmisión están determinadas tanto por el tipo de señal como por las características del medio. En el caso de los medios guiados, el medio, en sí mismo, es lo que más limitaciones imponen a la transmisión. En medio no guiados, las características de la transmisión están más determinadas por el ancho de banda de la señal emitida por la antena que por el propio medio.

En el diseño de sistemas de transmisión es deseable que tanto la distancia como la velocidad de transmisión sean lo más grandes posibles. Hay una serie de factores relacionados con el medio de transmisión y con la señal que determinan tanto la distancia como la velocidad de transmisión:

- **El ancho de banda:** al aumentar el ancho de banda de la señal, la velocidad de transmisión se puede incrementar.
- **Dificultades en la transmisión:** las dificultades, como por ejemplo la atenuación, limitan la distancia. En los medios guiados, el par trenzado sufre de mayores adversidades que el cable coaxial que, a su vez, es más vulnerable que la fibra óptica.
- **Interferencias:** las interferencias resultantes de la presencia de señales en bandas de frecuencias próximas pueden distorsionar o destruir la señal. Éstas

son especialmente relevantes en los medios no guiados, pero a la vez son un problema a considerar en los medios guiados.

- **Número de receptores:** un medio guiado se puede usar tanto para un enlace punto a punto como para un enlace compartido, mediante el uso de múltiples conectores.

En la figura 2.22 se muestra el espectro electromagnético, así como la frecuencia a la que operan diferentes técnicas de transmisión sobre medios guiados y no guiados.

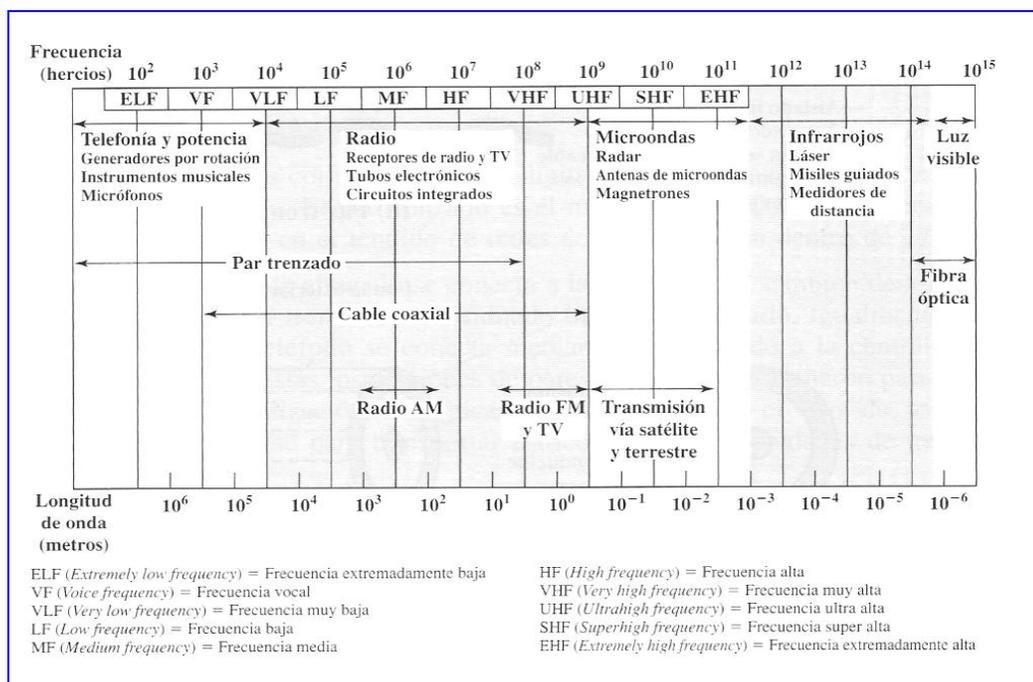


Figura 2.22. Espectro electromagnético para las telecomunicaciones. [9]

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.

3.1 Parámetros utilizados para el diseño de la red de sensores inalámbricos.

Para el diseño de la WSN se tomaron los siguientes parámetros de diseño:

- **Arquitectura.** Define la configuración estructural de la red de sensores inalámbricos, la forma como será implementada la misma.
- **Topología.** Existen dos tipos: la lógica y la física.
- **Módulos de radio.** Son los encargados de transmitir toda la información entre los diferentes componentes de la red de manera inalámbrica.
- **Sensores.** Serán los encargados de recolectar información de algún parámetro físico en particular del entorno.
- **Procesador digital de señal.** Procesará la información recolectada de los sensores y transmitirá la data a los respectivos módulos de comunicaciones.
- **Protocolos de comunicaciones.** Establecen las normas o reglas como interactuaran entre ellos, los diferentes nodos sensores, nodo coordinador y demás equipos de comunicación y de visualización.
- **Cobertura de la WSN.** El alcance de la WSN.
- **Energía.** Como serán alimentados los diferentes dispositivos que conforman la WSN.

3.2 Arquitectura de la red de sensores inalámbricos diseñada.

En la figura 3.1 se muestra la arquitectura de la red de sensores inalámbricos diseñada para este proyecto. Como es una aplicación específicamente para la

agricultura, se tomó como unidad de diseño para la medida de área la hectárea (ha), que es equivalente a 10.000 m^2 . La red de sensores está diseñada para una sola hectárea, esto se debe a que es la unidad fundamental de medida de terrenos en la agricultura, por ejemplo, existen terrenos destinados a la siembra y labranza de la tierra con superficies de 10, 20, 50 o más hectáreas, es decir, por lo general éstos son múltiplos de esa unidad.

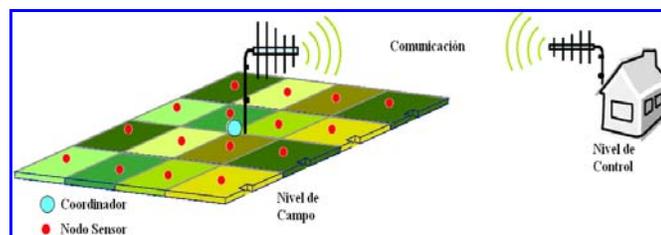


Figura 3.1. Arquitectura diseñada de la WSN. Fuente: Propia.

La arquitectura diseñada cuenta con los siguientes niveles: Nivel de campo, nivel de comunicaciones y nivel de control (nivel de monitorización y toma de decisiones).

3.2.1 Nivel de campo.

El nivel de campo está representado por la superficie a ser cultivada, es decir, aquella destinada a la siembra de un producto agrícola específico y consta de los siguientes dispositivos:

Nodo sensor.

Nodo coordinador.

En la figura 3.2 se puede observar la estructura del nivel de campo. Formada por los dispositivos antes mencionados y por un terreno con una superficie de una hectárea.

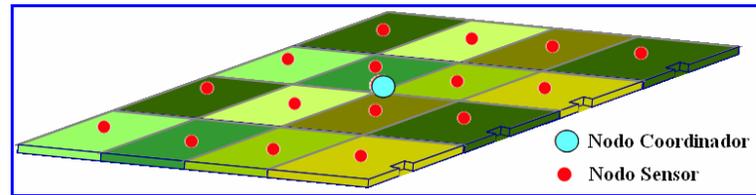


Figura 3.2. Estructura del nivel de campo de la WSN diseñada. Fuente: Propia.

3.2.1.1 Nodo sensor (NS).

El nodo sensor es el equipo encargado de recolectar toda la información procedente de los sensores asociados a él, procesar la misma para posteriormente almacenarla en memoria y transmitirla al nodo coordinador. Está constituido principalmente por sensores (analógicos y/o digitales), circuitos acondicionadores de señal, unidad de procesamiento (microcontrolador), memorias, módulos de radio (un transmisor y un receptor), switch rf, antena y fuente de alimentación. En la figura 3.3 se muestra un esquema general de un nodo sensor en el que se pueden apreciar los diferentes bloques por los que está constituido.

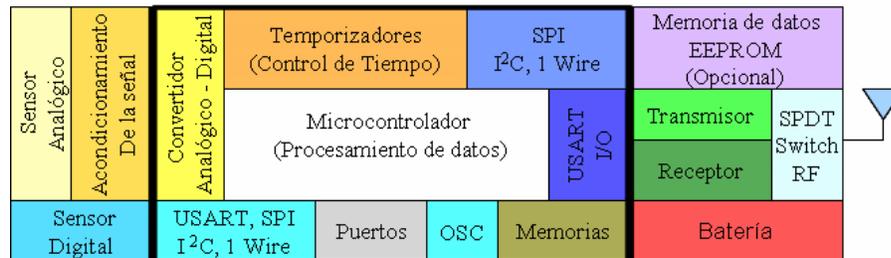


Figura 3.3. Esquema general de un nodo sensor. Fuente: Propia.

La función del nodo sensor es sencilla, al recibir la orden por parte del nodo coordinador, éste ejecuta los siguientes pasos:

1. Despierta de su estado de bajo consumo.
2. Realiza la conversión de analógico a digital de las señales provenientes de los sensores (si son analógicos).

3. Procesa la información y realiza los cálculos correspondientes.
4. Almacena los datos en memoria no volátil (opcional).
5. Repite los pasos 2 a 4 hasta haber terminado con todos los sensores.
6. Comienza la transmisión de toda la data almacenada en memoria vía inalámbrica al nodo coordinador.
7. Vuelve a su estado de bajo consumo.

En caso de haber una solicitud de retransmisión el nodo sensor realizará los pasos descritos anteriormente.

3.2.1.2 Nodo coordinador (NC).

El nodo coordinador es el equipo encargado de recolectar toda la información procedente de los nodos sensores asociados a él, almacenarla en memoria y transmitirla al Nivel de Control. Está constituido principalmente por unidad de procesamiento (microcontrolador), memorias, módulos de radio (un transmisor y un receptor), antena y fuente de alimentación. En la figura 3.4 se muestra un esquema general de un nodo coordinador en el que se pueden apreciar los diferentes bloques por los que está constituido.

Aunque el nodo coordinador no posee sensores, utilizará un canal del convertidor analógico-digital para monitorear el estado de su fuente de alimentación, es decir, de su batería.

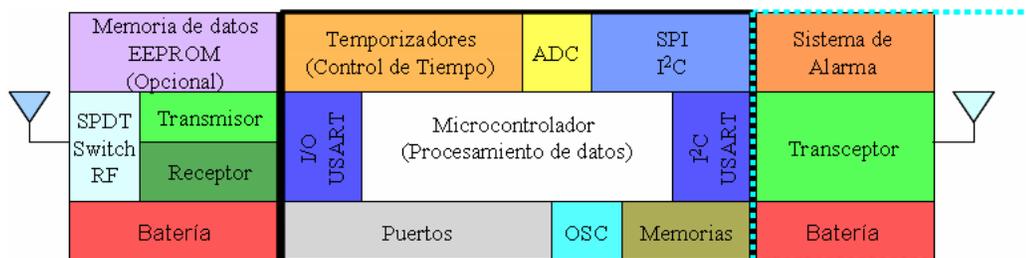


Figura 3.4. Esquema general de un nodo coordinador. Fuente: Propia.

El funcionamiento del nodo coordinador es un poco más complejo que el del nodo sensor, ya que éste debe pedir a todos los nodos sensores asociados a él toda la información que ellos posean, por lo tanto debe saber a que nodo sensor pertenece la información que está recibiendo, almacenarla en memoria sin cometer error alguno, es decir, no guardar los datos de un NS en posiciones de memorias de otro NS. El NC ejecuta los siguientes pasos:

1. Revisa el estado de su fuente de alimentación y lo transmite inmediatamente al nivel de control, si es bajo (menor al límite inferior) el equipo de recepción y visualización de los datos activará una señal de alarma (un LED indicador o un zumbador, o ambos), en caso contrario (nivel bueno) no se produce la condición de alarma.
2. Pide la data a un nodo sensor, si por alguna razón éste no responde al tercer intento, se pasa al siguiente y se descarta el mismo, cuando comience un nuevo ciclo se volverá a interrogar.
3. Almacena en memoria los datos correspondientes al nodo de manera organizada y ordenada. Si hay errores en la recepción, por ejemplo, falta de un dato, procederá a solicitar una nueva transmisión, es decir, volverá al paso 2, de recibir toda la información pasará al paso siguiente.
4. Transmite al nivel de control la data almacenada en memoria de manera ordenada a través del equipo de comunicación.
5. Espera por 3 segundos un código de recepción correcta o de retransmisión, si es el primer caso pasa al paso siguiente, en caso contrario, al paso anterior.
6. Repite los pasos 2, 3 y 4 hasta terminar con todos los nodos sensores.
7. Fija un tiempo (10 minutos, por ejemplo) de temporización en unos de sus temporizadores.
8. Se pone en estado de bajo consumo.
9. Una vez terminada la temporización, despierta de su estado de bajo consumo y vuelve al paso 1.

3.2.2 Nivel de comunicaciones.

El nivel de comunicaciones corresponde, como su nombre lo indica, al intercambio de información entre el nivel de campo y el nivel de control a través de un enlace de radio. Éste nivel está formado por dos equipos de comunicaciones con determinadas características para llevar a cabo la transferencia de datos.

El equipo de comunicación tiene como tarea transmitir la información del nodo coordinador al nivel de control. Éste está ubicado junto con el NC y se diferencia de los módulos de radio utilizados por el NC y por los nodos sensores, por la potencia de transmisión y el alcance de los mismos, además de utilizar antenas más directivas. En las figuras 3.4 y 3.5 se observa el bloque correspondiente al equipo de comunicación, el cual se encuentra resaltado con líneas de color punteadas. Este equipo es opcional, todo depende de la localización del nivel de control, si es cercano al nivel de campo (100 m máximo entre NC y el equipo de monitoreo de datos) no es necesario utilizarlo, si la separación entre ellos es mayor a los 100 m se requiere del equipo de comunicación.

3.2.3 Nivel control.

Éste corresponde al nivel de visualización de los datos y toma de decisiones, es el lugar donde llega toda la información de los nodos sensores transmitida por el nodo coordinador. Toda la data es almacenada en memoria y visualizada en una pantalla de cristal líquido (LCD), los datos de un nodo sensor a la vez. El agricultor con la información recibida tomará sus decisiones, por ejemplo, programar el riego del terreno. En la figura 3.5 se puede observar los diferentes bloques que componen al equipo receptor y de monitoreo de los datos, ubicado en el lugar destinado a la toma de decisiones, es decir, el espacio físico donde se encuentra el nivel de control.

El funcionamiento de éste equipo es un poco complejo, ya que se encargará de visualizar los datos provenientes del nivel de campo, indicar el estado de algunos eventos, reloj calendario (opcional) para guardar los datos con fecha, respaldar los datos en memoria no volátil (EEPROM), enviar ordenes de riego (si existe un sistema automatizable para el riego), manejar un teclado (matricial 3x4) para la entrada de datos y ordenes, pedir la data si se desea, activar el sistema de alarma en caso de haber una, otros.

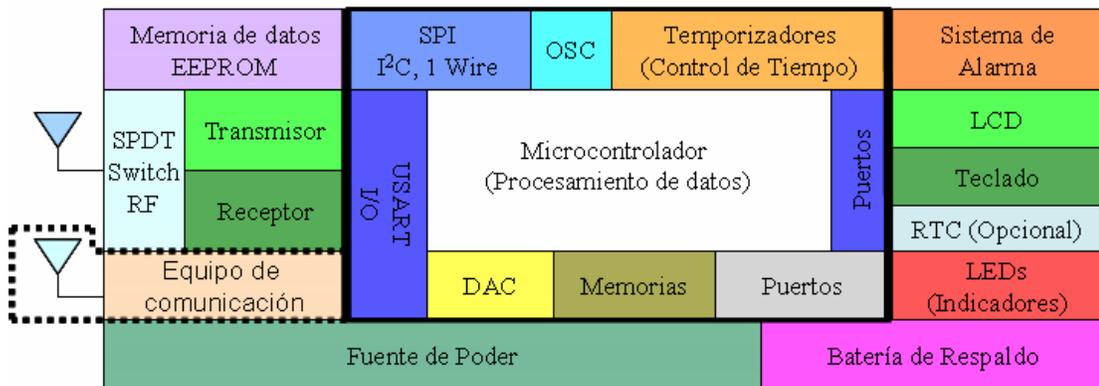


Figura 3.5. Esquema general del equipo de monitoreo. Fuente: Propia.

3.3 Topología.

Para que los nodos sensores transmitan sus datos al nodo coordinador, éstos deben hacerlo de determinada forma lógica y física. Para ello se utilizan ciertas topologías.

Para la obtención de los datos se utiliza topología lógica Token. El nodo coordinador es el encargado de controlar la red y pedir la información a cada nodo sensor, éste lo hace preguntando a cada NS (uno por uno) mediante un código (similar a un Token), por esta razón la topología lógica utilizada es la de tipo Token.

La topología física en este trabajo depende principalmente de los módulos de comunicación utilizados en el desarrollo del proyecto, debido a ciertas limitaciones de los mismos se selecciona la topología física en estrella, en estrella extendida y en árbol, todo depende de la superficie a cubrir por la red.

Estrella: la superficie de cobertura es de una hectárea, la red está formada por 16 nodos sensores y 1 nodo coordinador. La ventaja de ésta topología es que si falla uno de los nodos sensores la red aún funciona. Su grave desventaja es que si por alguna razón falla el nodo coordinador, se cae toda la red y no se obtendría ninguna información en el nivel de control. En la figura 3.6 se puede observar la distribución de los nodos sensores y del nodo coordinador.

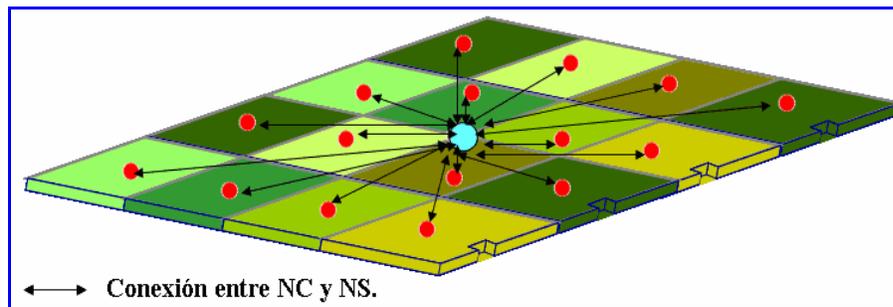


Figura 3.6. Distribución de los elementos de la WSN con topología en estrella.

Fuente: Propia.

Estrella extendida: la superficie de cobertura es de dos a cuatro hectáreas, la red está formada por varias estrellas (de 2 a 4) como las vistas en el caso anterior. Tiene como ventaja que si falla uno de los nodos sensores la red aún funciona, si falla uno de los nodos coordinadores la red aún se mantiene en funcionamiento excepto la estrella formada por el NC caído. Su desventaja es que si por alguna razón falla el nodo que coordina a los otros nodos coordinadores, se cae toda la red y no llegaría información al nivel de control. En la figura 3.7 se puede apreciar la distribución de las estrellas y del nodo coordinador general.

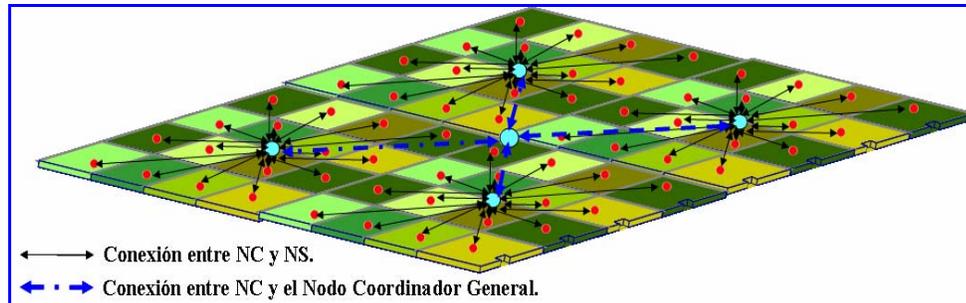


Figura 3.7. Distribución de los elementos de la WSN con topología en estrella extendida (cobertura de 4 hectáreas). Fuente: Propia.

Estrella extendida combinada con árbol: la superficie de cobertura es mayor a cuatro hectáreas, la red está formada por varias estrellas extendidas (depende de cuantas hectáreas tenga el terreno) y varios nodos sub-coordinadores y un nodo coordinador general, con cierta jerarquía entre éstos nodos, por lo que existe una combinación entre la topología anterior y en árbol. Tiene como ventaja la cobertura de mayores superficies que los dos casos anteriores. Su desventaja es que si por alguna razón falla el nodo general que coordina a los otros nodos coordinadores, se cae toda la red y no se recibiría ninguna información en el nivel de control, por el contrario si falla un nodo sub-coordinador solo se cae la parte de la red correspondiente a él y afecta al resto de la red dependiendo de la jerarquía que posea. En la figura 3.8 se puede observar la distribución de las estrellas extendidas, los subnodos coordinadores y nodo coordinador general (el de mayor jerarquía en la WSN).

Estas topologías seleccionadas se deben principalmente al módulo de radio utilizado, por las siguientes razones.

- El alcance (150 m, dato del fabricante).
- Potencia de transmisión (10 dBm, dato del fabricante).

- Carencia de protocolo (existen módulos de radio que manejan protocolos como ZigBee, por ejemplo, que permiten topología en malla o igual a igual, permitiendo extender el área de cobertura de la red).

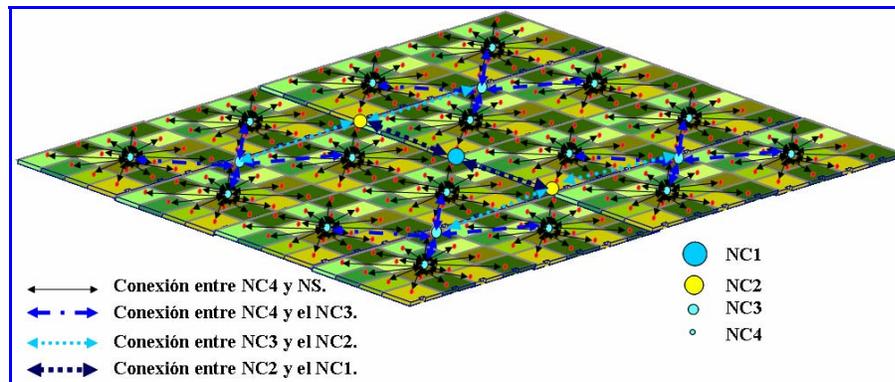


Figura 3.8. Combinación de la topología en estrella extendida con la topología en árbol para una WSN con una cobertura de 16 hectáreas. Fuente: Propia.

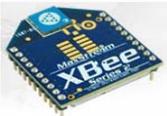
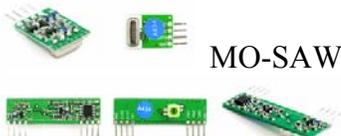
3.4 Módulos de radio.

Los módulos de radio deben tener las siguientes características:

- Transmisión Duplex (no limitativo).
- Operar en banda libre (ISM).
- Bajo consumo de potencia.
- Alcance mínimo de 100 m.
- Manejar protocolo de comunicaciones IEEE 802.15.4 o ZigBee (no limitativo).
- Debe tener un puerto de comunicación serial (preferiblemente) compatible con los protocolos RS232 (niveles TTL), SPI ó I²C (puertos característicos que poseen algunos microcontroladores).

En la tabla 3.1 se muestran algunos de los módulos de radio que pueden utilizarse para diseñar una red de sensores inalámbricos. Debido a factores limitantes en la adquisición de los módulos de radio, los seleccionados son: el MO-SAWR y el MO-RX3400.

Tabla 3.1. Módulos utilizados en redes de sensores inalámbricos. Fuente: Propia.

Modulo de radio	Frecuencia de operación	Velocidad de transmisión	Protocolo de comunicación
 Series XBee de Maxstream	2,4 GHz	250 kbps	ZigBee
 ZB2430 de Areocomm	2,4 GHz	250 kbps	ZigBee
 RF650 de RF Solutions	Dos versiones: De 433 y 868 MHz	100 kbps	Smart Radio
 MO-SAWR y MO-RX3400 de Holy Stone Enterprise CO., Ltd.	Dos versiones: De 315 y 433 MHz	200 bps – 8 kbps	Carece de protocolo

Uno de los inconvenientes de estos módulos es que carecen de protocolos de comunicación serial y de radio. Los datos son introducidos al transmisor de manera serial y éstos son transmitidos por modulación ASK, luego los datos recibidos por el receptor son demodulados y entregados de manera serial, pero sin ningún tipo de protocolo.

En la tabla 3.2 se muestran las especificaciones técnicas del fabricante del módulo transmisor y en la tabla 3.3 las del módulo receptor.

En la figura 3.9 se puede apreciar el nivel de potencia de transmisión según el voltaje de alimentación, mientras que en la figura 3.10 se muestra como varía la sensibilidad del receptor con respecto a la temperatura.

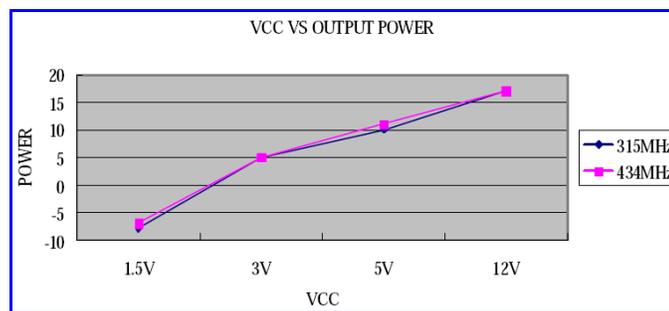


Figura 3.9. Nivel de potencia versus voltaje de alimentación. [42]

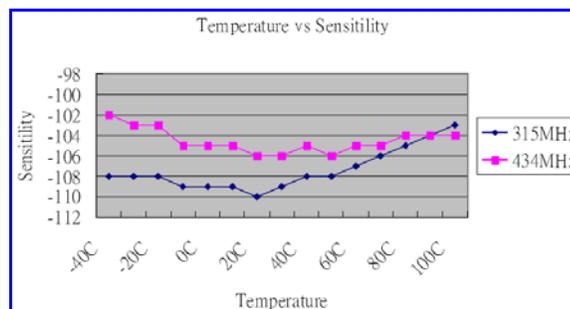


Figura 3.10. Variación de la sensibilidad del receptor versus la temperatura. [43]

Para poder lograr la correcta comunicación entre los elementos de la WSN (utilizando éstos módulos) se realizará un protocolo de comunicaciones para la parte de radio y se utilizarán un par de circuitos integrados para la transferencia de datos entre los módulos y el microcontrolador. Los CI son el codificador HT12E para el transmisor y el decodificador HT12D para el receptor, ambos del fabricante Holtek.

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas del MO-SAWR. Fuente: Tomada de la referencia [42].

Parameter	Symbol	Condition	Specification						Unit	
			Min.	Typical				Max.		
Operation Voltage				1,5	3	5	12		V	
Output power	Psens	DATA 5V	315 MHz		-11,8	4	10	16		dBm
		1 Kbps Data Rate	Supply current		3,1	11	20	57		mA
			433 MHz		-8,5	4	10	16		dBm
			Supply current		2,9	11	22	59		mA
Tune on Time	Ton	Data start out by Vcc turn on	10	20					ms	
Data Rate			200	1k				10k	bps	
Input duty		Vcc = 5V; 1kbps data rate	40					60	%	

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas del MO-RX3400. Fuente: Tomada de la referencia [43].

Parameter	Symbol	Condition		Specification			Unit
				Min.	Typical	Max.	
Operation Voltage				4,5	5	5,5	V
Sensitivity	Psens	Vcc = 5,0 V 1Kbps data rate	315 MHz		-107	-103	dBm
			433 MHz		-105	-102	dBm
ASK out logic HIGH	VOH	Iload = 10 μ A		0,7*Vcc			V DC
ASK out logic LOW	VOL	Iload = 10 μ A				0,3*Vcc	V DC
Supply current	Icc				2,3	3	mA
Tune on Time	Ton	Vcc off - turn on		25	30		ms
Data Rate				200	-	8k	bps
Output duty		Vcc = 5V; 1kbps data rate		40		60	%

3.4.1 Antenas.

La La selección de la antena depende principalmente de la frecuencia de la portadora y de la impedancia del módulo transmisor a utilizar. Como la frecuencia de trabajo de los módulos de radio seleccionado es de 434 MHz se debe diseñar y construir una antena a esa frecuencia y de impedancia de 50 ohm.

También se pueden adquirir ya fabricadas. En el mercado nacional se consiguen diferentes tipos de antenas de distintos fabricantes, pero para la frecuencia de 434 MHz es un poco difícil conseguir una de precio relativamente económica. Debido a la importación de los decodificadores HT12D se optó también por la importación de las antenas. En la figura 3.11 se muestra el aspecto físico de la antena seleccionada.



Figura 3.11. Antena seleccionada. ANT-433-PW-LP de Antenna Factor. [69]

El fabricante de la antena es una división de la empresa Linx Technologies llamada AntennaFactor, En la tabla 3.4 se muestran las especificaciones eléctricas de la antena. Las características principales de la antena se muestran a continuación:

- Alojamiento compacto.
- Patrón omnidireccional.
- Resistente a la intemperie.
- Screw-mount.

Tabla 3.4. Especificaciones eléctricas de la antena ANT-433-PW-LP. Fuente:

Tomada de la referencia [44].

Frecuencia central	433 MHz
Ancho de banda	12 MHz
Longitud de onda	¼ de onda
VSWR	< 1,9 típico a la frecuencia central
Impedancia	50 ohm
Conexión	Screw-mount

Electrical specifications and plots measured on 1.5”x 3.3” reference ground plane.

La antena ANT-433-PW-LP fue seleccionada principalmente por su precio, su impedancia de 50 Ω , su patrón omnidireccional y que no requiere de conectores costosos como los SMA o RPSMA. Existen otros tipos de antenas que operan a 434 MHz del mismo fabricante o de otros, como las mostradas en la figura 3.12. Estas antenas poseen características similares a la seleccionada, pero difieren principalmente en su tipo de conexión, tamaño físico, ancho de banda y precio.

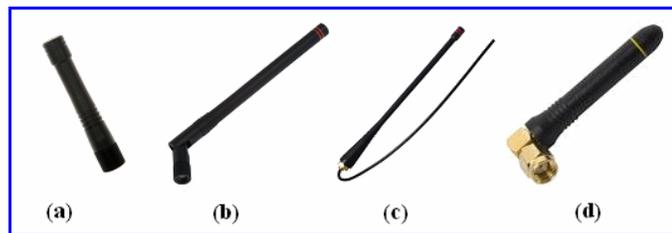


Figura 3.12. Otros tipos de antenas para 433-434 MHz. a) L324AM-434 de Nearson Inc [68] b) ANT-433-CW-HWR-RPS [71] c) ANT-PW-QW [70] d) ANT-CW-RCS de Linx Technologies Inc. [72]

La antena seleccionada será utilizada por los nodos sensores y por el nodo coordinador. Aunque se hubiese preferido antenas más directivas para los nodos sensores, el precio de estas puede ser mayor incrementando el costo del NS.

Para el equipo de comunicación si se requiere de antenas más directivas como las Yagi-Uda, las helicoidales, las de apertura e incluso los reflectores parabólicos (todo depende de la frecuencia de operación del equipo). Esto se debe a que es un enlace punto a punto con línea de vista.

3.5 Sensores.

Los sensores son variados como los principios físicos en los que se basan. En la actualidad para medir cualquier variable física se tienen variedades de sensores, con sus ventajas y desventajas, las características deseables de los sensores son:

Exactitud. La exactitud de la medición debe ser tan alta como fuese.

Precisión. La precisión debe ser muy buena, para que los valores medidos sean lo mas cercano posible al valor verdadero o referencia.

Rango de funcionamiento. El sensor debe tener un amplio rango de funcionamiento y debe ser exacto y preciso en todo el rango.

Velocidad de respuesta. El transductor debe ser capaz de responder a los cambios de la variable detectada en un tiempo mínimo. Lo ideal sería una respuesta instantánea.

Calibración. El sensor debe ser fácil de calibrar. El tiempo y los procedimientos necesarios para llevar a cabo el proceso de calibración deben ser mínimos. El término desviación se aplica con frecuencia para indicar la pérdida gradual de exactitud del sensor que se produce con el tiempo y el uso, lo cual hace necesaria su recalibración.

Fiabilidad. El sensor debe tener una alta fiabilidad. No debe estar sujeto a fallas frecuentes durante el funcionamiento.

Las variables físicas a medir por medio de los sensores son: temperatura, humedad e iluminancia.

3.5.1 Medición de temperatura.

La temperatura puede ser medida por diferentes tipos de sensores como: RTDs, termistores NTC y PTC, termopares o termocuplas, sensores piroeléctricos, sensores de silicio, entre otros. Para la medición de temperatura se seleccionaron los sensores de silicio y los NTC. En La tabla 3.5 se muestran los parámetros utilizados para la selección de éstos sensores.

Tabla 3.5. Parámetros de los sensores para la medición de temperatura. Fuente:

Parámetro	Especificación
Rango de operación	Rangos desde 0 °C a 100 °C,
Precisión	Precisión entre 0,5 °C y 2 °C.
Calibración	La calibración debe ser sencilla.
Velocidad de respuesta	De 1 seg. a 100 seg.
Precio	Precio asequible.

En la tabla 3.6 se muestra un cuadro comparativo de las características más resaltantes de los sensores seleccionados.

Tabla 3.6. Principales características técnicas de los sensores seleccionados. Fuente:

	Propia.			
Sensor	LM335	LM35DZ	DS18S20	NTC (10k)
Salida	Analógica (Voltaje)	Analógica (Voltaje)	Digital (Dato binario)	Analógica (Resistivo)
Linealización	10 mV/°K	10 mV/°C	-	-
Exactitud	±4 °C	±0,6 °C	±0,5 °C	±1,2 °C
Rango	(-40 a +100)°C	(0 a +100) °C	(-55 a +125) °C	(-40 a +150)°C
Velocidad de respuesta	1 – 80 seg	-	-	-
Precio (BsF)	8,50	12,00	21,00	8,10

Los sensores LM335, LM35 y NTC (10k) necesitan circuitos acondicionadores de señal (por lo que su costo se incrementa) y calibración. Para poder convertirlas a

un dato digital que represente el valor del voltaje proporcional a la temperatura. Éstas son desventajas respecto al sensor digital DS18S20. En la figura 3.13 se pueden apreciar el aspecto físico de estos sensores.

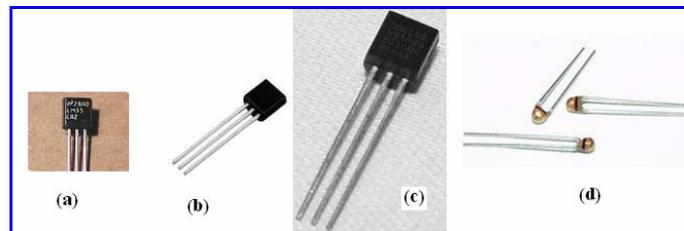


Figura 3.13. Sensores de temperatura seleccionados a) LM335 de STMicroelectronics, b) LM35 de National Semiconductor, c) DS18S20 de Dallas Semiconductor y d) NTC de 10k Ω de Vishay BCcomponents. [59]

3.5.2 Medición de humedad.

Para la medición de humedad existen muy pocos sensores, tales como: capacitivos y de silicio. Los de mayor uso son los sensores de silicio y los capacitivos. En las tablas 3.7 (salida capacitiva) y 3.8 (salida voltaje o binaria) se muestran un cuadro comparativo de las características más resaltantes de los sensores seleccionados.

Tabla 3.7. Principales características técnicas de los sensores de humedad seleccionados cuya salida es analógica (capacitiva). Fuente: Propia.

Sensor	HS1101	HCH-1000-002
Salida	Analógica (Capacitiva)	Analógica (Capacitiva)
Sensibilidad	0,34 pF/%RH (de 35 a 75 %RH)	0,6 pF/%RH (de 10 a 95 %RH)
Histéresis	$\pm 1,5$ %	± 2 %RH
Rango	0 %RH a 100 %RH	0 %RH a 100 %RH
Tiempo de respuesta	5 s (de 33 %RH a 80 %RH)	15 s (de 30 %RH a 90 %RH)
Costo	89,00 BsF (13,11 \$)	4,84 \$

Tabla 3.8. Principales características técnicas de los sensores de humedad seleccionados cuya salida es analógica (voltaje) o digital (binaria). Fuente: Propia.

Sensor	Serie HIH-4000	SHT15	HM1500LF
Salida	Analógica (Voltaje)	Digital (Dato binario)	Analógica (Voltaje)
Linealización	+31.483 mV/%RH	-	+26 mV/%RH
Exactitud	±3,5 %RH	±2 %RH	±5 %RH
Rango	0 %RH a 100 %RH	0 %RH a 100 %RH	0 %RH a 100 %RH
Tiempo de respuesta	15 s	8 s	10 s
Precio	Entre 17,50 y 26,24 \$	210,00 BsF	45,06 \$

Los sensores deben ser encapsulados de alguna forma para poder ser insertados en el terreno donde se registrará su humedad. En las figuras 3.14 y 3.15 se muestran las gráficas de las curvas típicas de la respuesta de los sensores HS1101 y HCH-1000-002 respectivamente.

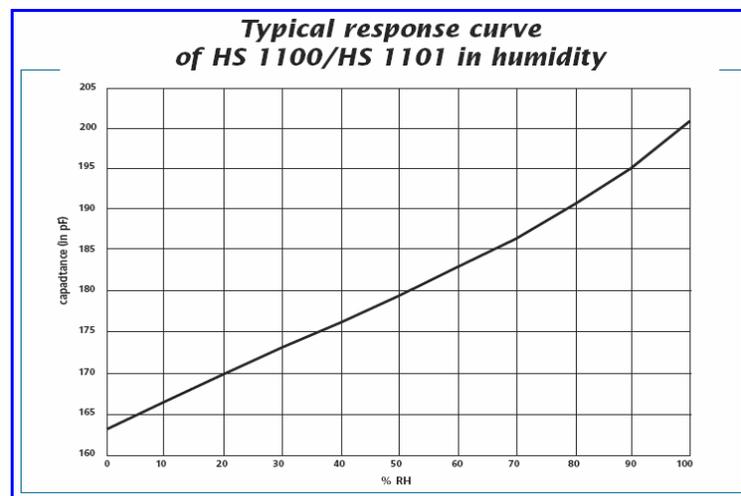


Figura 3.14. Curva típica del sensor HS1101 de Humirel. [34]

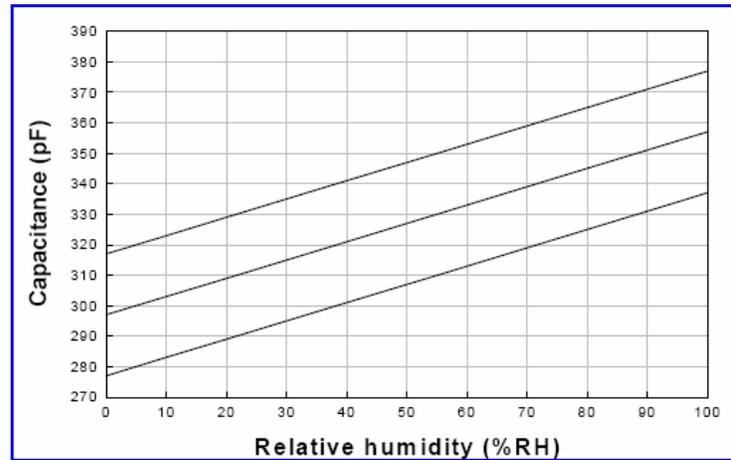


Figura 3.15. Curva típica del sensor HCH-1000-002 de Honeywell. [37]

Existen sensores que ya vienen acondicionados para ser insertados en el terreno, tal es el caso del HM1500LF de Humirel, ver figura 3.16. Como el HCH-1000-002 y el HS1101 carecen de este acondicionamiento, será necesario realizar uno. En la figura 3.17 se aprecia el aspecto físico del sensor HS1101 y del SHT15, disponibles en el mercado nacional. Mientras que en la figura 3.18 se muestra el sensor HCH-1000-002. Además de éstos existen otros tipos de sensores con características similares a los anteriores cuyas salidas pueden ser resistivas o frecuencias proporcionales a la humedad.



Figura 3.16. Aspecto físico del sensor de humedad HM1500LF de Humirel. [58]

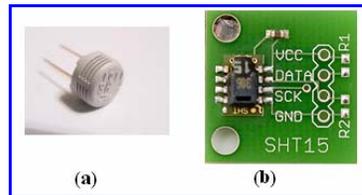


Figura 3.17. Sensores de humedad. a) Capacitivo HS1101 de Humirel, b) Digital SHT15 de Sensirion. [59]

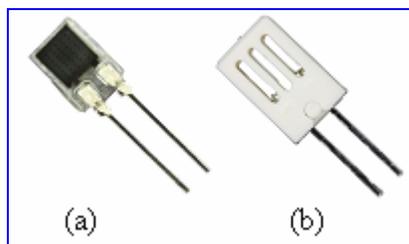


Figura 3.18. Sensor de humedad capacitivo de Honeywell. a) HCH-1000-001 [57] b) HCH-1000-002 [56]

3.5.3 Medición de iluminancia e irradiancia.

Para la medición de variables fotométricas como la iluminancia e irradiancia, existen sensores tales como:

- Optoelectrónicos.
 - Fotodiodos.
 - Fototransistores.
- Resistivo.
 - LDR.
- Sensores de fibra óptica.

Para la medida de la iluminancia se puede utilizar como sensor una LDR y para la medida de la irradiancia un fotodiodo. Ambos sensores requieren circuitos

acondicionadores de señal para obtener una relación de su variable con un voltaje. Por ejemplo, la LDR aumenta o disminuye su resistencia según el nivel de iluminación presente en su superficie detectora, para relacionarla con un voltaje se requiere de un circuito sencillo como lo es un divisor de tensión, de ésta forma se obtiene una relación entre la resistencia de la LDR y un voltaje en función de dicho valor. Esto es necesario ya que posteriormente se va a convertir a un valor digital y de está manera poder realizar los cálculos correspondientes. En la figura 3.19 se muestran el aspecto físico de estos sensores.

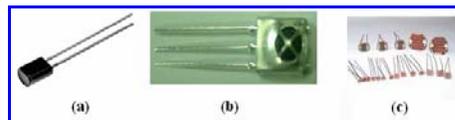


Figura 3.19. Sensores utilizados en fotometría. a) Fotodiodo [61], b) Fototransistor [60] y c) LDRs. [64]

No se medirá irradiancia, solamente la iluminancia, para ello no se utilizará una LDR como sensor debido a que su exactitud no es tan buena como la de sensores diseñados para esta aplicación (medición de niveles de iluminación), por ello se utilizan los sensores cuya características principales se muestran en la tabla 3.9 y el aspecto físico de ambos se puede apreciar en la figura 3.20.

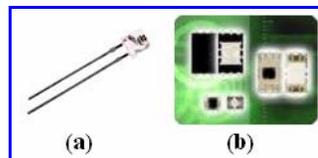


Figura 3.20. Aspecto físico de los sensores para la medida de iluminancia. a) LLS05-A de SENBA OPTICAL ELECTRONIC [41], b) BH1603FVC de ROHM. [55]

En las figuras 3.21 y 3.22 se muestran las curvas típicas de la respuesta de los sensores seleccionados para la medida de iluminancia.

Tabla 3.9. Características principales de los sensores seleccionados para la medición de iluminancia. Fuente: Propia.

Sensor	LLS05-A	BH1603FVC
Salida	Analógica (Corriente)	Analógica (Corriente)
Sensibilidad	-	-
Rango	1 – 200 lux	Variable 0 – 1.000 lux 0 – 10.000 lux 0 – 100.000 lux
Precio	0,65 \$ (Futurlec)	0,87 \$ (Digikey)

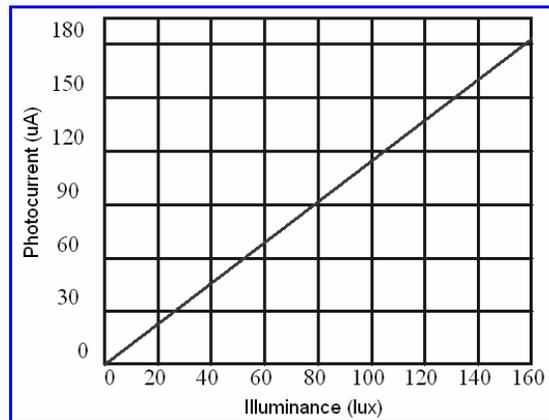


Figura 3.21. Curva característica del sensor LLS05-A [41]

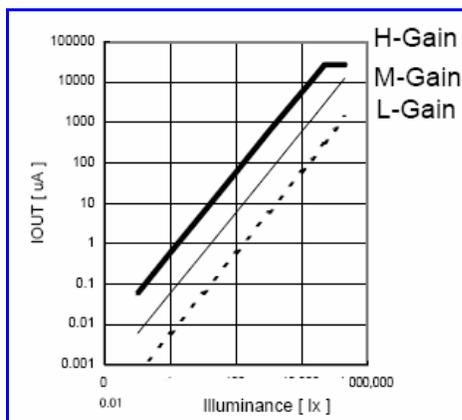


Figura 3.22. Curva característica del sensor BH1603FVC [40]

3.6 Circuitos Acondicionadores de señal.

La salida de la mayoría de los sensores son analógicas y por lo general no son un voltaje o son de niveles muy bajos como para ser introducidos al convertidor analógico digital directamente, aunque en la actualidad existen ADC con resoluciones de 10, 12 o más bits que podrían permitir niveles muy pequeños de voltaje según su voltaje de referencia. Otros sensores poseen salidas analógicas de tipo resistivo o capacitivo, por lo que se requiere un circuito acondicionador de señal que permita convertir o relacionar su valor con un voltaje de nivel suficiente para que se puedan introducir al CAD. Los sensores cuya salida sea un voltaje pueden requerir o no de un circuito acondicionador de señal, por ejemplo, un amplificador para incrementar su nivel a valores adecuados para el ADC.

Estos tipos de circuitos pueden ser desde muy sencillos (por ejemplo, un amplificador no inversor) hasta muy complejos como circuitos que incluyan filtrado, eliminación de ruido, entre otros.

3.6.1 Circuitos de acondicionamiento de señal para los sensores de temperatura.

Una vez que el sensor captura una variable física y la convierte en una señal eléctrica se debe adaptar a niveles adecuados para ser utilizadas por el convertidor analógico a digital. Cuya característica principal es la resolución y viene dada por:

$$\text{Resolución} = \frac{(V_{\text{ref}+} - V_{\text{ref}-})}{2^n} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde n es el número de bits del código binario directo con que se representa al valor analógico convertido. Los ADC más comunes son los de 8 y 10 bits, pero el

ADC del microcontrolador es de 10 bits. Tomando como valores de referencia +5V para V_{ref+} y 0V para V_{ref-} , de la ecuación 3.1 se tiene la siguiente resolución:

$$\text{Resolución}_{(10\text{ bits})} = \frac{(5 - 0)}{2^{10}} = \frac{5}{1024}$$

(Ec. 3.2)

$$\text{Resolución}_{(10\text{ bits})} = 4,88\text{ mV/bit}$$

3.6.1.1 El sensor LM335.

El LM335 es un sensor de temperatura lineal, su principal fabricante es la National Semiconductor, su linealidad es de +10mV/°K. A 0°C (273°K) el sensor entrega en su salida 2,73V. Para acondicionar la salida se utiliza un circuito amplificador diferencial (figura 3.23) y un amplificador (figura 3.24) según la resolución del convertidor analógico digital y del rango de medición, los valores de los elementos variaran.

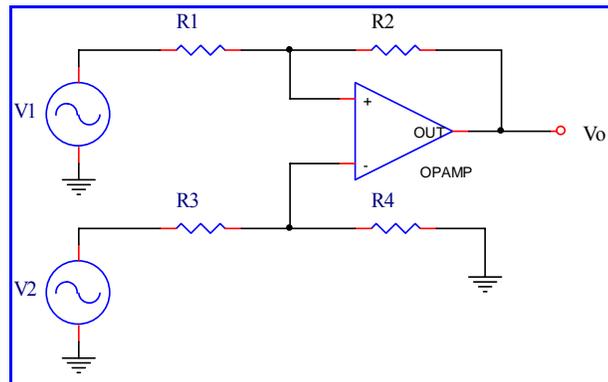


Figura 3.23. Amplificador diferencial con Op Amp. Fuente: Propia.

La ecuación de un amplificador diferencial viene dada por:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

(Ec. 3.3)

Para que se cumpla esta ecuación se debe satisfacer la condición de puente balanceado:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

y la de un amplificador no inversor es:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_i \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Al unir los circuitos amplificador diferencial y amplificador no inversor se tiene el circuito completo (figura 3.25) para el acondicionamiento de la señal proveniente del sensor.

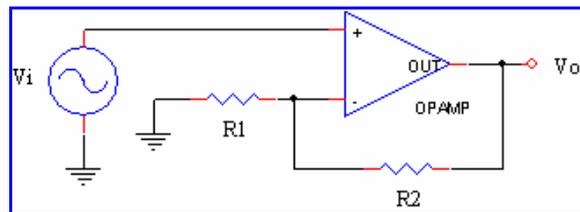


Figura 3.24. Amplificador no inversor con Op Amp. Fuente: Propia.

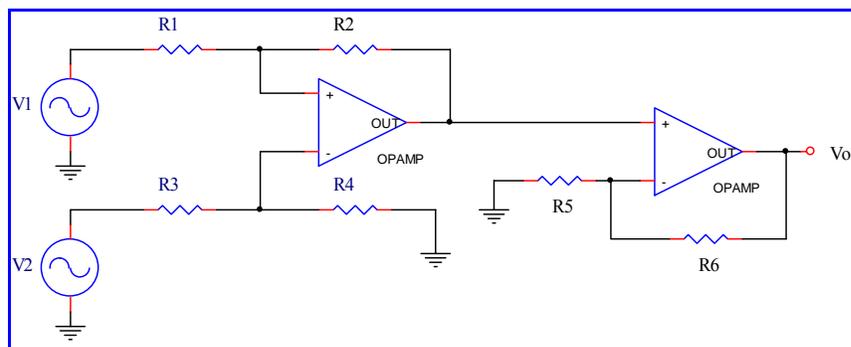


Figura 3.25. Circuito acondicionador para el sensor LM335. Fuente: Propia.

Por lo que la ecuación general de este circuito queda:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right)(V_2 - V_1) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Haciendo $A_v = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right)$ y sustituyendo en ecuación 3.6 se tiene:

$$V_o = A_v(V_2 - V_1) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

donde A_v es la ganancia del circuito amplificador no inversor, V_2 es el voltaje de salida del sensor LM335 y V_1 es el voltaje a ser sustraído para obtener el valor del voltaje de referencia del límite inferior del rango de valores de temperatura. Se establece un rango de valores desde 0°C hasta $+100^\circ\text{C}$, como se muestra en la figura 3.26.

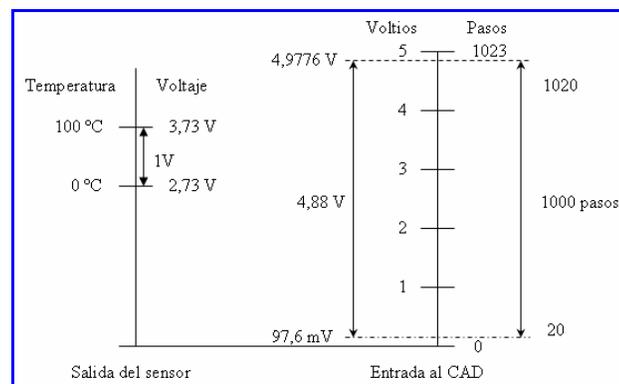


Figura 3.26. Señales del sensor y del ADC para el LM335. Fuente: Propia.

Para la obtención de los valores de los elementos se utiliza la ecuación 3.7. Se plantean para los límites.

$$\begin{cases} 2,73 A_v - A_v V_1 = 0,0976 \\ 3,73 A_v - A_v V_1 = 4,9776 \end{cases}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior se tiene:

$$\begin{cases} A_v = 4,88 \text{ V/V} \\ V_1 = 2,71 \text{ V} \end{cases}$$

Se tiene que $A_v = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right)$, por lo que se sustituye y se obtienen los valores de

las resistencias.

$$4,88 = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \rightarrow R_6 = 3,88 R_5, \text{ asumiendo un valor para } R_5, \text{ calculando y}$$

normalizando el valor para R_6 se obtuvieron:

$$\begin{cases} R_5 = 10 \text{ k}\Omega \\ R_6 = 39 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

Para el valor de V_1 se utiliza un divisor de voltaje (figura 3.27), el cual se rige por la siguiente ecuación:

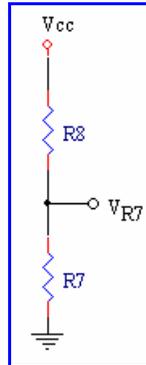


Figura 3.27. Esquema de un divisor de voltaje. Fuente: Propia.

$$V_{R7} = V_{cc} \frac{R_7}{R_7 + R_8} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Al sustituir $V_{R7} = 2,71\text{V}$ y $V_{cc} = 5\text{V}$ en la ecuación 3.8 y resolverla se tiene:

$R_7 = 1,183R_8$, asumiendo un valor para R_8 , calculando y normalizando el valor para R_7 se obtuvieron:

$$\begin{cases} R_7 = 4,3 \text{ k}\Omega \\ R_8 = 3,6 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

El circuito acondicionador completo se puede observar en la figura 3.28, en ella se aprecia que $R6$ está formada por dos resistencias: $R6'$ y $R10$, donde $R10$ es una resistencia variable usada para ajustar la ganancia del circuito amplificador, debido a las tolerancias de las resistencias y características de los amplificadores operacionales. De ésta forma se calibrará el sensor. Los valores seleccionados para $R6'$ y $R10$ son:

$$\begin{cases} R6' = 36 \text{ k}\Omega \\ R10 = 5 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

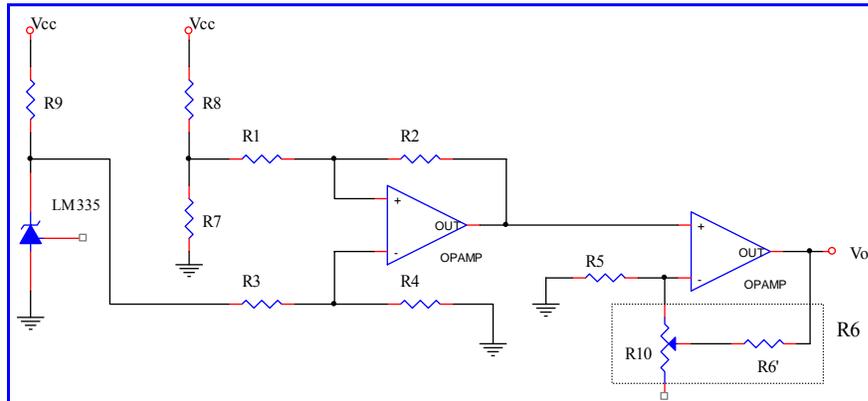


Figura 3.28. Sensor de temperatura LM335 y su circuito de acondicionamiento de señal (con R10 se ajusta la ganancia del amplificador no inversor).

La resistencia R9 tiene un valor de 3,3 K Ω , éste es seleccionado para un voltaje de alimentación (del sensor LM335) de +5 V, tomado como referencia de un ejemplo de un termómetro digital que utiliza este sensor, citado en [2]. Un terminal del sensor no se utiliza.

El circuito acondicionador de señal puede ser obviado y conectar directamente la salida del sensor LM335 a la entrada del convertidor analógico a digital, esto se debe gracias a su resolución (4,88 mV/bit). El único componente que se necesitaría sería la resistencia R9 de la figura 3.28 y la conversión de grados K a Celsius se haría por software a través de cálculos con el microcontrolador.

3.6.1.2 El sensor LM35.

Éste sensor es muy parecido al LM335, su principal diferencia es que la salida del LM335 es 10 mV/ $^{\circ}$ K mientras que la del LM35 es de 10 mV/ $^{\circ}$ C, por lo cual no requiere de un circuito amplificador diferencial, sino simplemente de un amplificador

no inversor (figura 3.24). En la figura 3.29 se muestran las señales del sensor y de entrada al convertidor analógico a digital.

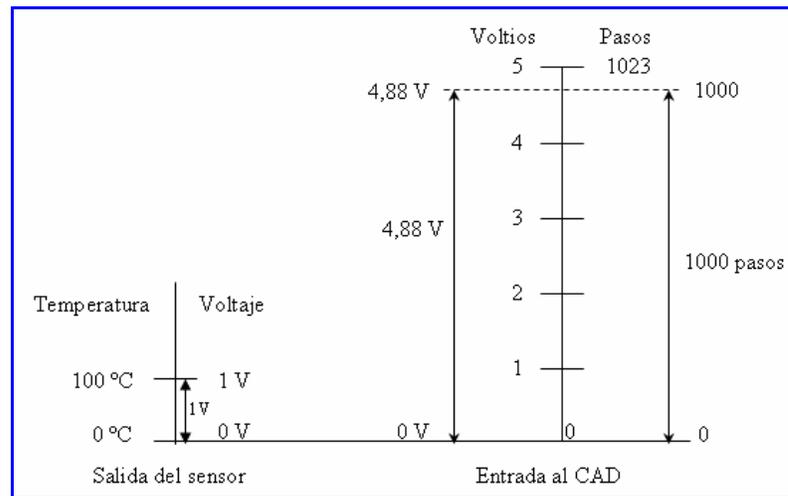


Figura 3.29. Señales del sensor y del ADC.

Haciendo $A_v = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ y sustituyendo en ecuación 3.3 se tiene:

$$V_o = A_v V_i \rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{4,88 \text{ V}}{1 \text{ V}}, \text{ se tiene entonces que :}$$

$$A_v = 4,88 \text{ V/V}$$

Se tiene que $A_v = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$, por lo que se sustituye y se obtienen los valores de

las resistencias.

$$4,88 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \rightarrow R_2 = 3,88 R_1, \text{ asumiendo un valor para } R_1, \text{ calculando y}$$

normalizando el valor para R_2 se obtuvieron:

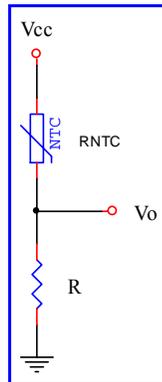


Figura 3.31. Circuito acondicionador de señal para un termistor NTC.

$$V_o = V_{cc} \frac{R}{R + R_{NTC}} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Como se sabe la respuesta de una NTC no es una variación de voltaje en función de la temperatura, sino una variación de resistencia, por tal caso se utiliza un divisor de voltaje como circuito acondicionador de señal para obtener una relación de voltaje-temperatura. El modelo matemático de una NTC no es lineal sino exponencial, por tal razón se requiere de cálculos más complejos que en los sensores lineales vistos con anterioridad.

Por sus características el sensor seleccionado para la medición de temperatura es el LM35DZ, ya que el LM335 posee un mayor error (sin calibración), aunque se puede mejorar su exactitud a ± 1 °C calibrándolo según datos del fabricante o se puede comprar el LM335A cuya exactitud es de ± 1 °C y se mejora a $\pm 0,5$ °C calibrado, pero es (el LM335 es 0,36 \$ más económico, dato de la tienda electrónica Digikey) más costoso que el anterior y no está disponible en la tienda donde fueron adquiridos los sensores. Aunque el costo del LM335 más un potenciómetro de calibración es menor que el LM35DZ, se opta por éste ya que no se requiere de calibración, tiene mejor exactitud y su circuito acondicionador de señal es más sencillo y económico que el

anterior. La NTC no es seleccionada como sensor de temperatura debido a su respuesta y la diferencia de precio no es mucha respecto al sensor seleccionado.

3.6.2 Circuitos de acondicionamiento para el sensor de humedad.

Para realizar el circuito de acondicionamiento del sensor de humedad es un poco más complicado debido a que la salida del sensor es una capacidad, por tal razón se utiliza un circuito convertidor C-V (capacitancia a voltaje), como el mostrado en la figura 3.32. Este circuito proporciona un voltaje proporcional al valor de un capacitor.

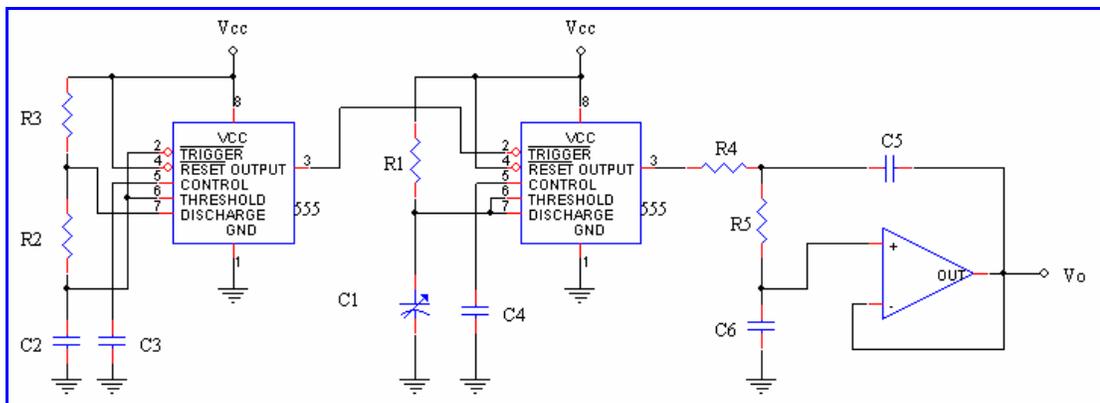


Figura 3.32. Circuito convertidor capacitancia – voltaje, donde C1 es el capacitor cuya capacitancia se desea convertir. Fuente: Adaptada de [8]

El multivibrador IC1 funciona como oscilador a 60 Hz proporcionando pulsos de disparo al multivibrador IC2 el cual opera como multivibrador monoestable. La resistencia R3 es fija y Cx es el capacitor que se desea medir. El ciclo de trabajo de IC2 va a depender del valor de Cx. IC3 es una combinación de filtro pasa bajo, amplificador y seguidor de voltaje, cuya salida es el voltaje promedio en función del ancho de pulso de la señal de IC2.

Para ciclos de trabajo pequeños, el voltaje promedio en V_o es pequeño. A medida que el ciclo de trabajo aumenta, para capacitores de capacitancia mayor, el voltaje promedio V_o aumenta. Ver figura 3.33.

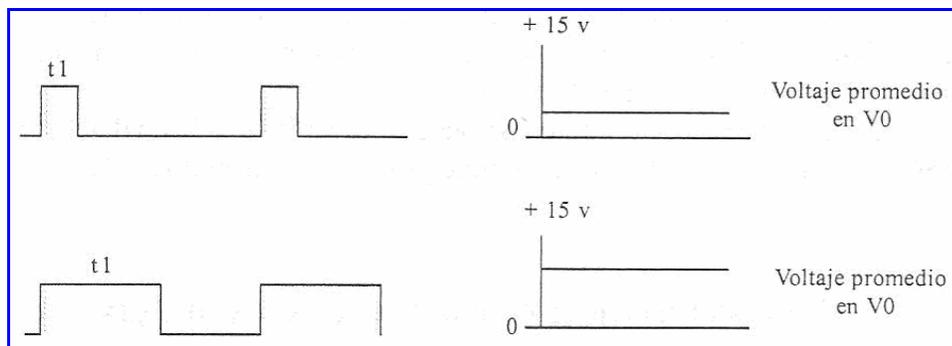


Figura 3.33. Formas de onda del convertidor capacitancia – voltaje. [8]

Como un ejemplo la gráfica de la figura 3.34 ilustra la relación entre valores de capacitancia ($0,01 \mu\text{F}$ hasta $0,1 \mu\text{F}$) y el V_o . El circuito presenta una excelente linealidad y calibración. Como medidor de capacitancia en relación 1:1 ($1\text{V}/0,01 \mu\text{F}$). Otras relaciones se obtienen ajustando R_3 ($100 \text{ k}\Omega$) de acuerdo a las necesidades del usuario.

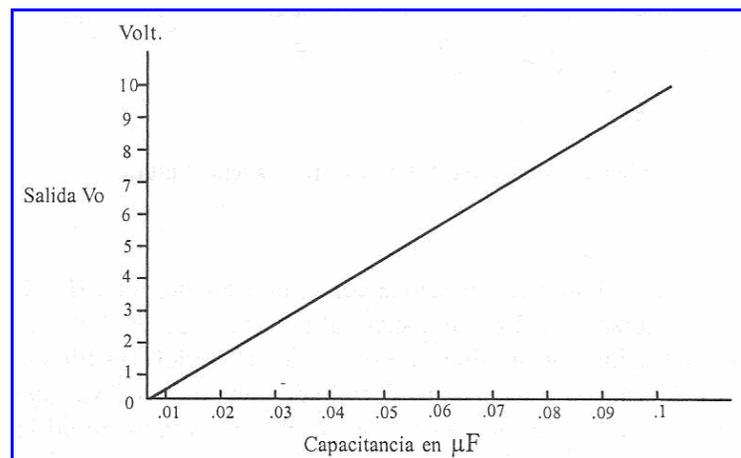


Figura 3.34. Capacitancia vs V_o . [8]

Para poder adaptar este circuito a nuestro sensor se deben hacer algunas modificaciones tales como: cambiar el voltaje de alimentación de 15 V a 5 V, por lo que la relación 1:1 ($1V/0,01 \mu F$) se ve modificada y por otro lado los valores de capacitancia de salida del sensor están comprendidos entre 270 pF y 380 pF, por lo que se debe modificar R_3 para adaptarla al sensor de humedad.

Como se reduce $\frac{1}{3}$ el voltaje de alimentación la resistencia fija R_3 se multiplica por 3 su valor y para obtener un mayor voltaje a la salida se multiplica por 10, es decir, la resistencia fija (R_3) se cambiará por una de $3 M\Omega$. La salida (V_o) está en el orden de los milivoltios, por lo que se requiere amplificarla, para ello se varía la frecuencia del multivibrador a estable a un mayor valor, obteniéndose un voltaje mayor y proporcional al valor del capacitor.

Este circuito se requiere ya que los sensores seleccionados son de tipo capacitivo (el HS1101 y el HCH-1000-001), es decir, el porcentaje de humedad relativa (%RH) es proporcional al valor de la capacitancia del sensor.

Por su sensibilidad y por razones de costo el sensor seleccionado es el HCH-1000-002 de Honeywell. Su principal desventaja es que necesita circuitos para convertir la capacidad (salida del sensor) en voltaje o en frecuencia y obtener una relación con el porcentaje de humedad. Este inconveniente es solucionado con el circuito acondicionador de señal mostrado en la figura 3.32. Por otro lado se puede considerar un circuito que permita medir la capacidad del sensor y así obtener un cálculo más directo de la humedad.

3.6.3 Circuitos de acondicionamiento para el sensor de iluminancia.

En las figuras 3.35 y 3.36 se pueden apreciar los circuitos acondicionadores de señal de los sensores seleccionados para la medida de iluminancia. Cabe notar que

solamente se requiere de una resistencia en ambos casos y un capacitor para el del sensor BH1603FVC.

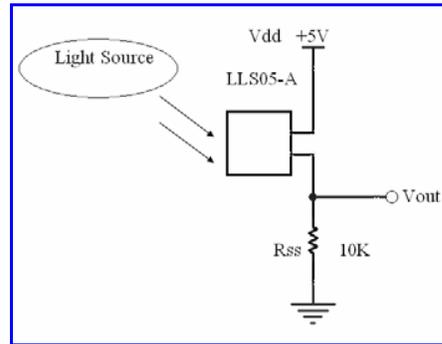


Figura 3.35. Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor LLS05-A. [40]

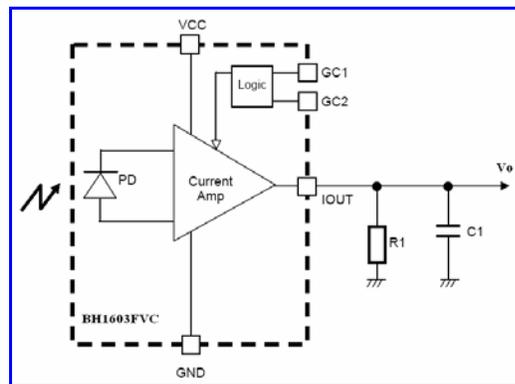


Figura 3.36. Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor BH1603FVC. [41]

El sensor seleccionado es el BH1603FVC por su rango variable, ya que la luz del sol a pleno medio día puede llegar a niveles de iluminación en el orden de los 100.000 lux (100.000 lúmenes/m²), por tal razón se selecciona este sensor, a pesar de ser el LLS05-A más económico. Su único inconveniente es su tamaño 3,0x1,6 mm, mientras que el anterior es de encapsulado tipo T-1³/₄, como se observa en la figura 3.23. Existen otros tipos de sensores para este tipo de aplicación, pero al igual que el LLS05-A sus rangos no son muy altos (1.000 lux como máximo rango en algunos, en otros es de 10.000 lux).

También los hay de tipo digital cuyo rango pueden llegar a los 128.000 lux, pero son muchos más costosos que los de salida analógica y por lo general manejan el protocolo I²C por lo que se requieren dos pines de un puerto del μ C y una subrutina para manejarlo o un microcontrolador con un puerto de comunicación que soporte este tipo de protocolo serial, mientras que el analógico solo requiere de un canal del ADC del μ C. Las ecuaciones de salida del sensor BH1603FVC son:

Para el modo de ganancia H

$$V_o = 0,6 * 10^{-6} * E_v * R_1 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Para el modo de ganancia M

$$V_o = 0,06 * 10^{-6} * E_v * R_1 \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Para el modo de ganancia L

$$V_o = 0,006 * 10^{-6} * E_v * R_1 \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Como se utilizará el máximo rango del sensor se utiliza la ecuación 3.10, para el mínimo de 100 lux se quiere tener un voltaje de +4,88 mV, por lo que se despeja de la ecuación y se calcula R1.

$$R_1 = \frac{V_o}{0,006 * 10^{-6} * E_v} = \frac{4,88 * 10^{-3}}{0,006 * 10^{-6} * 100} = 8.133,33 \Omega$$

Como este valor no es estándar se utiliza una combinación de tres resistores en serie (puede utilizar un potenciómetro para ajustar el valor, la precisión se requiere para que 100 lux sea un paso del CAD, 200 lux el siguiente paso y así sucesivamente). Los valores de estos son:

$$R_1 = \begin{cases} R_{1_1} = 8.200\Omega \\ R_{1_2} = 130\Omega \\ R_{1_3} = 3,3\Omega \end{cases}$$

3.6.4 Circuito de acondicionamiento para la medida del estado de la batería.

Para la medida de la batería se utiliza como circuito acondicionador de señal un divisor de voltaje como el mostrado en la figura 3.37. La batería que es de 9 V, no se puede medir directamente ya que el voltaje de referencia del ADC es de 5 V, por lo tanto se utiliza un divisor de tal manera que los 9 V correspondan a 5 V.

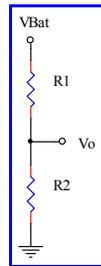


Figura 3.37. Divisor de voltaje utilizado para la medida del voltaje de las baterías de los nodos. Fuente: Propia.

Se tiene entonces que:

$$V_o = V_{Bat} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \text{ como } V_{Bat} = 9V \rightarrow V_o = 5V \text{ se tiene:}$$

$$\frac{5}{9} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow R_2 = 1,25R_1$$

$$\text{Y para } V_{Bat} = 12V, \frac{5}{12} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow R_2 = 1,4R_1$$

Asumiendo los valores de $R_1 = 12\text{ k}\Omega$, se tiene que $R_2 = 15\text{ k}\Omega$, ambas son de valores estándar, y $R_1 = 10\text{ k}\Omega$, se tiene que $R_2 = 14\text{ k}\Omega$, con tolerancias del $\pm 1\%$.

$$\text{Para } V_{Bat} = 9V: \begin{cases} R_1 = 12\text{k}\Omega \\ R_2 = 15\text{k}\Omega \end{cases} \quad \text{y} \quad \text{Para } V_{Bat} = 12V: \begin{cases} R_1 = 10\text{k}\Omega \\ R_2 = 14\text{k}\Omega \end{cases}$$

3.7 Procesador digital de señal.

Como procesador digital de señal se utiliza un microcontrolador, ya que éste tiene muchas ventajas frente a un microprocesador y debido a las funciones que realizará ésta unidad no se requiere la potencia de un DSP, cuyo precio es mayor que el de un microcontrolador en la mayoría de los casos (todo depende de los recursos y características que posean, es decir, memorias, puertos, timers, puertos de comunicación, formatos, frecuencia de operación, tipo de encapsulado, entre otros).

3.7.1 Selección del microcontrolador.

Para seleccionar el microcontrolador, primero se debe seleccionar una familia de ellos, ya que existen diferentes empresas que fabrican estos dispositivos, cada una de ellas dispone de varios modelos con características propias; por lo tanto se selecciona primero una familia (un fabricante), para luego seleccionar el o los microcontroladores necesarios para el diseño del proyecto.

Después de haber investigado, se selecciona la familia de microcontroladores PIC fabricados por la empresa Microchip, por las razones siguientes:

- Sencillez de manejo: Tienen un juego de instrucciones reducido; 35 en la gama media y 77 en la gama mejorada.
- Precio: Su coste es comparativamente inferior al de sus competidores.
- Poseen una elevada velocidad de funcionamiento. Buen promedio de parámetros: velocidad, consumo, tamaño, alimentación, entre otros.
- Herramientas de desarrollo fáciles y económicas. Muchas herramientas software se pueden recoger libremente a través de Internet desde Microchip.
- Existe una gran variedad de herramientas hardware que permiten grabar, depurar, borrar y comprobar el comportamiento de los PIC.

- La gran variedad de modelos de PIC permite elegir el que mejor responde a los requerimientos de la aplicación.
- Son los más fáciles de conseguir en el mercado.
- Existen herramientas de software que permiten la programación en lenguajes de alto nivel como C o BASIC.

Una de las razones del éxito de los PIC se basa en su utilización. Cuando se aprende a manejar uno de ellos, conociendo su arquitectura y su repertorio de instrucciones, es muy fácil emplear otro modelo.

3.7.2 La familia de microcontroladores PIC.

Microchip, fabricante de los microcontroladores PIC, se mantiene desde el año 2002 como líder mundial de ventas de microcontroladores de 8 bits. Las ventas de los productos de Microchip son absorbidos en un 43% por Asia y Japón, mientras que Europa soporta el 28 % y América el 29%. En cuanto al mercado a los que se destinan los microcontroladores PIC destaca el área genérica de la electrónica de consumo con el 35%, seguida por la industria automotor con el 18%. (Figura 3.38).

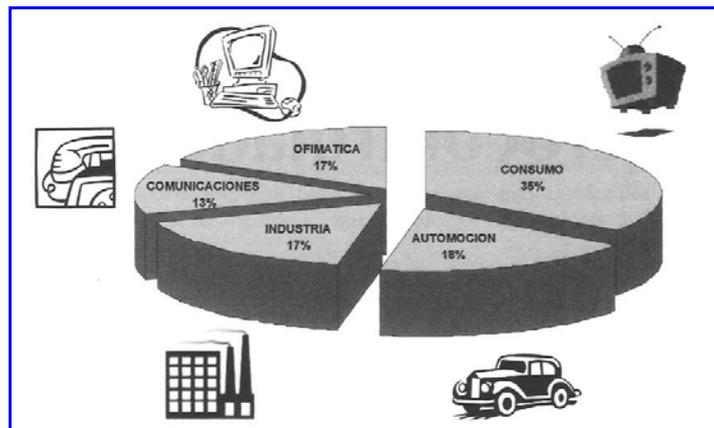


Figura 3.38. Distribución de las ventas de microcontroladores PIC en los principales segmentos del mercado. [6]

La gran diversidad de modelos de microcontroladores permite al diseñador encontrar el que contenga todos los recursos y capacidades de memoria que precisa para su aplicación. (Figura 3.39).

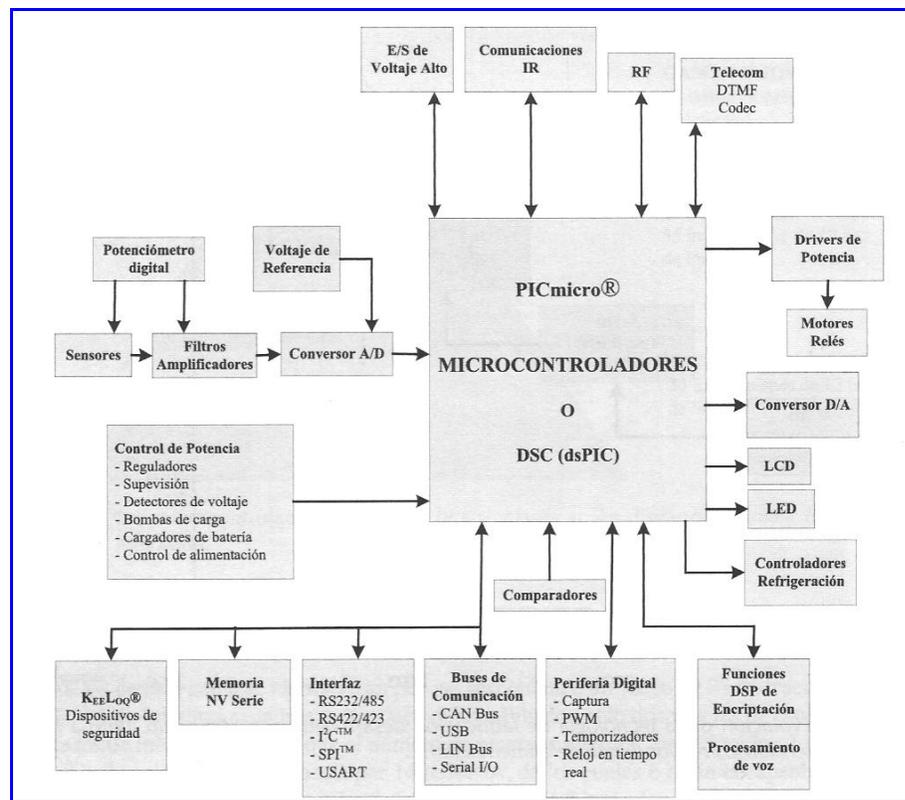


Figura 3.39. La variedad de dispositivos PIC con sus distintas configuraciones permite encontrar el modelo que cumpla con las especificaciones de cualquier proyecto. [6]

Una de las grandes ventajas de los microcontroladores de Microchip es su “migrabilidad”, que significa la posibilidad de cambiar de modelo de MCU y pasar a otro más potente con más capacidad de memoria y periféricos, manteniendo la distribución de los pines del encapsulado o “pinout”, la compatibilidad del software y del repertorio de instrucciones, la compatibilidad de los periféricos y la de las herramientas de desarrollo.

3.7.3 Clasificación de los microcontroladores PIC.

Estos microcontroladores o MCU se caracterizan por su arquitectura Harvard. Genéricamente los microcontroladores se clasifican según el tamaño de los datos que maneja el repertorio de instrucciones y existen 4 grandes grupos: de 4, de 8, de 16 y de 32 bits. Microchip solo fabrica microcontroladores de 8 y de 16 bits (año 2006). En la actualidad ya dispone de microcontroladores de 32 bits.

3.7.3.1 Microcontroladores PIC de 8 bits.

Se distinguen porque la longitud de los datos nativos que manejan las instrucciones es de 8 bits, que se corresponde con el tamaño del bus de datos y el de los registros de la CPU. Los microcontroladores PIC de 8 bits se clasifican en tres grandes gamas: Base, Media y Mejorada, con un total de unos 300 modelos diferentes que contienen distintas capacidades de memoria, periféricos y distintos tipos de encapsulados, ver figura 3.40.

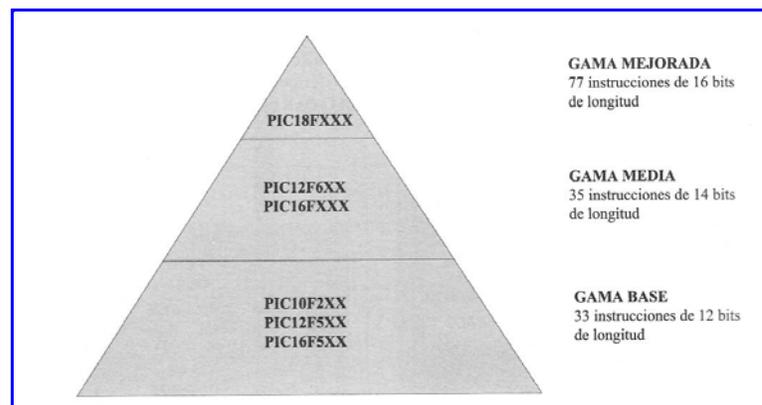


Figura 3.40. Los microcontroladores PIC de 8 bits se clasifican en 3 grandes gamas: Base, Media y Mejorada. [6]

3.7.3.2 Microcontroladores PIC de 16 Bits.

Los requerimientos técnicos que exigen las modernas aplicaciones precisan microcontroladores más potentes que los de 8 bits por esta razón Microchip ha

diseñado nuevos dispositivos que manejan en modo nativo datos de 16 bits y que se integran en arquitecturas de mayor complejidad.

Hay dos grandes gamas de microcontroladores de 16 bits:

- 1) Gama MCU de 16 bits, formada por las familias de dispositivos PIC24F y PIC24H.
- 2) Gama DSC de 16 bits, formada por las familias de dispositivos dsPIC30F y dsPIC33F.

3.7.3.3 Microcontroladores PIC de 32 bits.

Microchip Technology lanzo en noviembre de 2007 los nuevos microcontroladores de 32 bits con una velocidad de procesamiento de 1.5 DMIPS/MHz con capacidad HOST USB. Estos MCUs permiten un procesamiento de información increíble con un núcleo de procesador de tipo M4K. Al ser un microcontrolador reciente no se tiene mucha información en español acerca de esta familia.

Debido a los requerimientos hardware que deben tener los microcontroladores y las funciones que van a desempeñar se selecciona la gama media de la familia de 8 bits.

Los microcontroladores deben poseer las siguientes características:

- Memoria de programa con capacidad para el programa diseñado.
- Memoria RAM de datos suficiente para manejar las variables, operaciones de cálculos y resultados.

- Convertidor analógico a digital con resolución de 10 bits y por lo menos 5 canales.
- Puertos de comunicaciones seriales (no limitativo, depende de los periféricos externos a utilizar, por ejemplo, el módulo de radio).
- Timer con entrada de reloj externa.
- Suficientes pines I/O para cumplir la demanda de los mismos.
- Capacidad para interrupción externa.
- Frecuencia de trabajo, por lo menos a 4MHz.
- Opción de reloj interno (no limitativo).

De acuerdo a las características anteriores los microcontroladores (en el Anexo H se muestran las características más importantes) seleccionados son:

- El PIC16F886 para los nodos sensores.
- El PIC16F887 para el nodo coordinador.
- El PIC16F887 para el equipo de monitoreo.

En la figura 3.41 se muestran el aspecto físico de ambos microcontroladores.

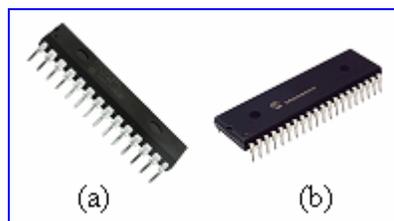


Figura 3.41. Aspecto físico de los microcontroladores seleccionados. a) PIC16F886/SP [73] y b) PIC16F887/P. [74]

3.8 Cobertura de la WSN.

La cobertura de la WSN está delimitada principalmente por el alcance de los módulos de radio, debido a que los seleccionados tienen un alcance de 100 m, la distancia entre dos nodos (nodo sensor – nodo coordinador) no debe sobrepasar éste valor. Por lo tanto, la cobertura de la red queda limitada a una superficie de una hectárea. Para lograr mayores coberturas se tienen las siguientes sugerencias:

1. Cambiar los módulos de comunicación por otros de mayor alcance (el problema de éste caso es que se requerirá mayor suministro de potencia debido a que este tipo de módulos por lo general tienen un mayor consumo de energía).
2. Utilizar topologías combinadas como las mostradas en la figuras 4.14 y 4.15.
3. Usar módulos de radio con corto alcance como los seleccionados o menos inclusive, pero que manejen algún protocolo de comunicaciones que soporten topologías en malla.
4. Incorporar repetidores en la red (caso no deseable).

En la figura 3.42 se muestra un terreno con una superficie de una hectárea, dividida en 16 cuadros de igual área (en este caso de 625 m² cada uno). También se pueden observar la ubicación de cada nodo, éstos están ubicados exactamente en el punto central de cada cuadro y el coordinador en el centro del cuadro general. Aunque no se visualice el equipo para la comunicación entre el nivel de campo y el nivel de control, éste estará ubicado al lado del nodo coordinador en dirección al nivel de control.

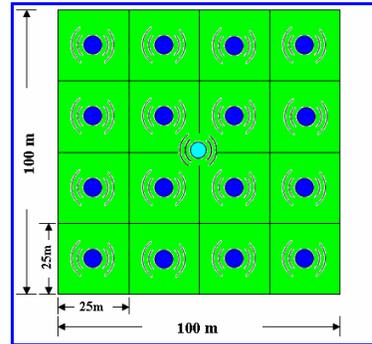


Figura 3.42. Terreno con una superficie de 1 hectárea, máxima cobertura de la WSN.

Fuente: Propia.

3.9 Alimentación de los equipos.

Debido a que es una red de sensores inalámbricos que será instalada en un terreno donde posiblemente se carezca del servicio de energía eléctrica y por lo tanto no se puedan utilizar fuentes de poder para energizar los diferentes equipos, se opta por la utilización de baterías como fuentes de alimentación.

En el caso de las redes de sensores inalámbricos se emplean los siguientes tipos de baterías de recarga:

- **Níquel-Cadmio (Ni-Cd):** Están basadas en un sistema formado por hidróxido de níquel, hidróxido de potasio y cadmio metálico. Poseen ciclos de vida múltiples, presentando la desventaja de su relativamente baja tensión. Pueden ser recargadas hasta 1000 veces y alcanzan a durar decenas de años. No contienen mercurio, pero el cadmio es un metal con características tóxicas.
- **Níquel Metal Hydride (Ni-Mh):** presenta alta densidad de energía (o capacidad) que implica un mayor tiempo de vida. Además es menos contaminante que el Ni-Cd, ya que no tiene adiciones de Cadmio (Cd) ni

plomo (Pb). Entrega cerca del 30% de mayor capacidad que una Ni-Cd de igual tamaño.

- **Litio:** De tamaño compacto a comparación del resto de las baterías (8.5 cm^3), ésta producen tres veces más que las pilas alcalinas, considerando tamaños equivalentes y poseen también mayor voltaje inicial que éstas (3 volts contra 1.5 V de la mayoría de las alcalinas), pero presentan un costo mayor con respecto a las alcalinas.
- **Litio-Ion:** Puede recargarse hasta 1000 veces. Costo de inicio más caro. (Un óxido es un compuesto químico que contiene uno o varios átomos de oxígeno, presentando el oxígeno un estado de oxidación -2, y otros elementos. Los óxidos son muy comunes y variados en la corteza terrestre).

No se selecciona un tipo específico de batería, todo dependerá de las posibilidades de adquisición en el mercado local de las mismas, aunque se prefieran las de tipo recargable y de mayor capacidad de corriente, de esta forma la red durará más tiempo en funcionamiento. El costo de las baterías recargables es superior a las cotidianas y se requiere un equipo para cargarlas nuevamente, pero su ventaja es que pueden ser recargadas hasta 1000 veces dependiendo del material de que estén constituidas, lo que significaría a mediano plazo un ahorro económico en baterías y por otro lado se reduciría la cantidad de pilas desechadas contribuyendo a la no contaminación. En la figura 3.43 se muestran algunos tipos de baterías.

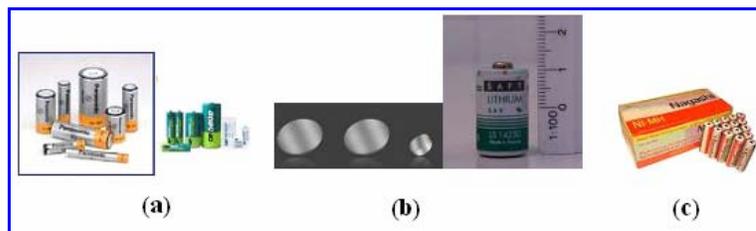


Figura 3.43. Diferentes tipos de baterías. a) Níquel-Cadmio (Ni-Cd) [67], b) Litio (Li) [65] y c) Níquel Metal Hydride (Ni-Mh) [66].

CAPÍTULO IV

TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES Y PROTOCOLOS.

4.1 Protocolos de comunicaciones.

Para compartir datos por la red es necesaria una comunicación previa, y esta comunicación se rige a través de ciertos protocolos que, bajo su cumplimiento, permiten la comunicación. Un protocolo de comunicaciones es una serie de normas que usan los equipos informáticos para gestionar sus diálogos en los intercambios de información. Dos equipos de diferentes marcas ó fabricantes se pueden comunicar sin problemas en el caso en que usen el mismo protocolo de comunicaciones.

En otras palabras, un protocolo de comunicaciones es el conjunto de reglas que especifican el intercambio de datos u órdenes durante la comunicación entre dos o más equipos ó entre las entidades que forman parte de una red.

4.1.1 Protocolos de comunicaciones seriales.

Son las reglas establecidas para realizar el correcto intercambio de información entre dos o más dispositivos, u otros equipos; empleando comunicación de tipo serial. Existen dispositivos tales como: memorias EEPROM, sensores digitales, RTC, módulos de radio, etc., que manejan determinados protocolos seriales tales como:

RS232 (Niveles TTL).	I ² C.	SPI
1-Wire.	USB	Otros.

En éste proyecto de investigación no se describen ninguno de ellos, debido a que no se utilizan en el mismo, sin embargo el microcontrolador seleccionado tiene dos módulos de comunicaciones seriales: el EUSART (Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) que es compatible con el RS232 (Niveles TTL) y el MSSP (Master Synchronous Serial Port) configurable para I²C ó SPI con diferentes modos de configuración, que se pueden utilizar para manejar algunos equipos o sensores digitales que utilicen alguno de los protocolos antes mencionados.

4.1.2 Protocolos de comunicaciones para redes inalámbricas.

Son los protocolos diseñados para comunicar dos o más equipos de manera inalámbrica.

4.1.2.1 WLAN.

Tradicionalmente, las redes LAN corporativas se han construido utilizando como medio de transmisión el cable de cobre. Debido a diversos problemas se desarrollaron las redes WLAN (Wireless Local Area Network), cuyo estándar más conocido es IEEE 802.11 en cualquiera de sus variantes, ver tabla 4.1.

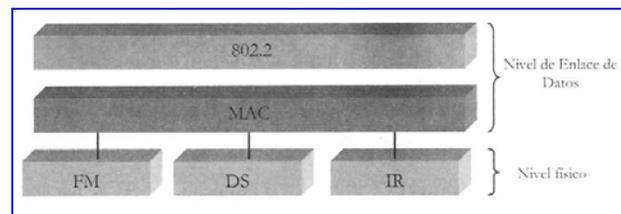
4.1.2.1.1 Pila de protocolos.

El estándar IEEE 802.11, como cualquier protocolo 802.x, especifica los requisitos para el nivel físico y el subnivel de MAC (figura 4.1).

Como se puede ver, existen tres niveles físicos: FHSS en la banda de 2,4 GHz, DSSS también en la banda de 2,4 GHz y el último en la banda infrarroja. Sobre el nivel físico, se encuentra el nivel de MAC, encargado de funciones tales como la fragmentación, el arbitrio del acceso al medio compartido o la retransmisión de paquetes.

Tabla 4.1. Estándares de la familia IEEE 802.11. Fuente: Tomada de referencia [13]

Nombre	Descripción
802.11a	5 GHz OFDM PHY
802.11b	2,4 GHz CCK PHY
802.11c	Bridging 802.11
802.11d	Itinerancia internacional.
802.11e	QoS
802.11f	Interacción entre puntos de acceso.
802.11g	2,4 GHz OFDM PHY
802.11h	Anexos regulatorios a 5 GHz.
802.11i	Seguridad.
802.11j	Especificaciones japonesas a 5 GHz.
802.11k	Medida de recursos de radio.
802.11m	Mantenimiento.
802.11n	PHY de gran capacidad.

**Figura 4.1.** Pila de protocolos IEEE 802.11. [13]

4.1.2.2 WPAN.

El término WPAN (Wireless Personal Area Network) engloba a las redes cuyo rango de acción se limita unos pocos metros y en los que el soporte físico de la información lo constituyen las ondas de radio. Por su radio de acción, estas tecnologías no resultan adecuadas para su aplicación en redes de área local (salvo en casos muy concretos) y se suelen utilizar en entornos más reducidos y acotados.

En la actualidad las WPAN están abriendo nuevos segmentos del mercado que, hasta hace poco, tenían escasa penetración tecnológica pues las opciones que existían estaban muy limitadas. Esta apertura de nuevos frentes ha sido notable, sobre todo, en entornos de corta distancia y bajas velocidades de transmisión (ver figura 4.2). Cada

una de estas aplicaciones presenta unas necesidades diferentes del sistema de comunicación.

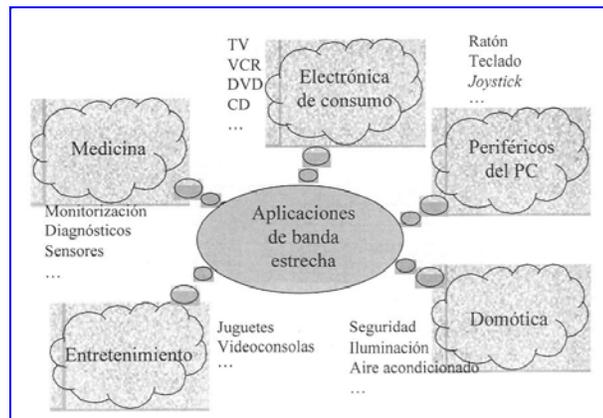


Figura 4.2. Nuevos mercados de las WPAN. [13]

Con el fin de soportar este tipo de comunicaciones se ha desarrollado un amplio abanico de tecnologías, entre las que se destacan los estándares IEEE 802.15 (Bluetooth, WiMedia y Zigbee), HomeRF, IrDA y RFID.

4.1.2.2.1 WiMedia/UWB

Algunas aplicaciones, como las comunicaciones multimedia o la transmisión de imágenes digitales de alta resolución, requieren anchos de banda y calidad de servicio con mayor grado de garantía del que Bluetooth es capaz de ofrecer. En estos casos, la solución es WiMedia, estandarizado por el IEEE como 802.15.3. En la figura 4.3 se muestra la supertrama piconet IEEE 802.15.3 en la que se basa WiMedia.

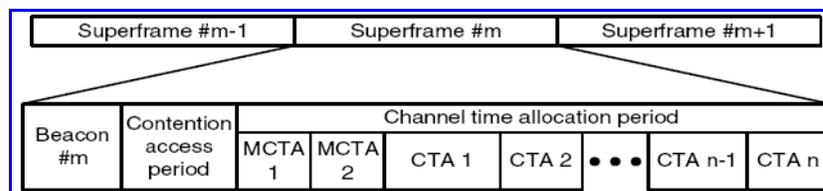


Figura 4.3. Supertrama piconet IEEE 802.15.3. [25]

La versión actual de WiMedia actúa en la misma banda de frecuencias que Bluetooth (2,4 GHz) y permite seleccionar cinco tasas binarias: 11 Mbps, 22 Mbps, 33 Mbps, 44 Mbps y 55 Mbps. La potencia transmitida es, aproximadamente, de 8 dBm y el alcance de las comunicaciones está comprendido entre 5 y 55 m. Además, proporciona características como el control de potencia, seguridad, coexistencia con Bluetooth y WLAN y QoS, que la hacen ideal para el transporte multimedia de alta calidad, la interconexión de dispositivos y las redes ad-hoc.

Para próximas versiones el nivel físico de WiMedia se sustituirá por *Ultrawideband*, de mucha mayor capacidad. *Ultrawideband* es una red inalámbrica de alta velocidad y bajo consumo de potencia recogida en el estándar 802.15.3 para redes WPAN. Sus principales características son gran ancho de banda, topología dinámica, calidad de servicio, gestión de potencia y distancias típicas que cubre son unos 10 m.

4.1.2.2.1.1 Tecnología.

UWB es una tecnología basada en la transmisión de pulsos muy cortos (ver figura 4.4). La consecuencia principal es que es la expansión del ancho de banda de la señal y la disminución de la densidad espectral de potencia permiten la coexistencia con otro tipo de tecnologías de radio. Los principales beneficios de UWB en comparación con otras tecnologías son su mayor robustez frente a la propagación multicamino, menor potencia de transmisión, localización de dispositivos y flexibilidad en la relación distancia y ancho de banda. Sin embargo, requieren de antenas de gran ancho de banda y relojes muy precisos.

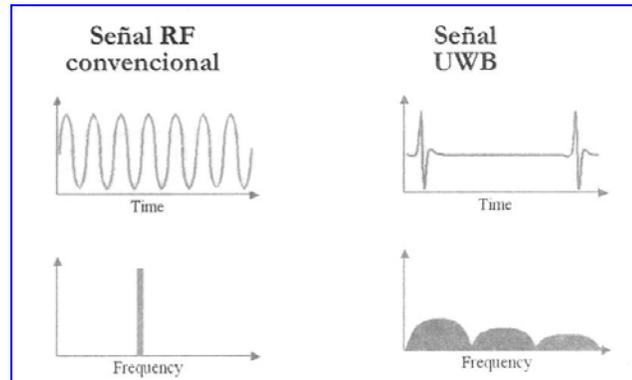


Figura 4.4. Transmisión UWB. [13]

4.1.2.2.2 Zigbee.

En algunas aplicaciones en las que participan pequeños dispositivos como sencillos sensores o actuadores no suelen ser necesarios altas tasas binarias. Estos sistemas se caracterizan por comunicaciones esporádicas en las que el mayor volumen de información apenas supera unas pocas decenas o centenas de kilobits por segundo y por requerir un alcance limitado a pocas decenas de metros, lo que facilita la portabilidad de la red y la instalación de este tipo de dispositivos. En estos entornos, por otra parte, resulta más crítico minimizar costes, tamaño y consumo de potencia de los dispositivos.

El estándar IEEE 802.15.4, más conocido como Zigbee, es una especificación para aplicaciones de control remoto de dispositivos, juguetes y, en general, cualquier equipo que requiere un bajo coste y un bajo consumo de potencia en entornos reducidos como un hogar. Zigbee puede trabajar a tres bandas de frecuencia diferentes: 868 MHz, 915 MHz y 2,4 GHz. Las características generales de Zigbee están recogidas en la tabla 4.2 y en la tabla 4.3 algunos datos referentes a los datos, tipos de modulaciones y frecuencias de transmisión.

Tabla 4.2. Características básicas de Zigbee. Fuente: Tomada de referencia [13].

Velocidad de transmisión	250 kbps (2,4 GHz), 40 kbps (915 MHz) y 20 kbps (868 MHz).
Acceso al medio	CSMA-CA.
Topologías	Estrella, punto a punto, mallada.
Espacio de direcciones	64 bits.
Alcance	Entre 5 y 500 m dependiendo del entorno.
Seguridad	128 AES

Tabla 4.3. Bandas de frecuencias y tasas de datos. Fuente: Referencia [26].

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868–868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902–928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (optional)	868–868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Orthogonal
	902–928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal
2450	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

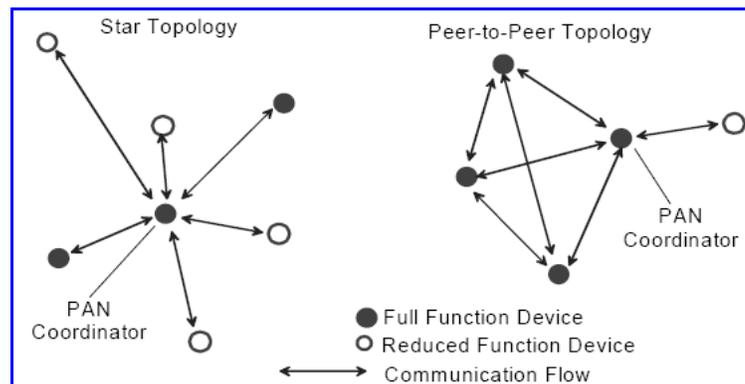
4.1.2.2.1 Topología de red.

Zigbee diferencia entre dispositivos completamente funcionales (FFD, Full Function Device) y dispositivos parcialmente funcionales (RFD, Reduced Function Device). Las características de uno y otro se recogen en la tabla 4.4.

En una red Zigbee, al menos, debe existir un dispositivo FFD que haga las veces de coordinador de red y, el resto, suelen ser RFD, mucho más sencillo, ya que, de este modo, se reduce el coste del sistema. La figura 4.5 muestra dos ejemplos de las topologías de red.

Tabla 4.4. Características de los dispositivos Zigbee. Fuente: Referencia [13].

FFD	Funcionamiento en cualquier topología.
	Puede ser el coordinador de la red.
	Capacidad para comunicarse con cualquier otro dispositivo.
RFD	Únicamente en topologías en estrella.
	No puede ser el coordinador de la red.
	Sólo se puede comunicar con el coordinador de la red.
	Implementación sencilla.

**Figura 4.5.** Ejemplos de topologías Star y Peer-to-Peer. [26]

4.1.2.2.2 Arquitectura.

La arquitectura del IEEE 802.15.4 es definida en términos de números de bloques en orden para simplificar el estándar. Estos bloques son llamados capas. Cada capa es responsable de una parte del estándar y ofrece servicios a las capas superiores. El diseño de los bloques está basado en el sistema abierto de interconexión (OSI), modelo de 7 capas.

Un dispositivo LR-WPAN (Low-rate Wireless Personal Area Network) comprende una PHY (Physical Layer), la cual contiene un transceptor de radio frecuencia (RF) con un mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa MAC

(Medium Access Control) que provee acceso al canal físico para todo tipo de transferencia. La figura 4.6 muestra estos bloques en una representación gráfica.

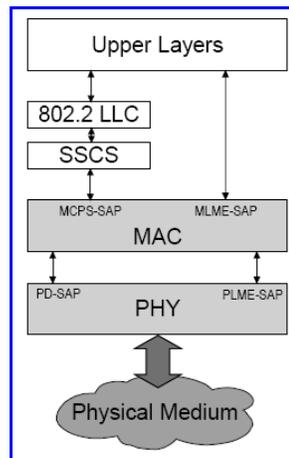


Figura 4.6. Arquitectura de un dispositivo LR-WPAN. [26]

Las capas superiores, mostradas en la figura anterior, consisten en una capa de red, la cual proporciona configuración de red, manipulación, y asignación de ruta a los mensajes, y una capa de aplicación, la cual provee la función prevista del dispositivo.

4.1.2.2.3 Pila de protocolos.

Una red WSN, por su propia naturaleza, presenta unas características diferentes que la distinguen del resto de redes de comunicaciones. Sin embargo, las diferencias más importantes se encuentran a nivel MAC. El nivel de acceso al medio hace referencia al modo en que los nodos emplean el medio de transmisión y a cómo se lo reparten en el tiempo. Los métodos tradicionales, caracterizados por una asignación fija, no resultan adecuados en redes de sensores en las que la topología de la red pudiera no estar bien definida. Por el contrario, se prefieren mecanismos de MAC dinámicos, en los que los nodos envían información bajo demanda y, en algunos casos, comprueban previamente si algún otro nodo está utilizando el medio.

En primer lugar, se encuentra un patrón de tráfico de periódico caracterizado por una tasa binaria definida, como ocurre en el caso de los sensores. El nivel MAC emplea tramas *beacon*, que se encargan de comprobar si tiene información pendiente de ser transmitida, si es así, la envía y vuelve a su estado normal.

Otro tipo de tráfico es el tráfico intermitente, en el que el dispositivo únicamente envía información cuando lo necesita, estando el resto del tiempo desconectado y ahorrando energía. Finalmente, se tiene el tráfico repetitivo que requiere de la asignación de recursos durante un tiempo muy corto con la garantía de que dichos recursos se asignarán. En cualquier caso, independientemente de la naturaleza de la fuente de tráfico, los destinos y, por tanto, las rutas son fijas al igual que el volumen de información transmitida y la latencia de la red. La figura 4.7 muestra en diagrama de bloques las capas o pilas de protocolo.

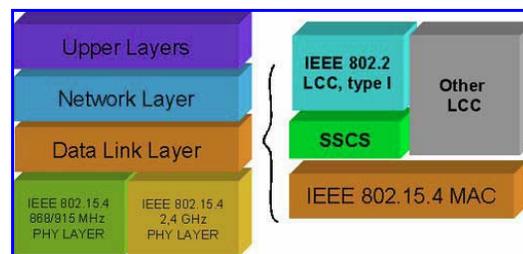


Figura 4.7. Capas del protocolo ZigBee. [31]

4.1.2.2.3 HomeRF.

HomeRF es una especificación para redes inalámbricas que proporciona interconexión entre productos electrónicos de consumo dentro del hogar (con un alcance de unos 50 m) y que opera en la banda de los 2,4 GHz. Soporta comunicaciones de voz y datos mediante el empleo del protocolo SWAP (Shared Wireless Access Protocol). Actualmente, se está definiendo la próxima especificación SWAP que se espera que permita incrementar la velocidad de transmisión a los 10 Mbps e incluso más.

4.1.3 Protocolo de comunicación de radio diseñado.

El protocolo de comunicación de radio establecerá las reglas de cómo se comunicarán los nodos sensores con el nodo coordinador y este último con el nivel de control, sin que se produzca conflictos entre ellos.

Debido a que los módulos de radio carecen de un protocolo se debe diseñar uno propio. Se utilizó como base el protocolo orientado a bits con transmisión serie asíncrona. Este protocolo es muy sencillo, consta de ocho bits de direcciones y cuatro bits de datos (1 Nibble), tal como se muestra en la figura 4.8; para la transmisión de un byte se transmitirán dos tramas seguidas con la misma dirección (ver figura 4.9). Para manejar éste protocolo se utilizará el codificador HT12E del fabricante Holtek para la transmisión y el decodificador HT12D del mismo fabricante para la recepción. El microcontrolador se encargará de manejar el decodificador y el codificador para la correcta transmisión y recepción de los datos.



Figura 4.8. Formato de la trama. Fuente: Propia.

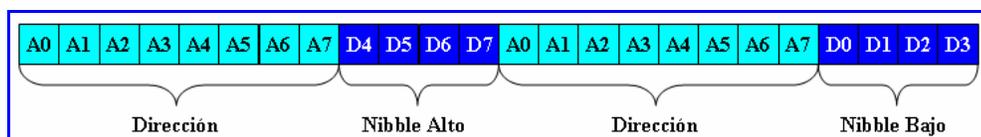


Figura 4.9. Formato de la trama para la transmisión o recepción de un byte de información. Fuente: Propia.

El HT12E posee un pin para la habilitar la transmisión, es decir, al colocar ese pin a nivel bajo por un pequeño tiempo (depende de la frecuencia de trabajo),

comienza a transmitir la trama, mientras que el HT12D posee un pin de validación de la transmisión, es decir, una vez recibida la trama y comprobada que la dirección es la misma del receptor, éste pone en nivel alto un pin para indicar que la transmisión es válida y se pueden leer los 4 bits de datos transmitidos. Aunque la mayoría de los protocolos que manejan bits usan control de detección de error usando control de paridad, no se usa en este proyecto. En éste será limitado por la comparación de los códigos, el almacenado en el microcontrolador y el recibido, si el resultado de la operación es exitoso nos indica que son los mismos, entonces el código recibido se encuentra exento de errores y se acepta como un dato válido para procesarlo.

El codificador HT12E trabajará a una frecuencia de 3 kHz, por lo que se obtiene una velocidad de transmisión en el aire de 1000 bps y el decodificador HT12D a una frecuencia de 150 kHz para poder decodificar correctamente la información, según el datasheet del fabricante. Ver anexo G.

Con respecto al control de flujos de datos transmitidos y recibidos entre los nodos, pueden ocurrir tres eventos:

- En condición normal, el nodo coordinador envía un dato sin error de comunicación y el nodo sensor lo procesa y le devuelve una respuesta normal.
- En condición anormal, el nodo coordinador no recibe un dato, no hay devolución de respuesta. El programa del NC eventualmente procesará una condición de tiempo excedido para recibir el dato.
- Si el nodo coordinador recibe la data incompleta o detecta un error (código erróneo), él pedirá al nodo sensor la retransmisión de la información según sea la naturaleza del error.

Y respecto al control de flujos de datos transmitidos y recibidos entre el nodo coordinador y el nivel de control, pueden ocurrir tres eventos:

- En condición normal, el nodo coordinador envía un dato sin error de comunicación y el nivel de control lo procesa y espera la transmisión de la información correspondiente a un nodo sensor.
- En condición normal, el nodo coordinador recibe un dato de respuesta. El programa del NC verificará si se trata de una retransmisión (la cual ejecutará) o de una transmisión completada.
- En condición anormal, el nodo coordinador o el nivel de control no recibe un dato, no hay devolución de respuesta. Los programas de los microcontroladores de ambos equipos (equipo de visualización, localizado en el nivel de control, y nodo coordinador) eventualmente procesarán una condición de tiempo excedido para recibir el dato.

Estos tres eventos y los tres anteriores serán controlados por medio de software implementado en cada microcontrolador, tanto el de los nodos sensores como el del nodo coordinador y del equipo de visualización.

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran los esquemáticos de los protocolos de comunicaciones diseñados para establecer el intercambio de información entre el nodo coordinador y los nodos sensores y el nodo coordinador y el nivel de control respectivamente.

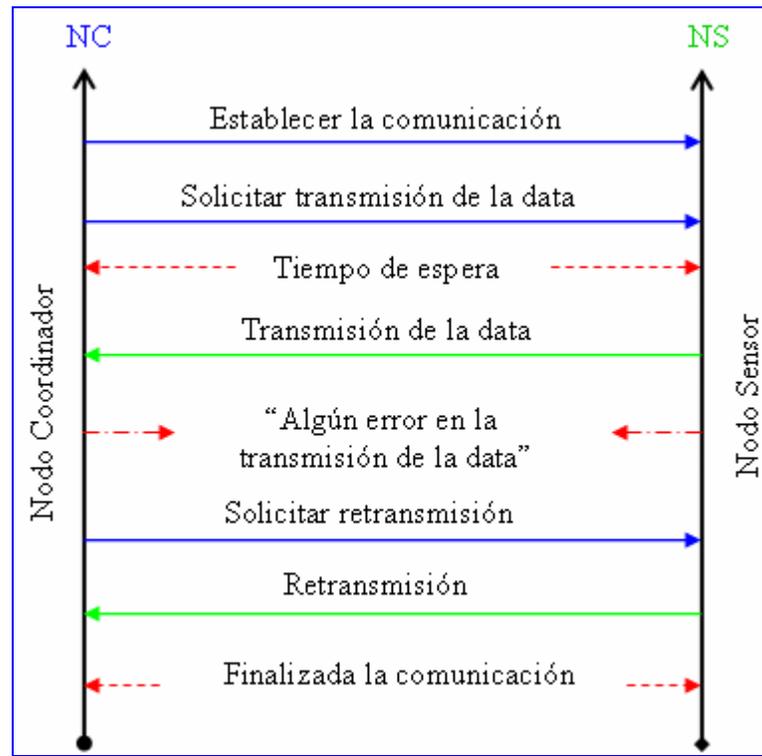


Figura 4.10. Esquema del protocolo de comunicaciones diseñado para la parte de radiocomunicación. Fuente: Propia.

El nodo coordinador inicia el establecimiento de la comunicación con un nodo sensor, terminada ésta, procede a la transmisión de la data al nivel de control, si recibe una condición de retransmisión procederá a la misma, en cambio, de recibir una de transmisión completada pasa al siguiente NS y así sucesivamente hasta terminar con el último. En caso de que no se establezca la comunicación en un tiempo predeterminado, se intentará de nuevo y si a la tercera vez no hay respuesta se realizará el proceso con otro nodo sensor. Si por alguna razón se produce un error en la transmisión de la data, el NC solicitará la retransmisión de la misma.

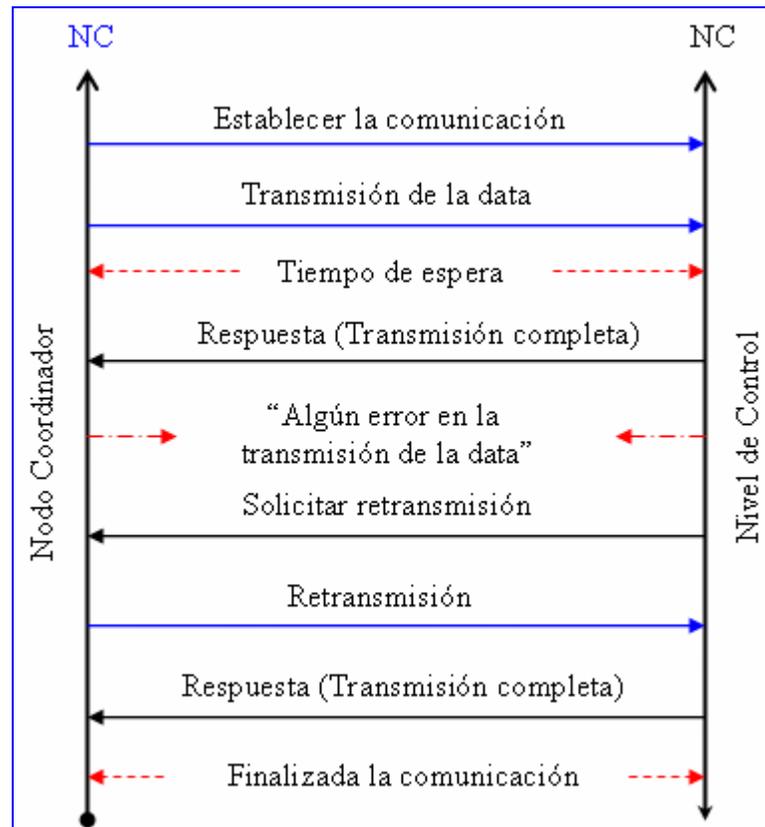


Figura 4.11. Esquema del protocolo de comunicaciones diseñado para la parte de radiocomunicación. Fuente: Propia.

Una vez terminada la comunicación con el último nodo sensor y la transmisión de la data al nivel de control, mediante un equipo de comunicación para grandes distancias (si la distancia entre NC y equipo de monitoreo es menor de 100 m no se requiere de este equipo, ya que se utilizarían los mismos módulos de radio que utilizan los nodos), el nodo coordinador pasará ha estado de bajo consumo por un tiempo establecido (15 minutos) y cumplido éste procederá nuevamente a la solicitud de la data a todos los nodos sensores, es decir, se repite nuevamente el ciclo.

CAPÍTULO V

CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.

5.1 Configuración del Nodo Sensor.

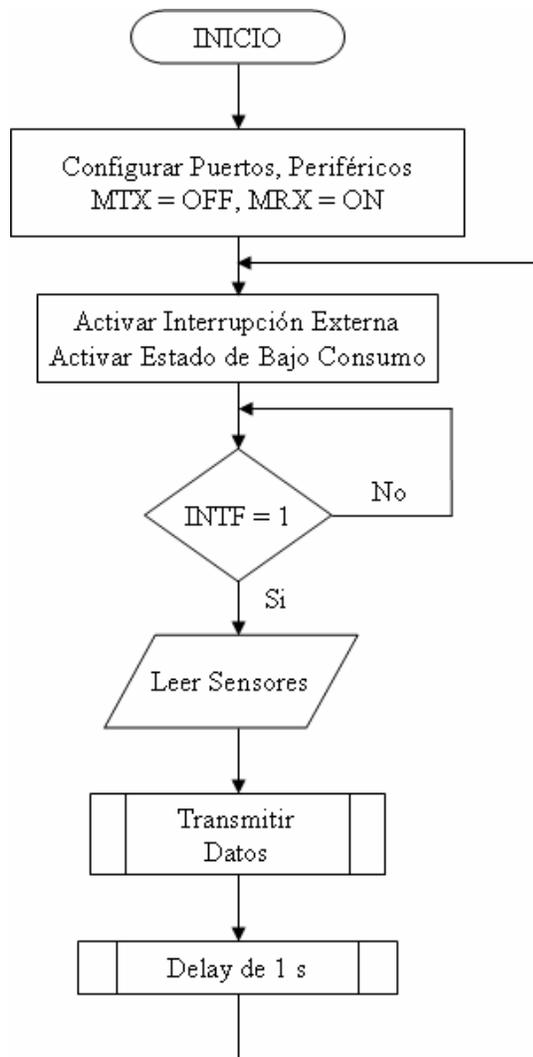
El nodo sensor está constituido por los siguientes dispositivos y componentes electrónicos (ver figura 3.3):

- Un microcontrolador PIC16F886 como procesador digital de señales.
- Un sensor de temperatura LM35Z.
- Un sensor de humedad HCH1000-001.
- Un sensor de iluminancia BH1603.
- Un SPDT switch RF referencia μ PD5713TK
- Una antena omnidireccional referencia ANT-433-PW-LP.
- Un receptor de radio referencia MO-RX3400 (operando a 433.92 MHz).
- Un transmisor de radio referencia MO-SAWR (operando a 433.92 MHz).
- Un decodificador para control remoto referencia HT12D.
- Un codificador para control remoto referencia HT12E.
- Un relé de 5 V_{DC} (voltaje de funcionamiento) tipo SPDT.
- Otros componentes pasivos y activos.

En la figura 5.1 se muestra las señales de entrada y salida del microcontrolador. El diagrama eléctrico del nodo sensor se puede apreciar en la figura 5.2. El microcontrolador que es el encargado de procesar las señales de los sensores para luego transmitirlos al nodo coordinador (una vez que éste se lo haya solicitado),

manejar el codificador, el decodificador, demás periféricos y dispositivos necesita ejecutar un programa almacenado en su memoria de programa para poder realizar las tareas encomendadas para el correcto funcionamiento del nodo sensor. El programa para la configuración del microcontrolador se encuentra en el anexo A y su diagrama de flujo se muestra a continuación:

Diagrama de Flujo del Programa del Microcontrolador del Nodo Sensor.



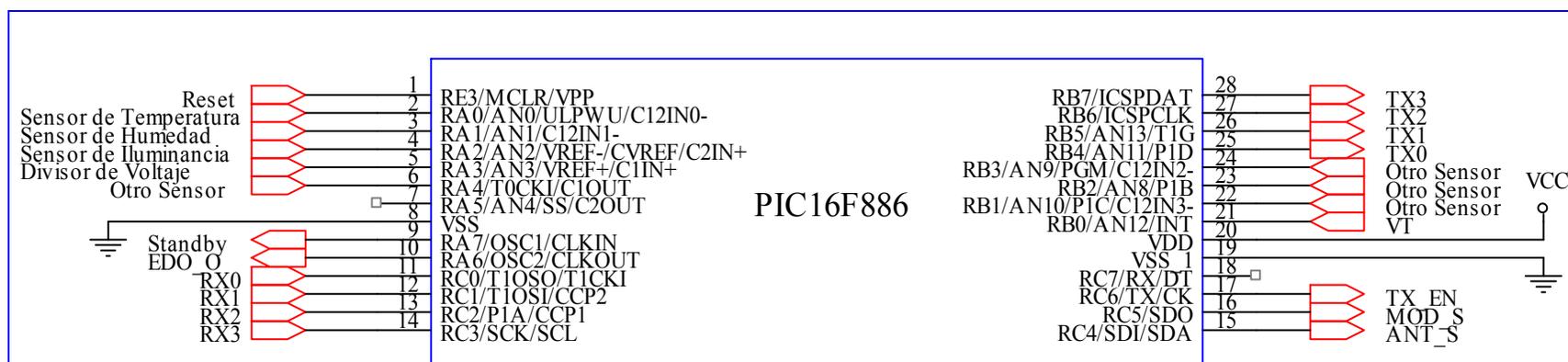


Figura 5.1. Microcontrolador del Nodo Sensor con sus señales de entrada y salida. Fuente: Propia.

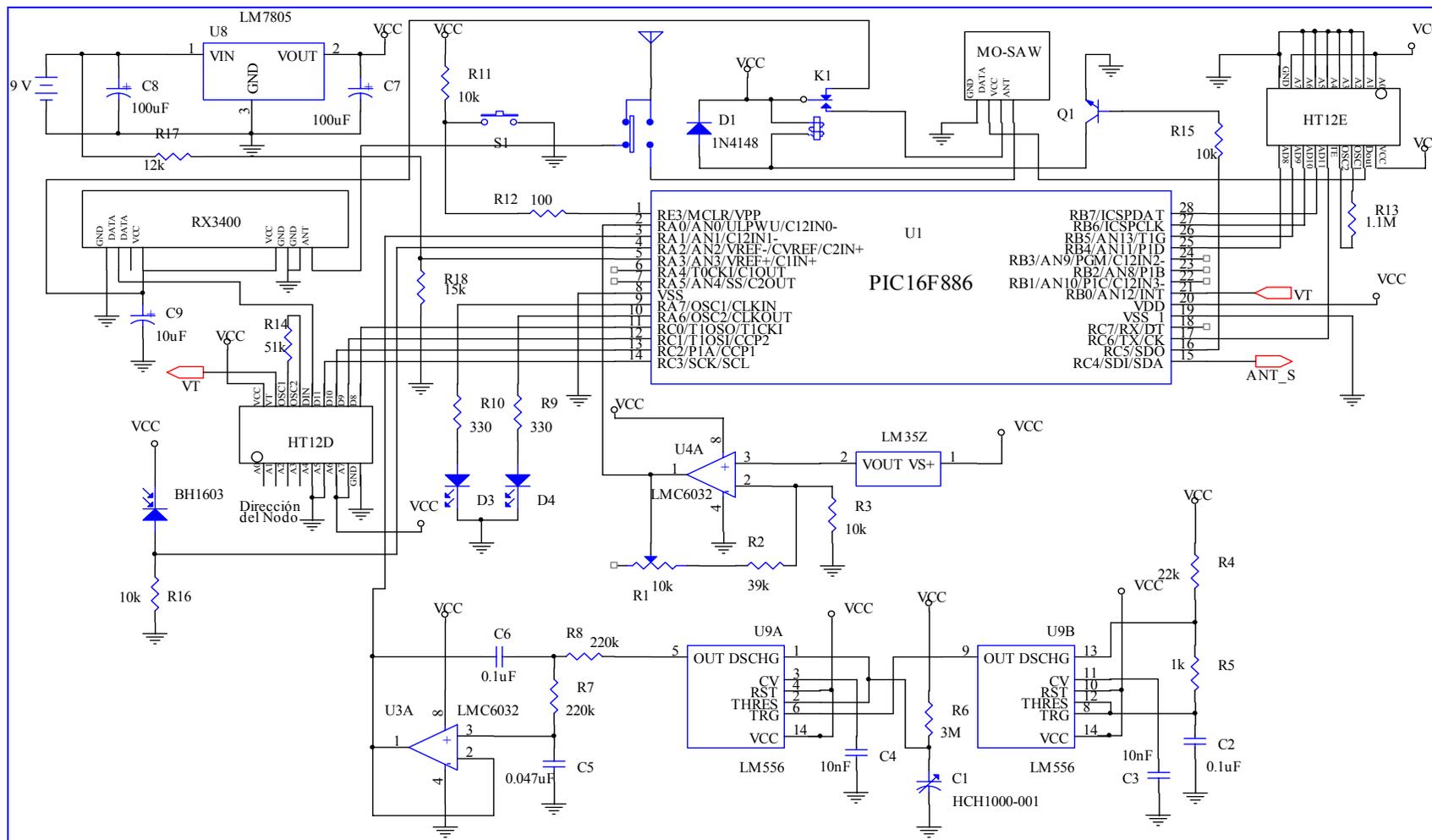


Figura 5.2. Diagrama eléctrico del Nodo Sensor. Fuente: Propia.

5.2 Configuración del Nodo Coordinador.

El nodo coordinador está constituido por los siguientes dispositivos y componentes electrónicos (ver figura 3.4):

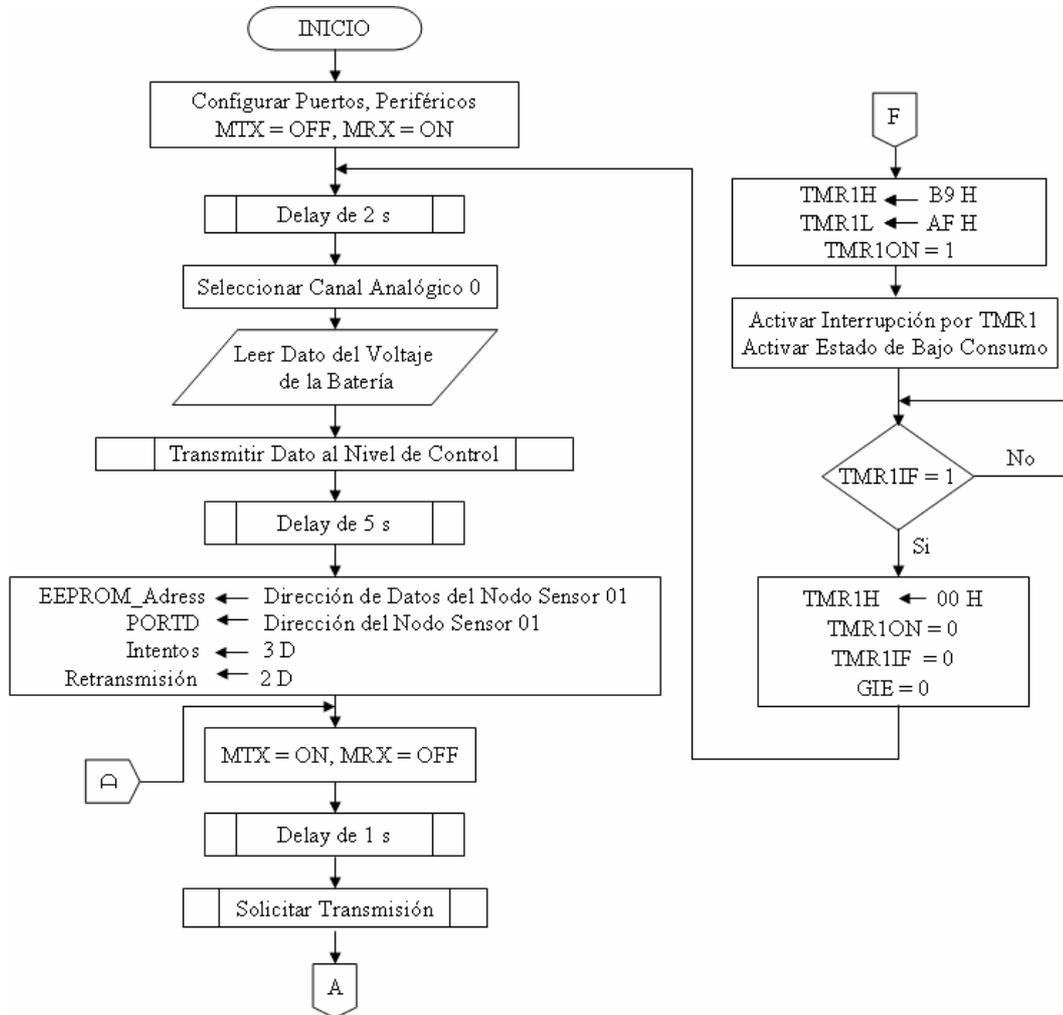
- Un microcontrolador PIC16F887 como procesador digital de señales.
- Un divisor de voltaje para determinar el voltaje de la batería.
- Un SPDT switch RF referencia μ PD5713TK
- Una antena omnidireccional referencia ANT-433-PW-LP.
- Un receptor de radio referencia MO-RX3400 (operando a 433.92 MHz).
- Un transmisor de radio referencia MO-SAWR (operando a 433.92 MHz).
- Un decodificador para control remoto referencia HT12D.
- Un codificador para control remoto referencia HT12E.
- Un relé de 5 V_{DC} (voltaje de funcionamiento) tipo SPDT.
- Una batería de 12 V.
- Otros componentes pasivos y activos.

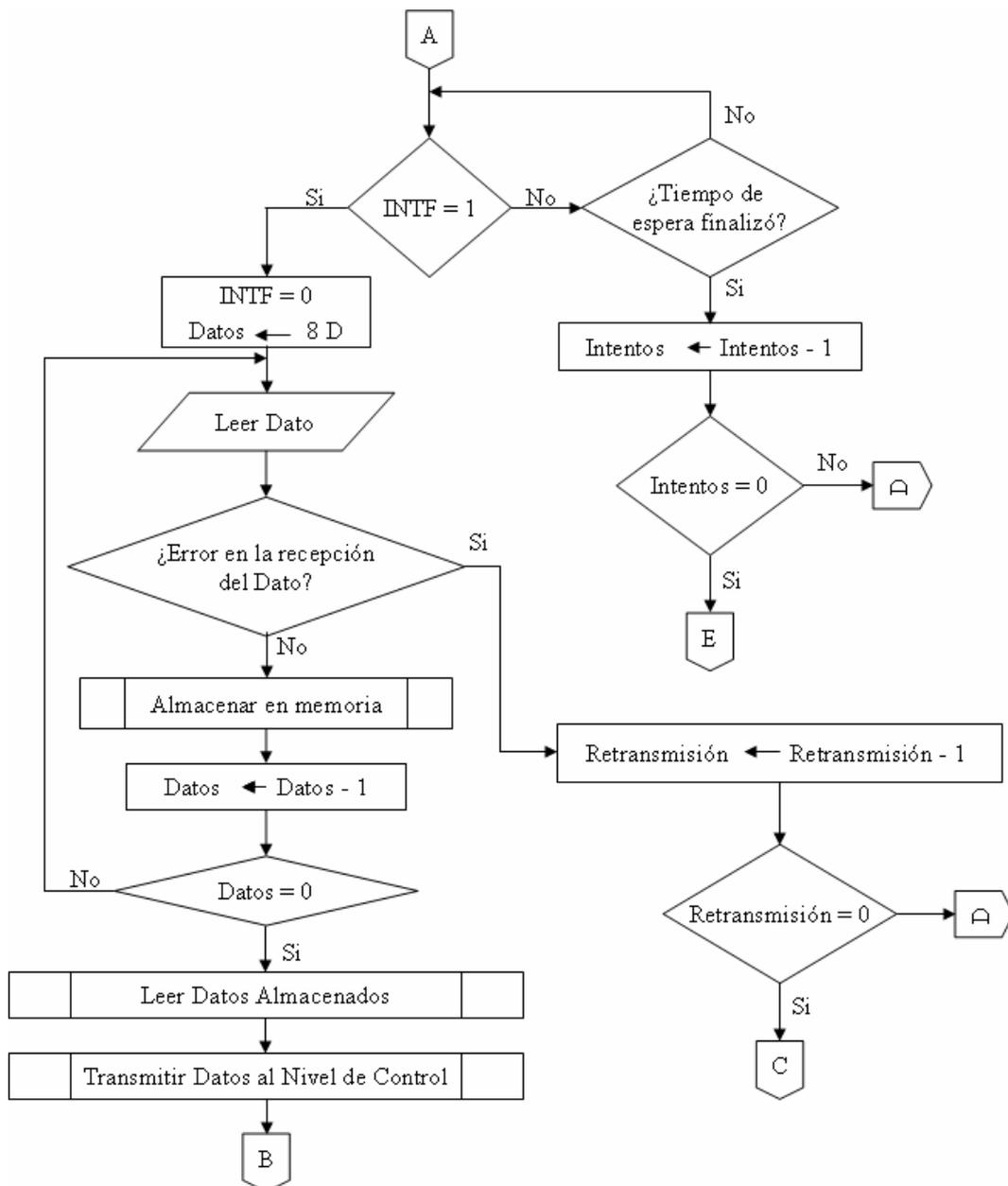
La principal diferencia entre el nodo sensor y el nodo coordinador está en que éste último no utiliza sensores, solamente usa el divisor de voltaje para determinar el voltaje de su batería y transmitir ese valor al nivel de control de tal manera que se pueda saber si el nivel de la batería está en valores normales, cercano al límite o bajo (para este caso se generaría una condición de alarma). En la figura 5.3 se muestra las señales de entrada y salida del microcontrolador. El diagrama eléctrico del nodo sensor se puede apreciar en la figura 5.4.

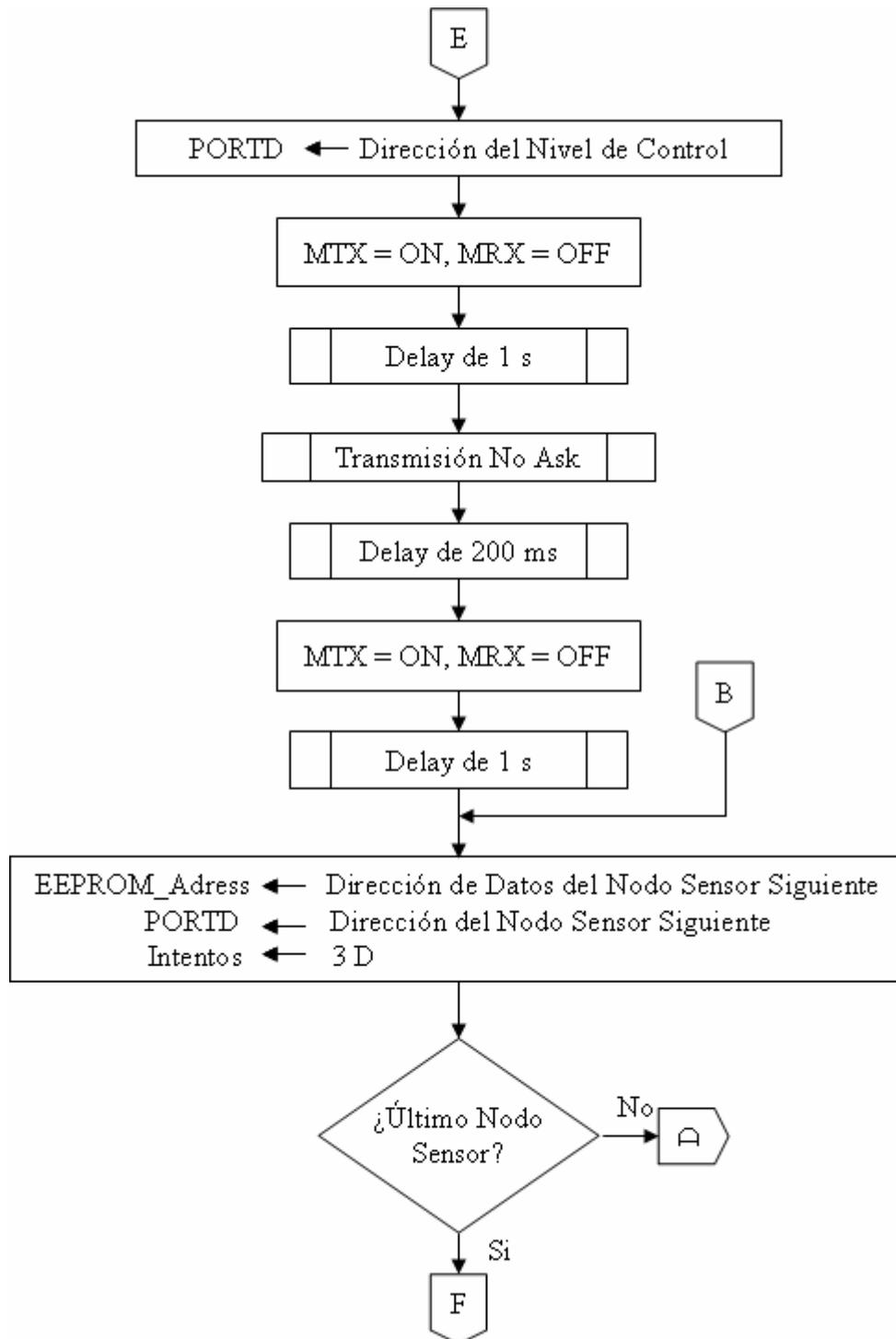
La configuración del programa del microcontrolador del nodo coordinador es parecida a la del nodo sensor, sin embargo las tareas que va a ejecutar son muchas más y diferentes, por lo tanto su programa no es igual al anterior.

El programa del microcontrolador del nodo coordinador se encuentra en el anexo B y su diagrama de flujo se muestra a continuación:

Diagrama de Flujos del Programa del Microcontrolador del Nodo Coordinador.







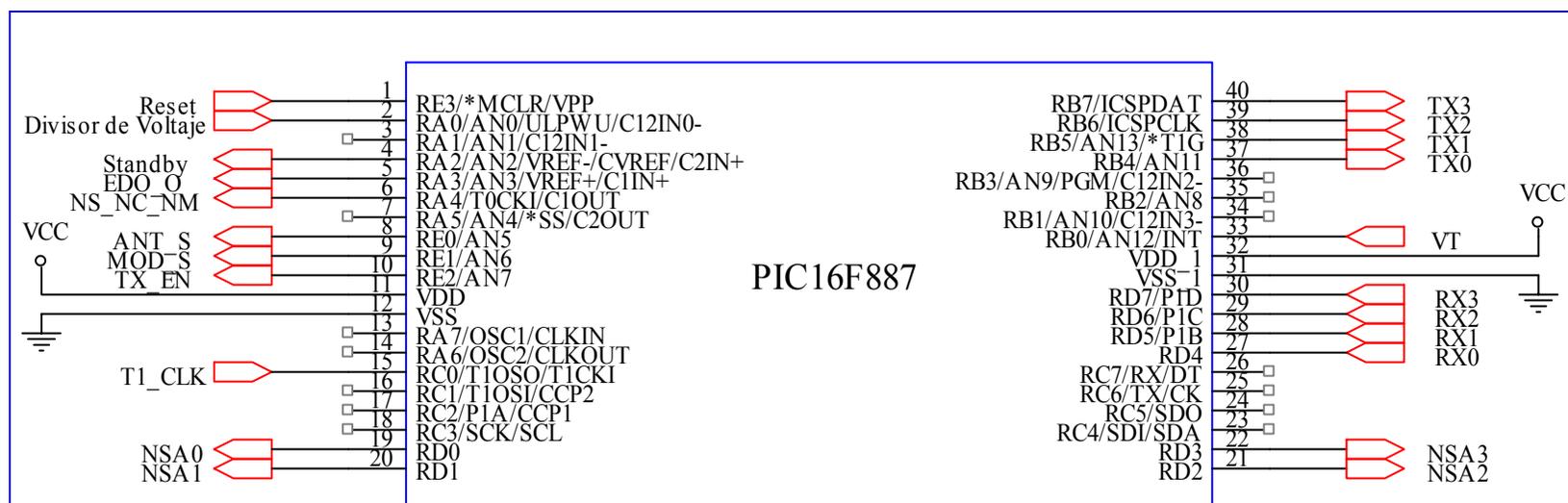


Figura 5.3. Esquema del microcontrolador del nodo coordinador con sus respectivas señales de entrada y salida. Fuente: Propia.

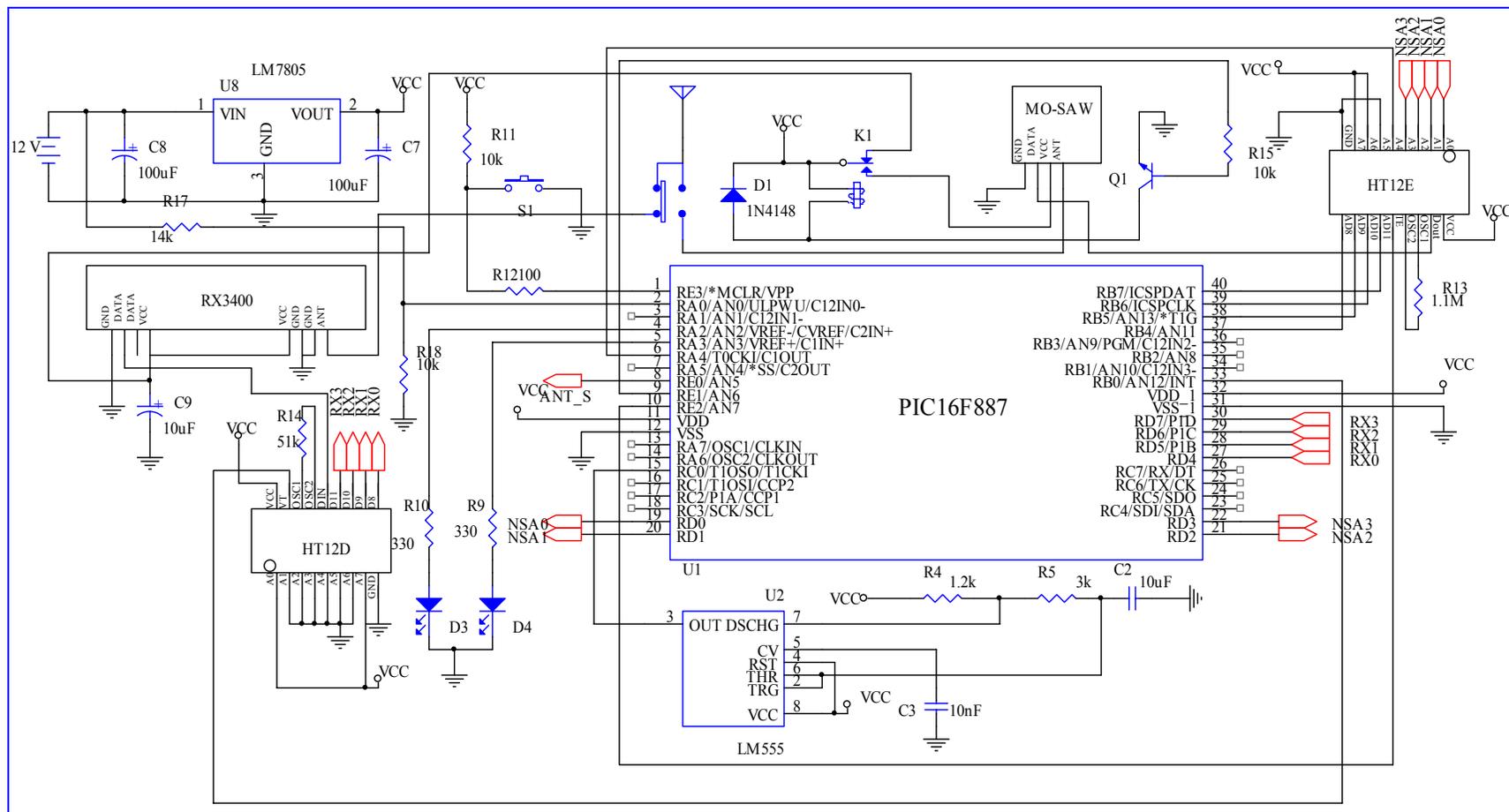


Figura 5.4. Diagrama eléctrico del circuito del nodo coordinador. Fuente: Propia.

5.3 Configuración del equipo de visualización ubicado en el nivel de control.

El equipo de visualización está constituido por los siguientes dispositivos y componentes electrónicos (ver figura 3.5):

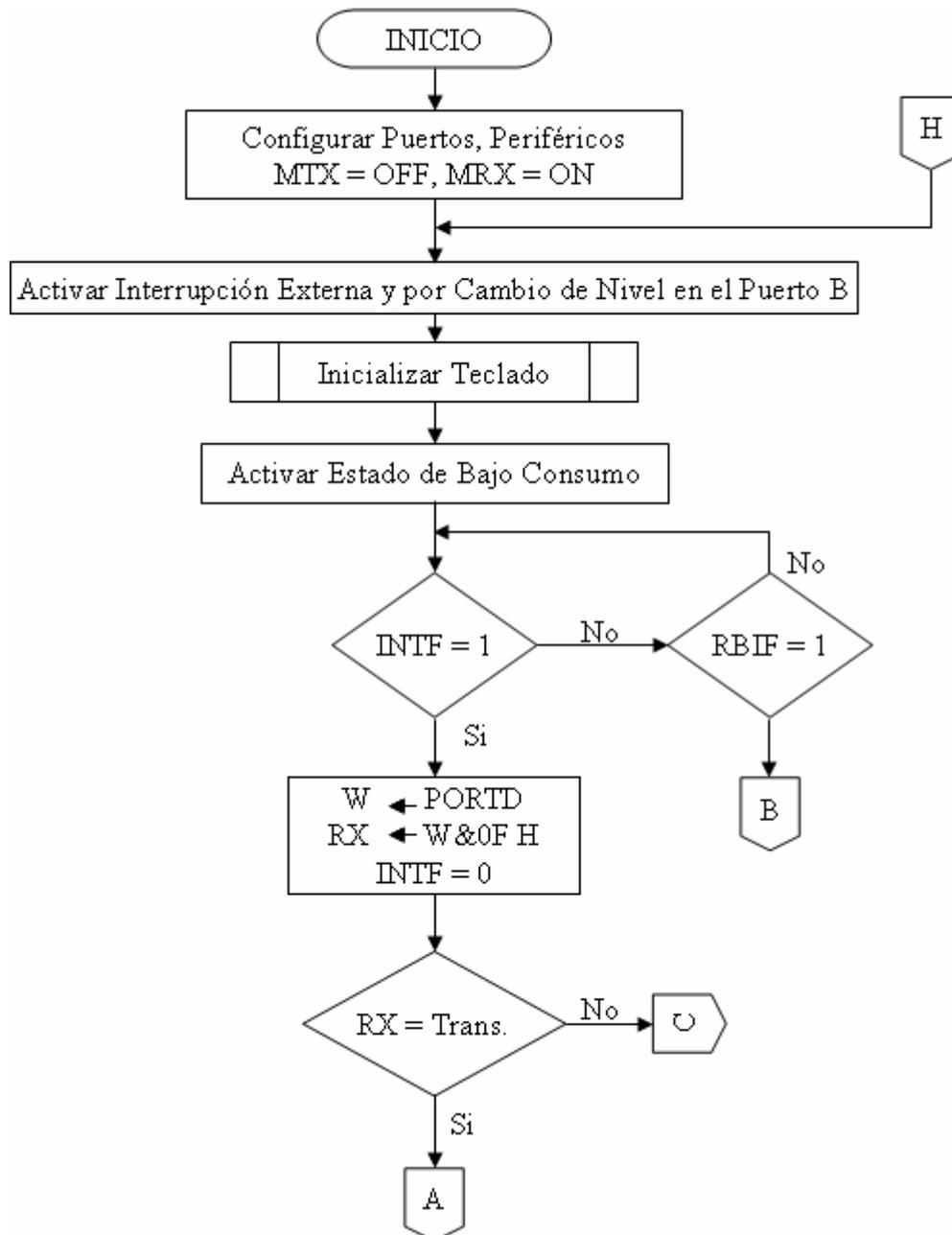
- Un microcontrolador PIC16F887 como procesador digital de señales.
- Un SPDT switch RF referencia μ PD5713TK
- Una antena omnidireccional referencia ANT-433-PW-LP.
- Un receptor de radio referencia MO-RX3400 (operando a 433.92 MHz).
- Un transmisor de radio referencia MO-SAWR (operando a 433.92 MHz).
- Un decodificador para control remoto referencia HT12D.
- Un codificador para control remoto referencia HT12E.
- Un relé de 5 V_{DC} (voltaje de funcionamiento) tipo SPDT.
- Un teclado 4X3.
- Una LCD (Liquid Crystal Display o Pantalla de Cristal Líquido) 4x16.
- LED para indicadores.
- Un buzzer para la condición de alarma.
- Una fuente de alimentación.
- Otros componentes pasivos y activos.

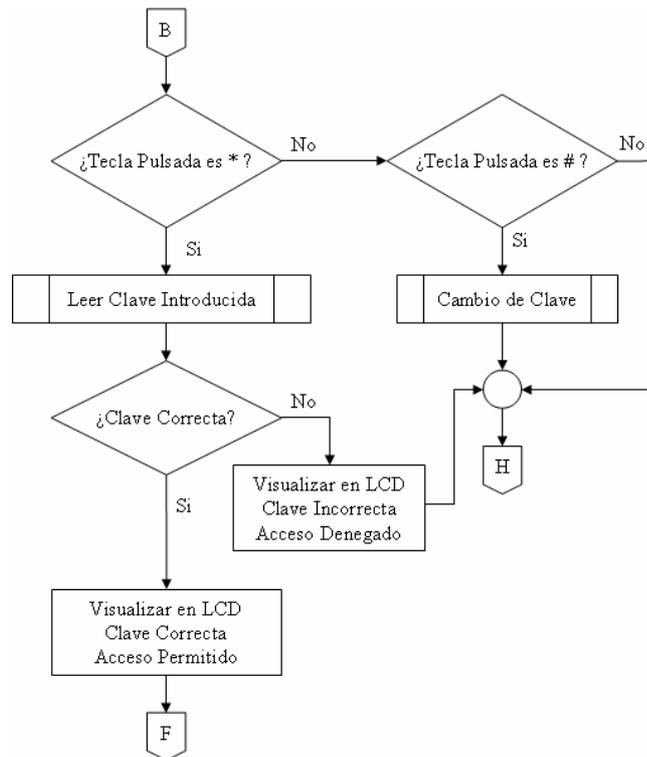
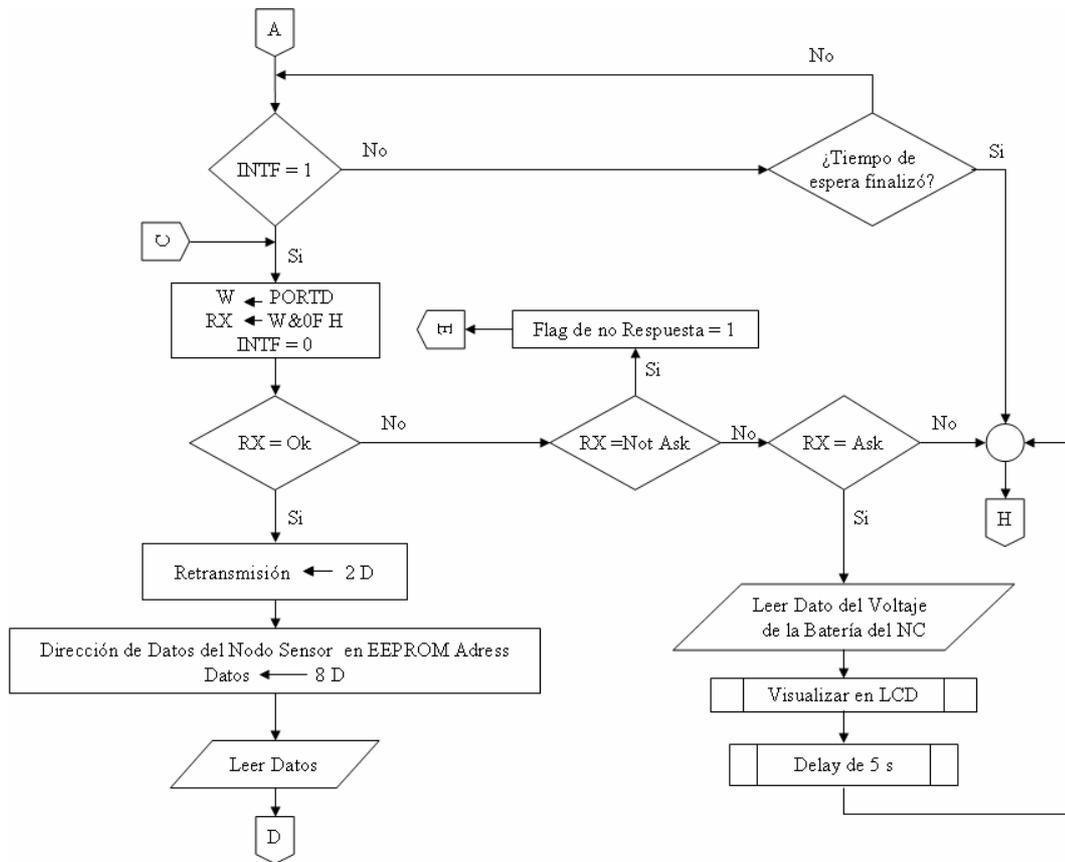
En la figura 5.5 se puede apreciar el diagrama eléctrico del microcontrolador del equipo de visualización con sus respectivas señales de entrada y salida, mientras que en la figura 5.6 se puede ver el diagrama eléctrico casi completo del circuito del equipo que va a estar localizado en el nivel de control, a excepción de la pantalla donde se visualizarán los datos y del teclado, cuyas configuraciones se muestran en las figuras 5.7 y 5.8 respectivamente.

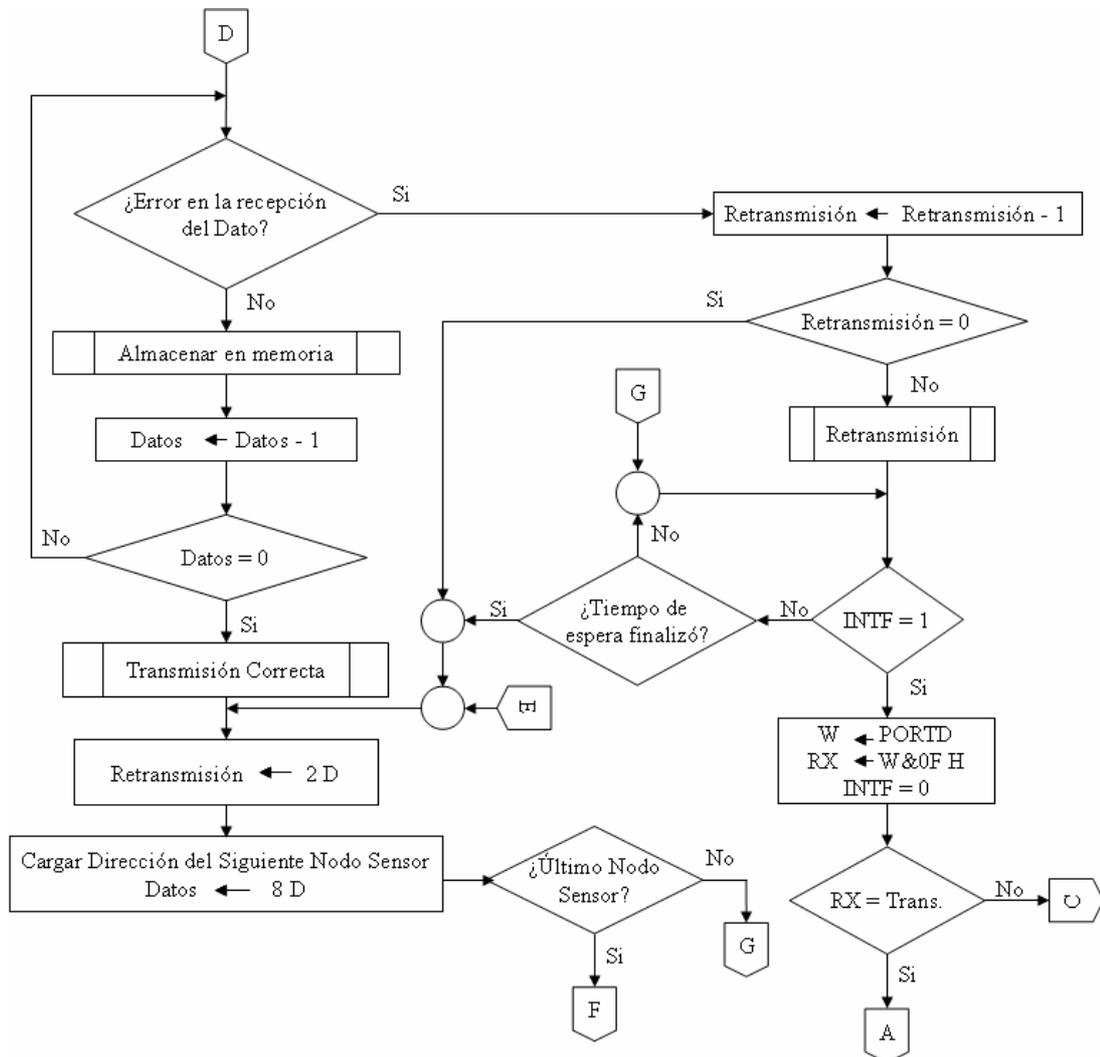
El programa que configura al microcontrolador del equipo de visualización o monitoreo y que va a ejecutar las instrucciones necesarias para la visualización de los datos en una LCD, el manejo de un teclado para la introducción de una

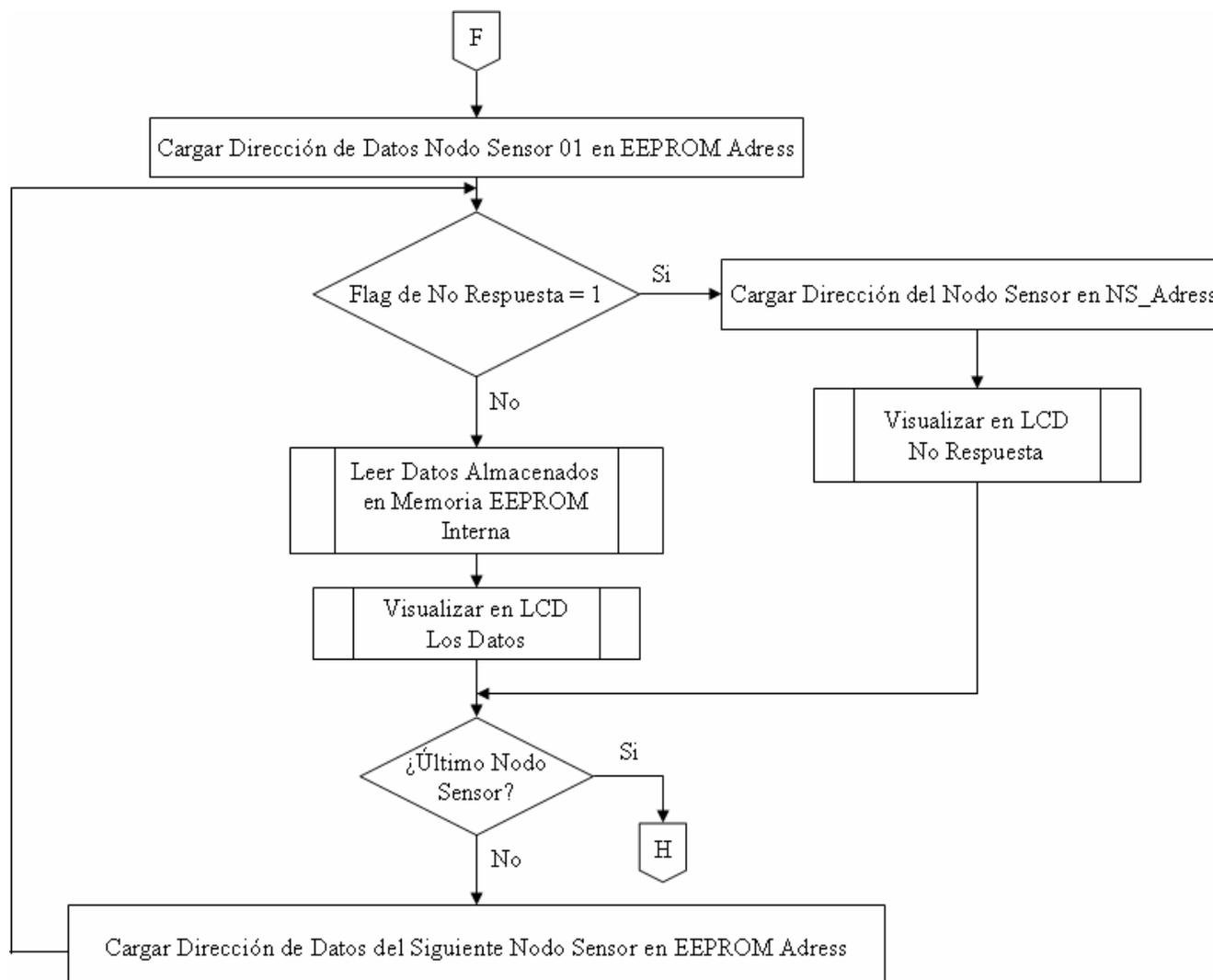
clave de acceso, entre otras tareas, se encuentra en el anexo C y su diagrama de flujo se muestra a continuación:

Diagrama de Flujo del Programa del Microcontrolador del Nivel de Control.









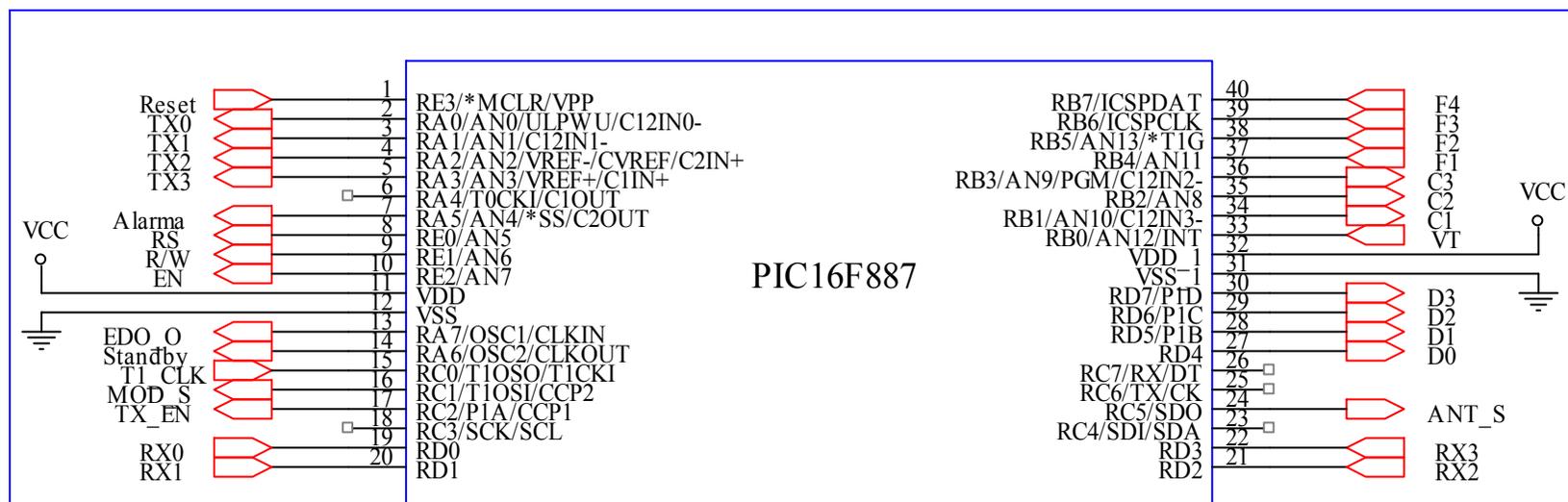


Figura 5.5. Esquema del microcontrolador del equipo de visualización o monitoreo donde se aprecian sus señales de entrada y salida.

Fuente: Propia.

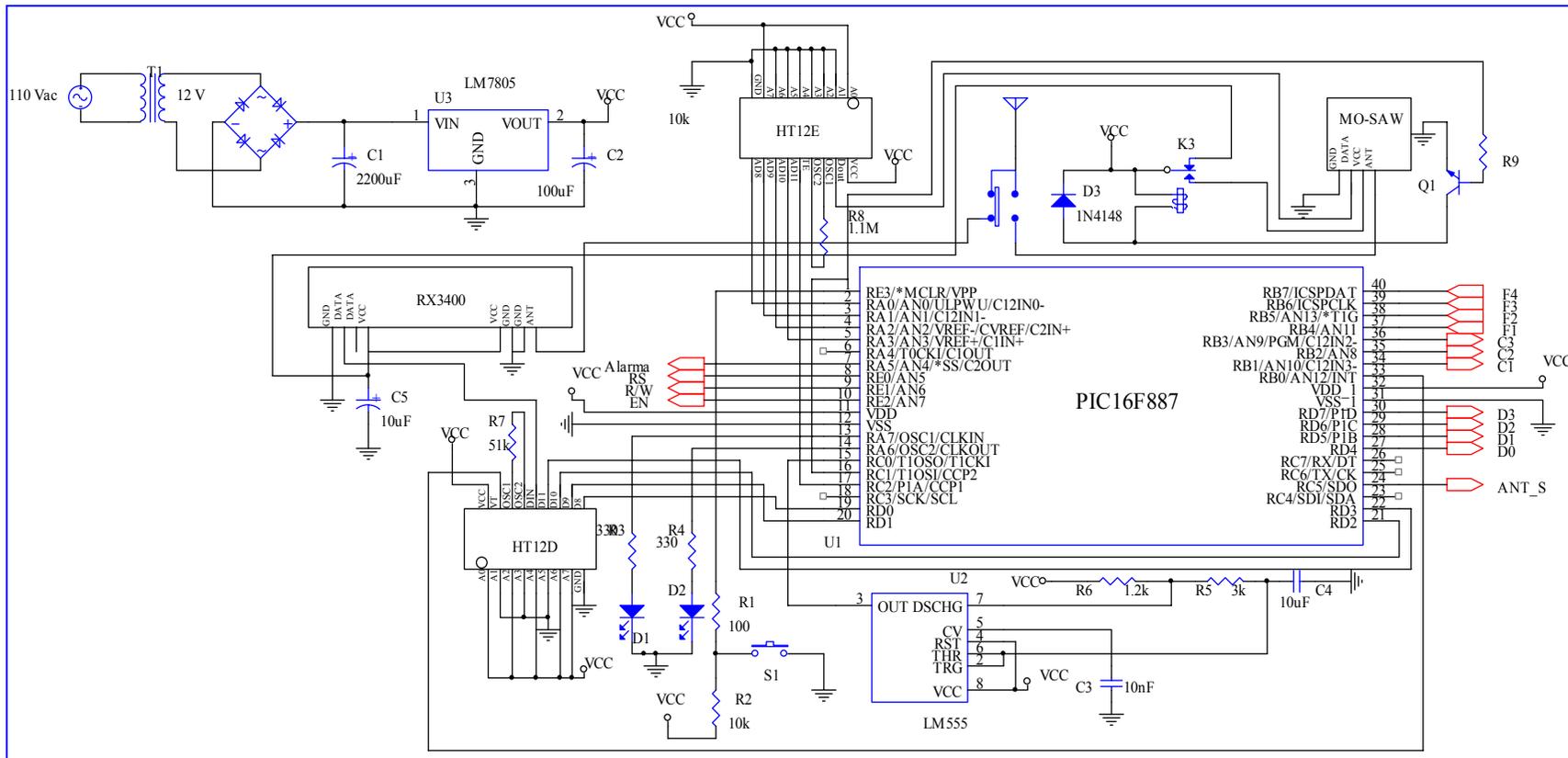


Figura 5.6. Diagrama eléctrico del equipo de visualización o de monitoreo. Fuente: Propia.

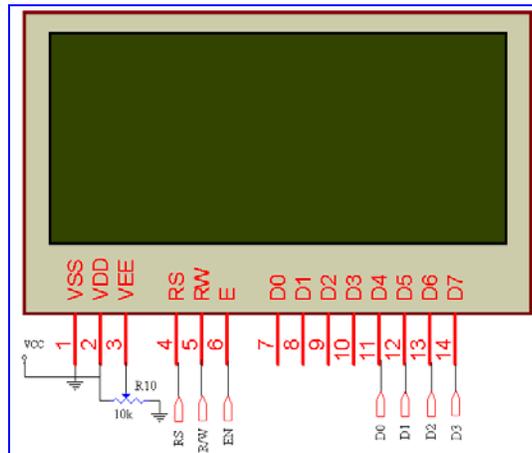


Figura 5.7. Configuración de la LCD. Fuente: Propia.

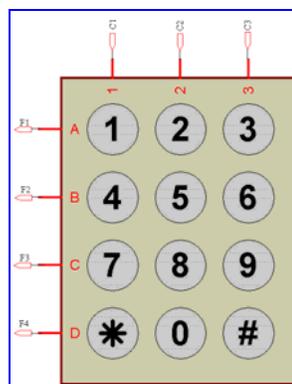


Figura 5.8. Configuración del teclado. Fuente: Propia.

CAPÍTULO VI

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBA DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.

6.1 Prueba del alcance de los módulos de radio.

Antes de implementar la propia red, primero se hicieron unas pruebas del protocolo de comunicaciones y del alcance de los módulos de radio. Para esto se utilizaron dos microcontroladores de la familia Microchip referencias PIC16F690 y PIC16F916. El primero hace las veces de Nodo Sensor, pero no transmite datos de sensores sino un mensaje (*FELIZ_AÑO_2009*) en código ASCII, mientras que el segundo hace las veces de Nodo Coordinador y equipo de visualización, ya que recibe el mensaje y lo muestra en una pantalla LCD 16x2. En la figura 6.1 se muestra el diagrama eléctrico del circuito utilizado para la prueba de comunicación.

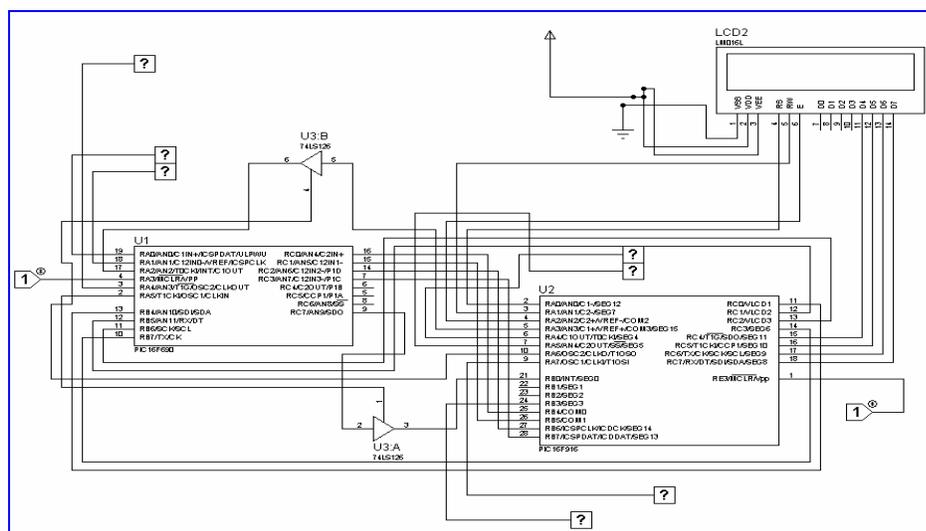


Figura 6.1. Diagrama eléctrico del circuito para la prueba de la comunicación.

Fuente: Propia.

En las tablas 6.1 y 6.2 se muestran los resultados de las pruebas realizadas a diferentes distancias y en diferentes lugares, para tal fin se contaron 30 transmisiones consecutivas.

Tabla 6.1. Resultados de la primera prueba realizada. Fuente: Propia.

Lugar	Distancia [m]	Transmisiones buenas	Transmisiones malas
Pasillo de los Laboratorios de Física, en Cursos Básicos. UDO - Anzoátegui.	10	30	0
	20	30	0
	30	30	0
	40	30	0
	50	30	0
	60	29	1

Tabla 6.2. Resultados de la segunda prueba realizada. Fuente: Propia.

Lugar	Distancia [m]	Transmisiones buenas	Transmisiones malas
Estacionamiento de los buses de la Universidad. UDO - Anzoátegui.	20	30	0
	40	30	0
	60	30	0
	80	30	0
	100	-	-
	120	29	1

En la figura 6.2 se muestra la ubicación del “nodo sensor” (transmisor del mensaje), mientras que en las figuras 6.3 se muestran las fotos tomadas durante la prueba realizada en el pasillo de los laboratorios de física, para una distancia de 10 m, en el anexo D se muestran las fotos de las pruebas realizadas para 20, 30, 40, 50 y 60 m respectivamente.

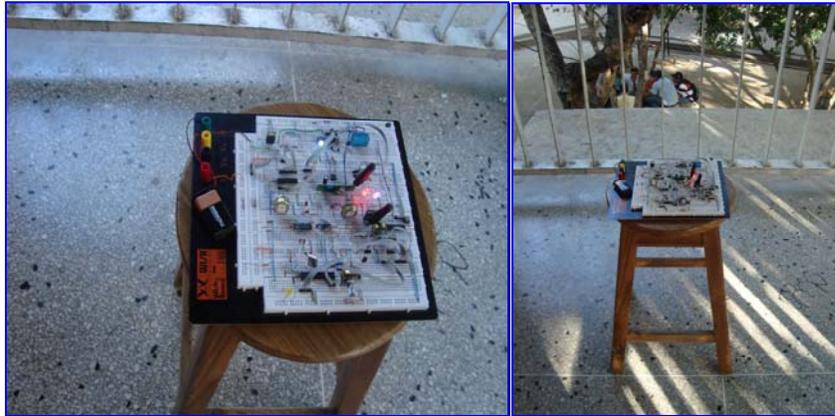


Figura 6.2. Ubicación del “nodo sensor” para la realización de la prueba. Fuente: Propia.



Figura 6.3. Fotos de la prueba realizada a 10 m de distancia. Fuente: Propia.

En la figura 6.4 se muestra las fotos tomadas durante la prueba realizada en el área de estacionamiento de los buses de la universidad para una distancia de 120 m. En el anexo D se muestran las fotos de las restantes pruebas a 20, 40, 60 y 80 m respectivamente, mientras que en la figura 6.5 se puede apreciar la única transmisión con errores durante las pruebas realizadas.

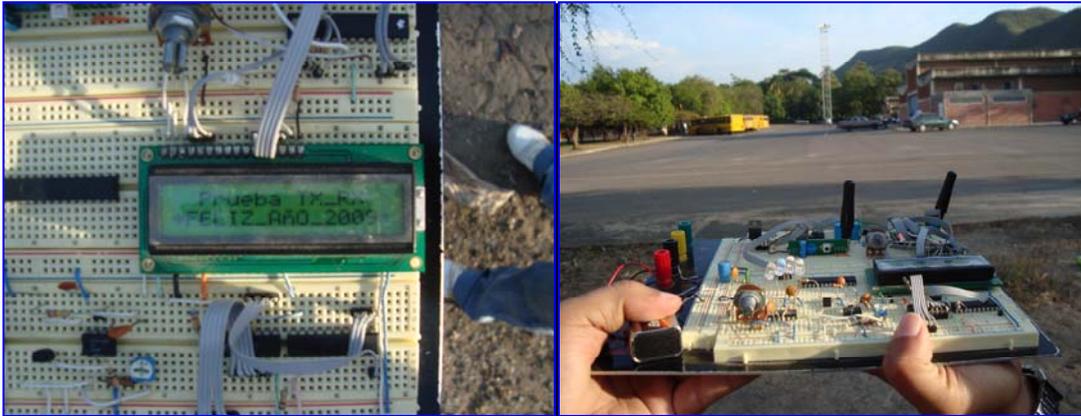


Figura 6.4. Fotos de la segunda prueba realizada a 120m de distancia. Fuente: Propia.

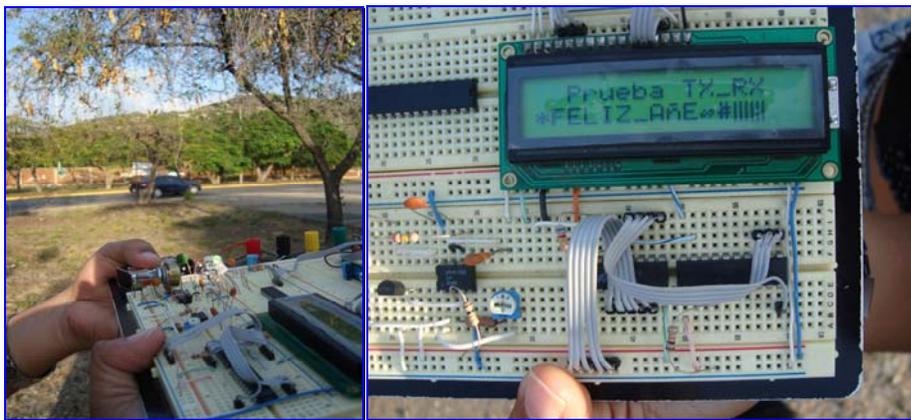


Figura 6.5. Fotos de la segunda prueba realizada a 120m de distancia, donde se aprecia la transmisión errada. Fuente: Propia.

6.2 Programación de los microcontroladores.

Una vez configurado los diferentes equipos de la red de sensores inalámbricos se procedió al compilado de los programas a través del MPSAM incluido en el programa MPLAB IDE versión 8.0 de la casa de Microchip, ya que se utilizan microcontroladores de éste fabricante. En los apéndices A, B y C se muestran los respectivos programas escritos en lenguaje Assembler para microcontroladores PIC de Microchip. En las figuras 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 se muestran las interfaces

gráficas de usuario del compilador MPASM versión 5.14 y los procesos terminados de la compilación de los programas del Nodo Sensor, Nodo Coordinador y Nivel de Control respectivamente.

Una vez compilados los programas y corregidos los errores, advertencias y mensajes se procede a la programación (quemado) de los microcontroladores, para tal fin se utiliza un programador con la capacidad de programar (quemar) los microcontroladores de la familia Microchip y los modelos seleccionados, para ello se requiere el archivo resultante de la compilación que tiene extensión .hex, el cual contiene el programa escrito en Assembler traducido a binario (lenguaje que entienden los procesadores digitales de señal). Para este propósito se utilizó el programador iPROG18 (Programador profesional USB para microcontroladores PIC's), está basado en tecnología Microchip y soporta los PIC seleccionados. En la figura 6.12 se muestra el aspecto físico de este programador.

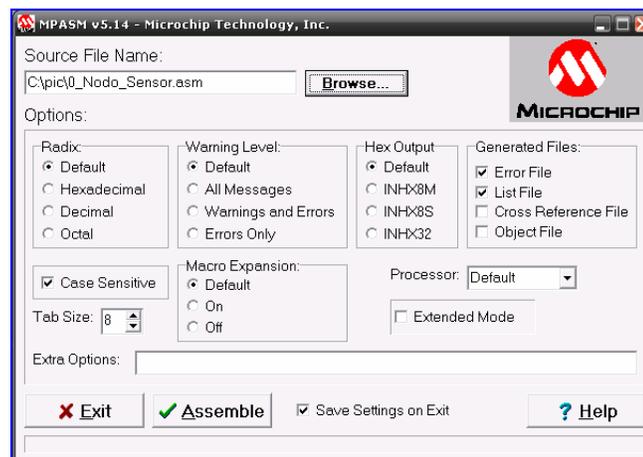


Figura 6.6. Interfaz Gráfica de Usuario del MPASM v5.14 donde se ha cargado el archivo con extensión .asm del Nodo Sensor para su compilación. Fuente: Propia.

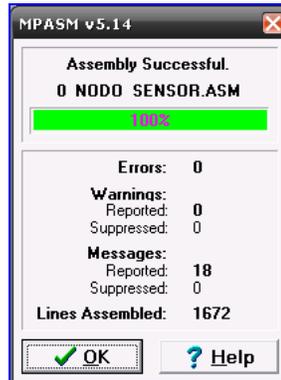


Figura 6.7. Resultado de la compilación para el programa del Nodo Sensor. Fuente: Propia.

Después de la compilación se generan varios archivos con diferentes extensiones, los más importantes son los de extensión .LST y .HEX. El archivo .HEX se utiliza para el grabado del microcontrolador y el .LST contiene aspectos importantes del programa como: la posición de las instrucciones en la memoria de programa, los mensajes, advertencias, errores, la posición asignada a cada variable descrita, entre otros. Del archivo .LST generado se obtuvieron los siguientes datos importantes:

Program Memory Words Used: 585

Program Memory Words Free: 7607

Errors: 0

Warnings: 0 reported, 0 suppressed

Messages: 18 reported, 0 suppressed

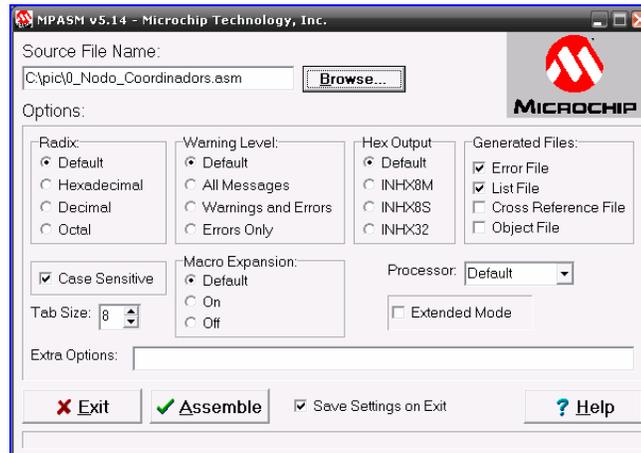


Figura 6.8. Interfaz Gráfica de Usuario del MPASM v5.14 donde se ha cargado el archivo con extensión .asm del Nodo Coordinador para su compilación. Fuente: Propia.

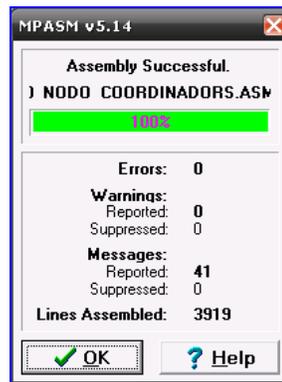


Figura 6.9. Resultado de la compilación para el programa del Nodo Sensor. Fuente: Propia.

Program Memory Words Used: 2823

Program Memory Words Free: 5369

Errors: 0

Warnings: 0 reported, 0 suppressed

Messages: 41 reported, 0 suppressed

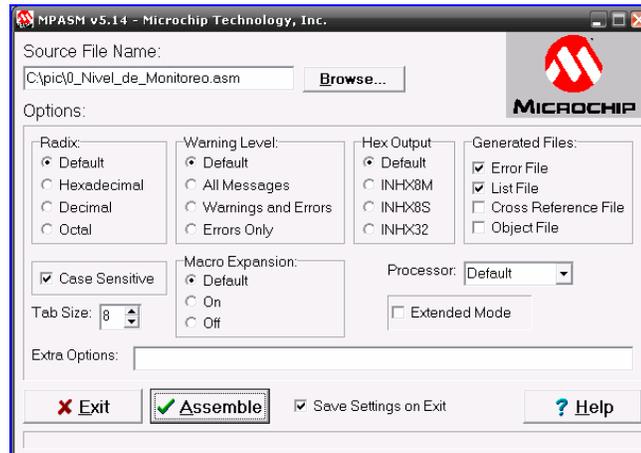


Figura 6.10. Interfaz Gráfica de Usuario del MPASM v5.14 donde se ha cargado el archivo con extensión .asm del Nivel de Monitoreo para su compilación. Fuente: Propia.



Figura 6.11. Resultado de la compilación para el programa del Nodo Sensor. Fuente: Propia.

Program Memory Words Used: 3788

Program Memory Words Free: 4404

Errors: 0

Warnings: 0 reported, 0 suppressed

Messages: 44 reported, 0 suppressed



Figura 6.12. Aspecto físico del programador iPROG18. [73]

Después de haber quemado los microcontroladores se colocan en su respectiva posición en los protoboards junto a todos los otros componentes que completan el circuito del nodo sensor, nodo coordinador y equipo de visualización.

Terminado el montaje de los respectivos circuitos se procede a la implementación de la red de sensores inalámbricos para su prueba, es decir, para probar su funcionamiento.

6.3 Implementación de la red de sensores inalámbricos.

La red fue implementada en la casa, esto se debe a que los circuitos están montados en un protoboard, es decir, en una placa de prueba que es utilizada para construir o montar prototipos de circuitos electrónicos sin soldadura, y como estas placas son un poco incómodas de trasladar de un lugar a otro, la red de sensores inalámbricos no pudo ser implementada en otro lugar (a la hora de realizar la prueba).

Para que los diferentes equipos puedan ser implementados en el lugar para la cual la WSN está diseñada, es decir, en un terreno donde se cultivará un producto agrícola, se deben diseñar las respectivas PCB (Printed Circuit Board ó Placa de Circuito Impreso) y carcasas para proteger a la PCB y los componentes electrónicos del medio ambiente donde se encontrarán, para cada equipo, es decir, para el nodo sensor, nodo coordinador y equipo de visualización.

Las carcazas deben ser construidas con un material plástico resistente a la intemperie, ya que estará bajo diferentes factores climáticos como: sol, lluvia, viento, polvo. Además debe ser impermeable y debe estar sellada para evitar que entre agua en su interior y pueda dañar el equipo.

6.4 Prueba de la red de sensores inalámbricos.

Una vez implementa la WSN en la casa, es decir, ubicados los diferentes equipos en determinados lugares, se procede a alimentar (energizar) los mismos y verificar su funcionamiento. En la figura 6.13 se muestra la ubicación de los equipos para el primer ciclo de la prueba. Aunque existe físicamente un solo nodo sensor, se utilizaron dos cables para cambiar la dirección del nodo sensor, por lo que se obtendría 4 nodos sensores.

En la figura 6.14 se puede ver el equipo de visualización o de monitoreo de los datos, mientras que en las figuras 6.15 se muestran los resultados del primer ciclo de la prueba. Los resultados de los ciclos restantes se pueden observar en el anexo F.



Figura 6.13. Ubicación de los equipos de la WSN para su prueba. Fuente: Propia.

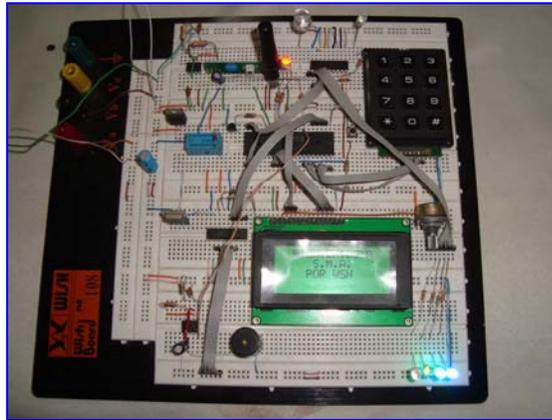


Figura 6.14. Equipo de visualización o monitoreo. Fuente: Propia.

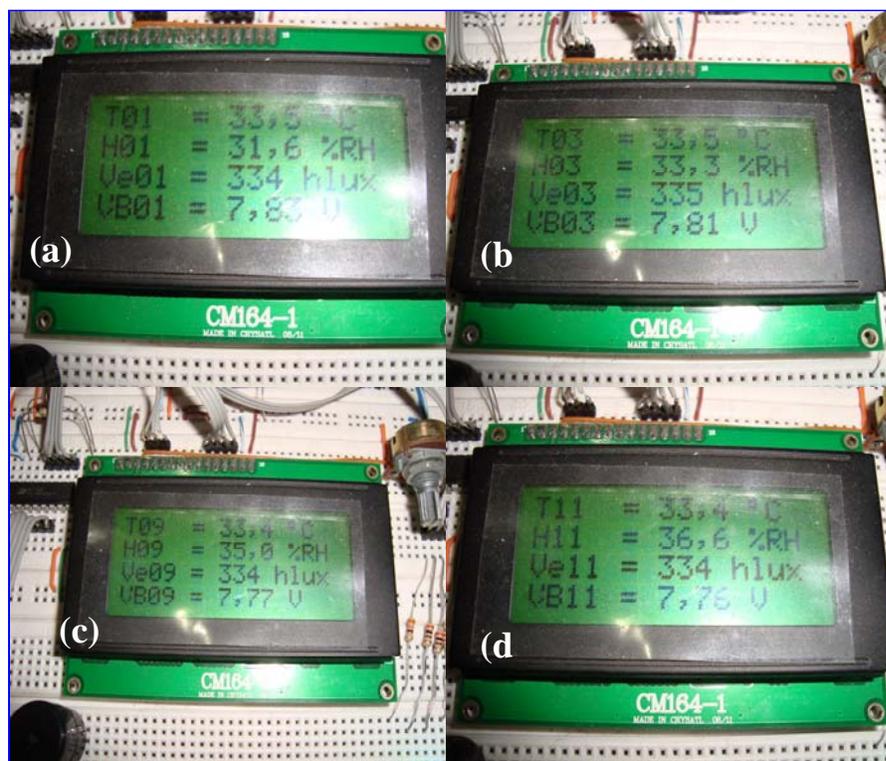


Figura 6.15. Visualización de los datos del 1^{er} ciclo, (a) NS01, (b) NS03, (c) NS09 y (d) NS11. Fuente: Propia.

El tiempo entre un ciclo y otro está programado para durar 15 minutos, para lograr este tiempo se utiliza el TMR1 (temporizador 1) del microcontrolador, se utiliza una señal de reloj externa como señal del TMR1 para su funcionamiento, se usa este temporizador ya que se puede activar o detener en cualquier momento deseado y además permite despertar del estado de bajo consumo al micro. Una vez que se acabe el tiempo de la temporización el microcontrolador empezará con otro ciclo de recepción y transmisión de datos.

El temporizador posee un par de registros (TMR1H:TMR1L) de 8 bits, al combinarlos forman un registro de 16 bits lo que permite contar 65.535 pulsos de la señal de reloj externa, una vez que los registros lleguen a la cuenta de 65.535 y viene el siguiente pulso, éstos pasan a 0 activando una bandera que indica que el TMR1 se ha desbordado y si está activada la interrupción por TMR1, la interrupción global y la de periféricos, se produce la interrupción despertando al microcontrolador de su estado de reposo o bajo consumo (sleep).

Para la señal de reloj se utiliza un multivibrador astable a una frecuencia de 20 Hz, realizado con un circuito integrado temporizador NE555. En la figura 6.16 se muestra el circuito de un multivibrador astable.

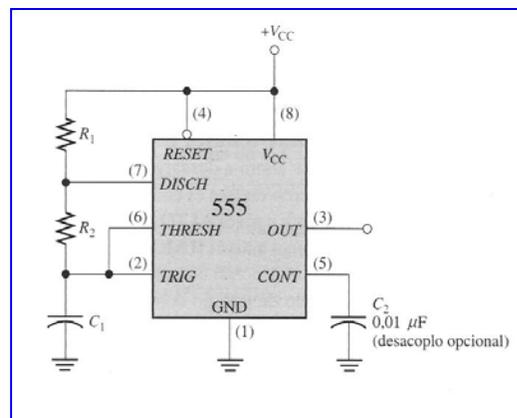


Figura 6.16. Circuito multivibrador astable. [3]

Su ecuación está dada por:

$$f = \frac{1.44}{(R1 + 2R2) * C} \text{ Hz} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

De la ecuación 6.1 y asumiendo un capacitor (C) de 10 μF se calculan las resistencias.

$$R1 + 2R2 = \frac{1.44}{20 * 10 * 10^{-6}}$$

$$R1 = 7200 - 2R2$$

Asumiendo un valor de $R2 = 3 \text{ k}\Omega$ se tiene:

$$R1 = 7200 - 6000$$

$$R1 = 1.2 \text{ k}\Omega$$

Entonces los valores para generar una señal de reloj de 20 Hz son:

$$\begin{cases} R1 = 1.2 \text{ k}\Omega \\ R2 = 3 \text{ k}\Omega \\ C = 10 \mu\text{F} \end{cases}$$

Para el equipo de visualización de los datos también se necesita una señal de reloj externa, pero a una frecuencia de 1 kHz, procediendo de manera semejante al cálculo anterior, los valores de los componentes (se seleccionaron valores normalizados) son:

$$\begin{cases} R1 = 820 \Omega \\ R2 = 6.8 \text{ k}\Omega \\ C = 0.1 \mu\text{F} \end{cases}$$

En la figura 6.17 se muestra una foto del tiempo de temporización cronometrado, es decir, el tiempo entre el fin de un ciclo y el inicio del otro.



Figura 6.17. Cronometraje del tiempo de temporización. Fuente: Propia.

En la figura anterior se puede ver un tiempo de 15 minutos con 10 segundos por lo que la diferencia entre el valor teórico estimado es diferente al real por unos pocos segundos, la principal razón se debe a que la señal de reloj no está calibrada a 20 Hz, al medirla resulto un valor de 19,72 Hz, por lo que los pulsos serán un poco más lento, a está frecuencia da un tiempo de 912.8 segundos que equivalen a 15 minutos con 12,8 segundos, la diferencia es de aproximadamente 3 segundos del valor medido al valor calculado a la frecuencia medida, pero entre el valor medido y el estimado teóricamente es de 10 segundos.

En la figura 6.18 se muestra el valor del voltaje de la batería del nodo coordinador medido por el sistema y en la figura 6.19 el valor medido con un multímetro modelo 890 G de la marca Miyako. Al comparar los valores se puede ver que la diferencia es de 10 mV.



Figura 6.18. Valor de la batería del NC calculado por su microcontrolador. Fuente: Propia.



Figura 6.19. Valor de la batería del NC medido por un multímetro. Fuente: Propia.

En la tabla 6.3 se muestran los resultados la prueba realizada a la red de sensores inalámbricos.

Tabla 6.3. Resultados de la prueba de la red de sensores inalámbricos. Fuente: Propia.

Ciclos	Transmisiones			
	NS01	NS03	NS09	NS11
1 ^{er}	Completada	Completada	Completada	Completada
2 ^{do}	Completada	Completada	Completada	Completada
3 ^{er}	Completada	Completada	Completada	Completada
4 ^{to}	Completada	Completada	Completada	Completada
5 ^{to}	Incompleta (Descartada)	Completada	Completada	Completada

En la tabla 6.4 se muestra un cuadro comparativo entre los estimados teóricos y los resultados de campo.

Tabla 6.4. Cuadro comparativo de los estimados teóricos vs. los resultados de campo.

Fuente: Propia.

	Estimado teórico	Resultado de campo
Máxima Distancia	150 m	(120 ± 1) m
Sensor de temperatura	10 mV/°C	$(9,99 \pm 0,07)$ mV/°C
Convertidor C-V	10 mV/pF	$(9,4 \pm 0,2)$ mV/pF
Sensor de humedad	0.6 pF/%RH	-
Tiempo entre ciclos	900 seg	910 seg

Para la medición de la temperatura se utilizó un sensor modelo CI-6505B PASCO Scientific junto a una interfaz Science Workshop® 750 Interface y el software Data Studio. Para la medida de voltaje y capacitancia un multímetro marca Digital Multimeter modelo M890D.

El resultado de campo para el sensor de temperatura es el promedio de las ocho mediciones realizadas y el del convertidor C-V es el promedio de cuatro mediciones. El error que se muestra es el promedio de los errores determinados por los formatos de representación de medidas y teoría de errores vistos en laboratorio II de física. En cambio el error de un metro para la medida de distancia es un estimado por errores casuales, no es la apreciación de la cinta métrica utilizada.

La prueba donde los datos se reciben correctamente se realizó hasta 120 m de distancia, sin embargo no quiere decir que sea la máxima posible del alcance, ya que se pudo recibir información aproximadamente a (200 ± 10) m, pero no todos los datos recibidos fueron correctos, por tal razón se toma la distancia de 120 m como máxima.

CONCLUSIONES.

- Los parámetros establecidos constituyen una combinación de variables analógicas propias de una aplicación agrotecnica, en conjunto con los requerimientos propios de una red de telecomunicaciones en cuanto a niveles de confiabilidad, disponibilidad, cobertura, etc, lo cual garantiza un diseño de una red.
- La arquitectura desarrollada en la red fue del tipo punto a multipunto, topología estrella, la cual se ajusta perfectamente a la criticidad de los eventos y a la confiabilidad del sistema de comunicación.
- El protocolo de comunicaciones desarrollado cumple con los requisitos de direccionamiento y data útil, así como del intercambio forzado de señales para asegurar respuestas entre cada uno de los nodos de sensores y el nodo coordinador.
- En las pruebas realizadas se comprobó que el protocolo de comunicaciones diseñado funciona correctamente.
- La integración de los diferentes componentes que conforman la red inalámbrica desarrollada, requirió un cuidado especial en cuanto a las conexiones de los componentes, debido a que una mala conexión de un sólo circuito integrado o dispositivo, traería como consecuencia un errado ó mal funcionamiento del equipo.
- Las pruebas realizadas en campo para diferentes escenarios y cobertura demostraron que el desempeño de la red diseñada es correcto y alcance supera a las especificaciones del fabricante en cuanto a distancia.
- La frecuencia de operación de los módulos de radio es ideal por sus características de propagación y por ser libre en el País.

- Los módulos utilizados poseen varias limitaciones en cuanto a velocidad de transmisión, alcance (distancia), protocolo de comunicación (carecen de él) que limitan el diseño de la aplicación.
- El circuito acondicionador de señal del sensor de humedad afecta la exactitud de la medida por la tolerancia de los componentes que poseen los mismos, por lo que para otro tipo de aplicaciones se utilizaría otro sensor.
- El microcontrolador seleccionado cumple con los requerimientos necesarios para su aplicación, además de poseer recursos extras para mejoras o modificaciones.
- La programación de los microcontroladores se realizó con la herramienta de Microchip, MPLAB, que se puede descargar de su página Web sin necesidad de pagar por algún tipo de licencia por la misma.
- Los circuitos integrados HT12D y HT12E por sus características de codificación, decodificación y protocolo de transmisión limitan la velocidad de transmisión a 120 bps, no obstante no se requiere altas velocidades de transmisión y en la prueba realizada se comprobó que es suficiente para la aplicación diseñada.
- Los circuitos integrados HT12E y HT12D permiten seleccionar 256 dispositivos diferentes, por lo que se pueden aumentar el número de nodos sensores por hectárea de terreno.

RECOMENDACIONES.

- Cambiar los módulos de radio por otros tipos de transceptores, con mayores niveles de potencia, sensibilidad para extender los alcances y que trabajen con protocolos basados en el Estándar IEEE 802.15.4 para mejorar la confiabilidad de la red.
- Optar por sensores de humedad de tipo digital o analógico (cuya salida sea un voltaje) aunque su precio sea mayor en comparación con los de salida capacitiva, ya que estos no requieren de circuitos acondicionadores de señal ni de calibración (la mayoría), por lo que su exactitud no se verá afectada por el mismo.
- Diseñar una carcaza para proteger el circuito de cada equipo de acuerdo a las condiciones climáticas del entorno existente en el lugar de su implementación.
- Diseñar una aplicación computacional en software libre (u otro) para visualizar los datos de los sensores, elaborar una base de datos y llevar una estadística de los mismos.
- Utilizar celdas solares para alimentar los equipos mientras haya luz solar.
- En base al consumo de los equipos: Nodo sensor (12 mA estado de bajo consumo y 62 mA transmitiendo) y Nodo coordinador (16 mA en estado de bajo consumo y 46 mA transmitiendo) se recomienda utilizar baterías de tipo recargables y con capacidades de corriente superior a los 2.000 mAh para mejorar la autonomía de la misma, ya que de esta forma la red duraría aproximadamente de 200 a 1.000 horas.
- Establecer líneas de investigación en las áreas de protocolos de comunicación y propagación en el ámbito de redes de sensores inalámbricos.

BIBLIOGRAFÍA.

1. CASTAÑO J., GONZÁLEZ M., VARGAS G., HERNÁNDEZ J. (2001) **“Curso Práctico Sobre Microcontroladores. Teoría, Programación, Diseño, Prácticas y Proyectos completos. Tomo 1”**. Edición CONO SUR, CEKIT S.A. Pereira. Colombia.
2. CASTAÑO J., GONZÁLEZ M., VARGAS G., HERNÁNDEZ J. (2001) **“Curso Práctico Sobre Microcontroladores. Teoría, Programación, Diseño, Prácticas y Proyectos completos. Tomo 3”**. Edición CONO SUR, CEKIT S.A. Pereira. Colombia.
3. FLOYD, T. (2002). **“Fundamentos de Sistemas Digitales”**. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 7ª Edición. Ciudad: Madrid.
4. BATES, R. (2003). **“Comunicaciones Inalámbricas de Banda Ancha”**. Editorial McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U. 1ª Edición. Ciudad: Madrid.
5. PÉREZ M., ÁLVAREZ J., CAMPO J., FERRERO F. y GRILLO G. (2005). **“Instrumentación Electrónica”**. Editorial THOMSON. 2ª Edición. Ciudad: Madrid.
6. ANGULO J., ROMERO S. y ANGULO I. (2006). **“Microcontroladores PIC Diseño práctico de aplicaciones 2ª Parte. PIC16F87X, PIC18FXXXX”**. Editorial McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U. 2ª Edición. Ciudad: Madrid.

7. PALACIOS E., REMIRO F. y LÓPEZ L (2006). “**Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de proyectos**”. Editorial Alfaomega Grupo Editor, S. A. de C.V. 2ª Edición. Ciudad: México.
8. BARAZARTE, H. (2004). “**El 555 y sus aplicaciones**”. Editorial HAR TECNOLOGÍA C.A. Edición 2004. Ciudad: Barquisimeto.
9. STALLINGS, W. (2004). “**Comunicaciones y Redes de Computadores**”. Editorial Pearson Prentice Hall. 7ª Edición. Ciudad: Madrid.
10. RUIZ, F. (2004). “**Enciclopedia del técnico en electrónica. Componentes Electrónicos Para Audio e Imagen**”. Editorial Ceac. 2ª Edición. Ciudad: Barcelona.
11. BLAKE, R. (2004). “**Sistemas Electrónicos de Comunicaciones**”. Editorial Thomson. 2ª Edición. Ciudad: México.
12. FRANCO, S. (2005). “**Diseño con Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Analógicos**”. Editorial McGraw-Hill Interamericana Editores, S. A. de C.V. 3ª Edición. Ciudad: México.
13. ROLDÁN, D. (2005). “**Comunicaciones Inalámbricas**”. Editorial Alfaomega Ra-Ma[®]. 1ª Edición. Ciudad: México.
14. RAMOS, F. (2007). “**Radiocomunicaciones**”. Editoriales Marcombo Ediciones Técnicas en coedición con Alfaomega Grupo Editor. 1ª Edición. Ciudades: Barcelona y México.

15. SEDRA, A. y SMITH, K. (2006). “**Circuitos Microelectrónicos**”. Editorial McGraw-Hill Interamericana Editores, S. A. de C.V. 5ª Edición. Ciudad: México.
16. MALONEY, T. (2006). “**Electrónica Industrial Moderna**”. Editorial Pearson Prentice Hall. 5ª Edición. Ciudad: México.
17. “**Microcontroladores**”. Disponible en:
<http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm> (03 de Noviembre de 2007).
18. “**Manual de microcontroladores PIC**”. Disponible en:
<http://lc.fie.umich.mx/~jrincon/manual%20PICs%20Ruddy.pdf> (03 de Noviembre 2007).
19. GASPAR, A. “**Termistores. Características y Aplicaciones**”. Disponible en: <http://www.gii.upv.es/personal/gbenet/treballs%20cursos%20anteriors-TIM-IIN-INYP-AYPD/termistores/termistores.doc> (28 de Marzo de 2008).
20. LÓPEZ, E. “**Protocolo SPI**”. Curso de Redes de Microcontroladores PIC. Disponible en: <http://www.i-micro.com/pdf/articulos/spi.pdf> (15 de Mayo de 2008).
21. ESCUDERO A., TORRES J. y PIETROSEMOLI E. (2007). “**Unidad 08: Antenas y Cables**”. Disponible en:
http://eslared.org.ve/tricalcar/08_es_antenas_y_cables_guia_v01%5B1%5D.pdf (10 de Marzo de 2008).

22. Laboratorio de Sensores e Instrumentación. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. **“Tutorial de Sensores”**. Disponible en: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/> (02 de Junio de 2008).
23. IEEE Computer Society. (2005). **“Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs)”**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Disponible en:
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.1-2005.pdf> (16 de Febrero de 2008).
24. IEEE Computer Society. (2003). **“Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands”**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Disponible en:
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.2-2003.pdf> (16 de Febrero de 2008).
25. IEEE Computer Society. (2003). **“Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Disponible en:
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.3-2003.pdf> (16 de Febrero de 2008).
26. IEEE Computer Society. (2006). **“Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)”**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Disponible en:

<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf> (16 de Febrero de 2008).

27. TAPIA, J. (2006). **“Tutorial de redes de sensores ad hoc con eficiencia en energía”**. Universidad De Las Américas Puebla. Disponible en:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/tapia_z_jl/ (16 de Abril de 2008).
28. **“PIC 32”**. MICROCHIP TECHNOLOGY INC. Disponible en:
http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2607 (10 de Febrero de 2008).
29. Modos de Transmisión de Datos. Textos Científicos.com. Disponible en:
<http://www.textoscientificos.com/redes/comunicaciones/modos> (22 de Enero de 2008).
30. NAVARRO, E. (2005). **“Diseño e implementación de una red de comunicación inalámbrica para protección ambiental en el bosque”**. Instituto Tecnológico de costa Rica. Disponible en:
<http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/181/1/Informe+Proyecto.pdf> (10 de Diciembre de 2007).
31. MAYNÉ, J. **“IEEE 802.15.4 y Zigbee”**. SILICA An Avnet Division. Disponible en:
http://www.bairesrobotics.com.ar/data/ieee_zigbee_silica.pdf (26 de Enero de 2008).
32. NATIONAL SEMICONDUCTORS. **“LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors Data sheet”**. Disponible en:

<http://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf> (20 de Junio de 2008).

33. STMICROELECTRONICS. **“LM335 Precision temperature sensors Data sheet”**. Disponible en:

<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/2158.pdf> (20 de Junio de 2008).

34. Humirel. **“RELATIVE HUMIDITY SENSOR HS1100/HS1101 Data Sheet”**. Disponible en:

<http://media.digkey.com/pdf/Data%20Sheets/Humirel%20PDFs/HS1100%20HS1101.pdf> (20 de Junio de 2008).

35. **“TLP434A Data Sheet”**. LAIPAC TECH. Disponible en:

<http://www.laipac.com/Downloads/Easy/tlp434a.pdf> (20 de Junio de 2008).

36. **“RLP434A Data Sheet”**. LAIPAC TECH. Disponible en:

<http://www.laipac.com/Downloads/Easy/RLP434A.pdf> (20 de Junio de 2008).

37. HONEYWELL. **“HCH-1000 Series Capacitive Humidity Sensor”**. Disponible en:

http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/146573/la_id/1/document/1/reid/0 (25 de Septiembre de 2008).

38. HONEYWELL. **“Installation Instructions for the HCH-1000 Series Capacitive Humidity Sensors”**. Disponible en:

http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/146574/la_id/1/document/1/reid/0 (25 de Septiembre de 2008).

39. HONEYWELL. **“HCH-1000 Series Humidity Sensor Calibration and Output Circuit Data”**. Disponible en:

http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/154296/la_id/1/document/1/re_id/0 (25 de Septiembre de 2008).

40. ROHM. “**Analog Current Output Type Ambient Light Sensor IC BH1603FVC Data Sheet**”. Disponible en:

<http://www.rohm.com/products/databook/sensor/pdf/bh1603fvc-e.pdf> (25 de Septiembre de 2008).

41. SENBA OPTICAL ELECTRONIC CO., LTD. “**Linear Light Sensor LLS05-A Data Sheet**”. Disponible en:

<http://www.sbcds.com.cn/en/products.asp?Cid=170> (25 de Septiembre de 2008).

42. HOLY STONE ENTERPRISE CO., LTD. “**MO-SAWR-A SAW RESONATOR TRANSMITTER MODULE Data Sheet**”. Disponible en:

<http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/General/MO-SAWR.pdf> (10 de Octubre de 2008).

43. HOLY STONE ENTERPRISE CO., LTD. “**MO-RX3400-A ASK RECEIVER MODULE Data Sheet**”. Disponible en:

<http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/General/MO-RX3400.pdf> (10 de Octubre de 2008).

44. ANTENNAFACTOR DIVISION OF LINX TECHNOLOGIES. “**ANT-433-PW-LP Data Sheet**”. Disponible en:

http://www.antennafactor.com/documents/ANT-433-PW-LP_Data_Sheet.pdf (02 de Octubre de 2008).

45. CEL. **“CMOS INTEGRATED CIRCUIT μ PD5713TK WIDE BAND SPDT SWITCH Data Sheet”**. Disponible en:
<http://www.cel.com/pdf/datasheets/upd5713tk.pdf> (02 de Octubre de 2008).
46. HOLTEK SEMICONDUCTOR INC. **“HT12D/HT12F 2¹² Series of Decoders Data Sheet”**. Disponible en:
http://www.holtek.com.tw/pdf/consumer/2_12dv110.pdf (25 de Septiembre de 2008).
47. HOLTEK SEMICONDUCTOR INC. **“HT12A/HT12E 2¹² Series of Encoders Data Sheet”**. Disponible en:
http://www.holtek.com.tw/pdf/consumer/2_12ev110.pdf (25 de Septiembre de 2008).
48. FAIRCHILD SEMICONDUCTORS COPORATION. **“LM556/NE556 Dual Timer Data Sheet”**. Disponible en:
<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM556.pdf> (30 de Septiembre de 2008).
49. FAIRCHILD SEMICONDUCTORS COPORATION. **“LM2904/LM358/LM358A Dual Operational Amplifier Data Sheet”**. Disponible en:
<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM358.pdf> (30 de Septiembre de 2008).
50. MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **“24AA512/24LC512/24FC512 512K I2C™ CMOS Serial EEPROM Data Sheet”**. Disponible en:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21754E.pdf> (05 de Octubre de 2008).

51. NATIONAL SEMICONDUCTOR. “**LMC6032 CMOS Dual Operational Amplifier Data Sheet**”. Disponible en:
<http://www.national.com/ds/LM/LMC6032.pdf> (05 de Octubre de 2008).
52. MICROCHIP TECHNOLOGY INC. “**28/40/44-Pin, Enhanced Flash-Based 8-Bit CMOS Microcontrollers with nano Watt Technology. PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet**”. Disponible en:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41291E.pdf> (05 de Octubre de 2008).
53. SHENZHEN BRILLIANT CRYSTAL TECHNOLOGIC CO., LTD. “**CM164-1 LCD Data Sheet**”. Disponible en:
<http://www.szcm-lcd.com/web/Zifu/5V/CM164-1SLYA.pdf> (10 de Noviembre de 2008).
54. CONATEL. “**Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CUNABAF)**”. Disponible en:
http://www.radioclubvalencia.org/Conatel/CUNABAF_GO.pdf (12 de Enero de 2009).
55. ROHM, “**Imagen del sensor BH1603FVC**”. Disponible en:
http://www.rohm.com/products/lsi/sensor/ambient_light_sensor/ic/ (16 de marzo de 2009).
56. Digi Key Corporation. “**Imagen del sensor HCH-1000-002**”. Disponible en:
<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=480-2904-ND> (16 de marzo de 2009).
57. Digi Key Corporation. “**Imagen del sensor HCH-1000-001**”. Disponible en:

<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=480-2903-ND> (16 de marzo de 2009).

58. Digi Key Corporation. **“Imagen del sensor HM1500LF”**. Disponible en:
<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=HM1500LF-ND> (16 de marzo de 2009).
59. Plus Electronics C.A. **“Imágenes de sensores”**. Disponible en:
<http://www.electronica.com.ve//ventas/catalog/index.php?cPath=50&osCsid=bbb90b6504588473c6d0ec2892bf6a4e> (16 de marzo de 2009).
60. Plus Electronics C.A. **“Imágenes de fototransistores”**. Disponible en:
<http://www.electronica.com.ve//ventas/catalog/index.php?cPath=58> (16 de marzo de 2009).
61. Plus Electronics C.A. **“Imágenes de fotodiodos”**. Disponible en:
<http://www.electronica.com.ve//ventas/catalog/index.php?cPath=54> (16 de marzo de 2009).
62. SparkFun Electronics. **“Imagen del módulo transmisor MO-SWAR”**.
Disponible en:
http://www.sparkfun.com/commerce/product_info.php?products_id=8946 (16 de marzo de 2009).
63. SparkFun Electronics. **“Imagen del módulo receptor MO-RX3400”**.
Disponible en:
http://www.sparkfun.com/commerce/product_info.php?products_id=8949 (16 de marzo de 2009).

64. Google imágenes. **“LDR”**. Disponible en:
<http://images.google.co.ve/images?gbv=2&hl=es&sa=1&q=LDR&aq=f&oq=>
(16 de marzo de 2009).
65. Google imágenes. **“Pilas litio”**. Disponible en:
<http://images.google.co.ve/images?gbv=2&hl=es&sa=1&q=pilas+litio&aq=f&oq=>
(16 de marzo de 2009).
66. Google imágenes. **“Pilas Ni MH”**. Disponible en:
<http://images.google.co.ve/images?gbv=2&hl=es&sa=1&q=pilas+Ni+MH&aq=f&oq=>
(16 de marzo de 2009).
67. Google imágenes. **“Pilas Ni Cd”**. Disponible en:
[http://images.google.co.ve/images?gbv=2&hl=es&q=pilas+Ni-](http://images.google.co.ve/images?gbv=2&hl=es&q=pilas+Ni-Cd&sa=N&start=40&ndsp=20)
[Cd&sa=N&start=40&ndsp=20](http://images.google.co.ve/images?gbv=2&hl=es&q=pilas+Ni-Cd&sa=N&start=40&ndsp=20) (16 de marzo de 2009).
68. Digi Key Corporation. **“Imagen de la antena L324AM-434”**. Disponible en:
[http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=730-](http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=730-1002-ND)
[1002-ND](http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=730-1002-ND) (16 de marzo de 2009).
69. Digi Key Corporation. **“Imagen de la antena ANT-433-PW-LP”**.
Disponible en:
[http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=ANT-](http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=ANT-433-PW-LP-ND)
[433-PW-LP-ND](http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=ANT-433-PW-LP-ND) (16 de marzo de 2009).
70. Digi Key Corporation. **“Imagen de la antena ANT-433-PW-QW”**.
Disponible en:

<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=ANT-433-PW-QW-ND> (16 de marzo de 2009).

71. Digi Key Corporation. **“Imagen de la antena ANT-433-CW-HWR”**.

Disponible en:

<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=ANT-433-CW-HWR-RPS-ND> (16 de marzo de 2009).

72. Digi Key Corporation. **“Imagen de la antena ANT-433-CW-RCS”**.

Disponible en:

<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=ANT-433-CW-RCS-ND> (16 de marzo de 2009).

73. Digi Key Corporation. **“Imagen del microcontrolador PIC16F886/SP”**.

Disponible en:

<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=PIC16F886-I/SP-ND> (16 de marzo de 2009).

74. Digi Key Corporation. **“Imagen del microcontrolador PIC16F887/P”**.

Disponible en:

<http://search.digikey.com/scripts/DkSearch/dksus.dll?Detail&name=PIC16F887-I/P-ND> (16 de marzo de 2009).

75. Roso-Control. **“Imagen del programador iPROG18”**. Disponible en:

<http://www.roso-control.com/Mercadolibre/20%20iPROG18/iPROG18.htm>
(16 de marzo de 2009).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL MONITOREO REMOTO DE VARIABLES FÍSICAS EN ÁREAS AGRÍCOLAS PARA EL DESARROLLO AGROTECNOLÓGICO DEL PAÍS
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
LEÓN C. HECTOR J.	CVLAC: 16.853.969 E MAIL: leonc.hector@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Redes de sensores inalámbricos

Microcontrolador

Sensores

Módulos de radio

Antenas

Circuitos electrónicos

Agricultura

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Eléctrica

RESUMEN (ABSTRACT):

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) son una tecnología innovadora del siglo XXI que tendrá grandes impactos en la sociedad y el mundo. En éste trabajo de investigación se desarrolla una aplicación para la agricultura, la cual consiste en monitorear remotamente la temperatura ambiente, la humedad del suelo y el nivel de luminosidad de un terreno cultivado. Esta aplicación está constituida por nodos sensores, encargados de sensar las variables anteriores y de transmitir los datos inalámbricamente a un nodo coordinador y luego a un nivel de control donde se visualizan los datos. El agricultor supervisará su cultivo y en base a la información recibida tomará sus decisiones, con el fin de optimizar la producción agrícola. Para esto se seleccionan los diferentes sensores, el microcontrolador en base a recursos/precio, se desarrolla un programa para ser compilado y luego grabado en la memoria del microcontrolador, se diseña un protocolo de comunicaciones, se configuran los diferentes equipos y se implementa la red para verificar los resultados de campo con respecto a los estimados teóricos. Se puede extender la cobertura de la WSN a mayores extensiones de terreno con pequeñas modificaciones del diseño.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E MAIL				
PEÑA, JOSÉ B.	ROL	CA	AS	TUX	JU
	CVLAC:	8.021.584			
	E MAIL	penajb@gmail.com			
	E MAIL				
PARRAGUEZ, LUIS	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	23.734.609			
	E MAIL	lparraguez@cantv.net			
	E MAIL				
HERNÁNDEZ, EULOGIO	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.337.457			
	E MAIL	eherna@cantv.com.ve			
	E MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E MAIL				
	E MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	06	03
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Diseño de una red de sensores inalámbricos.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L
M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5
6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: 25 Meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Electricista

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre - Grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Electricidad

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente - Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

Art. 44

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

León Castillo, Héctor José

Autor

Peña, José

TUTOR

Parraguez Luis

JURADO

Hernández Eulogio

JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS