

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE RED DE
SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE VARIABLES
FÍSICAS AMBIENTALES EN UN GALPÓN AVÍCOLA**

ALEXANDER CASTRO ANDRADE

HÉCTOR ENRIQUE DE LA HOZ LEÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

2008

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE RED DE
SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE VARIABLES
FÍSICAS AMBIENTALES EN UN GALPÓN AVÍCOLA**

ALEXANDER CASTRO ANDRADE

HÉCTOR ENRIQUE DE LA HOZ LEÓN

**Trabajo de investigación presentado como requisito para optar por el
título de Ingeniero Electrónico.**

Director

Mie. JOSÉ DE JESUS RUGELES URIBE

Co-Director

Mie(c). LUIS ALEJANDRO OSORIO AMAYA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
GRUPO DE INVESTIGACION EN CONECTIVIDAD Y PROCESAMIENTO DE
SEÑALES (CPS)**

2008

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1 MARCO TEÓRICO	8
1.1.1 Temperatura	9
1.1.2 Humedad	9
1.1.3 Estrés térmico en las aves.....	10
1.1.3.1 <i>Conducción</i>	11
1.1.3.2 <i>Convección</i>	11
1.1.3.3 <i>Radiación</i>	11
1.1.3.4 <i>Pérdida latente de calor (jadeo)</i>	11
1.2 APLICACIONES DE REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES EN LA AGROINDUSTRIA.....	12
1.3 ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN.....	14
2 PLATAFORMAS Y REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES.....	17
2.1 REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES	19
2.1.1 Estándar IEEE802.15.4	23
2.1.2 Redes ZigBee.	25
2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PLATAFORMAS HARDWARE UTILIZADAS EN WSN.....	28
2.2.1 Mica/Mica2.....	28
2.2.2 Telos B/ Tmote Sky	29
2.2.3 X-Bee ZNet 2.5	33
2.2.3.1 <i>Parámetros del módulo y Comandos AT</i>	37
2.2.3.2 <i>Pruebas de caracterización del radio del módulo Xbee Znet 2.5</i>	38
2.2.3.2.1 Consideraciones para la realización de las pruebas de caracterización de los módulos Xbee en ambientes abiertos.....	38
2.2.3.2.2 Metodología de las pruebas	39
2.2.3.2.3 Conclusiones de las pruebas de caracterización	40
2.2.3.2.4 Consideraciones para la realización de las pruebas de caracterización de los módulos Xbee en un galpón avícola.....	41
2.2.3.3 <i>Caracterización del sistema ADC del módulo Xbee</i>	43
2.2.3.4 <i>Metodología de la caracterización del ADC</i>	43
3 ESTUDIO DE SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS Y DISEÑO DEL SISTEMA DE ADECUACION DE SEÑAL.....	47
3.1 ESPECIFICACIONES Y PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE SENSORES.....	49
3.1.1 Principio de operación de los sensores más utilizados.....	50
3.1.1.1 <i>Sensores de temperatura</i>	51

3.1.1.2	<i>Sensores de Humedad</i>	59
3.1.1.3	<i>Sensores de Intensidad luminosa</i>	63
3.1.1.3.1	Foto-diodos	66
3.1.1.4	<i>Sensores para medir velocidad de fluidos</i>	71
3.1.1.5	<i>Sensores para medir concentración de gases</i>	73
3.1.2	Especificaciones del problema desde el punto de vista de las técnicas de sensado.....	80
3.1.2.1	<i>Selección del Sensor de Temperatura</i>	81
3.1.2.2	<i>Selección del Sensor de Humedad Relativa</i>	88
3.1.2.3	<i>Selección del Sensor de Intensidad Luminosa</i>	93
3.1.2.4	<i>Selección del Sensor de Amoniaco</i>	98
3.1.2.5	<i>Selección del Sensor de Monóxido de carbono</i>	104
3.1.2.6	<i>Selección del anemómetro (velocidad del viento)</i>	106
3.2	DISEÑO DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL	110
3.2.1	Selección del amplificador operacional.....	123
3.2.2	Medida del error y número efectivo de bits	127
4	IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL	131
4.1	SIMULACIONES.....	131
4.2	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS (P.C.B).....	132
4.2.1	Consideraciones para el diseño de las tarjetas de circuitos impresos (P.C.B)	132
4.3	PRUEBAS.....	137
4.3.1	Conclusiones de las pruebas de desempeño del sistema	140
4.4	VISUALIZACIÓN.....	141
5	CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	143
5.1	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.....	143
5.2	PROGRAMACIÓN DE LOS NODOS SENSORES Y CONCENTRADORES	145
5.3	HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN.....	146
5.4	DESARROLLO DE FUTUROS PROYECTOS EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN CPS	146
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
	ANEXO A. HOJAS DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SENSORES Y DISPOSITIVOS SELECCIONADOS	156
	ANEXO B. PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN Y DESEMPEÑO	173
	ANEXO C. SIMULACIONES	183
	ANEXO D. CODIGOS JAVA Y NES C	188

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Arquitectura de solución para red propuesta.....	16
Figura 2.1 Esquema básico de un nodo de una WSN.....	17
Figura 2.2 Esquema básico de una red inalámbrica de sensores.	21
Figura 2.3 Modelo de capas para redes inalámbricas de sensores	22
Figura 2.4 Diferentes arquitecturas de red soportadas por el estándar IEEE802.15.4.	23
Figura 2.5 Distribución de canales en el estándar IEEE802.15.4.....	24
Figura 2.6 Arquitectura de las redes ZigBee.	27
Figura 2.7 Arquitectura de la plataforma Mica.....	29
Figura 2.8 Arquitectura de la plataforma Tmote Sky.	30
Figura 2.9 Puertos de expansión en la plataforma Tmote Sky.....	31
Figura 2.10 Diagrama de bloques del sistema ADC del procesador MSP430	32
Figura 2.11 Arquitectura de la plataforma a. Xbee b. Xbee pro.	33
Figura 2.12 Distribución de pines de la plataforma Xbee.	33
Figura 2.13 Diagrama de bloques del funcionamiento de transmisión y recepción de la plataforma Xbee.....	35
Figura 2.14 Perfil de radio propagación en el galpón avícola ubicado en la finca los totumos.....	42
Figura 2.15 Trama API de los datos provenientes del ADC	44
Figura 2.16 Comportamiento de las lecturas tomadas por el ADC en la práctica.....	45
Figura 3.1 Una forma de clasificar a los sensores.....	49
Figura 3.2 Ejemplo de dispositivos sensores	51
Figura 3.3 Diferentes métodos para realizar la compensación por punto frío .	54
Figura 3.4 Diferencia entre RTD y Termopar tipo S	56
Figura 3.5 Celda de Brokaw	58
Figura 3.6 Sensor de humedad implementado con principios mecánicos.....	60
Figura 3.7 Sensor de humedad implementado con principios electrolíticos....	61
Figura 3.8 Sensor de humedad por conductividad.	62
Figura 3.9 Momento dipolar equivalente en la molécula de agua.	63

Figura 3.10	Espectro electromagnético y espectro de luz visible	64
Figura 3.11	Representación de la sección transversal de un fotodiodo y el efecto foto eléctrico.....	66
Figura 3.12	Característica eléctrica de los fotodiodos y dependencia de esta a la intensidad luminosa.	67
Figura 3.13	Modelo eléctrico de los fotodiodos.	68
Figura 3.14	Gráfica de corriente de oscuridad del APDS9005.....	68
Figura 3.15	Gráfica de respuesta espectral del APDS9005.	69
Figura 3.16	Sección transversal de un anemómetro térmico	72
Figura 3.17	Anemómetro MENS	73
Figura 3.18	Esquema básico de un sensor electrolítico para sensor concentración de gases.	75
Figura 3.19	Esquema básico de un sensor catalítico para la medición de concentración de gases.	76
Figura 3.20	Esquema básico de un sensor de estado sólido para la medición de concentración de gases.	77
Figura 3.21	Resumen de los tipos de sensores y su principio de funcionamiento.....	79
Figura 3.22	Ubicación de la finca los Totumos.....	83
Figura 3.23	Comportamiento térmico del microclima de la finca los Totumos. 83	
Figura 3.24	Comportamiento del sensor seleccionado (FM20).....	87
Figura 3.25	Comportamiento higrométrico del microclima de la finca los Totumos.....	89
Figura 3.26	Comportamiento del sensor seleccionado respecto a la humedad y la temperatura (HIH-4000).....	93
Figura 3.27	Comportamiento del sensor seleccionado respecto a la intensidad luminosa (APDS 9500).	98
Figura 3.28	Comportamiento del sensor seleccionado respecto a la concentración de NH ₃ (NT-NH3).	104
Figura 3.29	Esquema tradicional de los sistemas encargados de la adecuación y procesado de señales.	111
Figura 3.30	Etapas de acondicionamiento de señal implementada con una configuración inversora modificada.	112

Figura 3.31	Procesos de acondicionamiento de señal implementado con una configuración inversora modificada.	113
Figura 3.32	Etapa de acondicionamiento de señal implementada con doble configuración inversora modificada.	115
Figura 3.33	Etapa adecuación sensor Humedad y Función de transferencia (X-Bee)	117
Figura 3.34	Etapa adecuación sensor Humedad y. Función de transferencia (Telos B)	117
Figura 3.35	Esquema para calcular errores debido a imperfecciones en el comportamiento de DC de los OpAmps.	119
Figura 3.36	Esquema para calcular la tensión de ruido de un OpAmp.	121
Figura 3.37	Filtro RC pasabajos.....	123
Figura 4.1	Cara anterior y posterior de la tarjeta central.	134
Figura 4.2	Tarjetas para .los diferentes sensores	134
Figura 4.3	Implementación de la tarjeta central comparados con otras tarjetas de propósito específicos	135
Figura 4.4	Prototipo Nodo Concentrador.....	136
Figura 4.5	Resultados obtenidos.....	139
Figura 4.6	Diagrama de bloques del programa de visualización.....	141
Figura 4.7	Ventana de interfaz grafica para la visualización.	142

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Descripción de pines del módulo Xbee.	34
Tabla 2.2 Configuración de parámetros para realizar conversión AD.	44
Tabla 2.3 Lecturas del voltímetro en la entrada cotejadas con el valor hexadecimal capturado de la transmisión.	45
Tabla 3.1 Comparación entre los diferentes sensores de temperatura	58
Tabla 3.2 Comportamiento térmico ideal en un galpón de cría y levante de pollos de engorde raza Ross.	82
Tabla 3.3 Comparación entre los diferentes sensores de temperatura tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo.....	86
Tabla 3.4 Variación ideal de humedad relativa en un galpón de cría y levante de pollos raza Ross.	88
Tabla 3.5 Comparación entre los diferentes sensores de humedad tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo.....	92
Tabla 3.6 Programa de foto periodo al cual debe estar sometido los pollos de raza Ross un galpón de cría y levante.	94
Tabla 3.7 Comparación entre los diferentes sensores de intensidad luminosa tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo	97
Tabla 3.8 Efectos de las condiciones ambientales y gases de desechos en un galpón de cría y levante de pollos raza Ross.	99
Tabla 3.9 Comparación entre los diferentes sensores de amoníaco tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo.....	103
Tabla 3.10 Comparación entre los diferentes sensores y los requisitos tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo.....	108
Tabla 3.11 Resumen de los cálculos para predecir el comportamiento de los sensores bajo condiciones del ambiente real	110
Tabla 3.12 Resumen de las características de los ADC de los módulos Xbee y Telos B	112
Tabla 3.13 Valores de resistencias de las etapas de adecuación.....	114
Tabla 3.14 Valores de resistencias de las etapas de adecuación.....	116

Tabla 3.15 Valores comerciales de resistencias de las etapas de adecuación para todos los sensores.	116
Tabla 3.16 Funciones matemáticas que modelan el comportamiento eléctrico de las señales después de acondicionadas.	117
Tabla 3.17 Referencias de OpAmp fabricados por TI.	125
Tabla 3.18 Referencias de OpAmp fabricados por TI.	125
Tabla 3.19 Resultado del cálculo de errores debido a características de los dispositivos.	127
Tabla 3.20 Resultado del cálculo de errores debido a características de los dispositivos.	128
Tabla 3.21 Ecuación de cada una de las etapas de adecuación para la señal de los sensores.	130

TITULO
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE RED DE
SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE VARIABLES
FÍSICAS AMBIENTALES EN UN GALPÓN AVÍCOLA*

ALEXANDER CASTRO ANDRADE

HECTOR HENRIQUE DE LA HOZ LEÓN**

Palabras claves: red de sensores inalámbricos, radiotransmisor, temperatura, humedad, intensidad luminosa, amoníaco, monóxido de carbono.

La necesidad de ser competitivos frente a los procesos de globalización gestados en los últimos ocho años, ha incentivado la aparición de nuevas tendencias en todos los campos productivos de los países latino-americanos. El sector agropecuario, por ejemplo, ha visto la necesidad de incorporar tecnología de punta en procesos que tradicionalmente han sido realizados de forma manual; esta tendencia es conocida como agricultura de precisión y se concentra en otorgar los medios para observar, acceder y controlar las prácticas agrícolas, permitiendo al agricultor ajustar en forma dinámica los métodos de producción dependiendo de los problemas que se puedan presentar en estos.

El presente trabajo propone la adaptación de técnicas de redes inalámbricas de sensores como herramientas para el estudio de la incidencia de variables físicas ambientales temperatura, humedad relativa, intensidad luminosa, concentración de amoníaco, concentración de monóxido de carbono y velocidad del viento; en la mortalidad de aves de corral para granjas avícolas.

Como producto final, esta investigación otorga el diseño y la implementación de una plataforma *hardware* compatible con dispositivos IEEE 802.15.4 (Telos B y XBee) para la monitorización y recolección de datos concernientes a las variables físicas ambientales más influyentes en los procesos de cría y levante de pollo de engorde.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: José de Jesús Rugeles Uribe.

TITLE
**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A WIRELESS SENSOR NETWORK
PLATFORM FOR MONITORING OF ENVIRONMENTAL PHYSICAL VARIABLES
AT A POULTRY WAREHOUSE***

ALEXANDER CASTRO ANDRADE

HECTOR HENRIQUE DE LA HOZ LEÓN**

Key words: wireless sensors network, radio transmitter, temperature, relative humidity, light intensity, ammonia, carbon monoxide.

The need to be competitive facing the globalization processes presented in the past eight years, has encouraged the emergence of new trends in all production fields of Latin American countries. The agricultural sector, for example, has seen the need to incorporate high-tech into processes that have been traditionally performed by hand. This trend is known as precision farming and focuses on giving the means to monitors, access and controls agricultural practices, allowing the farmer to dynamically adjust production methods depending on the problems that may arise in these.

This paper proposes the adaption of wireless sensor networks techniques as a tool for studying the environmental impact of physical variables temperature, relative humidity, light intensity, ammonia level, carbon monoxide level and wind's speed; in the mortality inside poultry farms.

As a final product, this research gives the design and implementation of a hardware platform compatible with IEEE 802.15.4 (Telos B and XBee) devices which is able to monitor data relating to the most influential natural environmental variables in the breeding and lifting process in a poultry farm.

* Degree Work.

** Faculty of physics-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: José de Jesus Rugeles Uribe.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de ser competitivos frente a los procesos de globalización gestados en los últimos ocho años, ha incentivado la aparición de nuevas tendencias en todos los campos productivos de los países latino-americanos. El sector agropecuario, por ejemplo, ha visto la necesidad de incorporar tecnología de punta en procesos que tradicionalmente han sido realizados de forma manual; esta tendencia es conocida como agricultura de precisión y se concentra en otorgar los medios para observar, acceder y controlar las prácticas agrícolas, permitiendo al agricultor ajustar en forma dinámica los métodos de producción dependiendo de los problemas que se puedan presentar en estos [0.0].

Las redes inalámbricas de sensores (WSN por sus siglas en Ingles) han aparecido como una alternativa para la implementación de este tipo de estrategias en el sector avícola colombiano, sector que comparado con su homólogo en los grandes países productores y exportadores de carne de pollo a nivel mundial (China, Estados Unidos y Brasil quienes ocupan el 50% de la producción mundial de carne de pollo) no cuenta con la tecnología suficiente como para penetrar el mercado avícola global en forma competitiva. Sin embargo los datos presentados por el ministerio colombiano de agricultura en su informe anual del año 2007 muestran que Colombia ocupa el vigésimo cuarto lugar entre los productores mundiales de carne de pollo proporcionando un poco menos del uno por ciento de la producción mundial superando a países como Chile, Ecuador, Paraguay y Uruguay. Lo anterior muestra el gran potencial que tiene el país en este campo productivo, el cual podría ser explotado en forma más eficiente a través del uso de herramientas tecnológicas [0.1].

En este documento se presentan los resultados del proyecto de pregrado titulado *“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS AMBIENTALES EN UN GALPÓN AVÍCOLA”* , trabajo enmarcado

dentro de la línea de investigación en redes inalámbricas del grupo de investigación en Conectividad y Procesado de Señales (CPS) perteneciente a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Este proyecto propone la aplicación de técnicas de redes de sensores inalámbricos, como herramientas para el estudio de la incidencia de variables físicas ambientales en la mortalidad de aves de corral para granjas avícolas en el proceso de cría, levante y engorde. De la misma manera, dentro del grupo de investigación CPS actualmente se adelantan investigaciones que proponen emplear técnicas de procesamiento de imágenes termográficas con el objetivo de estudiar las condiciones ambientales dentro de galpones avícolas y así tener una visión mucho más completa de los fenómenos presentes en las granjas de cría y levante de pollo de engorde de la región. Los proyectos antes mencionados, junto con otras investigaciones que se están gestando en el grupo de investigación CPS, tienen como fin último colaborar con el desarrollo tecnológico del sector pecuario-agrícola del país.

A partir de un marco teórico otorgado por investigaciones realizadas por especialistas en ciencias agrícolas, el primer capítulo busca familiarizar al lector con el problema por resolver con este proyecto, posteriormente se presentan algunos resultados obtenidos a nivel mundial en aplicaciones de monitorización ambiental en donde la tecnología de redes inalámbricas de sensores ha dado excelentes resultados. Al final de esta primera sección se expone de manera formal la estrategia de solución (y su respectiva justificación) al problema planteado.

El segundo capítulo muestra generalidades sobre las redes inalámbricas de sensores así como una descripción básica de las plataformas *hardware* más importantes con las que se cuenta en la actualidad. Cabe resaltar que. éste capítulo no profundiza en demasía sobre las propiedades de dichas plataformas dado que dentro del grupo de investigación CPS previamente se han adelantado trabajos que precisamente buscan la caracterización de estas. Puede considerarse que esta parte del libro corresponde a un complemento de esos trabajos.

En el tercer capítulo se presentan los principios físicos que rigen el comportamiento de los sensores más utilizados en aplicaciones industriales además de una discusión acerca de la selección de los dispositivos necesarios para cumplir con los objetivos de esta investigación. Al final del capítulo se presenta un análisis detallado sobre las etapas de adecuación de señal necesarias para acoplar la salida de los sensores seleccionados a las características eléctricas de las plataformas IEEE 802.15.4 disponibles para este proyecto y descritas en el capítulo dos.

El capítulo cuarto presenta los resultados del proyecto entre los que se destacan el diseño y la implementación de los sistemas de acondicionamiento de señal para cada uno de los sensores utilizados así como los resultados de las pruebas realizadas con el sistema final.

Por último en el quinto capítulo se establecen las conclusiones y las recomendaciones hechas para proyectos venideros que deseen continuar trabajando con esta línea de investigación.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La monitorización ambiental, la agricultura de precisión, el control de procesos, el mantenimiento de maquinaria, la domótica y los proyectos militares, son algunos de los campos que se han logrado identificar como puntos clave para el desarrollo de aplicaciones de impacto mediante sistemas de redes inalámbricas de sensores [1.1].

A pesar de los grandes avances que se han dado en las tecnologías de redes de sensores, la incorporación de esta tecnología para el fortalecimiento de las actividades agropecuarias se encuentra todavía en su estado inicial [1.2] [1.6]. La industria avícola Colombiana (al igual que la gran mayoría de industrias latinoamericanas cuya actividad principal es la actividad agropecuaria) se caracteriza por mantener en el proceso de producción de carne de pollo, procedimientos ejecutados en forma manual que demandan de cierto grado de precisión y de un buen soporte tecnológico.

El objetivo de la agronomía es mejorar la calidad de los procesos de la producción agrícola a través de principios científicos y tecnológicos. Para lo anterior, esta ciencia estudia los factores físicos, químicos, biológicos, económicos y sociales que influyen o afectan los procesos productivos dentro de un *agro-ecosistema*, entendido este como el modelo específico por medio del cual el hombre interviene en la naturaleza con fines de producción de materia prima [1.0]. A pesar que las ciencias agronómicas en el ámbito nacional han avanzado mucho en aspectos concernientes a la alimentación, al manejo de instalaciones y al manejo sanitario de los animales; las estrategias utilizadas por los especialistas en esta área son adaptaciones de técnicas diseñadas especialmente para países con estaciones climáticas y en condiciones tecnológicas distantes a las Colombianas [1.3] [1.4].

Muchos de los problemas de eficiencia y rendimiento en la industria avícola, están fuertemente correlacionados con la alta probabilidad de error que los métodos manuales (como la preparación para la llegada de los pollos al galpón,

el transporte, el control del alimento, entre otros) introducen al proceso de producción de carne de pollo en general [1.3].

El manual de manejo de pollo de engorde Ross menciona que la precisión con la que se realicen los procesos agronómicos dentro de un galpón de cría y levante de pollos de engorde, permite que los pollos (como producto) *expresen al máximo el rendimiento productivo contenido en su genética* [1.5].

En Colombia las especies más utilizadas en la producción y explotación de aves de corral (Ross y Cobb) han sido genéticamente mejoradas con el fin de aumentar la eficiencia en la conversión alimenticia y así obtener de ellas la mayor cantidad de beneficios para el consumo, estas mejoras genéticas hacen que las aves sean más sensibles a las variaciones climáticas de su hábitat, por eso mantener condiciones ambientales y salubres optimas dentro del galpón de cría y levante de pollo de engorde es una de las preocupaciones más importantes en la escala productiva del sistema pecuario avícola[1.4]. Sin embargo la dificultad tecnológica existente para medir la mayoría de las variables físicas ambientales que afectan el rendimiento de los procesos pecuarios avícolas, ha generado la necesidad de iniciar investigaciones que tengan como fin desarrollar métodos que preserven las condiciones optimas para la supervivencia del pollo y además que sean adecuadas para las exigencias que impone la diversidad de zonas climáticas (pisos térmicos) encontradas en Colombia [1.3] [1.4].

Por lo observado en galpones visitados por el equipo desarrollador del proyecto, se puede decir que en general en el sector avícola santandereano el control sobre las variables físicas ambientales que afectan el rendimiento de la producción de carne de pollo en las etapas de cría y levante, se ejecuta basándose en la experiencia del personal encargado de la administración de la granja (galponeros). Por ejemplo para controlar la velocidad del viento y temperatura dentro del galpón, se recurre a un sistema de cortinas ubicadas alrededor del recinto las cuales se suben y se bajan a criterio de estas personas.

Hasta el momento no se conoce un dispositivo o instrumento que permita medir en forma continua (y en toda el área del galpón) variables como temperatura, humedad, calidad del aire, nivel de ventilación, entre otras; presentes en el proceso de cría y levante del pollo de engorde. Sin embargo se han propuesto soluciones que contemplan el desarrollo de estudios científicos a nivel nacional que tienen como propósito evaluar y determinar las zonas y factores ambientales óptimos para el desarrollo y manejo de las razas de aves comercialmente más utilizadas [1.4] [1.5].

Como resultado de esos estudios, se ha concluido que la actividad pecuaria-avícola en Colombia se desarrolla utilizando galpones abiertos y sin ningún tipo de control ambiental [1.7], esto se ve compensado con el hecho que las locaciones en donde se realizan estas actividades se encuentran entre 200 y 700 metros sobre el nivel del mar, bajo condiciones de temperatura promedio oscilantes entre 18 y 24 [°C] y de humedad relativa que van desde 65 a 75%. Lo anterior permite decir que el desarrollo de la actividad avícola, en las locaciones antes mencionadas, es propicio si se tienen en cuenta las recomendaciones encontradas en el manual de manejo de pollo de engorde Ross [1.8].

Además de las condiciones mencionadas, para que la producción de pollo de engorde se lleve a cabo en forma exitosa en términos de peso vivo, conversión alimenticia, uniformidad y rendimiento en carne, es necesario contar con pisos térmicos en donde la temperatura no presente variaciones mayores a 10 [°C] en un periodo de 24 horas, o menos. Mantener esta condición de estabilidad climática en los primeros días de vida del lote de pollos (parvada) dentro del galpón (en los cuales el animal no es capaz de auto-regular su temperatura corporal), garantiza el *confort* y bienestar del pollo [1.3].

Desafortunadamente, estudios muestran que en Colombia los pisos térmicos en donde se explota este tipo de aves, presentan variaciones en la temperatura de más de 15 [°C] en un periodo menor a 24 horas [1.8] [1.9] [1.4]. Por lo anterior no se puede concluir la inviabilidad en Colombia respecto a la participación de manera competitiva en el mercado avícola, por el contrario, se

hace evidente (según los indicadores mostrados por el ministerio Colombiano de agricultura en el informe sobre la caracterización de cereales [1.10]) la existencia de un gran potencial en este campo, el cual puede ser aprovechado ampliamente haciendo uso de tecnología que permita evaluar fenómenos que afecten en forma negativa el comportamiento de los animales en el ambiente de producción.

En Colombia, las posiciones geográficas claves para la producción de pollo, se encuentran situadas en el altiplano cundiboyasence, Medellín, Cali, los Santanderes y ciudades de la Costa Atlántica. Los datos entregados por el ministerio colombiano de agricultura, muestran que los departamentos de Cundinamarca y Santander son los territorios que cuentan con la mayoría de las granjas de reproducción, incubación y engorde existentes en el país, siendo el departamento de Santander el lugar en donde están posicionadas las industrias con mayor rendimiento (mostrando producciones diarias superiores a 50.000 aves) [1.10].

A pesar del gran potencial que tiene este campo productivo en el país, éste no se encuentra organizado en “clusters¹”, permitiendo la existencia de economías de baja productividad que restan capacidad competitiva a la industria [1.10].

La actividad avícola colombiana se ha convertido en un punto importante para la producción agropecuaria nacional, ha pasando de representar el 9% en 1990 al 13% en el 2004. Dentro de la actividad pecuaria el sector pasó de representar el 22% al 31%. Actualmente el pollo representa el 21,3% de la producción pecuaria nacional. Con estos valores en la producción y las políticas reguladoras nacionales que fomentan el desarrollo del campo, Colombia se posiciona vigésimo cuarta (24) entre los productores mundiales de carne de pollo participando con menos del 1% de la producción global [1.5], [1.7], [1.10].

Últimamente se ha mencionado en los círculos productores colombianos la posibilidad de re-localizar la industria, no solamente de las granjas avícolas

¹ **Clusters:** Son concentraciones geográficas de empresas e instituciones interrelacionadas que actúan en una determinada actividad productiva y que agrupan una amplia gama de industrias y otras entidades relacionadas que son importantes para competir.

sino también de todo el aparato productivo relacionado de manera que los avicultores se encuentren ubicados en las zonas de producción de materias primas [1.7]. Se han identificado varias áreas promisorias para la producción de materias primas competitivas, en términos de costos de producción y cercanía a los mercados de consumo. La altillanura y el departamento Córdoba se perfilan como zonas de alto desempeño. Se busca unas condiciones agroecológicas similares a la de una parte del “cerrado brasileiro” (noroeste de Brasil) donde se obtienen altos rendimientos por hectárea y bajos costos de producción [1.10].

1.1 MARCO TEÓRICO

En investigaciones realizadas por departamento de agricultura y servicio de asesoría del Reino Unido se muestra la relación existente entre la temperatura, la humedad relativa y la tasa de mortalidad de un lote de cría de pollos. Se logra establecer que cuando se tienen pobres condiciones de temperatura y humedad, se desencadena en el pollo un fenómeno conocido como estrés térmico o estrés por calor [1.3].

En el contexto Colombiano, dicho fenómeno es una de las causas más comunes de mortalidad en estas aves [1.5]; el manual de manejo de pollo de engorde Ross [1.3] advierte sobre formas para prevenir la aparición del estrés por calor en un lote de pollos, las recomendaciones van desde reducir la densidad de la población y asegurar la existencia de agua fresca para los bebederos en todo momento, hasta minimizar los efectos del calor e incrementar la velocidad del viento sobre las aves dentro del galpón en 2 ó 3 m/segundo, utilizando ventiladores. De acuerdo con esto, una forma de prevenir este tipo de situaciones a nivel de manejo de instalaciones, es implementar controles ambientales tecnificados dentro de las granjas de cría y levante de pollos de engorde.

Otros aspectos poco mencionados, en los manuales de avicultura sobre las causas de mortalidad y aparición de estrés por calor, son las incidencias de

variables relacionadas con la calidad del aire en donde crecen los pollos [1.3]. El amoníaco, el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, el exceso de vapor de agua y el polvo; son algunas de los fenómenos contaminantes que de igual forma afectan en el comportamiento de las aves. En niveles altos y/o en la exposición prolongada de estas variables, el pollo puede desarrollar ascitis (enfermedad que se caracteriza por una hinchazón en la cavidad torácica de los pollos a causa de exceso de agua en su organismo) y enfermedades respiratorias crónicas fatales para el animal [1.3][1.4][1.5]; A continuación se presentan los detalles de cómo estos fenómenos afectan el interior de un galpón avícola.

1.1.1 Temperatura

Es una propiedad física de la materia. Puede medirse a través de sus efectos sobre las cualidades de los cuerpos (longitud, volumen, etc.) y se explica mencionando la energía cinética de las partículas de los cuerpos, a mayor temperatura mayor cinética en los átomos que conforman el cuerpo. A pesar de esta explicación, la temperatura es un concepto netamente macroscópico [1.11].

Las aves poseen un sistema que les permite mantener estable su temperatura corporal, desafortunadamente, éste solo funciona de forma eficiente en ciertos rangos de temperatura ambiental [1.9]. El aplicar técnicas que permitan mantener cierta temperatura durante momentos específicos del proceso de engorde de pollos ha dado resultados satisfactorios en el objetivo de conseguir un desarrollo prominente en este tipo de aves.

1.1.2 Humedad

El aire que circunda todo sistema contiene partículas de diversos gases (Nitrógeno, Oxígeno, Carbono, Hidrógeno, etc.), entre esas partículas se encuentra el agua en forma de vapor [1.12]. La humedad se define como la medida de la cantidad de vapor de agua contenido en la atmósfera [1.11] [1.5].

En la parte avícola esta variable restringe, en forma importante, las circunstancias en las que el galpón ofrece las mejores condiciones ambientales

para la cría. Variables como la ventilación, temperatura, números de aves y tamaño de las aves que puede soportar un galpón; están totalmente atadas a las condiciones de humedad en las que se encuentra el edificio de la granja [1.3]. Uno de los problemas que se presenta a causa de la excesiva humedad es la poca efectividad en el desprendimiento de calor por parte de las aves. La humedad relativa en el galpón no debe exceder el 70%, ya que mediante estudios se ha demostrado que a este nivel de humedad relativa las condiciones ambientales tienden a desmejorar tanto el rendimiento en la conversión alimenticia, como el “*comfort*” del animal [1.4] [1.5] [1.8]. El ambiente que rodea a las aves, debe mantener una humedad relativa entre 50% y 70% [1.3].

1.1.3 Estrés térmico en las aves

El estrés térmico se presenta cuando las aves están expuestas a temperaturas ambientales mayores a 35°C ocasionando un incremento excesivo en la temperatura corporal del pollo, el estrés será mayor si el tiempo de exposición del ave en estas condiciones es prolongado [1.3].

El estrés por calor es uno de los factores más influyentes en el crecimiento y mortalidad del ave de corral ya que genera en el animal una reducción del consumo de alimento [1.3] [1.4] [1.5]. Para disminuir los efectos de este problema es necesario tener un buen control sobre el nivel de la temperatura a la cual están expuestas las aves. Varios de los factores que inciden en la temperatura corporal del ave son: el tipo de ave, el alimento suministrado, el metabolismo del animal, la temperatura ambiental, la humedad relativa y la densidad de población dentro del galpón.

Las aves no contienen glándulas sudoríparas para controlar su temperatura corporal, por lo tanto los controles de estas temperaturas se realizan mediante varios métodos de transferencia de calor; a continuación se describen algunos de ellos.

1.1.3.1 Conducción

Se presenta cuando un cuerpo entra en contacto con otro, en las aves, se puede observar esta clase de procesos cuando estas se tumban o se hacen debajo de bebederos en los que la zona es más húmeda [1.4] [1.11].

1.1.3.2 Convección

Es el proceso en donde partículas relativamente pequeñas de un fluido se mezclan con otras más frías o más calientes, aumentando o disminuyendo cíclicamente la temperatura en un sistema [1.12]. En las aves, el aire que entra en contacto con la piel de estas, se calienta y se eleva enfriándose y luego descendiendo para de nuevo calentarse y reducir la temperatura corporal promedio del lote [1.4]

1.1.3.3 Radiación

Es la emisión continua de energía de todos los cuerpos a través de ondas electromagnéticas [1.11] [1.12].

El calor desalojado de la piel de los pollos gracias a estos tres métodos se denomina *calor sensible*, sin embargo existe también el *calor latente*, que es el calor expulsado por las aves mediante la gasificación de agua [1.8] [1.9] [1.4].

1.1.3.4 Pérdida latente de calor (jadeo)

Cuando se tienen temperaturas ambientales elevadas, el ave aumenta su respiración y flujo sanguíneo con el fin de acelerar el proceso de enfriamiento, el ave puede llegar a perder 540 calorías por cada gramo de agua evaporado en la transpiración [1.9] [1.3]. Las pérdidas de calor mediante el calor sensible son eficientes a temperaturas bajas, a altas temperaturas es más efectivo la pérdida mediante calor latente, sin embargo, esta efectividad depende drásticamente de que tan seco está el ambiente, cuando el aire es demasiado húmedo (por encima de la saturación de humedad) la capacidad de absorción de calor del ambiente disminuye, por lo tanto el ave no logra eliminar el exceso de calor y comienza a jadear en demasía produciendo posteriormente la muerte del animal [1.9] [1.3] [1.4].

1.2 APLICACIONES DE REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES EN LA AGROINDUSTRIA.

En los antecedentes de investigaciones sobre este tema en la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga-Colombia) y en particular en el grupo de investigación en conectividad y procesamiento de señales (CPS), se encuentra un trabajo de investigación a nivel de Maestría en Ingeniería Electrónica titulado “Diseño implementación y caracterización de un prototipo de red *Zig Bee* en ambientes abiertos y cerrados” y un proyecto de pregrado titulado “Caracterización de dispositivos de redes de sensores inalámbricos en ambientes *indoor* y *outdoor*” con los cuales se exploró la posibilidad de emplear esta tecnología para el desarrollo de soluciones para la industria nacional. En estos estudios se presentan los conceptos relacionados con el estándar IEEE 802.15.4 y la tecnología ZigBee así como las herramientas de desarrollo Hardware y Software involucradas en la formación de redes malladas de sensores. Con estos trabajos se creó la base para el desarrollo de proyectos actuales y venideros otorgando la caracterización de algunas plataformas IEEE 802.15.4, además de presentar el fuerte impacto que puede llegar a tener esta clase de tecnología a nivel industrial [1.6][1.18].

Gracias al desarrollo en el campo de las redes de sensores inalámbricos y a la miniaturización de los dispositivos, ha comenzado a emerger la agricultura de precisión, la cual se concentra en proporcionar los medios para observar, acceder y controlar, las prácticas agrícolas con el fin de proporcionar al agricultor (o agrónomo) una forma de evaluación del estado de los productos y una herramienta de información para la toma de decisiones asertivas enfocadas hacia técnicas de manejo etc. La agricultura de precisión cubre una gran cantidad de quehaceres agrícolas, desde el manejo diario de información, pasando por horticultura hasta la producción en los campos de cosecha. También la agricultura de precisión revisa aspectos concernientes al pre y post-producción de las empresas agrícolas [1.13]. En el ámbito mundial y local, aparecen pocos proyectos referente al tema de la agricultura de precisión y nulos referente al caso particular de avicultura. Uno de los proyectos comparable con el que se pretende desarrollar, en cuanto a objetivos y

resultados esperados, es el proyecto denominado “*Lofar Agro*” desarrollado por el investigador holandés **Aline Baggio** de Delft University of Technology en Holanda [1.14]. En este proyecto, se desplegó un arreglo de 150 tarjetas sensores llamadas “tiny nodes” (de características similares a la plataforma hardware diseñada por la empresa Crossbow, llamada Telos) las cuales tenían como objetivo reunir datos referentes a temperatura y humedad en un campo de papas, determinantes para identificar y predecir la exposición del cultivo a enfermedades, con esto se logró establecer zonas de fumigación y otorgar naturalidad al proceso de siembra y cultivo de papa. La arquitectura de la red inalámbrica de sensores y la manera de concentrar y transmitir de manera remota los datos (Gateway, Wi-fi) hasta un usuario final (agricultor, gerente de la empresa administradora de la granja, etc), es muy parecida al esquema de difusión de la información planteado para el proyecto descrito en este libro.

Otro ejemplo de la aplicación de redes inalámbricas de sensores para el desarrollo de proyectos en la agricultura de precisión, es el presentado por **R. Beckwith, D. Teibel y P. Bowen**, trabajadores del Intel Research Berkeley Lab, titulado “*Report from the Field: Results from a Agricultural Wireless Sensor Network*” y presentado en el año 2004 en el marco de la vigésimo novena conferencia internacional anual IEEE sobre redes locales de computadores. Este proyecto muestra la dispersión de 65 nodos de red, capaces de medir temperatura ambiental y humedad del suelo, en un viñedo. Como resultado importante, se muestra el ahorro de US\$4000 por cada tonelada de uvas producida [1.2] [1.13].

El proyecto que más alusión hace a uno de los objetivos planteados en el proyecto de la avicultura de precisión es el presentado por **Prabal Dutta** (The Ohio State University Columbus, Ohio), **Mike Grimmer** (Crossbow Technology San Jose, California), **Anish Arora, Steven Bibyk y David Culler** (University of California, Berkeley Berkeley, California), titulado “*Design of a Wireless Sensor Network Platform for Detecting Rare, Random, and Ephemeral Events*”. Se expone la creación de una plataforma para redes inalámbricas de sensores que conjuga e integra los dispositivos necesarios para detectar y clasificar eventos ocurridos en un campo de más de 10km². Los integrantes del equipo de

investigación hacen referencia al resultado del proyecto como un nuevo “mote” (palabra empleada para referirse a los nodos de las redes inalámbricas de sensores) sin embargo, este utiliza los componentes más utilizados y fabricados por las compañías Crossbow y Moteiv para desarrollar su prototipo. Hay que mencionar que este proyecto fue desarrollado con dispositivos que datan del año 2000, los cuales en este momento, tienen remplazos de mejor rendimiento, sin embargo la esencia del sistema sirve como referencia en la visualización de proyectos que integren adquisición, procesamiento de señales y técnicas de comunicación [1.15].

Un proyecto llamado Trio, desarrollado igualmente por estudiantes e investigadores de la universidad de Berkeley en California, es la continuación del proyecto anterior, de tal forma, emplearon la plataforma para desarrollar una red capaz de detectar civiles, vehículos y personal militar en una zona de 10km² [1.16].

Un proyecto bastante interesante dado las arquitecturas de red y los medios que utiliza para la visualización de los datos recogidos por los nodos de la red (Tmote Sky) es el realizado por investigadores de la universidad de Buffalo y llamado “*INSIGHT*”. En este proyecto se logró tener un registro de medidas de temperatura y de humedad guardados en un servidor de base de datos (MySQL server) y puestos al servicio de visualización mediante el lenguaje de programación para aplicaciones graficas XML [1.17].

1.3 ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

No hay duda que los procesos de producción de algunas empresas agroindustriales locales son, desde un punto de vista tecnológico, “anticuados”. Esto genera un trabajo más laborioso en el objetivo de tener un buen rendimiento de los productos finales, lo cual habla de la eficiencia de los métodos utilizados por algunas empresas del sector agrícola.

El proceso de globalización presente en estos tiempos crea en las empresas la necesidad de tecnificarse con el objetivo de ser más competitivas en el mercado que pretenden penetrar. La industria avícola colombiana no es la excepción, se debe buscar aplicar tecnología para mejorar en todos los aspectos relacionados con la producción y comercialización de la carne de pollo e impedir que mercados altamente tecnificados como el brasilero, chino, norte americano, etc. arrasen con el crecimiento de las economías fundamentadas en el sector avícola.

Realizar este proyecto colaborará en la tecnificación y una posterior automatización de los procesos de producción de carne de pollo en el sector avícola regional, garantizando a través de la monitorización de variables físicas ambientales el florecimiento de los métodos de manejo en las granjas de cría y levante de pollos de engorde.

Las redes inalámbricas de sensores, es una de las tecnologías de la información que en los últimos años ha tomado gran importancia en proyectos de investigación, sin embargo en la industria avícola los trabajos que se encuentran al respecto son nulos. La ejecución de este proyecto de investigación ayudará a fortalecer los vínculos entre la empresa agrícola y la universidad en pro de generar un impacto social mediante la inclusión de tecnología de punta en los procesos de producción, mientras que el grupo de investigación en Conectividad y Procesado de Señales (CPS) se verá fortalecido en el desarrollo de la línea de investigación en redes inalámbricas de sensores (WSN).

La posibilidad de dar al avicultor una herramienta que le permita tomar decisiones con respecto al manejo del galpón dependiendo de la información otorgada por un sistema de medición de las condiciones de este recinto y además que dicha información sea proporcionada al avicultor (o administrador de la finca) a través de internet para que se tenga acceso a ella de manera remota y en cualquier momento, generó la idea de proponer una serie de investigaciones que desarrolladas en paralelo llegasen a alcanzar los objetivos trazados por el proyecto de investigación presentado para aplicar al título de

Máster en Ingeniería Electrónica titulado “Redes Inalámbricas de Sensores Aplicadas en Avicultura de Precisión. Diseño, Implementación y Caracterización” encargado a la autoría del ingeniero Luis Alejandro Osorio Amaya.

Los recursos con los que se desarrollan la investigación antes mencionada y demás proyectos de pregrado derivados de esta, son aportes que provienen del departamento de investigación y extensión de la universidad industrial de Santander (DIEF).

El presente proyecto hace parte de las actividades propuestas por el macro proyecto apoyado por el DIEF y se encarga del diseño de la plataforma *hardware* cuya tarea es recolectar datos del ambiente del galpón y enviarlos inalámbricamente hacia un nodo concentrador; en la figura 1 representa la implementación del sistema de información.

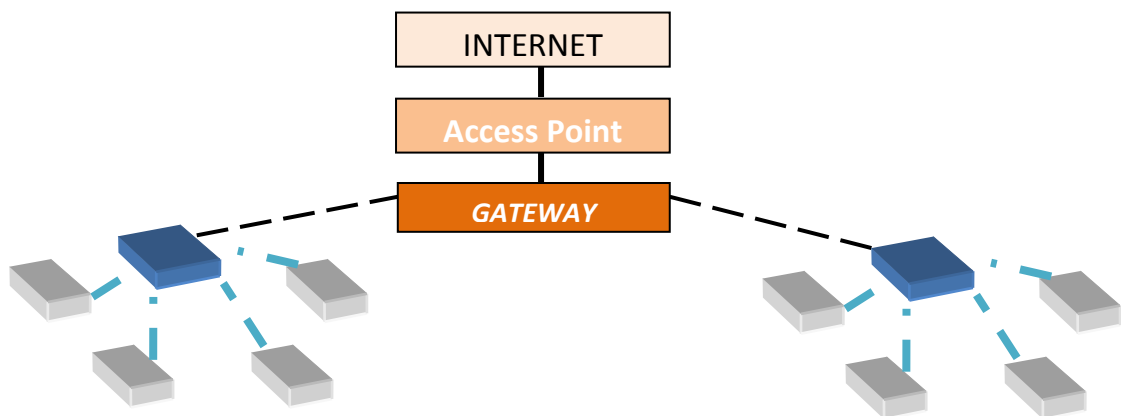


Figura 1.1 Arquitectura de solución para red propuesta

Fuente: Adaptado por los autores de Dutta Prabal, Hui Jonathan, Jeong Jaein, Kim Sukun, Trio: Enabling Sustainable and Scalable Outdoor Wireless Sensor Network Deployments, 2004.

2 PLATAFORMAS Y REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

Por varios años las aplicaciones industriales se han visto favorecidas por las capacidades de los sistemas de sensores conectados en red. La idea general de estos sistemas es conectar una serie de dispositivos sensores a través de un bus de campo con el fin de recolectar información de cierto fenómeno de estudio, ejemplos de estos sistemas son los arreglos de quipos que utilizan los protocolos de comunicación industrial Profibus, CAN, Modbus, etc.

La convergencia reciente entre la tecnología de los sensores y la tecnología de comunicación inalámbrica de baja potencia han permitido el surgimiento de las redes inalámbricas de sensores (WSN).

En una WSN, diversos nodos sensores compuestos por un conversor analógico-digital, un procesador, un radio receptor/transmisor, una antena, una fuente de alimentación (generalmente batería) y un conjunto de dispositivos transductores (analógicos o digitales) capaces de medir variables físicas, se coordinan e intercambian información de tal manera que proveen una visión global de cierto fenómeno en estudio (ver figura 1). Cada nodo operado de forma individual posee capacidades limitadas en cuanto a capacidad de procesamiento, rango de cobertura y tiempo de vida; sin embargo la comunicación y el procesamiento colectivo en la red permiten la adquisición de datos confiables.

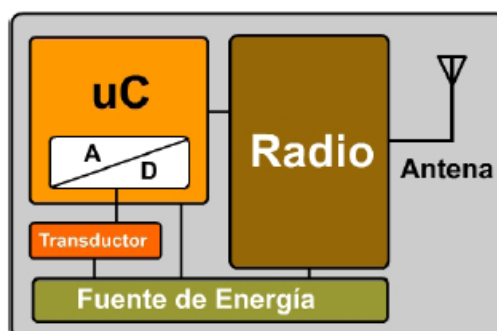


Figura 2.1 Esquema básico de un nodo de una WSN.

Fuente: Rugeles José. "Caracterización de una red ZigBee en ambientes abiertos y cerrados". UIS 2007.

Investigadores y expertos en el diseño de dichos nodos concuerdan en que estos deben tener las siguientes características [2.1] [2.2]:

- ***Dimensiones físicas reducidas.***

Para ser instalados de manera fácil y sin modificar de sobremanera el ambiente en donde se piensa desplegar la red inalámbrica de sensores, los nodos que conforma dicha red deben ser pequeños.

Debido a los constantes avances en las técnicas de miniaturización de *hardware*, los tamaños de los componentes electrónicos utilizados en los diseños de nodos sensores tienden a disminuir constantemente, no obstante este proceso de miniaturización de los prototipos finales, sigue limitado por el tamaño de las baterías.

El avance de la química en el campo de la electrólisis galvánica y fabricación de baterías ha sido bastante importante, sin embargo este avance se ha visto sorprendido por el progreso vertiginoso de la electrónica haciendo que la química no alcance a dar una respuesta completamente satisfactoria a las necesidades energéticas de los adelantos tecnológicos presentados por la electrónica [2.10]. Esto último, junto con el creciente espíritu ecológico en la comunidad científica, ha incrementado el interés por crear sistemas que sean capaces de utilizar el medio ambiente como fuente de energía (vibraciones, luz solar, etc.), estos sistemas son conocidos como “*harvesting systems*” [2.3] [2.11] [2.12].

- ***Capacidad de operar por un largo periodo de tiempo con cantidades limitadas de energía.***

La necesidad de operar de forma autónoma junto con las capacidades limitadas de energía disponibles por los nodos de una red inalámbrica de sensores, hacen del bajo consumo de energía un factor determinante en el diseño del *hardware* de estos equipos. A diferencia de cualquier proyecto enfocado en el desempeño de la parte física de sistemas, en donde los componentes electrónicos son seleccionados teniendo como prioridad las excelentes características de trabajo que estos puedan proporcionar (como

por ejemplo gran capacidad de procesamiento en la selección de micro-controladores), el desarrollo *hardware* de nodos empleados en WSN además de buscar excelentes características de desempeño, busca la adquisición de componentes de bajo consumo de energía y con posibilidad de soporte en la coordinación del consumo de esta. Lo anterior es la limitante más fuerte con la que un ingeniero debe lidiar para el diseño de plataformas físicas compatibles con esta clase de redes.

- ***Arquitectura modular permitiendo la conexión de sensores específicos para diferentes aplicaciones.***

Los servicios de una red de sensores tienden a ser específicos y a utilizar solamente el *hardware* necesario para cumplir con los requisitos de determinada aplicación. De esta forma, es importante diseñar una arquitectura que permita la modularidad de sus diferentes bloques componentes, para potenciar su aplicabilidad y robustez en aplicaciones industriales de tal forma que se ajusten a las necesidades del problema atacado.

El presente capítulo describe las características más importantes sobre redes inalámbricas de sensores, en especial sobre el estándar IEEE 802.15.4/Zigbee, así como las cualidades de las plataformas *hardware IEEE 802.15.4* que serán utilizadas en el desarrollo del presente proyecto, el cual busca diseñar e implementar un sistema de sensores inalámbricos para avicultura compatible con dos plataformas distintas que utilicen el estándar IEEE 802.15.4 y que permita la monitorización de las variables físicas: temperatura, humedad relativa, nivel de NH₃ e intensidad luminosa; al interior de un galpón de cría y levante de pollos de engorde.

2.1 REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

Como se mencionó en el capítulo anterior, se han identificado una gran cantidad aplicaciones en diferentes áreas como por ejemplo La monitorización ambiental, la agricultura de precisión, el control de procesos, el mantenimiento

de maquinaria, la domótica y los proyectos militares en donde las redes inalámbricas de sensores prometen generar grandes impactos.

Una red inalámbrica de sensores está conformada por un número de dispositivos sensores que están distribuidos ya sea dentro del fenómeno (u objeto) que se desea estudiar o muy cerca a él. El ingenio de la disposición de los nodos sensores puede llegar a permitir que una red de pocos nodos logre cubrir extensas zonas de terreno de difícil acceso, lo anterior habla de la flexibilidad de este tipo de redes, pero por otro lado, lo anterior también significa que los protocolos y algoritmos utilizados en la red deben otorgarle la capacidad de auto organizarse en caso de fallas provocadas por las condiciones de trabajo tan hostiles en las que la red se desenvuelve. Esto evidencia la necesidad de implementar técnicas de redes Ad-hoc en redes inalámbricas de sensores; sin embargo algunas de estas técnicas no son completamente aplicables debido a las remarcables diferencias existentes entre las redes Ad-hoc y las redes inalámbricas de sensores. A continuación se mencionan algunas de estas [2.4]:

- El número de nodos en las WSN puede ser varias veces más grandes que el número de nodos en una red Ad-hoc tradicional debido a la cantidad de tráfico que genera cada una de estas tecnologías.
- En la red inalámbrica de sensores los nodos están más densamente distribuidos en el espacio. Esto es por la sensibilidad de los radio transmisores/receptores empleados en estos equipos.
- Los nodos en las WSN son más propensos a fallar por las condiciones en las que estos son desplegados.
- La topología de la red inalámbrica de sensores cambia con bastante frecuencia. Esto es porque los protocolos de accesos al medio y de gestión de energía de la red hacen que algunos nodos no funcionen en un determinado periodo de tiempo haciendo que la red no tenga una estructura física definida.

- En las redes inalámbricas de sensores la comunicación se realiza principalmente a través de difusión total (“*Broadcast*”) mientras que en la mayoría de las redes Ad-hoc la comunicación entre nodos es punto a punto.
- Los nodos sensores están limitados en capacidad de cómputo, memoria y consumo de potencia. Esto se ve compensado con técnicas de procesamiento colectivo y estrategias de gestión energética dentro de la red.

En la figura 2.2 se presenta la forma en que los nodos de una red inalámbrica de sensores son desplegados en un campo. Cada uno de estos nodos tiene la capacidad de recolectar datos y enviarlos hacia un nodo concentrador llamado sumidero a través de una arquitectura de red llamada de múltiples saltos (ver página 37). El diseño de estas redes debe contemplar varios factores que afectan su desempeño como son: tolerancia a fallos, escalabilidad, costos de producción, ambiente de operación, topología de la red, limitantes de hardware (como el bajo consumo de potencia) y del medio de transmisión (como interferencias) [2.4]. Más adelante se hablará sobre las funciones que cumplen algunos nodos dentro de las WSN.

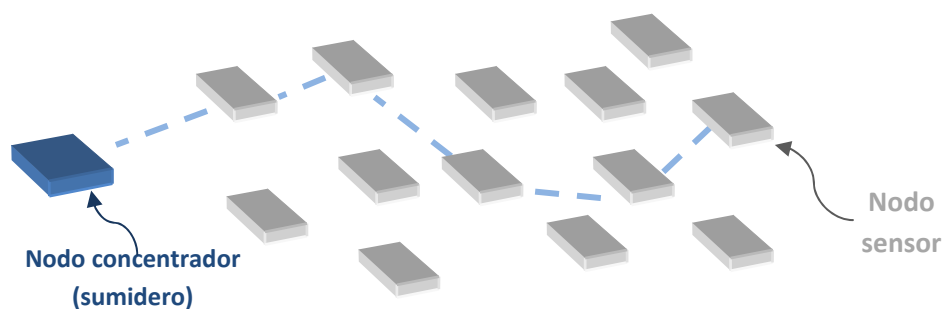


Figura 2.2 Esquema básico de una red inalámbrica de sensores.
 Fuente: Adaptado por el autor de Digi, manual Xbee ZNET 2.5.

Al igual que cualquier red de datos, la manera en que una red inalámbrica de sensores transmite información entre sus nodos está regida por una pila de protocolos especialmente diseñada para ser compatible con los requisitos que las WSN imponen. Haciendo una analogía entre un nodo inalámbrico y el cuerpo humano se podría decir que el micro-procesador es al cerebro como el

radio es al corazón y es precisamente en este último en donde se aloja la pila de protocolos antes mencionada.

Inicialmente los fabricantes de equipos electrónicos, diseñaron sus propias pilas de protocolos para implementar redes inalámbricas de sensores pero después una asociación llamada *Zig-bee Alliance* (conformada por distintas empresas de alto renombre como Intel, Samsung, Motorola) con la ayuda del instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en ingles) diseñaron una pila de protocolos estándar llamada IEEE802.15.4/ZigBee, con esto se logró unificar esfuerzos y evitar la aparición de una gran cantidad de protocolos propietarios completamente incompatibles [2.1].

La figura 2.3 presenta un modelo de capas (parecido al modelo de referencia OSI) en donde se establecen las responsabilidades que tienen estas dos entidades (ZigBee Alliance e IEEE) en el desarrollo de las redes inalámbricas de sensores.

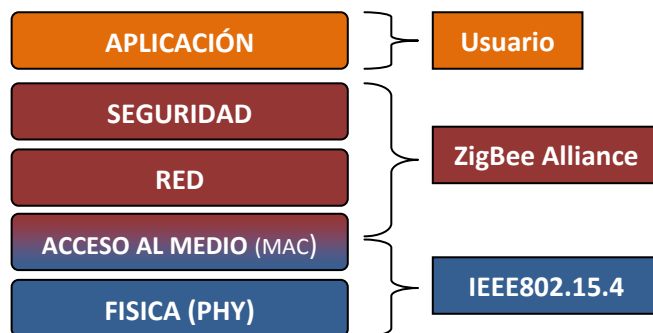


Figura 2.3 Modelo de capas para redes inalámbricas de sensores

Fuente: Adaptado por el autor de "khanh tuan le, Designing a ZigBee transceiver".

Nótese que las capas en donde ZigBee Alliance trabaja son las capas de red y seguridad las cuales están soportadas por las capas de acceso al medio y física, las cuales son tema de estudio de IEEE.

La pila de protocolos mostrada en la figura 2.3 se ve altamente beneficiada con la inclusión de la propuesta hecha por ZigBee Alliance ya que esta le confiere al estándar la posibilidad de establecer redes del tipo malla las cuales no están contempladas en las directrices de IEEE 802.15.4.

En conclusión, el estándar IEEE 802.15.4 y la tecnología inalámbrica ZigBee están diseñados para satisfacer las necesidades del mercado de tener dispositivos de bajo costo, estandarizados y por tanto adaptables a diferentes aplicaciones que tengan restricciones en cuanto a recursos energéticos, confiabilidad de información (seguridad, calidad de servicio) y que requieran una velocidad de transmisión de datos no muy alta (en estas redes la velocidad típicamente es de 250 [Kbps]) [2.1].

2.1.1 Estándar IEEE802.15.4

El estándar IEEE802.15.4 fue creado para el desarrollo de redes inalámbricas de área personal de baja velocidad (LR-WPAN). Este estándar permite establecer redes con una topología conocida como estrella, en donde todos los dispositivos se comunican directamente con un nodo concentrador o sumidero. Con ciertas modificaciones (ZigBee stack) en los nodos de la red, es posible establecer una segunda topología llamada topología P2P (peer to peer). Los dispositivos de una red P2P pueden comunicarse unos con otros de tal forma que es posible generar redes mucho más complejas (redes tipo malla) comparadas con las redes de topología estrella [2.1]. La figura 2.4 muestra un ejemplar de cada una de estas topologías.

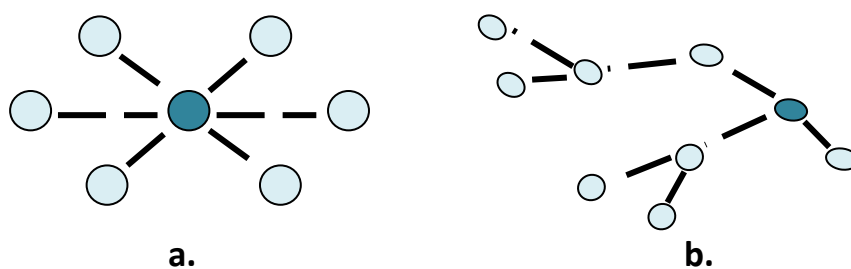


Figura 2.4 Diferentes arquitecturas de red soportadas por el estándar IEEE802.15.4. a. estrella b. malla.

Fuente: Adaptado por los autores de Jin-Shyan Lee and Yang-Chih Huang, "IEEE 802.15.4 Platform for Wireless Sensor Networks"

Como se observa en la figura anterior, en las redes inalámbricas de sensores existen 2 tipos de nodos. Los primeros se conocen como dispositivos con funcionalidad completa (*FFD*) y hacen las veces de coordinadores de la red y

sumideros (ver figura 2.2) y el otro tipo de nodos es llamado nodos con funciones reducidas (*RFD*) o nodos remotos [2.7], [2,1].

El estándar IEEE802.15.4 especifica los protocolos de la capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC) que permiten realizar comunicaciones sobre las frecuencias pertenecientes a la banda libre conocida como banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical band*) la cual comprende los canales de las frecuencias 868MHz, 915MHz y 2.4GHz (ver figura 2.3). En lo referente a la capa física, el estándar IEEE802.15.4 propone utilizar la técnica de espectro expandido con secuencia directa (DSSS) con el fin de tener una comunicación confiable y altamente inmune a la interferencia de otras tecnologías que operan sobre la misma banda (por ejemplo Wi-Fi). En la capa física también se establecen las recomendaciones para realizar detección de la energía recibida (RSSI), asignación de canales libres y tener una idea sobre la calidad del enlace. La grafica 2.5 muestra la distribución de canales propuestos por el estándar IEEE 802.15.4 para realizar la comunicación entre nodos de la red [2.5].

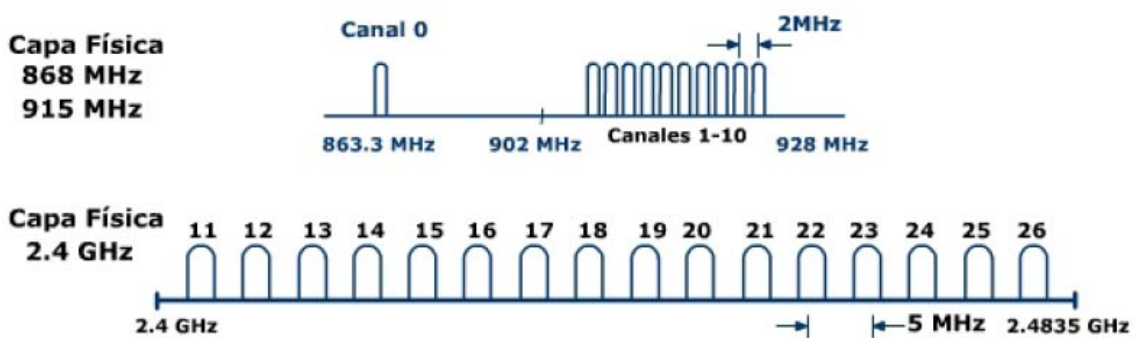


Figura 2.5 Distribución de canales en el estándar IEEE802.15.4.

Fuente: Rugeles José. "Caracterización de una red ZigBee en ambientes abiertos y cerrados".

El protocolo de acceso al medio establecido en el estándar IEEE 802.15.4 se llama múltiple acceso con sensado de portadora y evasión de colisiones (CSMA-CA) utilizado en varias redes de datos cableadas y no cableadas (TCP/IP) [2.6], también se establece que las direcciones de los dispositivos deben estar enmarcadas en un formato largo de 64 bits y uno corto de 16 bits, lo cual teóricamente permite soportar 65.000 nodos por red.

La subcapa MAC propuesta en el estándar IEEE 802.15.4 permite que los nodos se unan y desunen a una red en cualquier momento. Los protocolos de esta capa manejan en el formato de sus marcos (*frames*) señales de guía llamadas “*beacons*” las cuales son utilizadas para sincronizar la comunicación entre nodos. Además de esto, los protocolos de la capa MAC del estándar IEEE802.15.4 proponen mecanismos que garantizan el servicio de comunicaciones de alta prioridad (GTS *guaranteed time slot*) [2.5], [2.1], [2.7].

2.1.2 Redes ZigBee.

Las redes inalámbricas que utilizan dispositivos con tecnología ZigBee, es decir aquellos que incluyen la pila de protocolos mostrados en la figura 2.3, son llamadas redes ZigBee. Este nombre tan peculiar hace alusión al movimiento invisible en zigzag que realizan las abejas (Bee en inglés) para comunicar la posición del néctar [2.10].

Estas redes se encuentran clasificadas dentro de las redes de área personal o PAN (*Personal Area Networks*). Estas redes son capaces de mantener una estructura enmallada para el enrutamiento de datos, es decir, permite que los datos pasen por múltiples nodos (múltiples saltos) antes de que estos alcancen el nodo al cual están destinados. Esta manera de transmitir los datos le da la propiedad a las redes ZigBee de cubrir grandes áreas y mantener una buena calidad de comunicación entre todos sus nodos. El protocolo de comunicación ZigBee establece que las PAN están conformadas por 3 clases de dispositivos llamados coordinador, *router* y dispositivo final, a continuación se define cada uno de ellos.

- **Coordinador:** Este dispositivo es el responsable de seleccionar el canal y la dirección de red en la cual funcionarán los enlaces de comunicación; en pocas palabras, el coordinador es el encargado de establecer la red. Una vez establecida la red PAN, el coordinador puede permitir la afiliación de *routers* y dispositivos finales a su red PAN. El coordinador

tiene la facultad para transmitir y recibir datos, además ayuda en el enrutamiento de datos a través de estructuras complejas de red.

- **Router:** Este dispositivo debe pertenecer a una PAN antes de entrar en operación. Después de estar ligado a una red, el *router* puede permitir la unión de otros *routers* o dispositivos finales a la PAN. Este agente activo de las comunicaciones de las redes ZigBee (al igual que el coordinador) es capaz de recibir y transmitir datos a la vez que ayuda en el enrutamiento de estos.
- **Dispositivos finales (*End devices*):** al igual que el *router*, estos deben estar afiliados a una red ZigBee para poder funcionar. Esta clase de dispositivos difiere de las dos anteriores en que no está autorizada para permitir que otros dispositivos se afilien a la red, tampoco puede ayudar en el enrutamiento de los datos a través de la red. Un dispositivo final además de poder transmitir y recibir datos tiene la propiedad de mantenerse inactivo en un modo de bajo consumo de potencia (dormido) durante un periodo de tiempo en donde no es capaz de ejecutar tarea alguna dentro de la red; mientras los dispositivos finales duermen los encargados de manejar los datos dirigidos a estos son los *router* o *coordinadores* que permitieron el acceso del dispositivo final a la red, a este *router* o *coordinador* se le conoce como padre, mientras que el dispositivo final es conocido como hijo.

Toda red inicialmente debe contar con un coordinador ya que es él, el responsable de establecer la red (estableciendo una dirección de red y la frecuencia de operación o canal). Para esto, el coordinador realiza una serie de barridos para descubrir el nivel de actividad en diferentes canales (barrido de energía) con el objetivo de conocer que redes están establecidas en un rango relativamente cercano (barrido de PAN), el primer barrido se hace revisando la actividad de comunicaciones en diferentes frecuencias (canales) de la banda de 2.4GHz, aquellas frecuencias que presenten actividad energética excesiva son borrados de la lista de posibles canales a escoger, este proceso es conocido *ENERGY SCAN* (establecido en el estándar IEEE802.15.4 como asignación de canal). Luego de completar el barrido de

energía en cada frecuencia (16 canales), el coordinador realiza un barrido en los canales de menor actividad de radio frecuencia con el fin de localizar redes (PAN) existentes en ellos. Para obtener esta información, el coordinador envía una señal de petición (*Beacon* de un solo salto), difundiendo sobre todos los canales (*broadcast*). Cualquier coordinador o *router* que perciba la señal de petición, contestará en sentido contrario con otra señal que contiene la información sobre la dirección de red que está empleando para su propia comunicación (PANID). Como información adicional, la señal de respuesta contiene información sobre el estado de accesibilidad a la red, es decir informa si el dispositivo que contesta está permitiendo que otros dispositivos se añadan a su red, este proceso es denominado *PAN SCAN*. Una vez culminados estos dos procesos, el coordinador intenta establecer su red en un canal y una dirección de red no utilizada. Establecida la red PAN, el coordinador adquiere la propiedad de permitir la afiliación de *router* y dispositivos finales a su PAN [2.8]. La figura 2.6 muestra la arquitectura típica en una red ZigBee.

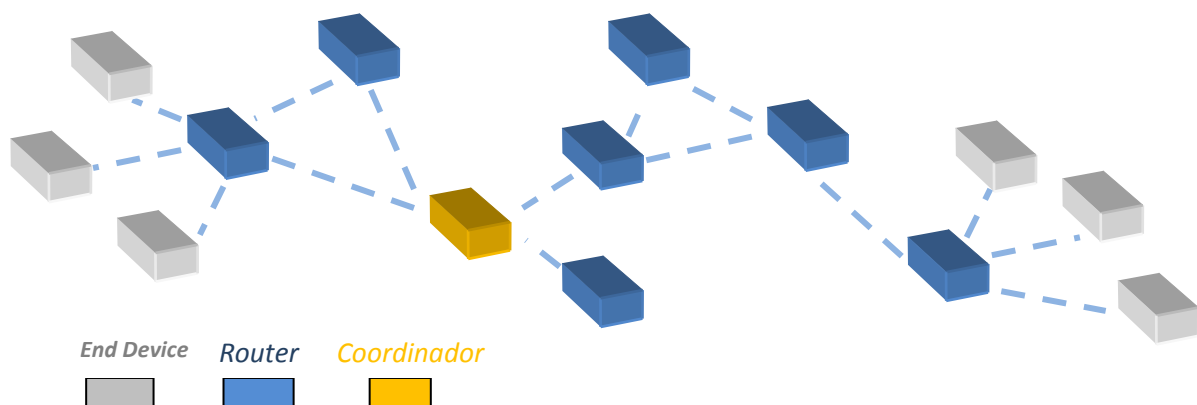


Figura 2.6 Arquitectura de las redes ZigBee.

Fuente: Adaptado por los autores de Solaiy Alagappan and Zach Hogya, "Is ZigBee Ready For Industrial Networks?".

Tal y como se ha mencionado en reiteradas ocasiones este tema se explica detalladamente en los dos primeros trabajos sobre redes inalámbricas de sensores realizados en el grupo de investigación CPS, por lo tanto, para tener una información más precisa al respecto el lector puede remitirse a las referencias bibliográficas [2.1] y [2.9].

2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PLATAFORMAS HARDWARE UTILIZADAS EN WSN

En esta sección se describen las características más relevantes de algunas de las plataformas hardware utilizadas en el desarrollo de investigaciones en redes de sensores inalámbricos alrededor del mundo.

2.2.1 Mica/Mica2

La plataforma hardware Mica, desarrollada por investigadores de la universidad Berkeley en California, es una de las plataformas para redes inalámbricas de sensores con más aplicaciones reportadas en artículos de revistas con carácter académico [2.11] [2.12] [2.13]. Debido a la reciente aparición de nuevas plataformas, Mica ha perdido protagonismo en el mercado tecnológico, a pesar de esto sigue teniendo valor ya que sirve como referencia para el desarrollo de nuevas aplicaciones.

Esta plataforma utiliza un radio de canal único fabricado por la empresa Chipcom (parte de Texas Instrumets inc.) con referencia CC1000, un Microcontrolador fabricado por Atmel con referencia Atmega128 de 8 bits el cual trabaja a 8 MHz con una memoria RAM de 4KB y 128KB de memoria flash. Adicionalmente la plataforma MICA tiene un chip de memoria flash extra de 512KB para el almacenamiento de datos y es energizado por medio de un par de baterías AA, lo que permite que el hardware sea pequeño (5 x 4 x 1.5 cm).

Como se aprecia en la siguiente figura, esta plataforma no tiene sensores incorporados, pero tiene puertos de propósito general (GPIO) que le permiten conectarse con dispositivos externos. La programación se hacer mediante un bus I₂C.

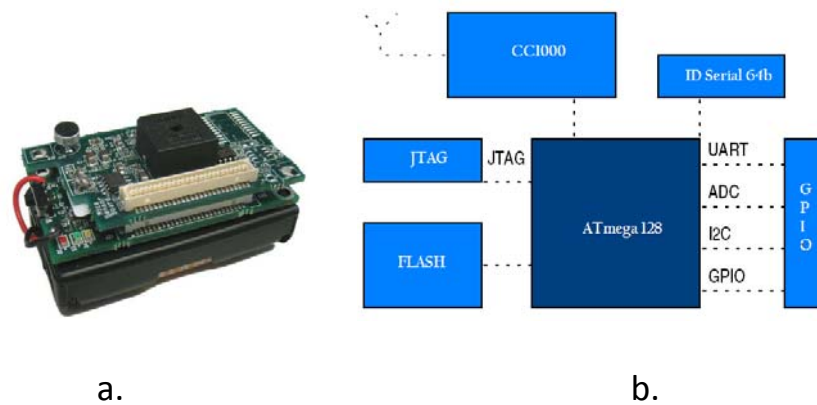


Figura 2.7 Arquitectura de la plataforma Mica.

Fuente: Adaptado por los autores de Moteiv, hoja de datos "Mica2 node".

2.2.2 Telos B/ Tmote Sky

Estos dispositivos también son desarrollados por la universidad de Berkeley pero en conjunto con Intel, también son conocidos por el nombre de *motes*. En su *hardware* incluyen un procesador MSP430 fabricado por Texas Instruments, un radio fabricado por Chipcon de referencia CC2420 además de una interface de comunicación USB y puertos de entrada y salida.

Sus características técnicas establecen lo siguiente [14]:

- El radio CC2420 tiene una velocidad de transmisión de 250kbps en la banda de transmisión de 2.4GHz y es compatible con otros dispositivos bajo el estándar IEEE802.15.4.
- El Microcontrolador MSP430 tiene una frecuencia de trabajo de 8MHz con 10KB de memoria RAM y 48KB de memoria Flash.
- Integra sistemas ADC y DAC para el manejo de señales.
- Tiene un rango de transmisión teórico de 50m en ambientes abiertos y 150m en ambientes cerrados.
- Integra sensores de humedad, temperatura e intensidad luminosa.

- Tienen dos puertos de expansión que conjuntamente otorgan 16 pines para la conexión de dispositivos externos.
- Son programados utilizando el lenguaje de programación NesC a través de la interfaz USB.

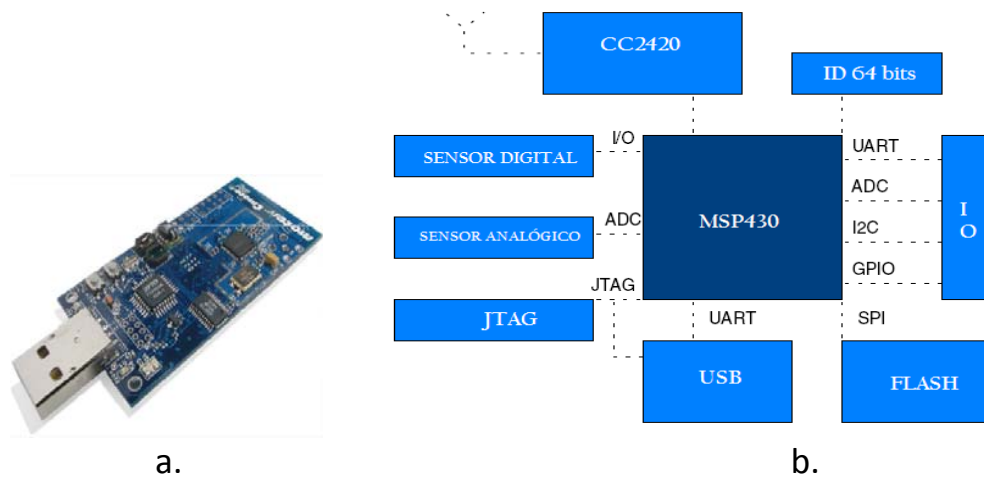


Figura 2.8 Arquitectura de la plataforma Tmote Sky.

Fuente: Adaptado por los autores de Moteiv, hoja de datos "Tmote Sky".

Para esta investigación es importante conocer los puertos de expansión porque como ya se mencionó, estos permiten conectar dispositivos externos (como por ejemplo otros sensores, UART, dispositivos con protocolo I₂C, etc.) al nodo, otorgándole una gran versatilidad al aumentar las posibilidades de realizar diversas aplicaciones con este; a continuación se presenta un esquema de los puertos de expansión del Tmote Sky.

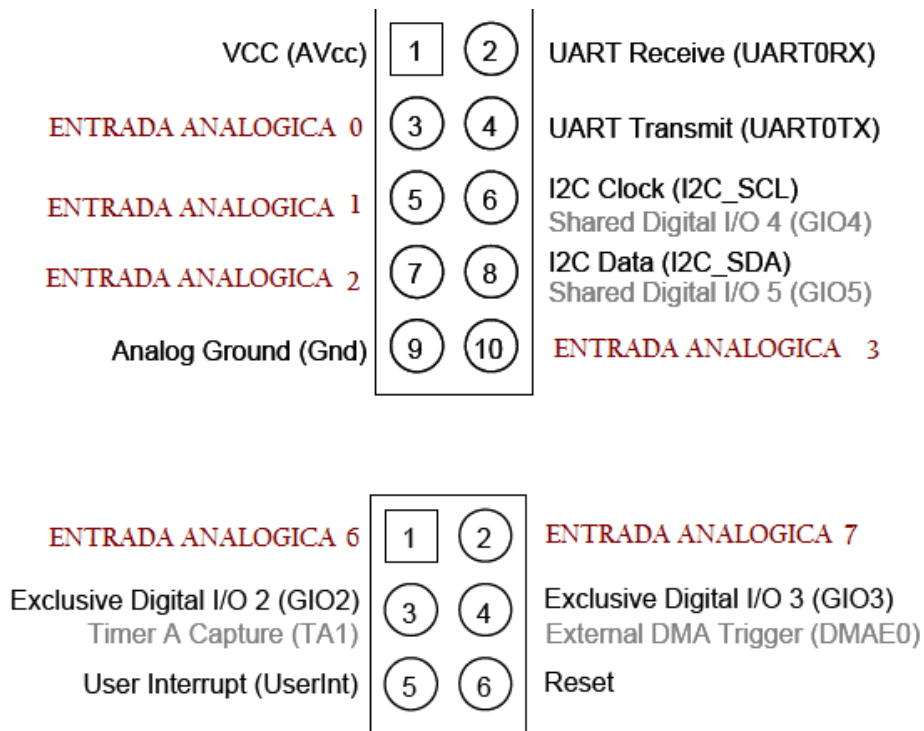


Figura 2.9 Puertos de expansión en la plataforma Tmote Sky.

Fuente: Adaptado por los autores de Moteiv, hoja de datos "Tmote Sky".

Los pines 3, 5, 7 y 10 de la parte superior de la figura 2.9 junto con los pines 1 y 2 mostrado en la parte inferior de la misma figura, dan la posibilidad de procesar señales analógicas por medio del Microcontrolador MSP430 y haciendo uso de su ADC interno; este sistema de ADC tiene las siguientes características:

- Soporta una conversión analógica digital de 12 o 10 bits (Seleccionable a través de software).
- Tiene un *buffer* de conversión y control que permite almacenar 16 muestras sin requerir de la intervención de la CPU del MSP 430.
- Tiene una tasa máxima de conversión superior a 200 Ksps.
- Permite seleccionar mediante software (o por medio de interrupciones propias del Microcontrolador) los periodos de conversión del proceso de muestreo y retención (*sample and hold*).

- Permite elegir entre dos tensiones de referencia (1.5[V] o 2.5[V]), esto limita la amplitud máxima que puede tomar la señal analógica de entrada.
- Dos de sus puertos (el puerto 4 y 5) son utilizados para medir la tensión de la fuente que lo alimenta y la temperatura en el Microcontrolador (temperatura interna).

La siguiente grafica presente el diagrama de bloques del sistema ADC para realizar conversiones en el formato de 12 bits.

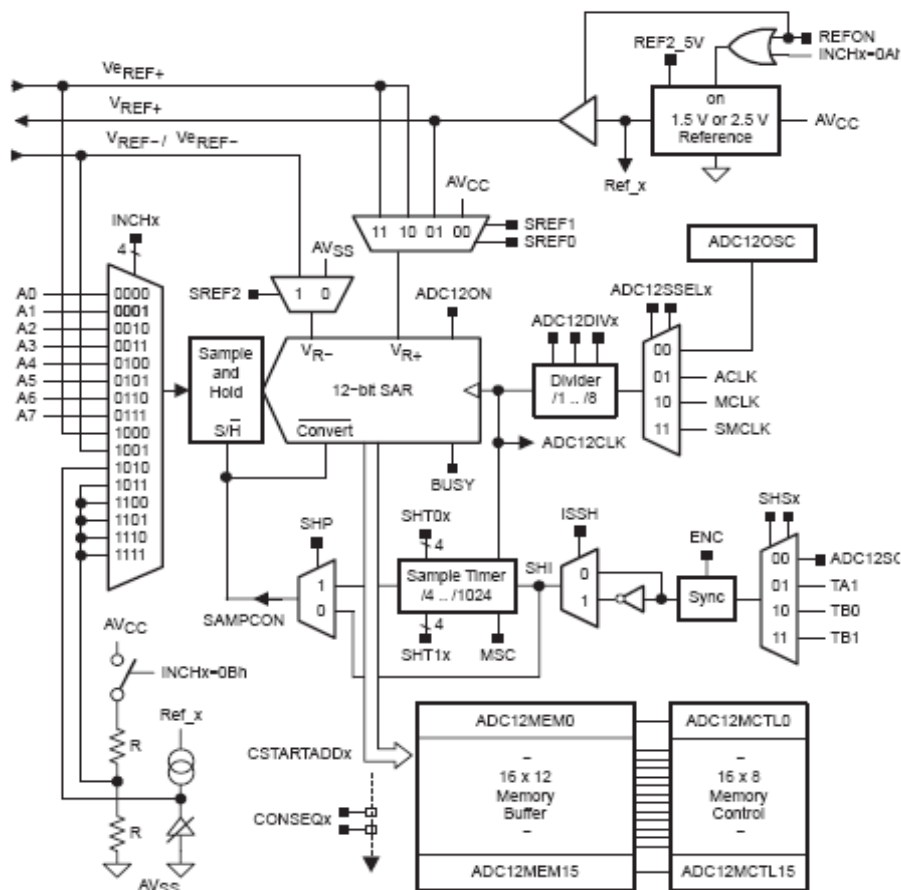


Figura 2.10 Diagrama de bloques del sistema ADC del procesador MSP430

Fuente: Adaptado por los autores de Texas Instruments, "MSP 430 user guide".

Todo lo concerniente al comportamiento y desempeño del Tmote Sky (y del Telos B) en una PAN, se encuentra descrito y evaluado en el trabajo titulado "REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE RED ZIGBEE EN AMBIENTES

ABIERTOS Y CERRADOS” de la autoría del MIE. José de Jesús Rugeles Uribe, miembro del grupo de investigación CPS.

2.2.3 X-Bee ZNet 2.5

Este dispositivo es una de las plataformas, que junto con el Tmote Sky, es utilizada para el desarrollo de este proyecto. En esta sección se hace una descripción más detallada sobre las características y comportamiento de esta plataforma dentro de una PAN; la figura 2.11 muestra el módulo en su presentación física.



Figura 2.11 Arquitectura de la plataforma a. Xbee b. Xbee pro.
Fuente: Adaptado por los autores de Digi, hoja de datos “Xbee ZNet 2.5”.

Los módulos Xbee/Xbee-PRO ZNet 2.5 OEM (formalmente conocidos como serie 2 y serie 2 pro) están diseñados para operar bajo el estándar de comunicación IEEE 802.15.4/ZigBee y cumplir con las especificaciones de bajo costo y bajo consumo de potencia de las redes inalámbricas de sensores; esta plataforma consume muy poca potencia eléctrica (alrededor de 14[mA] operando al máximo de sus capacidades) en su operación y otorga una alta calidad de enlace para la entrega de datos entre nodos remotos [2.8].



Figura 2.12 Distribución de pines de la plataforma Xbee.
Fuente: Adaptado por los autores de Digi, hoja de especificaciones técnicas “Xbee ZNet 2.5”.

PIN#	NOMBRE	Dirección	Descripción
1	Vcc	--	Alimentación
2	DOUT	Salida	Salida dato UART
3	DIN / CONFIG	Entrada	Entrada dato UART
4	DIO12	E / S	E/S digital
5	RESET	Entrada	Reset del módulo
6	PWM0 / RSSI / DIO10	E / S	Salida PWM / Indicador de potencia de señal recibida / E/S Digital
7	PWM / DIO11	E / S	E/S digital
8	reservado	--	No conectado
9	DTR / SLEEP_RQ/ DIO8	E / S	Pin control de modo "dormido" o E/S Digital
10	GND	--	Tierra
11	DIO4	E / S	E / S digital
12	CTS / DIO7	E / S	Control de flujo del buffer de recepción o E/S Digital
13	ON / SLEEP / DIO9	Salida	Indicador estado del modulo ó E/S Digital
14	reservado	--	No conectado
15	Asociación / DIO5	E / S	Indicador de asociación o E/S Digital
16	RTS / DIO6	E / S	Control de flujo del buffer de transmisión o E/S Digital
17	AD3 / DIO3	E / S	Entrada Analógica o E/S Digital
18	AD2 / DIO2	E / S	Entrada Analógica o E/S Digital
19	AD1 / DIO1	E / S	Entrada Analógica o E/S Digital
20	AD0 / DIO0 / Commissioning Button	E / S	Entrada Analógica o E/S Digital o Commissioning Button

Tabla 2.1 Descripción de pines del módulo Xbee.

Fuente: Adaptado por los autores de Digi, hoja de datos "Xbee ZNet 2.5".

La tabla número 2.1 muestra la distribución de los pines del dispositivo y una breve descripción de ellos. Las filas rojas y azules oscuro indican los pines necesarios para poner en funcionamiento el dispositivo, permitiéndole transmitir datos a través de radio enlaces además de transmitir datos a través de la UART. Los pines 17, 18, 19 y 20 le permiten al módulo interactuar con

dispositivos externos que requieran enviar una información analógica a través del aire.

Tal y como se mencionó anteriormente, el módulo Xbee ZNet 2.5 permite interactuar con dispositivos de gran capacidad de procesamiento de datos, como Microcontroladores y computadores, mediante una comunicación asíncrona a través de un puerto serial. De manera general es posible comunicar el módulo Xbee con cualquier dispositivo (*host*) que contenga UART (*Unidad de Recepción y Transmisión Asíncrona*). Para realizar esta comunicación el módulo Xbee cuenta con *buffers* que le permiten mantener (además de los datos seriales recibidos por parte de algún host) datos provenientes del aire en modo de radio frecuencia (RF).

Los datos provenientes de la comunicación serie son almacenados en el **buffer de recepción serie** hasta que estos puedan ser procesado por el módulo. Por otro lado, el **buffer de transmisión serial** almacena todos los datos provenientes del enlace de radio frecuencia (RF) y posteriormente son transmitidos a la UART del dispositivo host que está haciendo uso de las características inalámbricas del Xbee. El módulo soporta dos protocolos de comunicación serial denominados: modo transparente (por medio de comandos AT) y API (interfaz para la aplicación de programación o “*applicatiorn programming interface*”); la figura 2.13 presenta en diagrama de bloques la configuración interna del módulo.

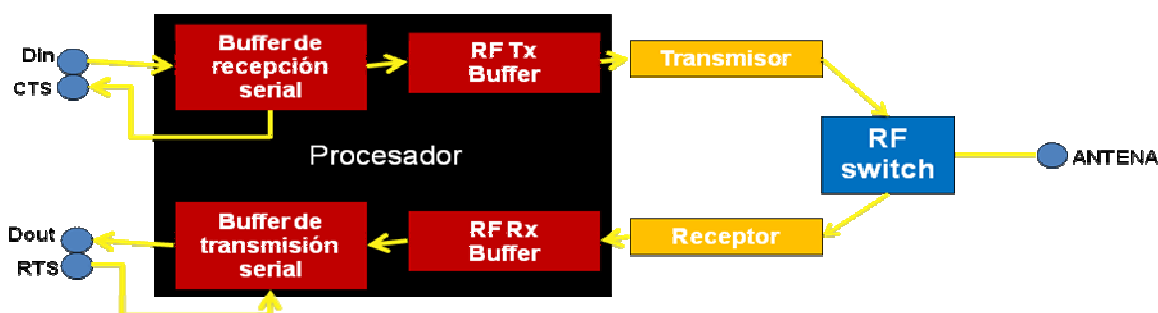


Figura 2.13 Diagrama de bloques del funcionamiento de transmisión y recepción de la plataforma Xbee.

Fuente: Adaptado por los autores de Digi, hoja de datos “Xbee ZNet 2.5”.

Cuando el módulo opera en modo transparente, este actúa como un camino directo entre la UART y el canal de radio comunicación, es decir que todo dato que llegue al dispositivo a través de un radio enlace, será dirigido inmediatamente a la UART de manera serial.

Los comandos AT son utilizados para modificar los parámetros (ya sea de comunicación, de direccionamiento, de seguridad, etc.) del módulo. Otra alternativa para hacer comunicación serial con el módulo Xbee es emplear el modo API, el cual se basa en una serie de tramas de datos creadas y organizadas para mejorar y hacer más flexible la forma en que se lleva a cabo la comunicación entre la aplicación del *Host* y el módulo Xbee. Cuando el módulo Xbee opera en modo API, todos los datos que entran y salen del módulo están contenidos en tramas que definen operaciones o eventos dentro de este. El protocolo de interfaz serial API facilita operaciones como por ejemplo la recepción del estado de éxito o fallo en la transmisión de datos RF o identificar la dirección fuente de cada paquete recibido. Durante su operación, el módulo Xbee atraviesa por diferentes estados que permiten la ejecución de cada una de las tareas necesarias para recibir y transmitir datos.

Un estado de operación especial es el estado conocido como dormido, en el cual el módulo permanece en un estado de bajo consumo de potencia cuando no se está utilizando. El módulo Xbee posee dos maneras para activar el modo dormido. La primera forma activa el modo dormido cuando la tensión en un pin (pin 9) del módulo cambia de un valor lógico 0 a un valor lógico 1, el módulo restablece su operación normal cuando el nivel de tensión en el mismo pin pasa de un nivel lógico 1 a un nivel lógico 0. El método restante es denominado por el fabricante como el modo dormido por ciclos (*cyclic sleep*) en donde el módulo entra en modo de bajo consumo de potencia durante un periodo designado (mediante *software*) de tiempo, luego regresa a su estado de operación normal por un tiempo y nuevamente llega al estado de bajo consumo de potencia, este proceso se repite periódicamente.

2.2.3.1 Parámetros del módulo y Comandos AT

Para poder realizar cualquier tarea, es necesario que el módulo inicialmente esté programado con un *firmware* adecuado para el papel que este va a desempeñar dentro de la red, es decir, si el dispositivo ha estado actuando como coordinador pero se requiere cambiarlo para que actúe como dispositivo final (ya que va a permanecer dormido cierto tiempo) este debe ser programado con un *firmware* diferente. Los *firmware*, además de contener las propiedades básicas y necesarias para que un módulo opere en condiciones normales (como activación de los periféricos del radio y del Microcontrolador interno, cargar el Zig-bee stack, entre otras), otorga al usuario la posibilidad de modificar parámetros del módulo relacionados con su calidad de desempeño y también permite ajustar las cualidades del módulo a la aplicación para la cual va a ser empleado dándole así una gran flexibilidad y adaptabilidad a estos dispositivos.

Los diferentes *firmware*, a través de comandos AT, permiten modificar parámetros del módulo relacionados con manejo de memoria (escribir y leer en memoria no volátil, etc.), direccionamiento de datos (dirección de red, dirección de destino, tabla de enrutamiento, etc.), seguridad y manejo de red (canal de operación, saltos de radio difusión, tiempo de afiliación a la red, duración del *SCAN CHANNEL Y DEL ENERGY SCAN*, etc.), la interfaz de radio frecuencia (potencia de transmisión, RSSI, habilitar o deshabilitar amplificador de potencia (*BOOST*), etc.), la interfaz de comunicación serial (habilitar el modo de comunicación API, velocidad de transmisión a través de puerto serie, etc.), puertos de entrada/salida (habilitar los puertos periféricos de entradas/salidas digitales/analógicas, rata de muestreo de los canales analógicos/digitales, etc.), diagnóstico, opciones sobre comandos AT y configuración del modo dormido (*Sleep mode*).

2.2.3.2 Pruebas de caracterización del radio del módulo Xbee Znet 2.5

Con el ánimo de conocer las características y habilidades del módulo Xbee y utilizar este conocimiento en el desarrollo de aplicaciones con un alto grado de calidad, el grupo de investigación CPS diseñó y ejecutó mediante este proyecto, una serie de estudios sobre las características del radio embebido en el módulo Xbee; los objetivos de este estudio de caracterización fueron:

- Conocer la máxima distancia a la cual existe una comunicación de buena calidad entre dos módulos Xbee.
- Conocer la potencia eléctrica requerida por el módulo para efectos de transmisión y recepción de datos.
- Evaluar el desempeño del módulo bajo diferentes configuraciones de los parámetros de la interfaz de radio frecuencia.

2.2.3.2.1 Consideraciones para la realización de las pruebas de caracterización de los módulos Xbee en ambientes abiertos

Estas pruebas fueron realizadas en un campo abierto (*Outdoor*) manteniendo línea de vista (LOS) entre un nodo operando con el firmware de dispositivo final y otro con el firmware de coordinador, la locación escogida para la realización de las pruebas fue la pista atlética de la Universidad Industrial de Santander, la altura de los módulos con respecto al suelo se escogió de 50 cm aproximadamente, el nodo que actuaba como nodo concentrador se alimentó a través del puerto USB de un computador portátil, mientras que el nodo dispositivo final fue alimentado por una batería de 9 voltios; Con el objetivo de medir la corriente requerida por el nodo remoto o dispositivo final, se empleó un multímetro; El nodo remoto se encontraba dentro de una caja plástica marca Dexson la cual teóricamente no presenta ningún tipo de atenuación a la señal de radio en la banda de 2.4 [GHz].

La prueba se realizó utilizando la herramienta X-CTU, la cual permite establecer patrones de simulación bastante útiles para este tipo de estudios,

esta herramienta software a través de una interfaz grafica, muestra el valor de la potencia de radio frecuencia recibida (RSSI), la cantidad de paquetes transmitidos y recibidos al igual que el contenido de estos; mediante este software también es posible configurar el tamaño y la cantidad de paquetes de datos que se desean ser enviados al nodo remoto durante la prueba.

El nodo remoto fue configurado para actuar como repetidor al conectársele un adaptador de *loopback*; de tal forma que todo los paquetes de datos recibidos por este nodo a través del enlace de radio frecuencia eran transmitidos de vuelta al nodo concentrador.

2.2.3.2 Metodología de las pruebas

La base del estudio es el conocimiento de los parámetros del módulo que permiten modificar la potencia de transmisión del radio (teniendo en cuenta que la sensibilidad del mismo es de alrededor de -92 [dBm]). Estos parámetros se encuentran clasificados dentro del grupo de comandos AT relacionados con la interfaz de radio frecuencia (RF); los comandos empleados para modificar las características de RF del módulo son los siguientes:

- a) **Nivel de potencia (PL):** Este comando permite seleccionar el nivel de potencia al cual el módulo de radio frecuencia transmite información, las opciones que ofrece este comando contemplan niveles de potencia de transmisión de -8, -4, -2, 0 y 2 [dBm] (con la opción de potencia adicional deshabilitada), estas opciones son seleccionadas incluyendo como argumento del comando los números del 0 al 4 respectivamente.
- b) **Opción de potencia adicional (PM).** Habilita o deshabilita el amplificador de potencia que permite incrementar la sensibilidad del módulo en 1dB y la potencia de transmisión en 2dB.

Evaluando las diferentes opciones de potencia que presenta el módulo, se procedió de la siguiente manera:

- Se realizaron medidas desde 0[m] y cada 5[m] de separación entre el coordinador y el dispositivo final hasta alcanzar 50[m] de distancia entre ambos nodos.
- En cada punto de medida (es decir cada 5 [m]) se registró el RSSI y el consumo de potencia en el nodo remoto (dispositivo final)
- Se modificó el parámetro de nivel de potencia (PL) y la opción de potencia adicional (PM) en cada punto de medida y se registro el RSSI y el consumo de potencia en el nodo remoto.

Los resultados de estas pruebas junto con las fotos que evidencian la realización de estas serán adjuntados a este documento en el anexo B.

2.2.3.2.3 Conclusiones de las pruebas de caracterización

- El fabricante establece que el nodo es capaz de cubrir con su transmisión un rango de 120 [m] en espacios abiertos y con línea de vista. Durante las pruebas se encontró que a 40 [m] de separación entre un transmisor y un receptor, la calidad en la comunicación empieza a fallar, sin embargo esta se recupera un poco a partir de los 50 [m] de separación entre los mismos nodos.
- El máximo alcance sin pérdida de paquetes es 60 [m]
- El comportamiento del RSSI (*"receive strength signal indication"*) fue tal y como se esperaba, es decir, a medida que se aumenta el parámetro PL éste mejora; siempre y cuando los nodos conserven la misma distancia de separación. Cuando el parámetro PL se mantiene constante y se varía la distancia el RSSI empieza a decaer hasta los 40 [m] de separación entre los nodos pero a partir de 50 [m] este empieza a aumentar, confirmando lo expuesto en el primer punto.
- Fue posible determinar que a medida que se aumenta el parámetro PL conservando la misma distancia de separación entre los nodos, la potencia

requerida por el dispositivo no varía lo cual permite tener una mejor calidad de señal (al incrementar la potencia de transmisión) sin incurrir en un gasto extra de potencia.

- Pese a que el fabricante afirma que el módulo operando con máxima potencia de transmisión requiere una corriente de alimentación de 40[mA] (máxima corriente de alimentación) durante las pruebas se aclaró que el mínimo valor de corriente que necesita el Xbee para funcionar es aproximadamente igual a 50[mA].

A modo de observación se puede decir que es posible ampliar los resultados obtenidos al considerar mediciones con alturas mayores a 50[cm] y diversos escenarios “*outdoor*” que complementen las pruebas de caracterización realizadas en este proyecto.

2.2.3.2.4 Consideraciones para la realización de las pruebas de caracterización de los módulos Xbee en un galpón avícola

En esta prueba se utilizó la misma metodología implementada en la caracterización del módulo Xbee en ambientes abiertos con la diferencia que para esta prueba el escenario era una área aproximada de 12x25 [m²] en donde diversos objetos como cortinas, recipientes de plástico utilizados para suministrar agua a los pollos del galpón (bebederos), objetos metálicos utilizados para brindar calor a las aves a través de combustión de gas (criadoras) e inclusive los mismos pollos; afectan el nivel de potencia recibida en un determinado punto del recinto.

La principal conclusión a la cual se llegó después de haber realizado estas pruebas en un galpón ubicado en el área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga (ver figura 3.19), es que dentro del galpón los elementos que más atenúan la potencia de la señal del radio Xbee, son las cortinas utilizadas para controlar de forma manual (y casi empíricamente) variables físicas ambientales como la temperatura, humedad relativa, intensidad luminosa y velocidad del viento (ventilación).

De acuerdo con los resultados obtenidos tras la realización de esta prueba, se observó que cuando las cortinas obstaculizan la línea de vista entre un nodo receptor y otro transmisor, la comunicación entre ellos no es tan confiable (en términos de calidad de enlace, nivel RSSI, cantidad de paquetes perdidos, etc.) como cuando dichos elementos no están presentes; la figura 2.14 muestra el perfil de radio propagación encontrado a través de esta prueba.

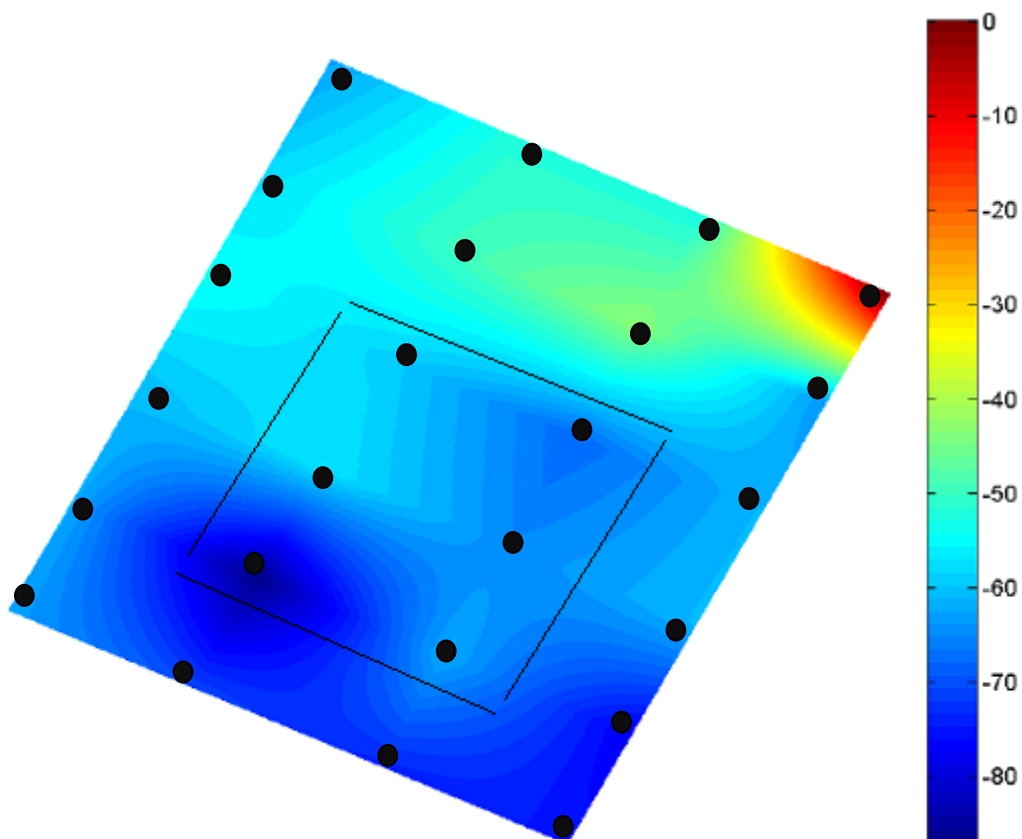


Figura 2.14 Perfil de radio propagación en el galpón avícola ubicado en la finca los totumos, los puntos donde se realizaron medidas se resaltan en color negro
Fuente: Autores

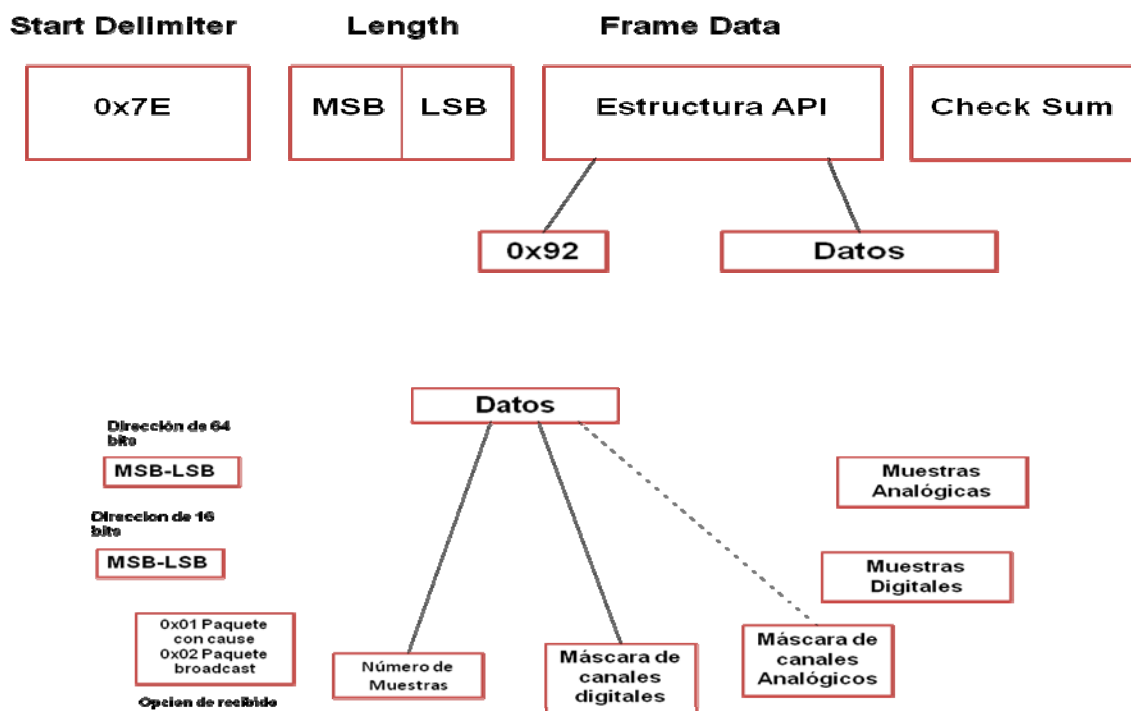
En el anexo B también se muestran los resultados de estas pruebas así como las fotos que evidencian su ejecución.

2.2.3.3 Caracterización del sistema ADC del módulo Xbee

En esta sección se presenta la forma en que se procedió para lograr la caracterización del sistema ADC del módulo Xbee. Esta práctica también fue diseñada y ejecutada por los autores del proyecto en conjunto con el equipo de trabajo del grupo de investigación CPS.

2.2.3.4 Metodología de la caracterización del ADC.

Dos módulos son necesarios para realizar esta práctica uno de los cuales debe estar configurado con un *firmware* (el *firmware* ZNet 2.5 router/End Device AT versión 1241 por ejemplo) que le permita actuar como dispositivo final, mientras el segundo debe estar configurado con un *firmware* que le permita actuar como coordinador y además manejar tramas API (el ZNet 2.5 coordinador API versión 1141 por ejemplo), esto es porque los datos provenientes del ADC se acomodan en una trama API como se muestra en la figura 2.15.



**7E 00 12 92 00 13 A2 00 40 0A 3D BF 66 BA 01 01 00 00 02 03 FF
4C**

- 7E - Start Delimiter
- 00 12 - Length Bytes
- 92 - API Identifier Value
- 00 13 A2 00 40 0A 3D BF - 64-bit Address
- 66 BA – 16-bit Address
- 01 - Receive Options
- 01 - Number of sample sets included in the payload
- 00 00 - Digital Channel Mask
- 02 - Bitmask field that indicates which digital IO lines on the remote have sampling enabled
- 03 FF - 2-byte value indicating the A/D measurement of input.
- 4C - Checksum

Figura 2.15 Trama API de los datos provenientes del ADC

Fuente: Adaptado por los autores de Digi, "Xbee User's guide".

En la tabla 2.2 se muestra la configuración de los parámetros de ambos nodos (para comprender mejor esta configuración el lector puede referirse al anexo A, el cual presenta la descripción de todos los comandos AT).

Coordinator AT	Router API
Pan ID=654	PAN ID=654
NI=COORD	NI=REMOTE1
SH=13A200	DH=13A200
SL=400A0085	DL=400A0085
DH=0	SH=13A200
DL=FFFF	SL=400A3DBF
	D1=2
	IR=1388

Tabla 2.2 Configuración que deben llevar los parámetros de ambos nodos para realizar conversión AD.

Fuente: Autores.

Se utilizó un potenciómetro conectado al pin9 (correspondiente al puerto AD1 del Xbee ZNet 2.5) del módulo cargado con firmware de *router*. Mediante este potenciómetro se incrementó la señal analógica con un paso de 0.1[V] y se registró la medida transmitida por dicho módulo en la trama API para cada nivel, estas medidas son presentadas en un formato digital de 10 bit, tal y como

lo sugiere el fabricante; la tabla 2.3 muestra las lecturas del voltímetro y el valor hexadecimal capturado en la trama que transmite el módulo por cada lectura. La gráfica 2.16 muestra el comportamiento de estas lecturas.

Lecturas del multímetro	Salida en Hex
0.05	0025
0.10	0053
0.20	00AF
0.30	00FB
0.40	014F
0.50	01A3
0.60	01F7
0.70	024
0.80	02A2
0.90	02F4
1.00	0346
1.10	03A0
1.20	03EE
1.22 y mayores	03FF

Tabla 2.3 Lecturas del voltímetro en la entrada cotejadas con el valor hexadecimal capturado de la transmisión.

Fuente: Autores.

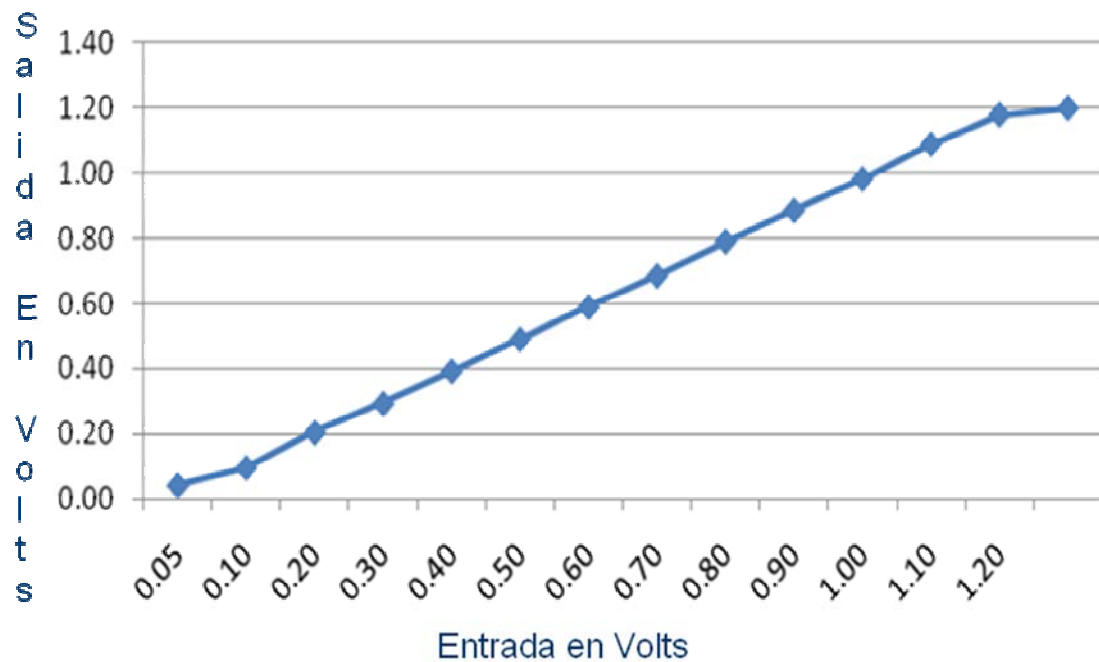


Figura 2.16 Comportamiento de las lecturas tomadas por el ADC en la práctica

Fuente: Autores.

De esta gráfica se aprecia que la tensión máxima admitida a la entrada del ADC es 1.2 [V] lo que significa que la tensión de referencia del ADC es también 1.2 [V], sabiendo esto se puede utilizar la fórmula (2.1) para realizar la conversión de hexadecimal a decimal.

$$V_{out} = \left(\frac{\text{valor hexadecimal}}{03FF} \right) * 1.2[V] \quad (2.1)$$

Con esto se completa la caracterización del sistema ADC, aunque no se tiene información precisa sobre el hardware que utiliza el módulo Xbee, los fundamentos extraídos de esta investigación permiten entender y utilizar el sistema ADC del módulo para desarrollar aplicaciones con transductores que entreguen a la salida una señal analógica.

3 ESTUDIO DE SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS Y DISEÑO DEL SISTEMA DE ADECUACION DE SEÑAL.

El diccionario de la real academia de la lengua española (DRAE) define el término Sensor como un “*dispositivo que detecta una determinada acción externa como presión, temperatura, etc. Y la transmite adecuadamente*”; a pesar de ser una definición simple, esta logra presentar una idea universal acerca de los sensores a partir de la cual se pueden ajustar definiciones más completas.

En la actualidad la mayoría de los sensores empleados en sistemas de adquisición de datos, instrumentación electrónica, control y de monitorización de variables físicas para procesos industriales, pertenecen a la clase de sensores que utilizan como mecanismo de funcionamiento las propiedades de la energía eléctrica, estos pueden ser definidos (partiendo de la definición otorgada por el DRAE como “*dispositivos que detectan una determinada acción externa (estimulo o variables de instrumentación) y otorgan una medida precisa de estas mediante una señal de naturaleza eléctrica (tensión, corriente, resistencia, capacitancia, inductancia, etc.) con el fin de extraer información del ambiente que lo rodea o del objeto en estudio*” [3.2][3.3][3.4]. Esta clase de sensores en particular, son conocidos con el nombre de Sensores Electrónicos; en el argot de la Ingeniería Electrónica el termino sensor y el termino transductor (definido por el DRAE como “*dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica*” [3.1]) son utilizados indistintamente. A lo largo del libro será empleado el término sensor para hacer alusión a este tipo de equipos.

Existen diversas formas de clasificar a los sensores, por ejemplo pueden clasificarse según su principio de funcionamiento (mecánico, eléctrico, neumático, etc.), tipo de señal que genera, nivel de integración (Discretos, Integrados), tipo de variables físicas medidas (Temperatura, Humedad, Luz, etc.), entre otros (ver figura 3.1) [3.3];

A pesar de las diversas clasificaciones que se pueden hacer sobre los sensores la convención en la industria es dividirlos teniendo en cuenta la necesidad (o carencia) de fuentes de excitación externas para producir una señal eléctrica de salida; de acuerdo con esto es posible contar con sensores activos o pasivos. [3.4]. Un sensor activo es aquel que es capaz de generar una señal de salida sin requerir una fuente de alimentación externa; las celdas fotovoltaicas, termopares y dispositivos piezoeléctricos son ejemplo de este tipo de sensores. Por otro lado, los sensores pasivos(a diferencia de los sensores activos), necesitan de una fuente de excitación externa para generar una señal de salida; en este respecto todos los sensores que producen su señal de respuesta en forma de variables eléctricas pasivas (resistencia, capacitancia, inductancia, etc.) pertenecen a este grupo. Termistores, galgas extensiométricas, transformadores de inductancia variable (LVDT), acelerómetros, etc. son algunos ejemplos de sensores pasivos.

Cabe anotar que antes de utilizar una clasificación que sirva como medio de discernimiento para la implementación de uno u otro sensor en determinada aplicación, lo más importante es tener pleno conocimiento del problema que se desea resolver; en este respecto clasificar los sensores de acuerdo a la variable que miden es bastante ventajoso. Según esta clasificación es posible encontrar sensores que miden temperatura, humedad, presión, posición, movimiento, caudal, luz, corriente, conductividad, resistividad, señales biológicas (sensores biométricos), sonido (Acústicos), aceleración, velocidad, inclinación, concentraciones de gases, etc.

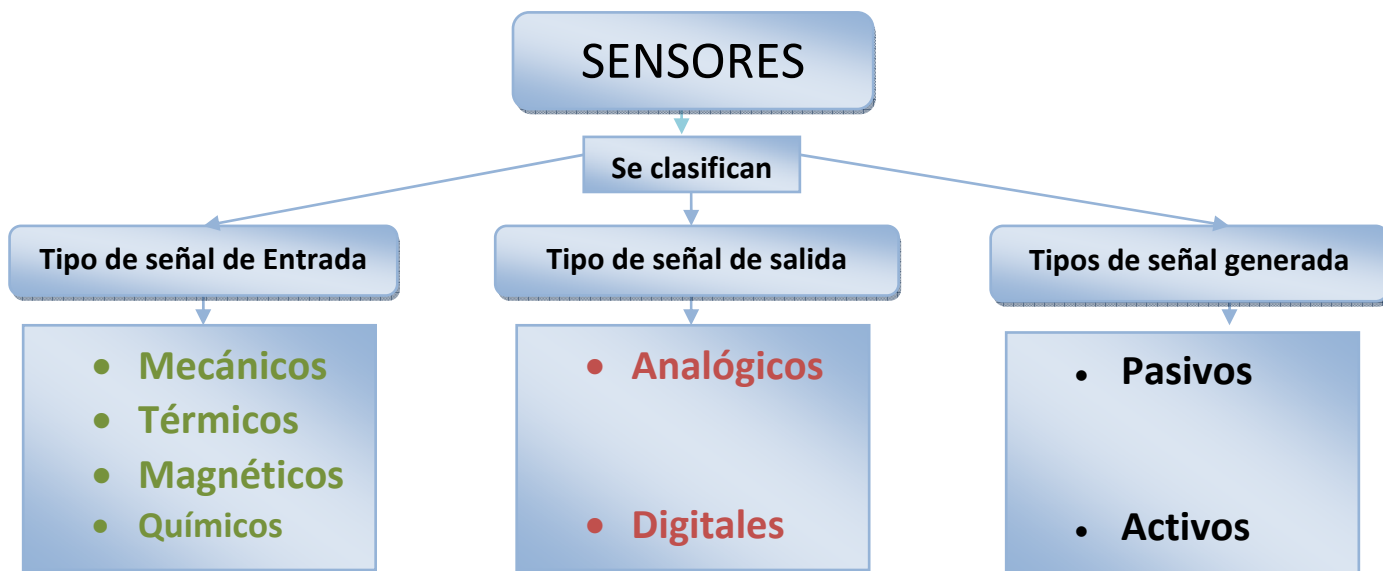


Figura 3.1 Una forma de clasificar a los sensores

Fuente: Adaptado por el autor de la página web de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales www.unal.edu.com.co.

3.1 ESPECIFICACIONES Y PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE SENSORES.

Un adecuado proceso de caracterización del sensor en términos de los parámetros apropiados para la aplicación marca la diferencia entre el éxito o no del trabajo final, por lo tanto el pleno conocimiento del problema que se desea abordar también implica una familiarización, por parte del diseñador, con detalles técnicos sobre los sensores que serán empleados, permitiendo así tener un buen criterio para la escogencia entre cierto producto u otro.

Entre los parámetros que más influyen en el desempeño de un sensor se encuentran la precisión, el rango de medida, la desviación de cero (*offset*), la resolución, la rapidez de respuesta, la linealidad, la repetitividad, la inmunidad a señales parasitas o deriva (*drift*), la sensibilidad, impedancias (de entrada y de salida) y máximas condiciones eléctricas. Algunas de estas serán definidas a continuación [3.5] [3.6] [3.7] [3.8]:

- Rango de mediada (*Range*): Dominio en la magnitud de medida en el cual puede aplicarse el sensor.
- Precisión (*Accuracy*): La precisión es una medida del grado con el cual las mediciones sucesivas difieren una de otra, es decir, es el error de medida máximo esperado.
- Sensibilidad (*Sensitivity*): Es la relación de la señal de salida o respuesta del sensor respecto al cambio de la entrada o variable de instrumentación.
- Resolución: Mínima variación de la señal de instrumentación que puede ser detectada a la salida del sensor.
- Desviación de cero (*Offset*): Es el valor presente a la salida del sensor cuando la variable de instrumentación es cero.
- Inmunidad a señales parasitas o derivas (*Drift*): Es la medida en que la señal de salida del sensor se ve afectado por condiciones indeseadas en el ambiente de operación del equipo u otras señales que influyen en el desempeño de este mismo, por ejemplo: la humedad ambiente, la humedad relativa, la vida útil del equipo etc.

3.1.1 Principio de operación de los sensores más utilizados

Los avances en Microelectrónica y diseño de circuitos analógicos integrados (IC por sus siglas en Ingles) han logrado que los sensores tengan características de desempeño nunca antes alcanzadas, permitiéndoles a los usuarios de estos (diseñadores) mayor facilidad a la hora de adaptarlos a sus aplicaciones finales.

A continuación se mencionan algunas de las características de los sensores que evolucionan a diario gracias a la incorporación de nuevos conocimientos y nuevas tecnologías en los procesos de fabricación [3.2].

1. Alta Eficiencia.
2. Linealidad casi perfecta.
3. Amplio rango de medidas.
4. Alta relación de rechazo a ruido.
5. Bajo consumo de potencia.
6. Presentación física reducida (ver figura 3.2).
7. Alta relación costo-beneficio (económicamente accesibles).

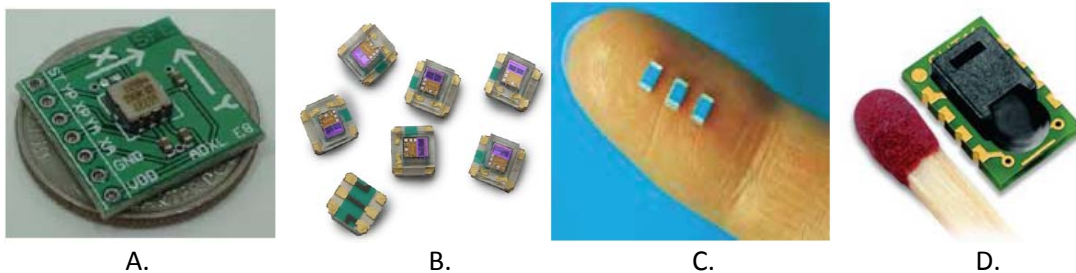


Figura 3.2 *Ejemplo de dispositivos sensores: A. acelerómetros, B. Sensor de luz, C. Sensor de temperatura D. Sensor de humedad*

A pesar de los avances y logros alcanzados por la ciencia en el campo de los sensores, los fundamentos teóricos concernientes al funcionamiento de estos permanecen inmutables desde hace más de cuatro décadas, el objetivo de esta sección es hacer una revisión de dichos fundamentos teóricos para los sensores más utilizados en la industria [3.9][3.10].

3.1.1.1 Sensores de temperatura

Para muchos procesos industriales y modernos dispositivos electrónicos (especialmente en equipos de carácter portable), la medición de temperatura es crítica. Aun cuando la temperatura no es el parámetro objetivo a medir, es

necesario tenerlo en cuenta ya que por ser una propiedad intrínseca de la materia este afecta a todos los materiales y a todos los procesos [3.4][3.8].

La temperatura puede ser medida a través de cambios macroscópicos en los cuerpos, cambios en volumen, masa o hasta con el estado (sólido, líquido o gaseoso) en el que esta se encuentra son aprovechados para medir temperatura [3.11].

La cantidad física conocida como calor, es una de las tantas formas de energía existentes en la naturaleza y por lo tanto se mide en unidades de Joule. Es impreciso decir que la cantidad de calor de un cuerpo es equivalente a su temperatura ya que la diferencia entre estos dos términos radica en que el calor es una consecuencia de la diferencia de temperatura entre dos cuerpos o de un mismo cuerpo si este no ha cambiado de estado físico [3.11][3.12].

Los transductores más populares para realizar mediciones de temperatura son tres (3) y a continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos.

- **Termocuplas o termopares:** Thomas Seebeck descubrió en 1821 que cuando dos metales diferentes están en contacto se genera una tensión eléctrica proporcional a la temperatura en el punto donde los dos metales se unen, en la actualidad esta tensión se conoce con el nombre de tensión Seebeck (en honor a su descubridor) mientras que al dispositivo que emplea este principio físico como método para medir la temperatura se le llama termopar. La ecuación matemática que modela este comportamiento se presenta a continuación.

$$V = a + b\theta + c\theta^2 \quad (3.1).$$

Donde V es la tensión generada por la diferencia de temperatura θ de las uniones de los metales disímiles, mientras que a , b y c son coeficientes característicos del par de metales. Otros fenómenos físicos similares al efecto Seebeck son el efecto Peltier y el efecto Kelvin [3.12].

En el mercado es común encontrar termopares fabricados de hierro, platino, rodio, tungsteno, cobre, alumel (Aleación entre níquel y aluminio), cromel (Aleación entre níquel y cromo) y constantan (Aleación entre cobre y níquel). Para fabricar termocuplas generalmente se utilizan dos métodos; uno de ellos consiste en fundir dos metales produciendo una unión frágil la cual debe ser protegida contra esfuerzos mecánicos con el fin de evitar fracturas o rupturas en la unión [3.8][3.12]; el segundo método es soldar dos metales; esto introduce un tercer metal al sistema, es decir se crean dos puntos de unión diferentes entre cada metal y el material utilizado para la soldadura (por lo general plomo), esta nueva unión trae como consecuencia añadir un par de voltajes Seebeck a la termocupla; afortunadamente dicha tensión adicional no afecta a la medida si se mantienen ambos extremos de la soldadura a la misma temperatura. Otra desventaja relativa a esta forma de fabricación de termocuplas radica en la disminución del rango de acción del instrumento dado que el límite superior de medida esta impuesto por la temperatura de fusión del material utilizado en la soldadura [3.8].

Este instrumento no es llamado termopar solamente por estar compuesto de metales disimiles, también es llamado así porque la medida de temperatura se realiza con respecto a otra unión de los mismos metales en el mismo sistema, es decir que para obtener una diferencia de potencial en los terminales de un termopar, es necesario que exista un extremo de este encargada del sensado de la temperatura del sistema que se desea estudiar y otra unión inmersa en un sistema capaz de mantener la temperatura constante. La unión que se somete a temperatura constante se denominada unión de punto frio o de referencia, llamado así porque históricamente fue necesario sumergirla en un baño que mezclaba hielo y agua conservando la temperatura de la unión a 0°C, actualmente esta compensación de punto frio se realiza empleando un sensor de temperatura encerrado en una cámara isotérmica junto con la unión de punto frio para generar una

tensión que equilibre la tensión Seebeck “parasita” generada por la unión de referencia [3.12] [3.4] [3.8].

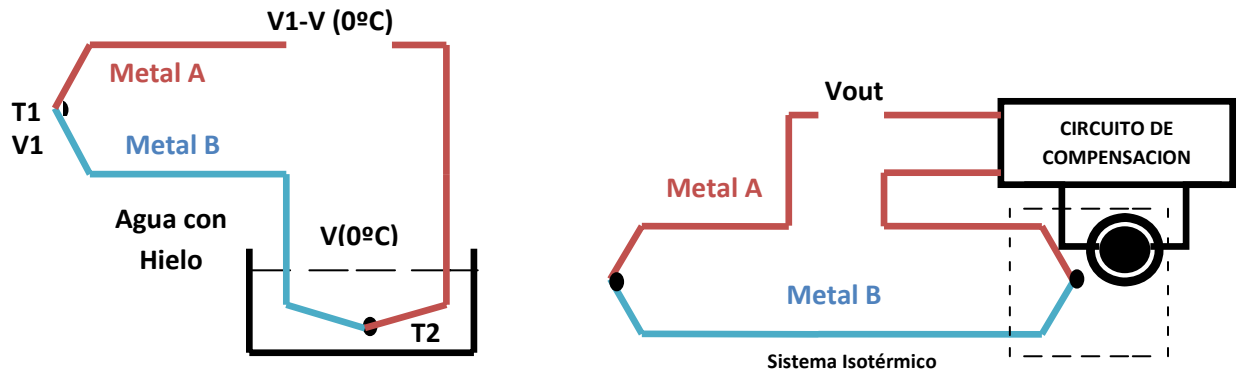


Figura 3.3 *Diferentes métodos para realizar la compensación por punto frío*

A. Utilizando un baño de agua con hielo, B. Empleando sensores semiconductores bajo un sistema isotérmico.

Fuente: Adaptado por los autores de COOPER, William. *Instrumentación Electrónica y mediciones*. Prentice Hal.

La ecuación de Seebeck (descrita arriba) evaluada a 0°C se transforma en la ecuación (3.2).

$$V = \alpha T^2 + \beta T \quad (3.2)$$

Donde V es la tensión generada por la diferencias de temperatura T de las uniones de los metales disimiles (una de ellas a 0°C), mientras que α y β son coeficientes característicos del par de metales.

En el Instituto Nacional Estadunidense de Estándares (ANSI por sus siglas en ingles) aparecen registrados ocho tipos de termopares, clasificados según los materiales utilizados en su fabricación (B, C, E, J, K, R, S y T), entre estas ocho clases de termocuplas se destacan la tipo J, la tipo K y la tipo S; por su popularidad.

En la escogencia adecuada de una termocupla intervienen dos parámetros importantes, uno es el rango de operación (el cual es bastante amplio) y el otro es la linealidad. El conocimiento de la curva característica que representa la tensión de salida de la termocupla con relación a la temperatura determina el rango de operación, mientras

que la grafica que muestra la relación entre el coeficiente de Seebeck (medido en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) y la temperatura permite observar la estabilidad y linealidad del instrumento (ver graficas 4-67 y 4-66 de la referencia [3.4]).

Los termopares se caracterizan por ser sensores activos y como tal producen una diferencia de potencial considerablemente pequeña en sus terminales de salida (del orden de decenas de mili-volts) sin necesitar una fuente de excitación externa y por lo tanto técnicas de linealización y amplificación deben ser utilizadas junto con estos instrumentos para obtener de ellos el mayor provecho posible [3.4] [3.12] [3.20].

- **Termómetros de resistencia (RTD):** Todos los metales exhiben un cambio en la resistividad en presencia de cambios de temperatura. Además de la resistividad (ρ), otras cantidades físicas como la longitud (S) y la sección transversal del material (A) también se ven afectadas por la temperatura.

$$R = \frac{\rho S}{A} \quad (3.3)$$

Como se aprecia en la ecuación (3.3) el concepto de resistencia eléctrica está matemáticamente representado a través de estos tres parámetros. Cada material tiene un comportamiento diferente a un valor determinado de temperatura así que la existencia de un valor que rige dicho comportamiento es un hecho totalmente comprobable. El valor del cual se hace referencia es conocido como coeficiente térmico de resistencia y permite calcular la resistencia de un material enmarcado en una temperatura determinada. Casi todos los conductores metálicos utilizados en la fabricación de termómetros de resistencias (Níquel o Platino por ejemplo) tienen un valor de coeficiente térmico de resistencia positivo, de tal manera que la resistencia se incrementa con el aumento de temperatura de tal manera que es mejor tener un coeficiente térmico

elevado para obtener variaciones significativas de resistencia a cambios no tan grandes en temperatura [3.8] [3.12].

Comparados con los termopares, los RTD a pesar de ser dispositivos pasivos y requerir fuentes de alimentación para generar una respuesta en función de la temperatura, muestran un comportamiento mucho más lineal y más preciso en el mismo rango de medida y por lo tanto el proceso de linealización a través de técnicas de instrumentación es menos complejo, por ejemplo arquitecturas simples en las que se incluyen puentes de Wheatstone son frecuentemente utilizadas para acoplar señales de RTD a sistemas de procesamiento de datos [3.4].

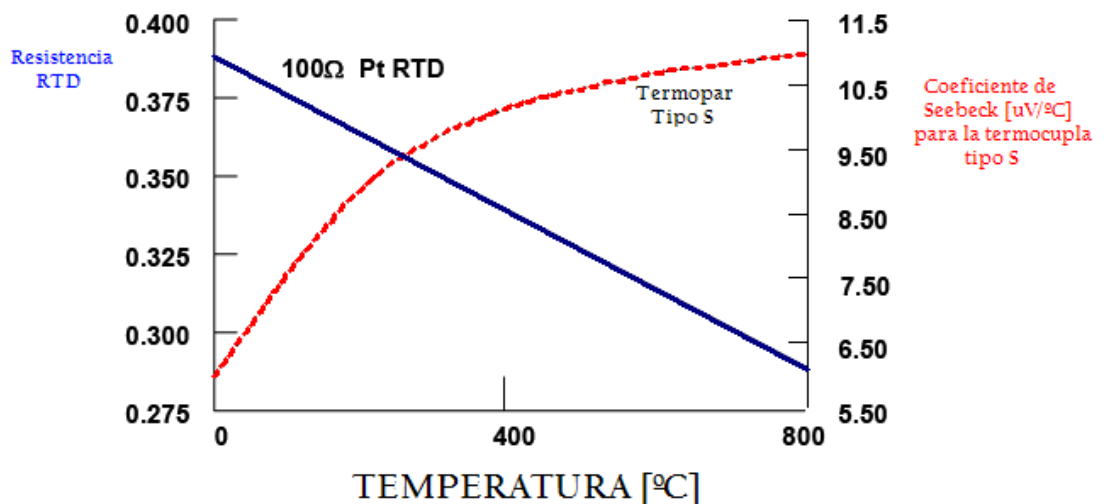


Figura 3.4 Diferencia entre RTD y Termopar tipo S

Fuente: Adaptado por los autores de KESTER, Walt. *Sensor Signal Conditioning, Analog Device.*

- **Sensores semiconductores de temperatura:** Los avances en electrónica analógica han permitido el surgimiento de modernos circuitos fabricados con semiconductores capaces de sensar temperatura ofreciendo alta precisión sobre un rango de operación dado. Estos circuitos incorporan amplificadores y sistemas de acondicionamiento de señal que permiten escalar la señal de respuesta hasta los valores requeridos por la aplicación final. Como fue mencionado anteriormente, estos dispositivos también son bastante versátiles y son empleados

ampliamente en los sistemas de compensación para uniones frías en termopares.

El principio físico utilizado en los sensores de temperatura fabricados a partir de semiconductores, se basa en la relación existente entre la tensión de la unión Base-Emisor en un transistor de juntura bipolar (BJT por sus siglas en ingles) y la corriente de colector del mismo [3.4].

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_C}{I_S} \right) \quad (3.4)$$

Donde V_{BE} es la tensión de la unión Base-Emisor del transistor, k la constante de Boltzmann, T la temperatura, q la carga del electrón, I_C la corriente de colector e I_S es una corriente de polarización y depende de la temperatura y de aspectos geométricos del transistor.

En la práctica estos sensores están formados por varios BJTs que comparten la misma tensión Base-Emisor y la misma corriente de colector lo cual da como resultado la independencia del sistema con relación al parámetro I_S , el modelado de este sistema está dado por la siguiente ecuación, en donde N es la cantidad de transistores utilizados.

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln (N) \quad (3.5).$$

La implementación del modelo matemático se logra a través de la arquitectura conocida como celda de Brokaw en honor a su diseñador [3.4].

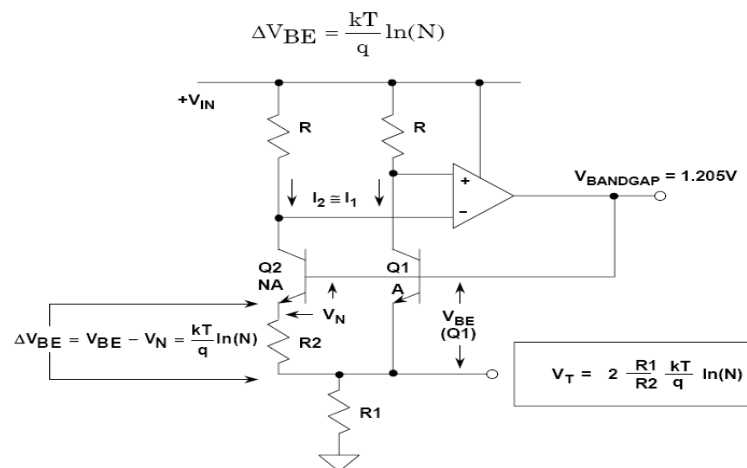


Figura 3.5 Celda de Brokaw

Fuente: Adaptado por el autor de KESTER, Walt. *Sensor Signal Conditioning, Analog Device.*

A manera de resumen se presenta la tabla (3.1) que muestra la comparación entre los diferentes sensores de temperatura con sus características más relevantes lo cual sirve como guía e identificar el sensor más apropiado para cierta aplicación.

Dispositivo	Alimentación [V]	Rango [°C]	Linealidad	Otros
TERMOPAR	ACTIVO (Comp. punto frío)	-184 / 2300 (El más amplio)	Gran linealidad y repetitividad	Baja tensión de salida
RTD	PASIVO	-200 / 850	Media	Bajo costo
TERMISTOR	PASIVO	0 / 100	Baja	Alta sensibilidad
SEMICONDUCTOR	PASIVO	-55 / 150	Muy Buena (1°C)	Buena Ganancia (10mV/K)

Tabla 3.1 Comparación entre los diferentes sensores de temperatura

Fuente: Adaptado por los autores de KESTER, Walt. *Sensor Signal Conditioning, Analog Device.*

3.1.1.2 Sensores de Humedad

El aire que circunda todo sistema contiene partículas de diversos gases (Nitrógeno, Oxígeno, Carbono, Hidrógeno, etc.), entre esas partículas se encuentra el agua en forma de vapor [3.10]. La humedad se define como la medida de la cantidad de vapor de agua contenido en la atmósfera [3.13] [3.14].

Existe una relación estrecha entre la temperatura de los seres vivos que ocupan un recinto y la humedad relativa en dicho ambiente; cuando esta última aumenta se hacen más arduos los procesos de transpiración los cuales permiten el enfriamiento de los cuerpos; como todo proceso físico, la humedad relativa no aumenta en forma infinita, existe un punto llamado de saturación que es la condición en la cual la atmósfera no soporta más vapor de agua permitiendo que el aumento en la temperatura corporal se refleje directamente en el ambiente circundante. Los seres vivos expresan un bajo nivel de “*confort*” bajo condiciones ambientales en donde el vapor de agua alcanza un 60% del volumen de aire de un lugar [3.14] [3.15].

La humedad absoluta hace referencia al peso de agua contenido en un volumen de aire por tanto se expresa en unidades de masa o de volumen de aire seco. Medir la humedad absoluta es poco significativo al momento de expresar condiciones de comodidad de un ambiente, ya que no muestra la manera en que está relacionada la medida de la temperatura y el grado de saturación por vapor del ambiente [3.13]. Es por eso que el concepto de humedad relativa se hace importante; la humedad relativa es la razón entre el contenido efectivo de agua en su forma gaseosa en la atmósfera y la cantidad de agua en estado gaseoso necesario para saturar el ambiente a la misma temperatura a la que fue medido el contenido efectivo del aire, es decir, la humedad relativa indica el nivel de saturación de vapor de agua de un ambiente a una temperatura específica [3.10], por lo general esta medida se muestra en porcentaje y es adimensional. La ecuación matemática que modela este fenómeno físico se presenta a continuación:

$$H_r = 100 \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (3.6)$$

Donde ***H_r*** es la Humedad relativa, ***P_v*** la presión parcial de vapor y ***P_{sat}*** es la presión de vapor de saturación.

Los instrumentos que permiten medir esta condición ambiental se conoce como higrómetro y es posible encontrarlos en diversas presentaciones y aplicando diversos principios físicos y químicos. Entre los métodos más populares en la industria para realizar este tipo de mediciones se encuentran los higrómetros mecánicos, electrolíticos y los que aplican las propiedades eléctricas como la conductividad y la capacitancia [3.16]. A continuación se describe brevemente cada uno de estos cuatros instrumentos.

- **Sensores mecánicos de humedad:** Estos dispositivos aprovechan los cambios físicos de cierto tipo de materiales como fibras sintéticas y naturales (por ejemplo el cabello humano) en presencia de humedad. La idea se basa en que al aumentar la humedad estos materiales se alargan y es precisamente este fenómeno el que se aprovecha y amplifica para otorgar una señal representativa y proporcional a la humedad.

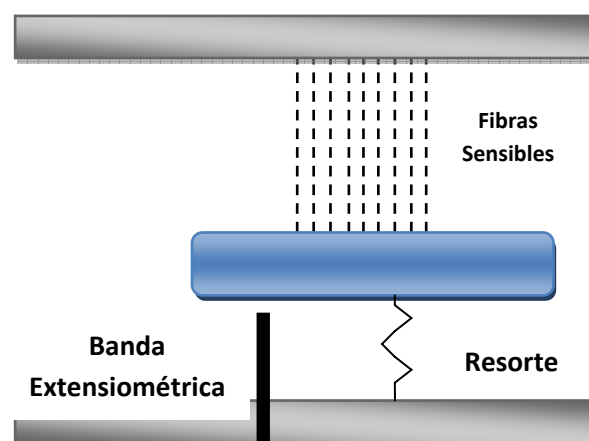


Figura 3.6 Sensor de humedad implementado con principios mecánicos

Fuente: Adaptado por los autores de KOURU, Samir. *Automatización Industrial: Sensores de humedad*, Universidad Técnica Federico Santamaría.

- **Sensores electrolíticos de humedad:** La electrólisis es el fenómeno químico que explica el proceso por medio del cual una molécula de agua es descompuesta para producir dos electrones libres [3.16]. Estos electrones libres en presencia de una diferencia de potencial generan una intensidad de corriente eléctrica lógicamente proporcional a la cantidad de moléculas de agua descompuesta. El fenómeno anteriormente descrito es empleado para sensor, a partir de la cantidad de moléculas de agua en el aire de un recinto, la humedad relativa; el esquema básico de un sensor que utiliza este principio electroquímico se presenta en la figura 3.7.

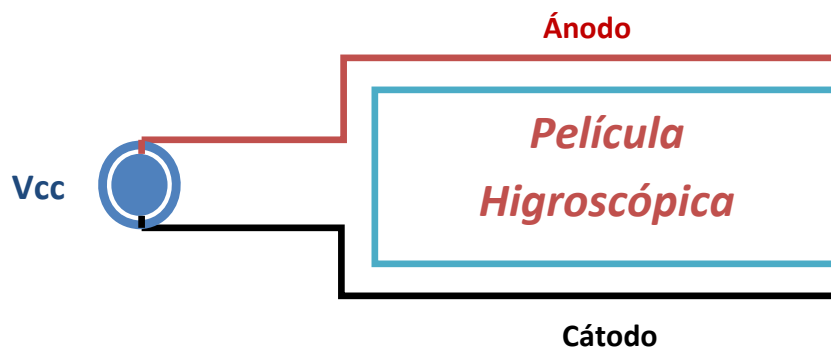


Figura 3.7 Sensor de humedad implementado con principios electrolíticos.

Fuente: Adaptado por el autor de KOURU, Samir. *Automatización Industrial: Sensores de humedad*, Universidad Técnica Federico Santamaría.

Como se observa de la figura anterior estos sensores están compuestos por una capa higroscópica fabricada con pentóxido de fósforo (PO_5) empleada para capturar una muestra de las moléculas de agua presente en el ambiente; dicha película se encuentra entre los dos electrodos del dispositivo cuya diferencia de potencial descompone las moléculas de H_2O y así generar la cantidad necesaria de electrones libres para producir una corriente proporcional a la humedad relativa del ambiente en estudio [3.16].

- **Sensores de humedad por conductividad:** El agua gracias a su composición química y a las características geométricas de la molécula (ver figura 3.10) es un buen conductor de energía eléctrica y en presencia de esta los metales mejoran su conductividad [3.13] [3.17].

Este cambio en las propiedades eléctricas de los metales es aprovechado para sensar la cantidad de agua en un ambiente determinado. La estructura física general de estos sensores se caracteriza por la presencia de varias placas de metal (tradicionalmente fabricadas en oro por tener alta conductividad) entrelazadas pero sin tocarse y enmarcadas en una placa de superficie lisa no conductora las cuales al conectarse a una fuente de alimentación externa generan una intensidad de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de partículas de agua presentes en la superficie no conductora [3.16].

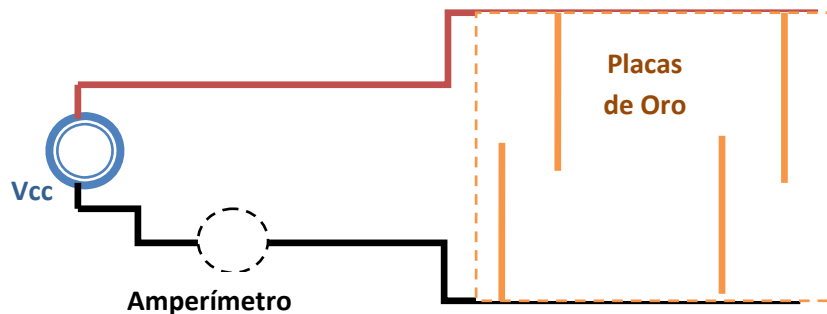


Figura 3.8 *Sensor de humedad por conductividad.*

Fuente: Adaptado por los autores de KOURU, Samir. Automatización Industrial: Sensores de humedad, Universidad Técnica Federico Santamaría.

- **Sensores de humedad por capacitancia:** Los capacitores pueden ser definidos como dispositivos que involucran elementos conductores separados por medios dieléctricos y que tienen como función principal acumular carga eléctrica en sus partes conductoras; el comportamiento de estos dispositivos (si están formados por dos placas planas y paralelas) está modelado mediante la ecuación presentada a continuación [3.16].

$$C = \epsilon \frac{A}{D} \quad (3.7)$$

Donde **C** es el valor de la capacitancia expresada en Faradios, **A** es el área las placas que forman el capacitor, **D** es la distancia que separa las placas y ϵ es la permitividad del material dieléctrico entre las capas.

Es común encontrar capacitores de diversas formas (cilíndricos, esféricos, etc.) que utilizan como medio dieléctrico mezclas gaseosas como el aire; si estas mezclas gaseosas poseen algunas moléculas de agua la permitividad del dieléctrico varía y a su vez lo hace el valor de la capacitancia (a mayor cantidad de moléculas de agua mayor capacitancia), esto se debe a que la geometría de la molécula de agua le otorga a la mezcla gaseosa propiedades eléctricas muy parecidas a la de los dipolos haciendo que estas sean alineadas en dirección de un campo eléctrico presente en el medio (ver figura 3.9).

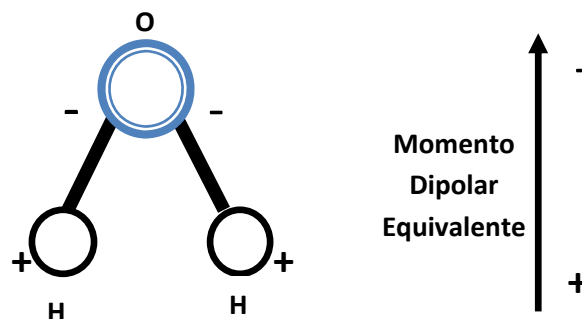


Figura 3.9 Momento dipolar equivalente en la molécula de agua.

Fuente: Adaptado por los autores de KOURU, Samir. Automatización Industrial: Sensores de humedad, Universidad Técnica Federico Santamaría.

Esta variación de la capacitancia, proporcional a la cantidad de moléculas de agua en el dieléctrico, es aprovechada para calcular la humedad relativa en un ambiente determinado. Los higrómetros capacitivos son los más difundidos a nivel industrial gracias a la facilidad con que son construidos y reproducidos, además de su alta fidelidad y bajo costo.

3.1.1.3 Sensores de Intensidad luminosa

La luz es un fenómeno electromagnético de tipo radiante de la misma clase de las ondas empleadas en las telecomunicaciones con la diferencia que las primeras tiene longitudes de ondas mucho más cortas y por ende frecuencias

más altas. En los procesos químicos industriales la luz hace las veces de catalizador aumentando la velocidad de las reacciones y en algunos casos provocándolas, esto con el objetivo de mencionar uno de los ejemplos en donde el control de la intensidad luminosa es necesario.

De la física es bien conocida la expresión que relaciona los tres parámetros fundamentales de las ondas: la velocidad v , la longitud de onda λ y la frecuencia f .

$$v = \lambda f \quad (3.8).$$

En la figura (3.10) se observa el lugar que ocupan las ondas de luz dentro del espectro electromagnético a la vez que presenta la subdivisión de estas en Visible, Infrarrojas y Ultravioletas.

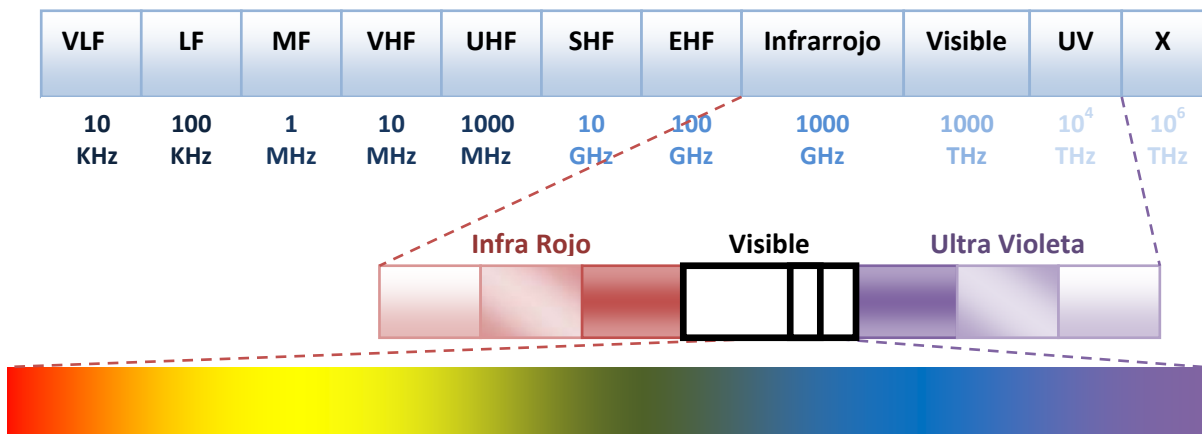


Figura 3.10 Espectro electromagnético y espectro de luz visible

La existencia de materiales que cambian sus propiedades eléctricas en presencia de luz (materiales fotosensibles) se explica utilizando el principio físico que establece que toda onda es portadora de energía en cantidades limitadas (Quantum) y que esta depende tanto de la amplitud de la onda como de la frecuencia a la cual esta viaja.

$$E = hf \quad (3.9)$$

En la ecuación 3.9 E representa la energía que contiene un fotón que viaja en el vacío oscilando a una frecuencia f y h representa una constante de

proporcionalidad llamada de Plank. Los materiales fotosensibles por lo general son semiconductores, los cuales en condiciones naturales poseen pocos electrones/huecos libres. Para que los semiconductores logren tener características de conductores es necesario incrementar esta cantidad de portadores libres y una manera de lograr el aumento en los portadores libres es incrementando la energía de las partículas del material. La luz por ser fuente de energía puede ser utilizada como medio generador de nuevos portadores libres en los materiales semiconductores. A los dispositivos que utilizan este principio físico para realizar mediciones sobre la cantidad de energía proveniente de la luz en un determinado lugar se les llama foto-sensores o foto-detectores. Hay que recalcar que para que exista la posibilidad de generar un nuevo par electrón-hueco en un semiconductor, la luz incidente debe ser de una longitud de onda determinada y así tener la suficiente energía para producir el efecto deseado (para el caso del silicio la luz debe tener longitudes de onda menores a 1100[nm]). La explicación de este principio y sus efectos (Efecto foto-eléctrico) le otorgó a Albert Einstein su primer premio Nobel [3.12] [3.21] [3.22].

Para medir qué tan sensible es un material a la luz existen dos unidades patrón, la primera es llamada Lux y es una medida de la iluminación que reside sobre el material, para relacionar ésta cantidad con situaciones comunes la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE por sus siglas en francés) establece que 50[lux] equivalen a la iluminación otorgada por una bombilla incandescente domestica y es suficiente para leer la página de un periódico, siguiendo de manera “proporcional”, la misma comisión establece que 100000[lux] equivalen a la iluminación que se alcanza cuando sobre un lugar incide la luz solar en forma directa [3.21]. La otra unidad es una medida de la radiación (“*Irradiance*”) que cae sobre el material y se expresa en mW/cm^2 como si se tratase de la densidad de potencia (energía) que recibe el material por medio de la luz, como relación algunos autores y fabricantes de dispositivos fotosensibles plantean que 200[lux] equivalen aproximadamente a $1[\text{mW}/\text{cm}^2]$, hay que tener presente que en el Sistema Internacional de Medida, la candela es la unidad oficial para medir intensidad de luz [3.26] [3.23] [3.22].

Una forma de clasificar foto-detectores es según la cantidad eléctrica que se afecta en presencia de luz, según esto es posible encontrar foto-resistores, foto-emisores y materiales foto-voltaicos. En las prácticas electrónicas los foto-sensores más utilizados son los fotodiodos, a continuación se hará una descripción de estos.

3.1.1.3.1 Foto-diodos

Los fotodiodos al igual que otros foto-detectores, son capaces de “transformar” intensidad luminosa en una intensidad de corriente o en un nivel de tensión. Estos dispositivos son físicamente parecidos a los diodos rectificadores fabricados en semiconductores con la diferencia que el encapsulado de los fotodiodos debe estar diseñado con una abertura o ventana para que la luz alcance la parte sensible de este. También se diferencian en que los fotodiodos no solo emplean uniones P-N normales sino que también emplean uniones del tipo PIN.

El principio físico del funcionamiento de estos sensores es el mismo explicado brevemente en el aparte inmediatamente anterior y es ilustrado por la siguiente grafica en donde la sección transversal de un fotodiodo es presentada.

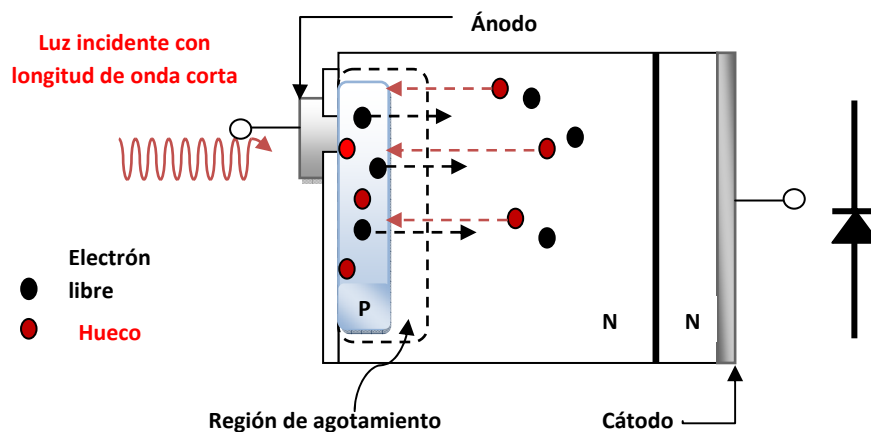


Figura 3.11 Representación de la sección transversal de un fotodiodo y el efecto foto eléctrico.
 Fuente: Adaptado por los autores de Hamamatsu Corporation. Photodiode Technical Guide. sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/index.htm.

En la grafica 3.11 se muestra que el material semiconductor fabricado de silicio y dopado con átomos de boro (B) se encuentra ubicado en la superficie activa

del dispositivo (Silicio tipo P), una capa más gruesa de material semiconductor tipo N es ubicado como sustrato y así forma la unión P-N que actúa como transductor foto-eléctrico. La respuesta en frecuencia y la respuesta espectral del dispositivo son controladas por el grosor de las capas N y P así como por la calidad y la pureza del dopaje. Cuando el material es expuesto a la luz, los electrones dentro del material son excitados y si los fotones de la luz incidente tienen una energía lo suficientemente grande como para llevar electrones de la capa de valencia a la capa de conducción, entonces se generará un nuevo par electrón-hueco en cualquier parte del dispositivo ya sea en la capa P, N o inclusive en la región de agotamiento de la unión; los electrones generados en este proceso (sin importar la capa en donde fueron creados) son acelerados hacia el sustrato N, mientras que los huecos son empujados hacia la capa P gracias a la tensión generada en la zona de agotamiento, en este sentido, los pares hueco-electrones generados en forma “proporcional” a la luz incidente aumentan la carga neta en cada una de las zonas del material por lo que si un circuito externo es conectado entre estas partes se generará una corriente de portadores entre los electrodos del circuito. Todos los fotodiodos utilizan este principio pero con algunas variaciones de acuerdo con estas modificaciones se clasifican en foto-diodos PN, PIN, Schottky y APD [3.24].

La figura 3.12 muestra el comportamiento eléctrico de los fotodiodos, es interesante notar que en ausencia de luz el comportamiento de estos dispositivos es idéntico al de un diodo rectificador [3.24] [3.25].

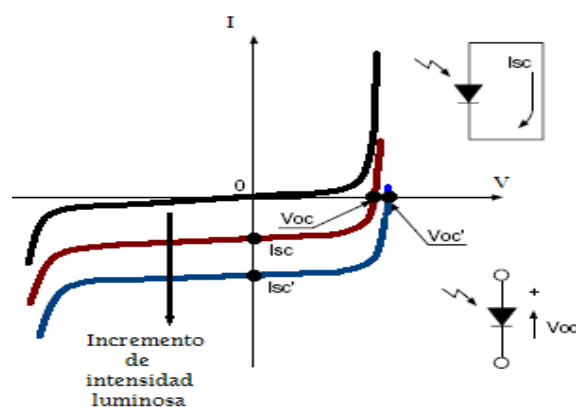


Figura 3.12 Característica eléctrica de los fotodiodos y dependencia de esta a la intensidad luminosa.
Fuente: Adaptado por los autores de Hamamatsu Corporation. Photodiode Technical Guide. sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/index.htm.

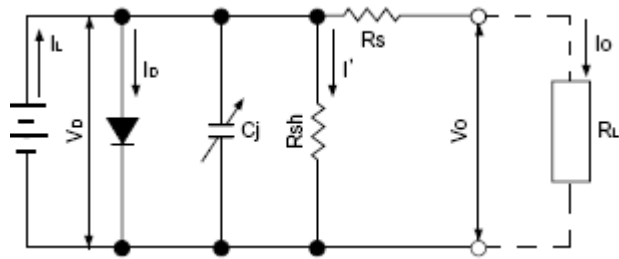


Figura 3.13 Modelo eléctrico de los fotodiodos.

Fuente: Adaptado por los autores de Hamamatsu Corporation. Photodiode Technical Guide. sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/index.htm.

Para seleccionar adecuadamente un fotodiodo la empresa fabricante de fotodiodos Perkin-Elmer propone tener las siguientes consideraciones [3.26]:

1. Determinar el rango de longitudes de ondas que debe cubrir el dispositivo.
2. Determinar el mínimo tamaño que debe ser utilizado en el sistema óptico.
3. Determinar el requisito eléctrico de ancho de banda en frecuencia, ya que sobre dimensionar este parámetro degrada la relación señal a ruido (SNR) del sistema.

Para seguir estas recomendaciones es necesario conocer algunas especificaciones básicas otorgadas por los fabricantes [3.24] [3.26]:

- **Corriente en oscuridad:** Si la región que cruza por el origen en la grafica que representa la dependencia de la corriente en función de la tensión a plena oscuridad se amplifica, se observa algo como lo presentado en la siguiente grafica.

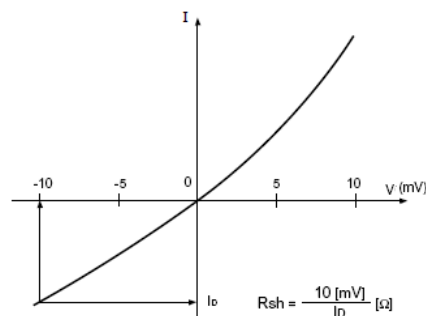


Figura 3.14 Gráfica de corriente de oscuridad del APDS9005.

Fuente: Adaptado por el autor de Hamamatsu Corporation. Photodiode Technical Guide. sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/index.htm.

De la grafica se observa que la corriente del dispositivo en la oscuridad es prácticamente lineal en un rango de +/- 10[mV], la pendiente de esta grafica demuestra la existencia de la resistencia en paralelo R_{SH} la cual es la representación de la corriente de ruido térmico presente en todo proceso eléctrico (ver figura 3.13). Es posible hacer una analogía entre este parámetro y el offset de los amplificadores operacionales.

- **Respuesta espectral:** Como se ha explicado con anterioridad, existe una relación entre la energía necesaria para que la luz genere un par electrón-hueco y la longitud de onda de esta, dicha fórmula para fotodetectores fabricados en silicio se expresa de la siguiente manera.

$$\lambda_h = \frac{1240}{E_g} \text{ [nm]} \quad (3.10)$$

A temperatura ambiente E_g tiene el valor de 1,2 [V], si se reemplaza este valor en la formula 3.10 se obtiene el valor de longitud de onda mínimo que debe tener la luz que se desea sensar, este valor es de 1100[nm], lo que significa que longitudes de ondas mayores a esta no tendrán ningún efecto sobre el sistema foto-sensible diferente al del calentamiento. Esta sensibilidad o respuesta espectral, también depende del material con el que es fabricada la ventana del encapsulado que permite la penetración de la luz hacia la unión P-N. A continuación se ilustra la respuesta espectral de un fotodiodo fabricado por la empresa AVAGO junto con la respuesta espectral del ojo humano según el CIE.

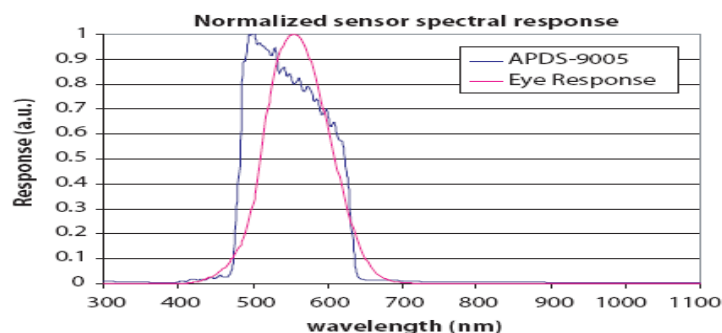


Figura 3.15 Gráfica de respuesta espectral del APDS9005.

Fuente: Adaptada por los autores de hoja de datos de APDS9005, AVAGO 2007.

- **Característica de ruido:** Al igual que otro tipo de sensores, el nivel mínimo detectado por los fotodiodos está limitado por la característica de ruido del dispositivo. El ruido en los fotodiodos se modela como la suma del ruido térmico o de Johnson, el ruido ráfaga producido por el fenómeno físico característico de estos dispositivos y la corriente en oscuridad.

$$i_n = \sqrt{\frac{4kTBW}{R_{SH}} + 2qB(I_D + I_L)} \quad (3.11).$$

Donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta a la cual se encuentra el sistema, Bw es el ancho de banda sobre el cual se quiere medir el ruido, q la carga del electrón I_D , I_L y R_{SH} son parámetros tomados del modelo eléctrico del fotodiodo (ver figura 3.13). Conociendo el modelo de ruido, se define la mínima intensidad de luz detectada como aquella que es capaz de generar una corriente igual a la corriente de ruido, esto se conoce como potencia equivalente de ruido o NEP (por sus siglas en inglés).

$$NEP = \frac{i_n}{S} \quad (3.12).$$

Donde i_n es la corriente de ruido calculada de acuerdo con la ecuación (3.11) expresada en [A] mientras que S es la foto-sensibilidad del material expresada en [A/W].

- **Tensión inversa:** Gracias a que los fotodiodos generan potencia a partir del efecto foto-eléctrico, están clasificados en el grupo de elementos activos. Sin embargo la respuesta en frecuencia y la linealidad pueden ser mejoradas al utilizar una fuente de alimentación externa conectada al dispositivo con polaridad inversa (ánodo-cátodo y cátodo-ánodo), hay que tener siempre presente que la corriente en un fotodiodo se da gracias a la incidencia de luz en este, por lo tanto emplear esta fuente de alimentación externa no afectará la señal de corriente en el dispositivo.

El uso de una tensión inversa tiene sus consecuencias como por ejemplo el aumento de la corriente en condiciones de oscuridad, así como el riesgo de dañar el equipo por exceso de diferencia de potencial entre sus terminales, los fabricantes en sus hojas de datos presentan el valor máximo de tensión inversa que puede ser utilizado.

3.1.1.4 Sensores para medir velocidad de fluidos

Realizar medidas sobre la cantidad y la velocidad de determinado fluido al interior de un recinto se ha convertido en una tarea importantísima y determinante para diversas disciplinas; por ejemplo en la medicina el conocimiento de estas medidas es fundamental en el tratamiento de pacientes con dificultades respiratorias [3.67].

Existen diversas formas de medir la velocidad de los fluidos. En la industria es bastante común encontrar sensores de presión diferencial utilizados para medir velocidad de fluidos; el principio de funcionamiento de dichos sensores es la deformación de un elemento elástico cuyos movimientos provoca cambios en las propiedades eléctricas de materiales piezoeléctricos ubicados en estos; dichos sensores están formados por una configuración mecánica llamada tubo de Burton el cual es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo y conectado a la fuente de presión por el otro. Al aumentar la presión en el interior del tubo éste se endereza, provocando un movimiento que a su vez deforma un elemento piezoeléctrico ubicado en el extremo cerrado del tubo [3.7].

Existe otro tipo de transductores diseñados para medir velocidad de fluidos son fabricados de materiales semiconductores con técnicas modernas de microelectrónica, estos dispositivos son llamados sistemas MENS, dichos sensores tienen diversos principios de funcionamiento, a continuación solamente se mencionan dos de ellos.

- **Anemómetro térmico (hot-wire):** Como su nombre lo indica, estos sensores miden la velocidad de fluidos (en especial del viento) teniendo en cuenta variaciones en la temperatura de un cuerpo determinado.

La técnica más común en este tipo de dispositivos, consiste en hacer circular una intensidad de corriente eléctrica a través de un material conductor (como tungsteno, platino o la aleación entre platino e iridio) logrando que éste se caliente hasta una temperatura conocida. En presencia de una corriente de aire (o agua) la placa conductora se enfría, por tanto la variación de intensidad de corriente eléctrica necesaria para mantener la placa conductora a la temperatura conocida es proporcional a la velocidad del flujo “refrigerante”.

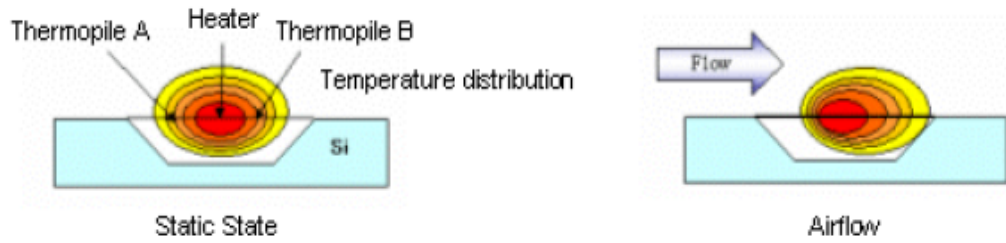


Figura 3.16 Sección transversal de un anemómetro térmico

Fuente: Adaptado por los autores de James Seddon, *Principles of Flow Sensor Measurement*.

- **Sensor MENS con principios mecánicos.**

La tecnología MENS ha logrado fabricar palancas de tamaño muy reducido utilizando materiales semiconductores, la siguiente gráfica muestra un anemómetro fabricado con esta técnica. Cuando estas diminutas palancas son desplazadas por acción de una corriente de viento se produce un cambio de capacitancia proporcional a la velocidad con la que el fluido impacta las placas de silicio.

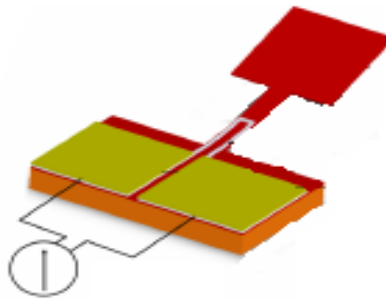


Figura 3.17 Anemómetro MEMS

Fuente: Adaptado por los autores de Yu-Hsiang Wang, *A MEMS-based Air Flow Sensor with a Free-standing Microcantilever Structure*.

3.1.1.5 Sensores para medir concentración de gases

En los procesos industriales es necesario monitorizar ciertos gases catalogados como peligrosos por su potencial explosivo (volatilidad) y por la importancia que ha tomado en las últimas décadas el control de la calidad de aire para preservar la salud de los trabajadores industriales [3.27].

La ciencia ha encontrado varias formas de realizar el sensado de concentración de gases lo cual le ha permitido establecer estándares que proponen tiempos de exposición a ciertas concentraciones de gases nocivos para la salud en determinados ambientes de trabajo [3.27]. La peligrosidad de un gas es medido a partir de la concentración mínima (LEL, “*lower explosive limit*”) o máxima (UEL, “*upper explosive limit*”) de dicho gas en el aire necesaria para iniciar un proceso de ignición y luego detonación. La interpretación de los límites antes mencionados indica que si la concentración de determinado gas de interés es inferior al LEL significa que no hay suficiente combustible como para iniciar una explosión, mientras que si la concentración es superior al UEL no es posible iniciar una explosión porque el gas ha desplazado todo el oxígeno disponible en el recinto como para propiciar una reacción, lo anterior muestra que para valores de concentraciones de gases volátiles comprendidos entre el LEL y UEL las probabilidades de explosión aumentan considerablemente, fuera de este rango no hay peligro de explosión. La concentración de los gases se presenta como cantidad de partículas por un millón de partículas de aire (partes por millón [ppm]) o como un porcentaje del LEL.

Para resolver la necesidad de la medición de gases la industria y la ciencia proponen utilizar sensores que emplean principios electroquímicos, catalíticos y de física de estado sólido; cada uno de estos principios será explicado a continuación.

- **Sensores electroquímicos para medir concentración de gases:**

Estos sensores son utilizados para detectar y monitorizar bajos niveles de gases tóxicos y oxígeno para ambientes en donde es indispensable mantener condiciones salubres adecuadas para la respiración [3.28]. Básicamente un sensor electroquímico consiste en dos electrodos (ánodo y cátodo) separados por una solución electrolítica (por ejemplo agua). Estos sensores aprovechan reacciones de oxidación y reducción entre el gas que se desea sensar y el electrolito para producir una pequeña corriente (del orden de los nano Amper), los electrodos hacen las veces de recolectores de los portadores libres que son resultado de estas reacciones. Mientras en un electrodo (*“working electrode”*) se recolectan los electrones libres para luego liberarlos a un circuito externo en forma de corriente, el otro electrodo (*“counter electrode”*) recolecta iones con carga positiva para así iniciar una reacción de reducción con el fin de preservar las cualidades eléctricas del electrolito, es decir mientras un electrodo consume electrones, el otro genera electrones, lo cual se traduce en mayor tiempo de vida útil para el sensor [3.28][3.29]. Dado que las cargas no son recolectadas uniformemente en los electrodos, una diferencia de potencial no deseada se presente en el electrolito cambiando sus propiedades. Para contrarrestar este fenómeno algunos fabricantes incluyen una arquitectura con tres electrodos, los dos antes mencionados y un tercero que sirve como referencia eléctrica y se encuentre sumergido en el electrolito; la figura 3.18 muestra un esquema de dicha arquitectura junto con un ejemplo de reacciones en un sensor de monóxido de carbono (CO) [3.28] [3.30] [3.31].

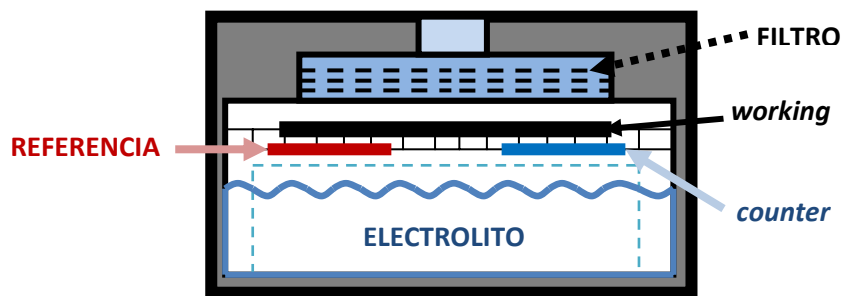


Figura 3.18 Esquema básico de un sensor electrolítico para sensar concentración de gases.
Fuente: Adaptada por los autores de www.nemoto.com.it

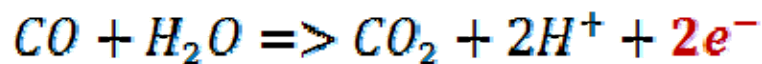


Figura 3.18b. Ecuación de oxidación para un sensor de CO con electrolito de H₂O.
Fuente: Adaptado por los autores de www.nemoto.com.ti

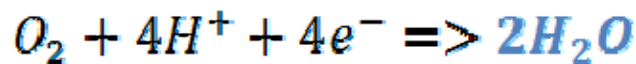


Figura 3.18c. Ecuación de reducción para un sensor de CO con electrolito de H₂O.
Fuente: Adaptado por los autores de www.nemoto.com.ti

Estos sensores se caracterizan por ser del tipo de dispositivos activo por lo tanto no necesitan de una fuente de alimentación externa para su funcionamiento, son poco resistentes a esfuerzos mecánicos, por lo general son bastante selectivos y son típicamente utilizados para medir concentraciones de gases no volátiles.

- **Sensores catalíticos para medir concentración de gases:** La combustión catalítica ha sido el método más utilizado para la detección de gases inflamables desde la invención del resistor catalítico metalizado o Pelistor a mediados de 1960 [3.28].

Un pelistor consiste en varias espiras delgadas fabricadas de alambre de platino encerrada en una capsula de cerámica untada en su superficie por un metal noble tratado catalíticamente que cuando se calienta promueve la oxidación exotérmica de gases inflamables.

Estos sensores son del tipo pasivo y por lo tanto requieren de una fuente de alimentación externa para operar, cuando estos sensores son conectados a dicha fuente una corriente eléctrica empieza a circular a través de las espiras metálicas calentándolas gracias al efecto Joule,

esto a su vez calienta la capsula cerámica y su material catalítico. Si el dispositivo se expone a gases inflamables se presenta una reacción de oxidación que al igual que la combustión libera calor, este calor aumenta la temperatura del dispositivo lo que resulta en un cambio de resistencia eléctrica del metal que forma las espiras internas del sensor, este cambio de resistencia se da de manera proporcional a la concentración del gas [3.28].

Estos sensores son ideales en aplicaciones que tienen que ver con seguridad en ambientes altamente inflamables, dado que para que una mezcla de gases inflamables se quemara es necesario que se alcance una temperatura mínima de ignición, el uso de materiales catalíticos en el sensor hace que el gas se empiece a quemar a temperaturas más bajas lo cual permite medir los gases en niveles inferiores de concentración que el “*Lower Explosive Level*”; la figura 3.19 presenta la idea básica de un sensor de pelistor catalítico.

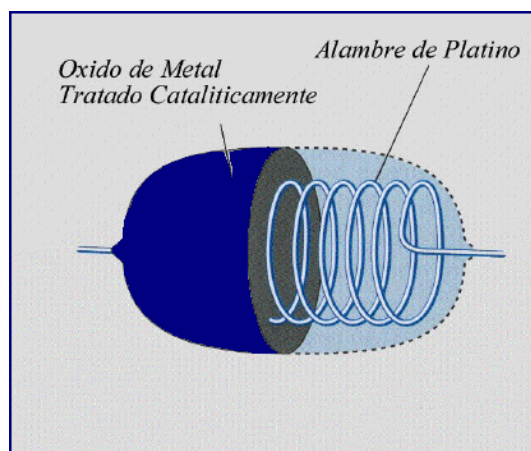


Figura 3.19 Esquema básico de un sensor catalítico para la medición de concentración de gases.

Fuente: Adaptada por los autores de <http://www.nemoto.com.it>.

- **Sensores de estado sólido para medir concentración de gases:** Los sensores que tienen como objetivo medir concentración de gases inflamables o tóxicos fabricados bajo los principios de física de estado sólido (utilizando materiales semiconductores) no son muy comunes y de allí la poca documentación citada con respecto este tema.

La estructura básica de un sensor de gases fabricado de esta manera consta de una o más placas de óxido metálico de materiales como el hierro, cobalto, níquel, cobre o zinc. Presentan un material conductor insertado en la estructura del sensor con el propósito de hacer circular en él una intensidad de corriente eléctrica determinada, la cual por efecto Joule calienta el sistema y lo mantiene a una temperatura adecuada para la detección del gas (ver funcionamiento de sensores catalíticos para la detección de gases), este conductor es conocido como calefactor o “*heater*”. En presencia de un gas combustible el óxido metálico provoca la disociación de las moléculas del gas en iones cargados facilitando la obtención de electrones libres, dos electrodos ubicados en el sensor son los encargados de hacer circular una intensidad de corriente (proporcional a la cantidad de moléculas de gas disociadas) que es tomada como señal de salida. Estos sensores se caracterizan por tener largas expectativas de vida (de 5 a 6 años) pero tienen una selectividad limitada, es decir miden las concentraciones de una familia de gases, mas no son capaces de sentir un gas en específico. Por ejemplo, un sensor de este tipo es capaz de medir gases de bases nitrogenadas sin diferenciar si se trata del gas amoníaco o del gas amonio [3.29] [3.28] [3.32]. La figura 3.20 muestra el esquema básico de un sensor para medir concentración de gases fabricado de materiales de estado sólido.

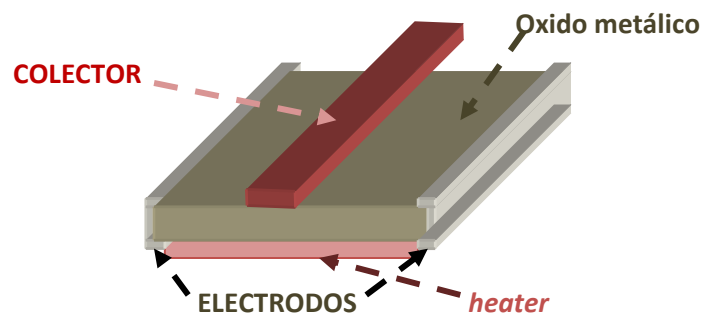
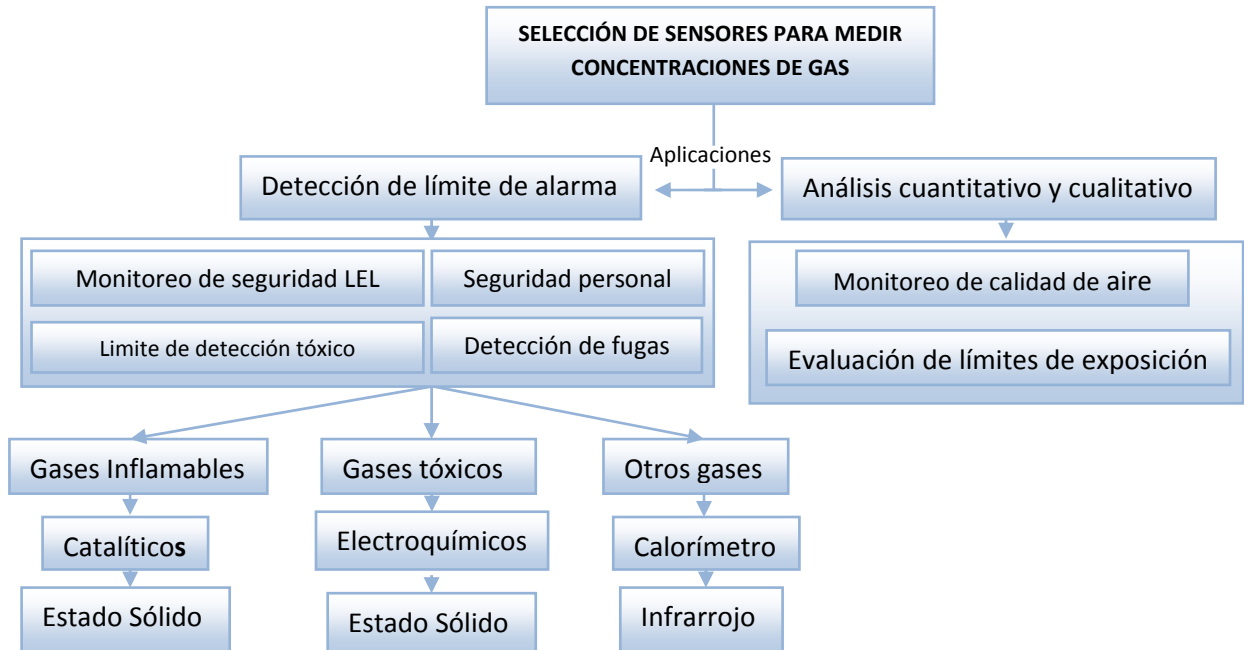


Figura 3.20 Esquema básico de un sensor de estado sólido para la medición de concentración de gases.

Fuente: Adaptada por el autor de [http://: www.nemoto.com.it](http://www.nemoto.com.it).

Luego de haber escudriñado varias formas de medir concentraciones de gases es posible hacer una especie de mapa mental que esclarezca la difícil tarea de elegir un sensor cuyo principio de funcionamiento se ajuste a las necesidades de la aplicación en donde este se desea emplear.



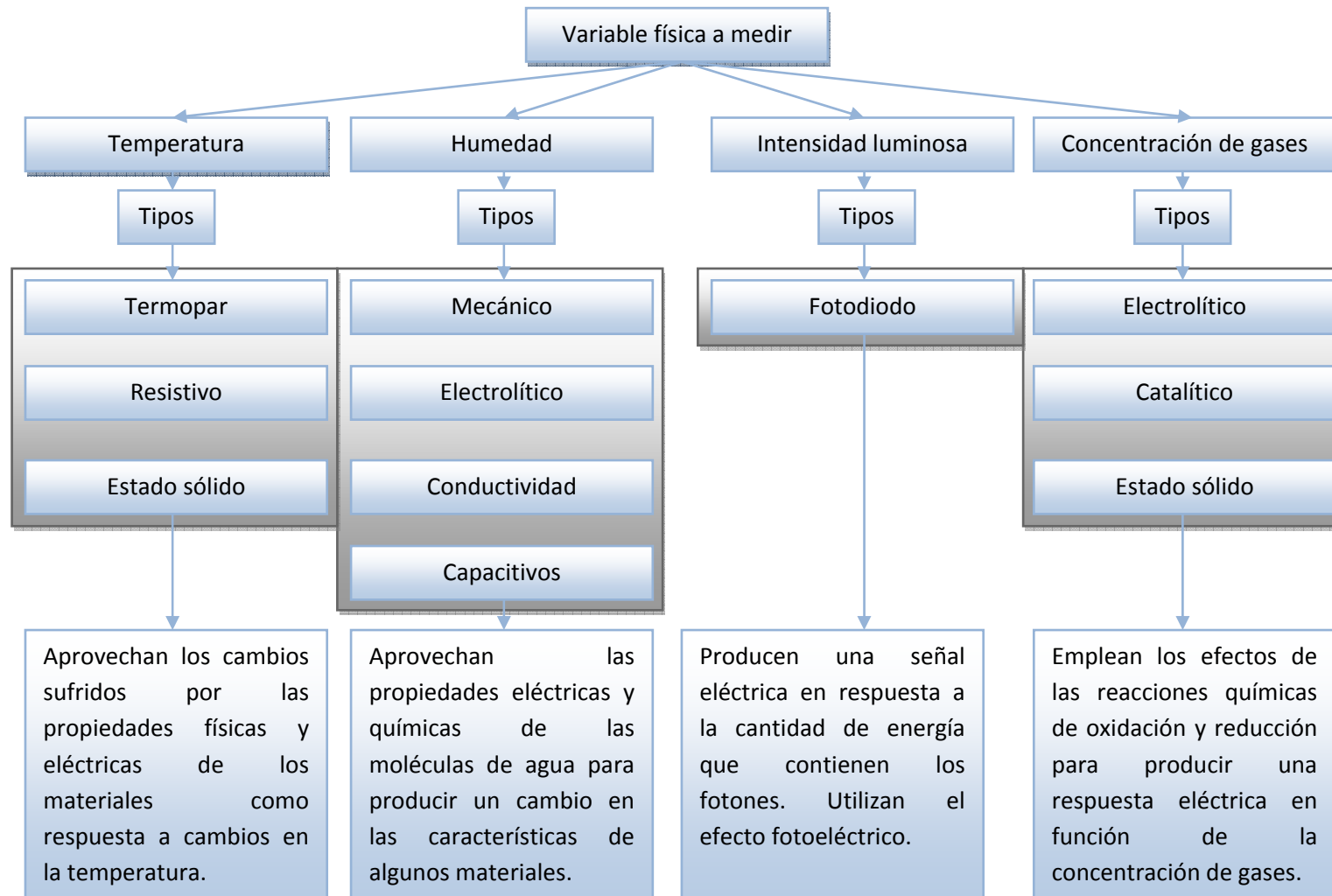


Figura 3.21 Resumen de los tipos de sensores y su principio de funcionamiento.
 Fuente: Autores

3.1.2 Especificaciones del problema desde el punto de vista de las técnicas de sensado.

En los sistemas de medición, tal y como se ha mencionado anteriormente, los transductores tienen la importante tarea de transformar determinadas cantidades físicas en señales de naturaleza eléctrica, por tanto seleccionar adecuadamente este dispositivo es tal vez el paso más importante para la obtención de datos exactos.

Según William D. Cooper una metodología válida para llegar a una selección adecuada de dispositivos sensores es resolver las siguientes preguntas [3.8]:

- ¿Cuál es la cantidad física por medir?
- ¿Cuál es el principio de transducción que mejor se ajusta a la aplicación?
- ¿Qué exactitud requiere el sistema de medición de tal forma que este sea confiable?

La respuesta a la primera pregunta, está fundamentada en los objetivos de la investigación, los cuales contemplan la medición de las variables físicas ambientales (Intensidad de luz, nivel de amoníaco, temperatura, humedad relativa) dentro de un galpón de cría y levante de pollo de engorde [3.11].

La manera en que se manejan los datos recolectados por los sensores impone ciertas restricciones en la elección de estos. Para el desarrollo del presente proyecto se debe tener presente que los datos recolectados serán transmitidos inalámbricamente por una red que utiliza el estándar de comunicación IEEE 802.15.4 lo cual implica que los dispositivos empleados en esta deben cumplir con ciertos requisitos como poseer dimensiones físicas reducidas y ser capaces de operar por largo tiempo con cantidades limitadas de energía [3.2].

3.1.2.1 Selección del Sensor de Temperatura

Tomando en cuenta las características descritas en la tabla 3.1 (pag 71) se establece que los sensores de temperatura que emplean las propiedades térmicas de los semiconductores como principio de funcionamiento son los más apropiados para el desarrollo del presente proyecto dado que su amplio rango de operación (típicamente desde -55°C hasta 150°C), su presentación en tamaños pequeños (dispositivos de montaje superficial, SMD. por sus siglas en ingles) y su bajo consumo de potencia cumplen con los requisitos impuestos por las características de las redes de comunicación inalámbricas que emplean el estándar IEEE 802.15.4. En la actualidad las casas de diseño de dispositivos electrónicos más reconocidas a nivel comercial (Texas Instruments, Analog Device, Fairchild, etc.) ofrecen una gran cantidad de dispositivos electrónicos capaces de medir temperatura, estos pueden ser separados en dos grandes grupos, el primero está constituido por aquellos sensores que presentan en su salida una señal de tipo discreto, estos sensores son conocidos como sensores digitales de temperatura y se caracterizan por tener una excelente precisión en comparación con los demás métodos de sensado térmico y permiten hacer una calibración más precisa empleando herramientas software[3.4]. Los sensores de temperatura pertenecientes a este grupo no son capaces de funcionar por si solos, necesitan de dispositivos de carácter digital como Microcontroladores, Convertidores Analógico/Digital (ADC), Osciladores, Compuertas lógicas, etc. para poder ser controlados/programados [3.18].

El otro grupo de circuitos integrados diseñados para sensar temperatura son aquellos que presentan a su salida una señal continua, este tipo de dispositivos son llamados sensores analógicos de temperatura. A diferencia de los primeros, estos no necesitan ser controlados ni programados y por ende no necesitan elementos externos para producir una señal de salida, sin embargo demandan de sistemas de acondicionamiento de señal para que esta, la señal de salida, se ajuste a los niveles de tensión y características requeridas por el ente procesador (DSP, Microcontrolador, etc.).

Partiendo de lo anterior se aprecia que en el caso de las plataformas Xbee es necesario hacer un esfuerzo económico y de diseño adicional para el uso de sensores digitales (por sus dispositivos de control y programación); es más cómodo aprovechar la conversión A/D que ofrecen dichas plataformas utilizando sensores analógicos e igualmente obtener resultados satisfactorios en cuanto a precisión, consumo de potencia y tamaño del prototipo final. Esta decisión no afecta el desempeño de las plataformas Telos B y Tmote Sky, ya que estos también ofrecen puertos disponibles para realizar conversión A/D. Cabe anotar que las características de ambos ADC también influyen en la selección de los dispositivos sensores haciendo necesario el uso de sistemas de acondicionamiento de señal que los acompañen (ver el capítulo 2 y más adelante en este capítulo). En conclusión se opta por la decisión de utilizar sensores que ofrezcan la señal de salida en forma continua en vez de discreta y diseñar para cada uno de ellos circuitos que realicen el acondicionamiento de señal correspondiente para todas las variables por medir.

Dentro de un galpón de cría y levante de pollo de engorde la temperatura debe oscilar teóricamente entre 20°C y 32°C dependiendo de la edad de los pollos, en la siguiente tabla se ilustra este comportamiento [3.19].

EDAD EN DÍAS	TEMPERATURA [°C]
1	29
3	28
6	27
12	25
15	24
18	23
21	22
24	21
27	20

Tabla 3.2 *Comportamiento térmico ideal en un galpón de cría y levante de pollos de engorde raza Ross.*

Fuente: Adaptado por los autores de MANUAL Ross, AVIAGEN.

Para corroborar estos valores, se realizaron estudios propuestos y ejecutados por el grupo de investigación CPS, los cuales tuvieron como objetivo la caracterización térmica del micro clima del galpón de cría y levante localizado en la finca “Los totumos”, sitio destinado para el desarrollo de esta investigación [3.32].



Figura 3.22 Ubicación de la finca los Totumos, lugar destinado para el desarrollo de la investigación
 Fuente: Adaptada por los autores de [http:// www.googlemaps.com](http://www.googlemaps.com).

Como ejemplo se muestre a continuación los resultados de una prueba realizada en uno de los galpones de la finca “Los totumos”. En total se tomaron 3117 medidas de temperatura, con un periodo de muestreo de cinco minutos durante once días de ciclo de cría, levante y engorde [3.33].

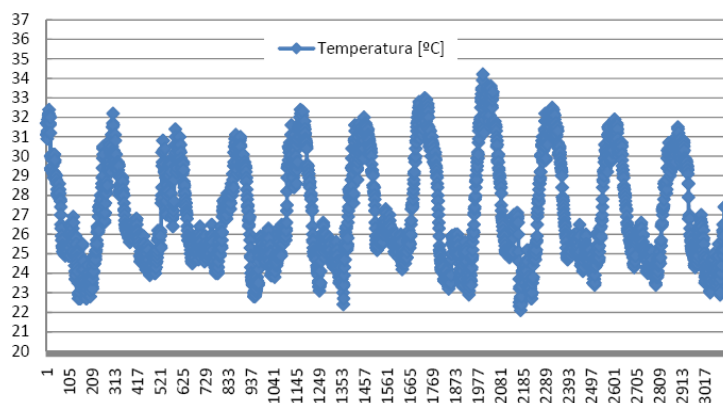


Figura 3.23 Comportamiento térmico del microclima de la finca los Totumos.
 Fuente: Adaptada por los autores de [http:// www.googlegroups.com](http://www.googlegroups.com).

Estos valores son tomados como referencia para todo el proceso de selección del sensor; adicional a esto, los manuales de manejo de pollos de engorde no establecen la precisión con que la temperatura debe ser medida, por tanto se asumirá que un error del 10% es aceptable para los objetivos del proyecto, lo anterior lleva a un análisis de las características del sensor bajo la condición que el rango de medidas estará entre 20°C y 36°C.

Las restricciones impuestas por las consideraciones anteriores (costo, bajo consumo de potencia, tamaño, rango, etc.) acotan sustancialmente el abanico de posibilidades suscritas en el mercado, en particular se analizaron solamente productos disponibles en tiendas de venta de dispositivos electrónicos con sede en Norte América y fabricados por las empresas más reconocidas a nivel comercial.

Es de vital importancia seleccionar un dispositivo cuya hoja de datos brinde la suficiente información como para permitirle al diseñador abstraer y predecir su funcionamiento en el sistema que se desea desarrollar. Para la selección del transductor de temperatura se preseleccionaron los siguientes dispositivos:

- **TMP 35/36/37 (Analog Device):** La familia con referencia TMPxx ofrece una señal de salida proporcional al nivel de temperatura en grados Celsius, no requieren de dispositivos externos de calibración para proporcionar una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ a 25°C y $\pm 2^{\circ}\text{C}$ entre -40°C y 125°C . Además de su baja impedancia de salida, su linealidad simplifica los circuitos que permiten la interfaz de este sensor con sistemas de control de temperatura o conversores A/D. Esta familia de sensores está diseñada para operar con tensiones de alimentación comprendidas en el rango de 2,7[V] y 5,5[V] y corriente de alimentación de 50 [μA] que evita incurrir en errores apreciables debido al calentamiento producido por el propio dispositivo. Este equipo fue lanzado al mercado en el año 2005 [3.34].
- **AD22100 (Analog Device):** Sensor monolítico que lleva integrado un circuito de acondicionamiento de señal que le permite trabajar en el rango de temperatura comprendido entre -50°C y 150°C entregando a la

salida tensiones entre 0,25[V] y 4,75[V] respectivamente empleando como tensión de alimentación 5[V]. Este sensor presenta un error total máximo de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ a una temperatura de 25°C , está diseñado para operar con una tensión de alimentación mínima de 4.0 [V] y máxima de 6,5 [V], adicionalmente para su normal funcionamiento requiere típicamente de una corriente de alimentación igual a 500 [μA] y máxima de 650[μA]. Dispositivo presentado al mercado en el año 2004.[3.35]

- **LM19 (National Semiconductor):** Este sensor diseñado en tecnología CMOS opera sobre el rango de -55°C hasta 130°C y bajo condiciones de alimentación establecidas desde 2,4[V] hasta 5,5[V] y con un consumo de corriente debido a la alimentación igual a 10[μA]. Presenta un error máximo de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente pero este aumenta hasta $\pm 3,8^{\circ}\text{C}$ en temperaturas extremas. A diferencia de los demás sensores, este se encuentra en presentación “*through hole*” (TH) y su tensión de salida está en función del cuadrado de la temperatura ambiental, es decir la forma de su función de transferencia es cuadrática [3.36].
- **FM20 (Fairchild Semiconductor):** Como todo sensor de temperatura diseñado en tecnología CMOS, este tiene una buena relación costo-beneficio a la hora de emplearlo en sistemas de monitoreo preciso y de bajo consumo de potencia. Posee una función de transferencia extremadamente lineal caracterizada por tener pendiente negativa. Su excelente diseño le permite tener una precisión equivalente a $\pm 1^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente (25°C), operar bajo condiciones de alimentación en tensión entre 2,4[V] y 6[V] y en corriente de alimentación entre 9[μA] y 10[μA] [3.37].
- **MAX 6605(Maxim):** Este sensor analógico de temperatura está disponible en el encapsulado estándar SC-70 de cinco pines, opera en un rango de tensión de alimentación comprendido entre 2,7[V] hasta 5,5[V] extrayendo de la fuente un valor de corriente igual a 10[μA]. Es capaz de sensor temperaturas en el rango de -55°C hasta 125°C , a temperatura ambiente registra una precisión de $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$ pero en

valores de temperatura cercanos a 0°C y a 70°C este parámetro se eleva hasta +/-3°C [3.38].

- **TMP300(Texas Instruments):** Este dispositivo a diferencia de los anteriores no es propiamente un sensor de temperatura, el fabricante se refiere a este como un “*Temperature switch*”. Es bastante versátil, permite establecer un umbral de medición fácilmente al incorporar una resistencia externa al circuito. Este dispositivo se consideró en la preselección por tener un pin llamado “VTEMP” el cual genera una señal analógica proporcional a la temperatura ambiental. El TMP300 sensa temperatura con una precisión máxima de +/-4°C en el rango de -40°C hasta 125°C, opera con una tensión mínima de alimentación de 1,8[V] y extrae de esta una intensidad de corriente de 110[μA] [3.39].

La Tabla 3.3 muestra la comparación entre los diferentes dispositivos analizados.

Dispositivo	Alimentación [V] [μA]	Ganancia [mV/°C]	Rango y precisión [°C]	Fabricante	Precio [USD]
FM20	2.4 – 6.0 9	-11.77	-55 -> 130 +/-1	Fairchild Semiconductors	0,9
MAX6605	2.4 – 5.5 10	11.9	-40 -> 105 +/-3	MAXIM	No venta
TMP35	2,7 - 5,5 50	10	-40 -> 120 +/- 2	Analog Device	1,19
AD22100	4-6,5 500	22,5	-50 -> 150 +/- 2	Analog Device	5,46
LM19	2,4-5,5 10	(No lineal)	-55 -> 130 +/-2,5	National Semiconductor	1,06
TMP 300	1,8-18 110	10	-40 -> 150 +/-4	TEXAS INSTRUMENTS	1,83

Tabla 3.3 Comparación entre los diferentes sensores de temperatura tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo

Fuente: Autores. Los precios fueron tomados de la tienda Newark electronic.

En la toma de la decisión sobre cual sensor emplear, se hicieron las siguientes consideraciones:

- Los dispositivos con referencias TMP 300, AD22100 y TMP35; a pesar de tener una ganancia y un rango de medida parecido al de los demás sensores poseen un consumo de potencia relativamente alto además el AD22100 es varias veces más costosos que los otros dispositivos.
- El sensor presentado por National semiconductor (LM19) a pesar de tener unas buenas características eléctricas, presenta una función de transferencia que se ajusta a una función de orden dos o cuadrática.[3.36]
- La referencia MAX6605 lastimosamente no se encontraba a la venta en las tiendas comercializadoras de dispositivos electrónicos.

Finalmente se tomó la decisión de utilizar la opción propuesta por la empresa Fairchild (FM20), esta ofrece un sensor que no solo se ajusta a las necesidades del problema en cuanto a rango, consumo de potencia y precisión en el rango de interés sino que está a la venta a un bajo costo, se caracteriza por tener una ganancia con pendiente negativa, lo cual facilita la interpretación de los datos capturados, además sus características eléctricas (Impedancias, *offset*, *Drift*, etc.) permiten visualizar su excelente desempeño en el sistema final.

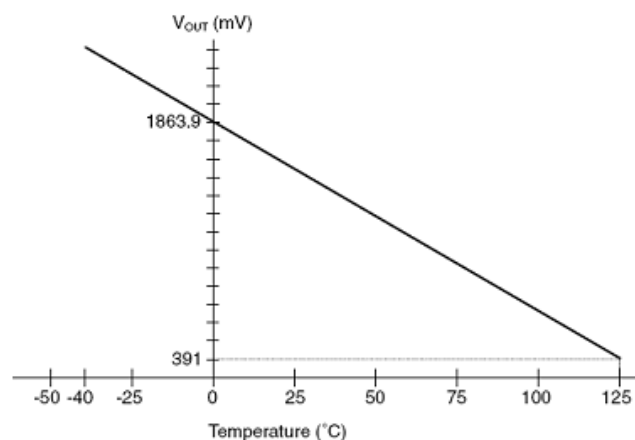


Figura 3.24 Comportamiento del sensor seleccionado (FM20).

Fuente: Adaptada por los autores de las hojas técnicas del fabricante, FM20 [3.37]

3.1.2.2 Selección del Sensor de Humedad Relativa

Muchas de las consideraciones hechas en el aparte anterior fueron tomadas también para seleccionar un dispositivo capaz de medir Humedad. La búsqueda de dicho dispositivo estuvo acotada por las siguientes consideraciones:

- Tamaño reducido, bajo consumo de potencia, precisión, rango de medida, etc. el sensor debe realizar la medida partiendo de las propiedades de los semiconductores.
- Por compatibilidad con respecto a la plataforma Xbee, la salida debe ser entregada en forma de señal analógica.
- Fabricado por empresas reconocidas desde el punto de vista comercial que se encuentren disponibles en las tiendas comercializadoras de dispositivos electrónicos con sede en Estados Unidos.

El manual de manejo de pollos de engorde Ross, establece que para evitar la presencia de estrés por calor en la parvada de pollos, el porcentaje de Humedad relativa (RH) en el micro-clima del galpón de cría y levante debe estar entre 60% y 70% [3.19].

EDAD EN DÍAS	%RH
1	65-70
3	65-70
6	65-70
12	65-70
15	60-70
18	60-70
21	60-70
24	60-70
27	60-70

Tabla 3.4 Variación ideal de humedad relativa en un galpón de cría y levante de pollos raza Ross.

Fuente: Adaptado por los autores de MANUAL Ross, AVIAGEN.

Estos valores fueron contrastados mediante el mismo estudio con que se midieron los valores de temperatura, dicha caracterización arrojó valores de RH oscilantes entre 46.8% y 90.8%, lo cual confirma la ausencia de un método de control de RH en el galpón localizado en la finca los totumos [3.33].

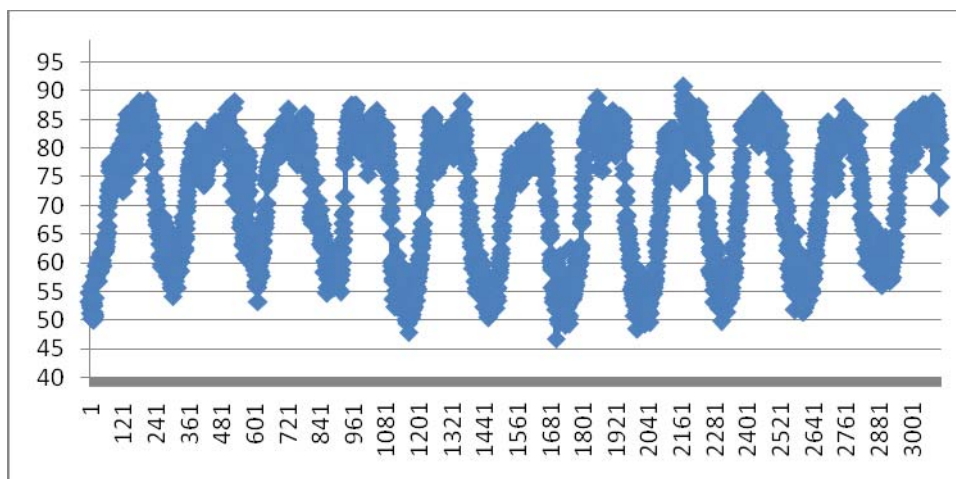


Figura 3.25 Comportamiento higrométrico del microclima de la finca los Totumos.

Fuente: Adaptada por los autores de [http://: www.googlegroups.com](http://www.googlegroups.com).

No se encontró ningún estudio que estableciera la precisión para la medida de parámetros ambientales en galpones avícolas por eso se consideró que una precisión del 10% en la media de humedad relativa para el rango de valores de interés es aceptable para alcanzar los objetivos del presente proyecto [3.11].

Las opciones contempladas para la pre-selección de los transductores de humedad son las siguientes (ver tabla 3.5)

- **HIH-4000 (Honeywell):** A pesar de ser un dispositivo presentado en tecnología TH tiene unas dimensiones físicas reducidas. Destaca su rango de alimentación entre 4[V] y 5,8[V] en tensión así como 200[μA] y 500[μA] en corriente, la precisión de +/-3% en el rango de 0% hasta 100% de RH, la repetitividad de +/-0,5%, el tiempo de respuesta al noventa por ciento de la respuesta en estado estable de 15[s] bajo una temperatura de 25°C y la linealidad de +/-0,5%. Es una característica de los sensores de Humedad necesitar una compensación con relación a la temperatura ya que esta ultima afecta en cierto grado las “lecturas” hechas por los dispositivos, este transductor no es la excepción por eso la hoja de datos ofrece información sobre la ecuación matemática que

modela de mejor manera el comportamiento del sensor, es decir aquella ecuación que modela la función de transferencia de este incluyendo o no la compensación del sensor por temperatura.

El HIH-4000 es un sensor capacitivo con un sistema de acondicionamiento de señal integrado que permite su acople a sistemas de procesamiento de señales, su construcción física en múltiples capas lo hace resistente a condiciones de trabajo hostiles y es bastante resistente al polvo, aceites, químicos ambientales comunes y agua. El fabricante de este dispositivo entrega muy buena información referente a las características eléctricas y posibles aplicaciones en donde el sensor puede ser empleado logrando un óptimo funcionamiento [3.40].

- **HU-10(General Electric):** Es un sistema que está diseñado tomando como base el sensor con referencia HS15P. El sistema completo (HU-10) es descrito por su fabricante como un sistema listo para usar “*plug and play*” que ya viene con la compensación por temperatura establecida y es fácil de instalar.

Opera bajo una tensión de alimentación de 5[V] y consume una intensidad de corriente de 2[mA], es capaz de medir porcentajes de humedad tan bajos como 10% y tan altos como 100%, realiza sus mediciones con una precisión del +/-5% con un tiempo de respuesta de 5[min] para una salida entre 1[V] y 3[V] [3.41].

- **HS15P (Thermometrics):** Este dispositivo fue analizado por ser el sensor base del sistema HU-10 de la empresa *General Electric*, opera con una tensión alterna (A.C) con un valor RMS de 0,1[V] a una frecuencia de 1[KHz], tiene un tiempo de respuesta mínimo de 5[min] y su salida está expresada en unidades de impedancia, su función de transferencia tiene un carácter fuertemente exponencial en donde a 90% de RH la impedancia del instrumento es de 1[Kohm].

Este sensor está fabricado bajo principios de conductividad explicados anteriormente pero lastimosamente la documentación referente a este producto es bastante limitada así como para el HU10 [3.42].

- **SHT15(Sensirion):** Este dispositivo es el recomendado por las plataformas T-mote Sky y Telos B ya que estos han sido pensados, tanto en hardware como en software, para ser compatibles y tener un buen desempeño. El SHT15 es un sensor multifuncional capaz de medir la temperatura y el porcentaje de humedad relativa presente en el ambiente circundante. Fabricado en tecnología CMOS lo cual permite tener una excelente precisión y un tamaño físico pequeño.

Utiliza un elemento capacitivo fabricado en polímero capaz de medir porcentaje de RH y un circuito de “bandgap” que permite sensar temperatura, estos dos dispositivos junto con un ADC y un circuito de interfaz serial se encuentran integrados en el mismo chip dándole al instrumento una gran versatilidad. El hecho de la existencia de un ADC y un circuito capaz de manejar datos en forma serial (protocolo de 2 hilos “two wire protocol”), hablan de la naturaleza digital de este dispositivo. Trabaja con una tensión de alimentación entre 2,4[V] y 5[V] extrayendo de la fuente de alimentación 550[μA] de intensidad de corriente. Tiene una precisión en las lecturas de temperatura y RH de +/-1,5°C y +/-3% respectivamente, entrega las lecturas en un formato digital de 12 o 14 bits y también permite hacer compensación por temperatura [3.43].

Del análisis de los sensores anteriormente presentados se concluye que el sensor HIH-4000 es el único dispositivo que cumple con los criterios de selección establecidos, por tanto este es el sensor que fue escogido para hacer parte del prototipo final. El análisis de los demás dispositivos se realizó con el fin de contrastar las opciones ofrecidas por el mercado.

Haciendo un parangón entre el sensor seleccionado (HIH-4000) y el SHT1x, el cual es tomado como referencia por su versatilidad y por las aplicaciones encontradas en donde es empleado [3.58], [3.59], [3.60], es claramente apreciable que en cuanto a características eléctricas, estos dos dispositivos

son fuertemente compatibles si se desprecia la diferencia de naturaleza de señales de salida (analógica y digital).

La tabla 3.5 muestra un resumen de las características más relevantes de los sensores analizados y una breve comparación entre ellos.

Dispositivo	Alimentación [V] [μA]	SALIDA [V]	Rango [%RH]	Fabricante	Precio [USD]
HIH-4000	4 – 5.8 200 @ 5[V]	0,8 - 3,9	0 ->100	HONEYWELL	21,01
HU-10	5 2000	1 – 3	10 ->90	GENERAL ELECTRIC	N/A
HS12P	1(r.m.s.) 0,3[mW]	1[Kohm] 10[Mohm]	20 ->90	THERMOMETRICS	8,33
STH15	2,4 - 5,5 550	<i>Digital</i>	0 ->100	SENSIRION	27,78

Tabla 3.5 Comparación entre los diferentes sensores de humedad tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo

Fuente: Autores. Los precios fueron tomados de la tienda Newark electronic.

Al término de estos dos primeros análisis se concluye que no es indispensable utilizar el sensor STH15 para medir humedad y temperatura, tal y como lo plantea las plataformas Telos-B y Tmote-Sky, sino que emplear sensores de naturaleza analógica para realizar las medidas de dichas variables es totalmente viable y adecuado para los objetivos planteados en esta investigación. Haciendo una revisión de costos, la suma de los precios de los sensores HIH-4000 y FM20 (seleccionado para el diseño final) es \$21,91 USD, mientras que el costo de un ejemplar del STH15 es \$27,7 USD lo cual muestra que la relación costo beneficio se inclina a favor de los primeros teniendo en cuenta que las características eléctricas del sistema no se ven afectadas y se mejora en modularidad del sistema en general al separar los transductores de estas dos variables.

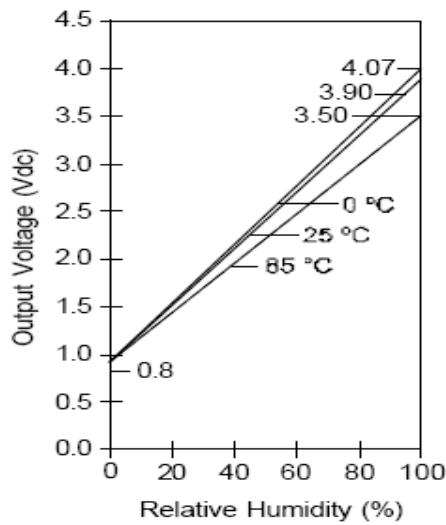


Figura 3.26 Comportamiento del sensor seleccionado respecto a la humedad y la temperatura (HIH-4000).

Fuente: Adaptada por los autores de la hoja de especificaciones técnicas, HIH-4000 [3.40]

3.1.2.3 Selección del Sensor de Intensidad Luminosa

La manera más común para realizar sensado de intensidad luminosa en un ambiente determinado, es mediante el uso de fotodiodos. El mercado de este tipo de dispositivos, al igual que el de los sensores de temperatura, es bastante competido ya que la mayoría de sensores de intensidad luminosa disponibles en las tiendas distribuidoras de dispositivos electrónicos poseen características muy similares. Es necesario tener claro que los parámetros importantes contemplados para esta aplicación son la sensibilidad, el espectro de medida, tensión máxima inversa (alimentación), tamaño y calidad de información proporcionada por el fabricante.

Partiendo del hecho que las plataformas Telos-B y Tmote-Sky utilizan los fotodiodos con referencia S1087 y S1087-01 fabricados por la empresa HAMAMATSU (ver capítulo descripción de hardware), se procedió a buscar otras opciones que pudieran funcionar perfectamente para las plataformas anteriormente mencionadas así como para la plataforma Xbee y además presentaran algún beneficio con respecto a los anteriores cumpliendo con las mismas características eléctricas, físicas y de disponibilidad de los apertes anteriores.

La base teórica sobre la cual esta selección está fundamentada se describe en el manual de manejo de pollo de engorde Ross [3.19] el cual establece que con el fin de aumentar el metabolismo y la transformación energética, se debe inducir al pollo (y a la parvada en general), en su etapa de cría y engorde, en un programa de foto-exposición que comprende una relación entre la edad de vida del pollito y el periodo de tiempo de exposición de este a un determinado número de luxes, es de saber que en el galpón ubicado en la finca los totumos, no se tiene un control sobre esta variable [3.19].

EDAD (Días)	INTENSIDAD (Lux)	FOTO-PERIODO (Hora)
0-6	20	23 de luz-1 de oscuridad
7-21	20-10 Reducción progresiva con la edad	23 de luz-1 de oscuridad
22-Sacrificio	10	2 de luz-2 de oscuridad
Sacrificio	10	1 de luz-2 de oscuridad

Tabla 3.6 Programa de foto periodo al cual debe estar sometido los pollos de raza Ross un galpón de cría y levante.

Fuente: Adaptado por el autor de MANUAL Ross, AVIAGEN.

- APDS 9005(AVAGO):** Este dispositivo está descrito por su fabricante como un sensor fotosensible de bajo costos que viene en una presentación miniatura de montaje superficial (“chipLED lead free”). Este sensor está construido con base en un fotodiodo de avalancha (APD) que tiene una respuesta espectral cercana al propuesto por el estándar de la Comisión Internacional en Iluminación (CIE por sus siglas en francés) relacionado con el espectro fotópico del observador (ver figura 3.15). El APDS 9005 es ideal para aplicaciones en las cuales la medición de luz ambiental rige el comportamiento de dispositivos encargados del control de luces como por ejemplo las de

ajuste de contraste de los *display*, también es perfecto para aplicaciones en donde el consumo de potencia es crucial.

Las características eléctricas de este dispositivo establecen que su funcionamiento requiere de una tensión de alimentación en el rango de 1,8[V] hasta 5,5[V], la salida se entrega en forma de corriente y como se menciona anteriormente las dimensiones físicas de este dispositivo son bastante reducidas forzando al dispositivo a manejar corrientes muy pequeñas del orden de los nano y micro Amperes, por ejemplo bajo condiciones de total oscuridad y con una alimentación de 3[V] la corriente de salida es 300[nA]. El fabricante ofrece una hoja de datos bastante completa y con una caracterización excelsa, permitiendo al diseñador prever su comportamiento bajo diversas condiciones tanto de luminosidad como de carga [3.44].

- **TSL12S/13S/14S(THAOS):** La familia de sensores ópticos TSL1xx son dispositivos primordialmente optimizados en su relación costo-desempeño; es un dispositivo con un alto grado de integración ya que en un solo chip incluye un fotodiodo y un amplificador de transimpedancia lo cual permite que a la salida se tenga una señal de tensión. La respuesta espectral del sensor es bastante amplia lo cual le permite sensor intensidades con longitudes de onda en el rango de 320 [nm] hasta 1050 [nm] lo cual excede el rango visible establecido por el CIE, la linealidad de este sensor es muy buena a pesar que la superficie sensible a la luz es de 0,25 [mm²]. En cuanto a la alimentación, el dispositivo funciona con tensiones entre 2,5 [V] y 5,5[V] extrayendo una corriente de 1,1[mA] de la fuente de alimentación y la tensión a la salida puede ir desde 0,08[V] hasta 4,8 [V] cuando el dispositivo se alimenta a 5[V]. A pesar de sus excelentes características físicas y eléctricas, este dispositivo no se encuentra disponible en las tiendas distribuidoras de dispositivos electrónicos por ende no hace parte de la selección de todas formas es importante subrayar su existencia [3.45].

- **OPT101(Texas Instruments):** Este dispositivo es un chip monolítico que incluye un fotodiodo con un amplificador de transimpedancia lo cual le permite entregar a la salida una señal de tensión, esta señal aumenta linealmente y proporcionalmente con la intensidad de la luz que incide sobre la superficie fotosensible de este dispositivo. El OPT101 está diseñado para ser alimentado de forma dual o simple lo que lo hace ideal para ser empleado en sistemas que operan con baterías. La integración del fotodiodo y el amplificador de transimpedancia en un solo chip elimina problemas como corrientes de perdidas comúnmente encontrados en diseños discretos; este dispositivo opera con un rango de tensión de alimentación entre -2,7[V] y 36[V] y una corriente de alimentación de 120 [μA] está disponible a la venta en una presentación tipo DIP [3.46].
- **QSE973(Fairchild Semiconductor):** Este dispositivo es bastante sencillo ya que a diferencia de los demás sensores analizados este simplemente incluye un fotodiodo sin ningún dispositivo adicional en un encapsulado TO9 de tecnología through hole. La carencia de un amplificador integrado hace que a la salida la intensidad de corriente entregada por este sensor sea pequeña (del orden de los micro-Amperes) complicando en cierto grado el proceso de acondicionamiento de señal. La respuesta espectral de este dispositivo no es muy amplia ya que comprende colores con longitudes de onda en el rango de 800[nm] á 1050[nm], este dispositivo tiene una función de transferencia bastante lineal a pesar de presentar a la salida niveles de intensidad de corriente entre 0[μA] y 120[μA] para patrones de densidad de radiación entre 0[mW/cm²] y 2[mW/cm²] [3.47].
- **S1087/01(Hamamatsu):** Esta familia de dispositivos son los preferidos por los fabricantes de las plataformas Telos B y Tmote Sky. Al igual que el QSE973 estos dispositivos son simplemente unos fotodiodos y no incluyen las ventajas y beneficios que otorga la integración de amplificadores en el mismo encapsulado. La respuesta espectral de

estos dispositivos es bastante amplia y es posible escoger entre tres sensores diferentes; el transductor S1087, empleado en las plataformas fabricadas por la empresa Crossbow, responden a la luz con características espectrales pertenecientes a ondas con longitudes de onda entre 320[nm] y 730[nm], con estos sensores es posible tener un amplio rango de corriente a la salida, contemplando corrientes entre 10^{-16} [A] hasta 10^{-2} [A] para una intensidad de luz incidente entre 10^{-8} [lux] hasta 10^8 [lux] pero con la contraparte de tener una función de transferencia con un patrón reconociblemente no lineal [3.48].

La tabla 3.7 muestra un resumen de las características más relevantes de los sensores analizados y una breve comparación entre ellos.

Dispositivo	Alimentación [V]	SALIDA [V]	Rango [nm]	Fabricante	Precio [USD]
APDS-9005	1.8 – 5.5	0 – 1.2	400 -> 700	AVAGO	0,96
TSL1xS	2.7 – 5.5	1.5 – 2.5	320 -> 1050	TAOS	N/A
OPT 101	2,7-36	10^{-3} -10	300 -> 1100	TEXAS INSTRUMENTS	4,95
QSE973	0-32	0-120 [μA]	800 -> 1005	FAIRCHILD SEMICONDUCTOR	0,6
S1087	0,01-10	10^{-16} - 10^{-2} [A]	320 -> 730	HAMAMATSU	8,12

Tabla 3.7 Comparación entre los diferentes sensores de intensidad luminosa tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo

Fuente: Autores. Los precios fueron tomados de la tienda Newark electronic.

Después de haber analizado cada uno de los sensores considerados para la medición de esta variable, se concluye que el sensor APDS-9005 se ajusta a las necesidades del sistema en términos de relación costo-beneficio y versatilidad; el fabricante de dicho dispositivo presenta en su hoja de datos una caracterización bastante minuciosa del comportamiento de este en diferentes condiciones ambientales y de carga. Otro punto por destacar es que el máximo valor de tensión disponible a la salida en todo el rango de medida (utilizando cualquier resistencia de carga recomendada por el fabricante) es 1,2[V], lo cual

coincide con el máximo rango de entrada del ADC de la plataforma Xbee, lo anteriormente mencionado agiliza el proceso de acondicionamiento de señal si se pretende medir todo el espectro de luz visible [3.44].

De la tabla 3.7 es posible observar que los fotodiodos de referencia S1087 son costosos en comparación con los sensores escogidos, sin mencionar que la ausencia de un amplificador lo hace menos versátil que el APDS-9005.

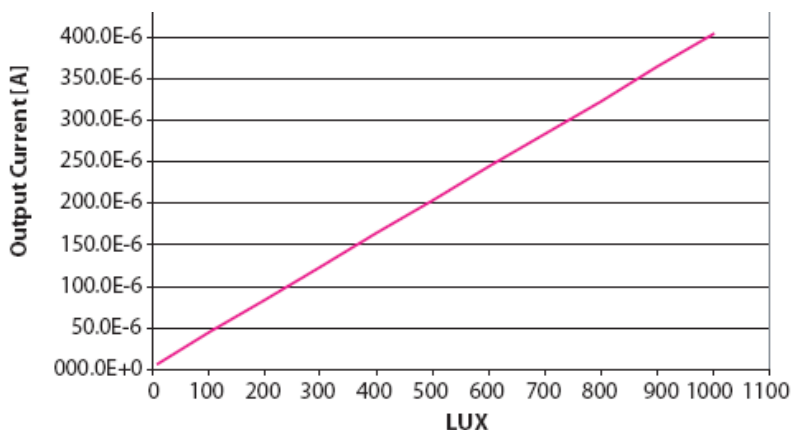


Figura 3.27 Comportamiento del sensor seleccionado respecto a la intensidad luminosa (APDS 9500).

Fuente: Adaptada por el autor de hoja técnica de datos APDS 9500 [3.44]

3.1.2.4 Selección del Sensor de Amoniac

Uno de los contaminantes del aire dentro de un galpón de cría y levante de pollos de engorde es el amoniac (NH_3), la aparición de enfermedades respiratorias crónicas y ascitis está fuertemente relacionada con los niveles de concentración de gases como este (llamados también gases de desecho) en el interior del galpón.

El manual de manejo de pollo de engorde Ross establece que lo ideal es mantener la concentración de NH_3 en una proporción menor a 20 partes por millón (ppm) para el área en donde se encuentran los pollos; bajo esta condición ambiental la salud de las aves de corral se ve afectada debido al deterioro de la superficie de las paredes pulmonares haciendo que el animal sea más susceptible a enfermedades respiratorias e incluso presentar problemas de crecimiento para concentraciones de NH_3 cercanas a 50 partes por millón [3.19].

AMONIACO (NH ₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede detectar por olfato a 20 ppm o más. • Más de 50 ppm disminuye la tasa de crecimiento en el ave de corral.
MONOXIDO DE CARBON (CO)	<ul style="list-style-type: none"> • 100 ppm reducen el enlace del oxígeno. • Fatal en niveles elevados
DIOXIDO DE CARBONO (CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 0,35% causa Ascitis.
POLVO	<ul style="list-style-type: none"> • Daña el recubrimiento del tracto respiratorio • Incrementa la susceptibilidad a enfermedades
HUMEDAD	Sus efectos varían de acuerdo con la temperatura. A más de 29°C y con más de 70% de humedad relativa se puede ver afectado el crecimiento.

Tabla 3.8 Efectos de las condiciones ambientales y gases de desechos en un galpón de cría y levante de pollos raza Ross.

Fuente: Adaptado por el autor de MANUAL Ross, AVIAGEN.

A diferencia de los sensores anteriores, el mercado de este tipo de sensores es bastante limitado. Una exhaustiva búsqueda de empresas fabricantes de estos dispositivos arrojó como resultado el hallazgo de solamente 4 referencias comerciales, dos de ellas operan en Europa (Italia e Inglaterra), una lo hace desde Estados Unidos y la restante lo hace desde Asia (Japón) con operaciones en Estados Unidos. Lo anteriormente mencionado es un verdadero problema porque reduce las posibilidades de encontrar un producto que se ajuste a las necesidades del proyecto; otra dificultad es el proceso de adquisición de estos transductores ya que ninguno se encuentra disponible en las tiendas distribuidoras de dispositivos electrónicos. Para tener la posibilidad de compra de estos dispositivos es necesario realizar el contacto directo con las empresas fabricantes.

A continuación se describen las opciones encontradas y disponibles para realizar el sensado de concentración de NH₃ en el aire de galpón ubicado en la finca los totumos. Este tipo de mediciones nunca se ha hecho en dicha finca.

- **NP-ANSM(Nemoto):** Este sensor utiliza el método de pelistor catalítico inflamable, consta de un par de elementos pelistores acoplados e incorporados en una sola capsula y protegidos por una malla metálica. Este dispositivo está diseñado y optimizado para la detección de amoniaco disuelto en aire para un rango de medida entre 0 y 100% LEL. El NP-ANSM se caracteriza por su alta selectividad al amoniaco y por su

inmunidad a gases de la misma base de hidrocarbonatos. Este sensor está catalogado como sensor pasivo si se tiene en cuenta que es necesario incorporar una fuente de alimentación externa a él para obtener una señal a la salida, la cual está dada en forma de variación de impedancia. Esta fuente debe ser de 2,2 [V] de la cual el sensor extrae una intensidad de corriente aproximada a 175[mA]; es capaz de operar en un rango de 0 a 10,000[ppm] con una precisión de +/-500 [ppm] lo que equivale a +/-5% de la máxima escala de medida; tiene un excelente tiempo de respuesta, 8 segundos para llegar al noventa por ciento de la respuesta en estado estable. Cabe resaltar que este fabricante presta un excelente servicio de soporte técnico y comercial además de una completa documentación referente al comportamiento de dichos sensores [3.49].

- **TGS2444(Figaro):** Este dispositivo utiliza una estructura sensorial multicapa conformada por un cubrimiento de vidrio que se encuentra entre una capa de óxido de rutenio (“heater”) y un substrato o cuerpo de aluminio, este cubrimiento de vidrio actúa como aislador térmico para el sensor. La capa restante es la que se encarga del sensado del gas y está fabricada en una delgada película de dióxido de estaño y se encuentra envuelta en un aislador térmico que encierra de igual manera al calentador. En su exterior expone cuatro electrodos de oro (Au), dos para el calentador y dos para el elemento activo o sensor de gas, emplea el principio de transducción de los sensores de estado sólido para medida de concentración de gases. Muestra una excelente selectividad respecto al gas objetivo (NH_3) sin embargo no es totalmente inmune a la presencia de otros gases que pueden generar medidas como en el caso del sulfuro de hidrógeno (H_2S). El fabricante del TGS 2444 expresa que dicho sensor es ideal para las aplicaciones que tiene que ver con seguridad industrial, como la detección de fugas de amoníaco en sistemas de refrigeración y en aplicaciones que estén relacionadas con la detección de amoníaco en el campo de la agricultura (especialmente en la rama de la avicultura). Este dispositivo presenta a

su salida variaciones de impedancia lo cual lo lleva a estar en el grupo de sensores pasivos al requerir una fuente de alimentación externa para generar una respuesta en presencia de la variable por medir. Lo curioso de este sensor es que necesita de un circuito generador de pulsos (como si se tratase de un sensor digital) para poder operar y presentar a la salida la respuesta en forma de tensión. En cuanto a las características eléctricas opera en un rango de medida comprendido entre 10[ppm] y 100[ppm], es necesario que los pulsos utilizados para el funcionamiento de este dispositivo tengan una forma rectangular y oscilen entre los 0[V] y 5[V], tiene un consumo de corriente de aproximadamente 203 [mA] y tiene un tiempo de respuesta bastante prolongado de alrededor de 10 a 15 minutos para llegar al noventa por ciento del nivel de la señal en estado estable, se encuentra disponible en un encapsulado metálico TO-5 de tecnología “*through hole*” [3.50].

- **P/N 705 (Synkera):** Este dispositivo tiene un principio de operación parecido al de los dos sensores expuestos con anterioridad; la unión calentador y elemento sensor, enmarcados en el encapsulado estándar TO-39 de tecnología through hole, permite que el P/N 705 tenga un rango de detección de 20 ppm hasta 10,000 ppm utilizando un nivel de tensión para el calentador y el elemento sensor de 7,5[V] y 5[V] respectivamente, consumiendo una intensidad de corriente de 130[mA] aproximadamente. Tiene un tiempo de respuesta de un minuto aproximadamente y un rango de variación de impedancia comprendido entre 10^8 [ohm] y 10^{10} [ohm], la información otorgada por el fabricante Synkera es bastante escasa [3.51].
- **NT-NH3 (NEMOTO):** A diferencia de los anteriores sensores, el NT-NH3 es un sensor que aprovecha las reacciones electroquímicas para realizar el sensado de amoníaco, este método de sensado permite obtener datos bastante precisos con una alta sensibilidad y a un costo razonable. La naturaleza electroquímica del sensor hace que la señal de salida se muestre en forma de corriente y se caracteriza por ser muy pequeña (del orden de los nano amperes) lo cual parecería ser un problema por los

niveles de ruido que podrían acoplarse a esta señal, sin embargo la información otorgada por el fabricante es de gran ayuda para obtener excelentes resultados utilizando este equipo. El NT-NH3 es capaz de sensor concentraciones de amoníaco en el rango de 0ppm a 100ppm sin requerir una fuente de alimentación externa lo cual lo define como un sensor activo; lo anterior lo hace muy útil por el bajo consumo de potencia que esto representa y la disminución de dispositivos encargados de la alimentación de este sensor; el tiempo de respuesta es relativamente corto considerando que las constantes de tiempo de los procesos químicos son bastante lentas, este tiempo es de aproximadamente 30 segundos para alcanzar un 60 por ciento de la respuesta en estado estable. Su arquitectura física consta de 3 electrodos, uno de ellos es llamado electrodo de referencia el cual siempre se encuentra al mismo potencial electroquímico con el fin de tener una medida precisa y estable, el otro electrodo es llamado electrodo activo o "*worker*", este es el encargado de entregar la corriente que representa la concentración de amoníaco en el ambiente, puede considerarse como el electrodo de salida, cabe notar que el electrodo de referencia está eléctricamente atado al "*worker*". Por último existe un electrodo denominado "*counter*", el cual se encarga de restablecer en cierta proporción el balance electroquímico del dispositivo generando una cantidad de electrolito a partir de los electrones generados (referirse a principios de funcionamiento) [3.52].

Se considera que debido a la poca cantidad de opciones para la selección de este dispositivo, es necesario realizar un procedimiento de descarte analizando las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas en cuestión.

Los sensores que utilizan el principio de pelistores y de unión entre "*heater*" y elemento sensor, en especial los sensores con referencia NP-ANSM y P/N 705, ofrecen rangos de medida muy amplios, con precisiones de plena escala que exceden las necesidades del proyecto. La excepción a este caso es el sensor fabricado por la empresa Figaro con referencia TGS2444, dicho dispositivo está diseñado para operar en un rango de bajas concentraciones de amoníaco,

lastimosamente no es posible operarlo sin un sistema generador de pulsos con cierto formato establecido por su diseñador (referirse a [3.50]) lo que conlleva al uso de dispositivos extras para otorgar una señal analógica, se considera entonces que el esfuerzo económico y de diseño adicionales que hay que realizar para manejar el TGS2444 valdría la pena si se tratase de un dispositivo de naturaleza digital y si así fuera, no cumpliría con el requisito que establece que el sensor debe otorgar una señal analógica en su salida. La intensidad de corriente que hay que suministrar a estos tres equipos es considerablemente importante (del orden de las centenas de mili-amperes) y por tanto se alejan aun más de ser una alternativa viable y adecuada para la aplicación.

El sensor fabricado por la empresa NEMOTO y de referencia NT-NH3 aparece como la opción más adecuada para los objetivos de este trabajo investigativo ya que al ser un dispositivo activo economiza los recursos necesarios para la alimentación de este; actúa en el rango necesario para la aplicación sin incurrir en errores exagerados provocados por la precisión de máxima escala y ofrece una vida útil de mínimo 2 años lo cual permite pensar en un sistema auto sostenible durante ese mismo periodo de tiempo.

La tabla 3.9 muestra un resumen comparativo entre los 4 sensores de concentración de amoníaco analizados.

Dispositivo	Alimentación [V] [mA]	Sensibilidad	Rango [ppm]	Fabricante	Precio [€]
NT-NH3	No requiere	52 [nA/ppm]	0 -> 100	NEMOTO	49,4
NP-ANSM	2,2 170	15 [mV/%NH3/aire]	0 -> 10,000	NEMOTO	12
TGS2444	4,8[V](heater) 5[V](sensor) 203	0,63[Kohm/ppm]	10 -> 100	FIGARO	54 [USD]
P/N 705	7,5[V](heater) 5[V](sensor) 130	N/A	25 -> 10,000	SYNKERA	N/A

Tabla 3.9 Comparación entre los diferentes sensores de concentración de amoníaco tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo

Fuente: Autores. Los precios fueron tomados directamente de los fabricantes.

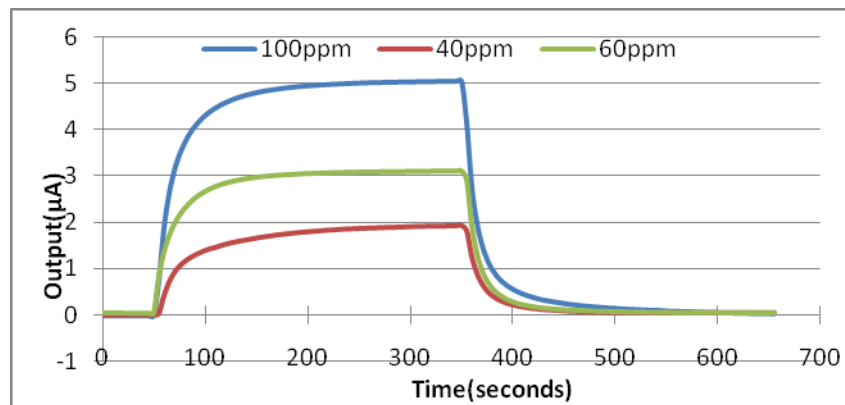


Figura 3.28 Comportamiento del sensor seleccionado respecto a la concentración de NH_3 (NT-NH3).
Fuente: Adaptada por los autores de la hoja de especificaciones técnicas del NT-NH3 [3.52]

3.1.2.5 Selección del Sensor de Monóxido de carbono

Al igual que el amoníaco, el monóxido de carbono es considerado como gas de desecho y por tanto también afecta la salud de los pollos de la misma manera que lo hace el amoníaco. Las recomendaciones del manual de manejo de pollo Ross se encuentran resumidas en la tabla 3.8.

Para la selección de este transductor las opciones son reducidas debido a la escasa cantidad de fabricantes de este tipo de dispositivos.

En esta investigación solo fue posible encontrar dos empresas fabricantes de sensores de amoníaco, a continuación se presentarán en forma breve cada uno de los dispositivos ofrecidos por estas.

- **TGS5042 (FIGARO):** El fabricante describe este producto como un sensor electroquímico operable con batería lo cual le da ciertas ventajas (en cuanto a precisión, estabilidad y tiempo de vida) con respecto a los sensores electroquímicos tradicionales.

En cuanto a las características eléctricas de este dispositivo se puede apreciar que, al igual que todos los sensores electroquímicos encontrados en esta investigación, entrega a la salida una señal de intensidad de corriente de baja amplitud (del orden de los nano-Amperios). Tiene un rango de medida de 0 a 10.000 [ppm] operando bajo temperaturas comprendidas en el rango de -40 a 70 [°C]. Tiene una

precisión de +/-5% y un tiempo de respuesta de aproximadamente 2 minutos.

Es curioso observar que a pesar de ser un sensor electrolítico, el TGS5042, opera con dos electrodos en vez de tres (“*counter y working*” haciéndole falta el electrodo de referencia”) [3.61].

- **NT-CO-2F (NEMOTO):** El NT-CO-2F es un sensor electroquímico de tres electrodos; Este sensor es utilizado para la detección de monóxido de carbono (CO) en ambientes que requieren un medio que permita controlar la calidad de aire y establecer alarmas.

La tecnología utilizada para fabricar este dispositivo permite que el sensor tenga una buena selectividad, es decir sea poco sensible a gases diferentes al CO.

El NT-CO-2F permite realizar medidas de concentración de monóxido de carbono en un rango de 0 a 1000 [ppm] con un error de plena escala de +/-0.5%, con un tiempo de respuesta menor a 30 [S]. El funcionamiento del NT-CO-2F es prácticamente igual al utilizado por el sensor de referencia NT-NH3, seleccionado para realizar las medidas de NH3 [3.62].

De acuerdo con los sensores estudiados, se establece que el parámetro de selección no puede ser consumo de potencia porque la naturaleza activa de ambos dispositivos hace que estos no consuman potencia alguna, en cambio, el rango de medida es la característica más influyente en la selección de este dispositivo si se tiene en cuenta que es necesario medir concentraciones de CO cercanas a las establecidas en la tabla 3.8. Con esta nueva evidencia se selecciona el dispositivo de referencia NT-CO-2F porque para el rango de medida teórico necesario para este proyecto, este dispositivo comete un menor error porcentual en la medida que la segunda opción (el TGS5042). Como dato interesante, el fabricante de estos sensores establece que el circuito que se utilice para controlar uno de los dos sensores, funciona para controlar el otro.

3.1.2.6 Selección del anemómetro (velocidad del viento)

Medir la velocidad del viento dentro de un galpón avícola es muy importante ya que dicha velocidad determina que tan rápido se evacúan los gases de desecho (NH₃, CO₂) y se purifica el aire del galpón [3.19]. El manual de manejo de pollo de engorde Ross recomienda que la velocidad del viento al interior de un galpón avícola, deba estar entre 2 o 3 [m/S] para garantizar aire fresco y buenas condiciones climáticas (temperatura y humedad) en todo momento al interior de dicho recinto. En la actualidad el control de la velocidad del viento en la mayoría de galpones de cría y levante de pollo de engorde en el ámbito local se realiza a través de cortinas dispuestas alrededor del edificio, esto se hace de la siguiente manera: cuando la persona encargada del mantenimiento de la granja (galponero) considera que la velocidad del viento es alta, este cierra las cortinas y las baja en caso contrario.

Encontrar sensores que sean capaces de medir velocidades de viento tan pequeñas como las encontradas en los galpones avícolas, es una labor algo complicada ya que la mayoría de dispositivos electrónicos comercializados para realizar esta labor están diseñados para medir velocidades de fluidos características de ambientes industriales (como por ejemplo en la industria del gas destinada a la energía).

Después de una minuciosa investigación sobre empresas que fabriquen este tipo de sensores se encontró que solamente una empresa diseña y comercializa sensores capaces de medir velocidades de flujo pequeñas, dicha empresa ofrece dos dispositivos muy similares para realizar el sensado de la variable en cuestión. Otras empresas (como por ejemplo Honeywell) ofrecen algunos anemómetros pero sus características no son adecuadas para las exigencias de esta investigación.

- **D6F-V03A1 (OMRON):** Es un sensor diseñado para medir velocidades de viento en el rango de 0 a 3 [m/s] empleando tecnología MENS. Su estructura física (única y patentada por la empresa OMRON) le permite separar partículas de polvo que las corriente de aire puede contener; lo anterior disminuye la frecuencia con la cual estos dispositivos deben

someterse a revisión y mantenimiento técnico. En cuanto a las características eléctricas del D6F-V03A1 se destaca su alimentación en el rango de 3.15 a 3.45 [V.dc] consumiendo una intensidad de corriente eléctrica de 15[mA] además de hacer las medidas bajo un error de +/- 10% del valor a plena escala. Por último su rango de salida está en el rango de 0 a 2 [V].

- **D6FP-1007 (OMRON):** Este es un dispositivo muy similar al D6F-V03A1, anteriormente descrito. Se diferencian en que el D6FP-1007 mide la velocidad del fluido que circula por él en unidades de litros por minutos (SLM) en vez de hacerlo en metros por segundo. El rango de alimentación de este dispositivo está entre los valores de 5 y 10 [Vdc] consumiendo una intensidad de corriente de 15 [mA] y entregando a la salida una señal entre 0,5 y 2,5 [V].

De acuerdo con el estudio de los dos sensores anteriormente descritos, se concluye que el dispositivo de referencia D6F-V03A1 es idóneo para medir la velocidad del viento en galpones avícolas si se tiene en cuenta que este cumple con las exigencias impuestas por los rangos de medida teóricos propuestos por el manual de manejo de pollo de engorde Ross. Desde el punto de vista del diseño de sistemas de redes inalámbricas de sensores, el D6F-V03A1 se adapta muy bien a las necesidades de bajo consumo de potencia características de este tipo de sistemas. Por otro lado, en el caso particular de los módulos Telos, el dispositivo D6F-V03A1 no requiere de un sistema de acondicionamiento de señal para acoplarse al sistema ADC del módulo radiotransmisor fabricado por la empresa Crossbow.

A manera de resumen se presenta la tabla 3.10 en la que se muestra las variables por medir con sus respectivas restricciones teóricas, comparadas con los sensores escogidos para realizar cada una de las tareas.

Variable (Rango teórico)	Dispositivo	Alimentación [V] [μA]	SALIDA [V]	Rango	Fabricante	Precio [USD]
Intensidad Luminosa (10/50[Lux])	APDS-9005	1.8 – 5.5	0 – 1.2*	0/1100 [lux]*	AVAGO	0,96
Temperatura (20/30[°C])	FM20	2.4 – 6.0 9	-11.77	-55/130 [°C]	Fairchild Semiconductors	0,9
Humedad R. (60/70[%HR])	HIH-4000	4 – 5.8 200 @ 5[V]	0,8 - 3,9	0/100 [%HR]	HONEYWELL	21,01
Amoniaco	NT-NH3	No requiere	0-0,074*	0/100 [ppm]	NEMOTO	77,9
Monóxido de Carbono	NT-CO-2F	No requiere	0-0,074	0/1000 [ppm]	NEMOTO	50
Anemómetro	D6F- V03A1	3.15-3.45 1500	0-2	0-3 [m/S]	OMRON	34
Costo Total						184,77

Tabla 3.10 Comparación entre los diferentes sensores y los requisitos tomados en cuenta para el desarrollo del prototipo

Fuente: Autores. *Estos valores son proporcionados por los fabricantes aplicando circuitos básicos de instrumentación. Los precios fueron tomados y de la tienda Newark.

Después de haber hecho una revisión exhaustiva sobre las opciones que ofrece el mercado de los dispositivos electrónicos en favor de obtener los dispositivos que mejor se adapten a las consideraciones del proyecto, es hora de presentar algunos datos relevantes sobre el comportamiento de los sensores en las condiciones climáticas a las que serán sometidos (ver figuras 3.23, 3.25 y tablas 3.2, 3.3, 3.6, 3.7 y 3.9).

Los fabricantes de los dispositivos seleccionados en sus hojas de datos presentan las ecuaciones que rigen el comportamiento de la correspondiente variable de salida en presencia de cambios en la variable de instrumentación (variable por medir). En el caso del sensor de humedad HIH-4000, la empresa Honeywell asegura que este se ajusta al modelo matemático presentado en la fórmula (3.13).

$$\%H = \frac{V_{sen} - 0.8V}{3,1V} * 100\% \quad (3.13)$$

Donde **Vsen** es la tensión otorgada por el sensor en respuesta a un determinado valor de humedad relativa. Adaptando los valores expuestos en la figura 3.21, es relativamente sencillo inferir que los valores de tensión a la salida del sensor estarán en un rango de valores comprendidos entre 2,319[V] y 3,621[V].

Desarrollando un análisis similar con el sensor seleccionado para medir temperatura (ver figura 3.19 y fórmula 3.14 donde **Vsen** es la tensión a la salida del sensor en respuesta a una temperatura determinada), se obtiene que para el modelo matemático planteado por el fabricante los valores de tensión a la salida del sensor oscilaran entre 1,4402[V] y 1,6285[V].

$$T (^{\circ}C) = \frac{V_{sen} - 1.8639 V}{-0.01177 V/^{\circ}C} \quad (3.14)$$

La fórmula (3.15) y (3.16) presentan el modelo matemático otorgado por los fabricantes de los sensores para medir intensidad luminosa (APDS-9005) y concentración de amoníaco (NT-NH3) respectivamente. El análisis para estos sensores arroja un rango de valores de tensión que van de 0[V] a 0,45[V] y de 0,2[V] a 0,275[V] respectivamente.

$$LUX = (2,666 * 10^6) I_{sen} \quad (3.15)$$

$$NH3(ppm) = 12,43 * 10^6 I_{sen} - 266.66 \quad (3.16)$$

La tabla 3.11 muestra un resumen de estos cálculos para cada uno de los sensores seleccionados.

Sensor (seleccionado)	Rango de la variable (real)	Rango de salida del sensor
HIH 4000	49->91 [%RH]	2,319->3,621 [V]
FM20	20->36 [°C]	1,440->1,628 [V]
APDS 9500	0->100 [lux]*	0->0,45 [V]
NT-NH3	0->100 [ppm]*	0,2->0,275

Tabla 3.11 Resumen de los cálculos para predecir el comportamiento de los sensores bajo condiciones del ambiente real

Fuente: Autores

*estos valores fueron elegidos tomando en cuenta que no existen valores patrones en el galpón.

3.2 DISEÑO DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

En la práctica es difícil encontrar sensores que operen sin ninguna clase de sistemas anexos o auxiliares, esto es debido a que la amplitud de la señal eléctrica entregada por los sensores es relativamente baja en todo el rango de medición y por tanto no son lo suficientemente “significativas” (desde el punto de vista industrial se admiten niveles de tensión de 1-5[v] y de corriente de 4-20[mA]) como para poder ser controladas, comparadas e interpretadas [3.4][3.53][3.9]. Estos sistemas auxiliares a su vez están constituidos por subsistemas encargados de la interpretación y el procesado de las señales (Micro-controladores, FPGA’S, DSP’S, etc.) además de múltiples circuitos reconocidos como circuitos de acondicionamiento; estos últimos están encargados de la amplificación, el desplazamiento de nivel, la linealización y el filtrado (entre otras funciones) de las señales entregadas por el sensor [3.4].

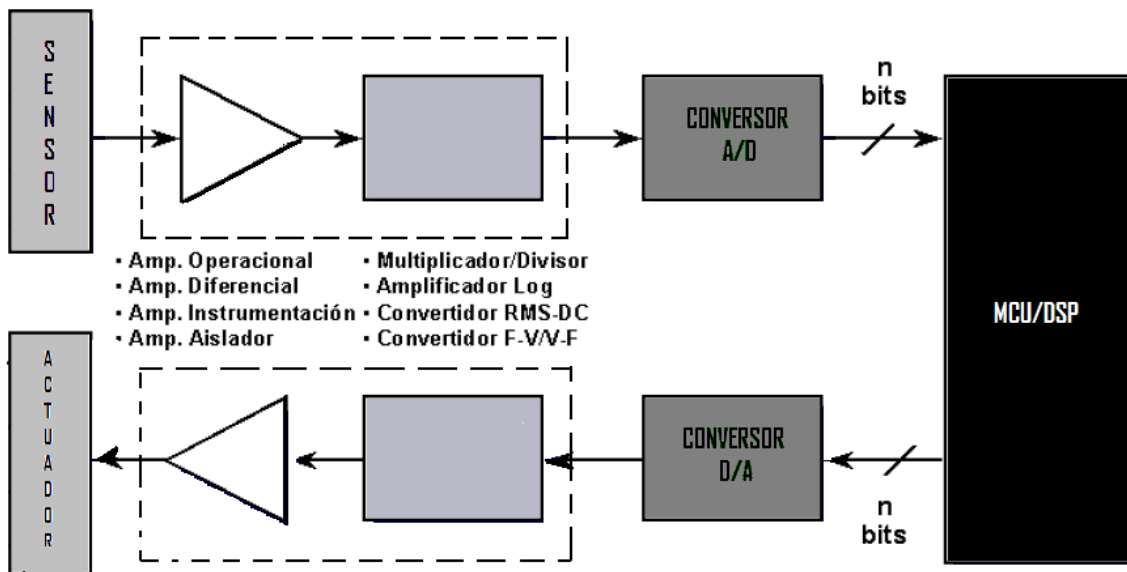


Figura 3.29 Esquema tradicional de los sistemas encargados de la adecuación y procesamiento de señales. Fuente: Adaptada por los autores Mayné, Jordi. Acondicionadores y Procesadores de señal. Silica an avnet division. [3.53].

Puentes de Wheatstone, amplificadores y filtros electrónicos son ejemplos de circuito de acondicionamiento de señal encargados de adaptar la señal a los niveles apropiados para el resto del sistema.

Como se pudo observar de la tabla 3.10, las señales que se obtienen de los diferentes sensores manejan niveles de tensiones que varían en cierto rango según las especificaciones del fabricante. En el capítulo anterior se vio que los ADC para las plataformas *hardware* Xbee y Telos B imponen niveles de tensiones mínimos y máximos que en sus puertos de entrada que restringen de sobremanera el rango de salida de los sensores. Con el fin de aprovechar al máximo las capacidades de los sistema de conversión analógica/digital (ADC) de cada uno de los módulos utilizados en este trabajo, es necesario diseñar circuitos que realicen la labor de acoplar los niveles de las señales de salida de los sensores, con los niveles máximos y mínimos exigidos por los puertos de entrada de los ADC. La tabla 3.12 resume las cualidades de los ADC pertenecientes a las plataformas X-Bee y Telosb.

Módulo	Numero de Bits	Tensión de Referencia ($V_{in\ max}$)	Resolución (LSB/V)	F. de muestreo
Xbee	10	1,2	1,17 [mV]	1 [KHz]
Telos B	12	2,5	6.11 [mV]	200[KHz]

Tabla 3.12 Resumen de las características de los ADC de los módulos Xbee y Telos B

Fuente: Adaptado por los autores de los manuales de los módulos Xbee y Telos B.

De la comparación entre las tablas 3.10 y 3.11 se evidencia que ninguno de los sensores seleccionados otorga a la salida, bajo las condiciones ambientales de operación, niveles de señal que coincidan con los necesarios para extraer de los sistemas ADC el mayor beneficio posible.

Para la etapa de acondicionamiento de señal anteriormente mencionada se opta por añadir en el camino de señal entre el sensor y los puertos del ADC, una topología de circuitos conocida como amplificador inversor (ver figura 3.27a) [3.54][3.55]. En esta, un amplificador operacional (OpAmp) es utilizado junto con un par de resistencias para ajustar la ganancia del sistema y así asegurar que el *Spam* tanto del sensor como del ADC coincida, lo anterior no asegura que los rangos de la señal y del ADC sean iguales, por eso es necesario modificar levemente esta topología incluyendo en la entrada no inversora del OpAmp una señal de tensión continua (DC) con el fin de desplazar el rango de la señal de salida del sensor hasta llegar al acople de los rangos en cuestión de forma perfecta; la figura 3.27 b ilustra este hecho.

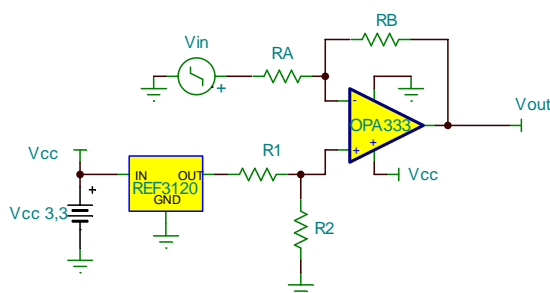


Figura 3.30 Etapa de acondicionamiento de señal implementada con una configuración inversora modificada.

Fuente: Adaptado por los autores de Kester Walt, Bryant James, Jung Walt, Wurcer Scott, Kitchin Chuck. Sensor Signal Conditioning. Analog Device.

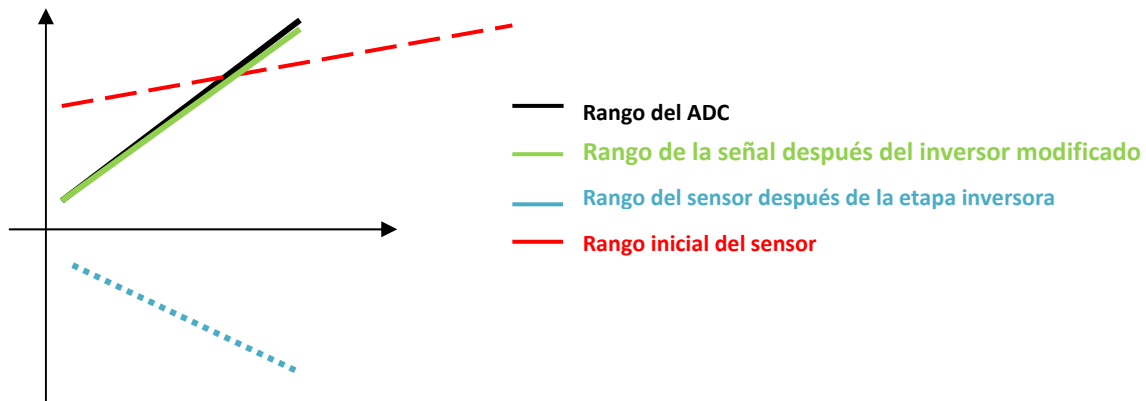


Figura 3.31 Procesos de acondicionamiento de señal implementado con una configuración inversora modificada.

Fuente: Autores.

La ecuación 3.17 describe la relación entrada-salida de la etapa de acondicionamiento descrita en el párrafo anterior. Se aprecia que esta ecuación es de naturaleza lineal (primer grado) y es de la forma

$$V_{ADC} = m * V_{sen} + b \quad (3.17)$$

En donde m es la pendiente de la recta y b es el intercepto de esta con el eje de las abscisas. La ecuación 18 permite inferir que la pendiente de esta recta al igual que su intercepto están gobernados por la relación de elementos pasivos (resistencias) que conforman la topología mostrada en la figura 3.30, esto último advierte sobre la flexibilidad de este circuito haciéndolo idóneo para aplicaciones multipropósito como las desarrolladas en este trabajo.

$$V_{out} = \underbrace{-\frac{R_B}{R_A} V_{in}}_m + \underbrace{V_{ref} \left(1 + \frac{R_B}{R_A} \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)}_b \quad (3.18)$$

Hay que aclarar que los valores de las resistencias no pueden escogerse de forma aleatoria, algunos fabricantes de dispositivos electrónicos [3.56] sugieren que los valores de las resistencias deben ser escogidos de tal manera que el valor resultante del paralelo de las resistencias conectadas en la entrada no inversora iguale el valor resultante del mismo cómputo realizado para las resistencias ubicadas en la entrada inversora, de esta forma se asegura que las tensiones generadas en las entradas del OpAmp a causa de corrientes indeseables (corriente de ruido referida a la entrada, corriente de polarización, etc.) tengan el mismo valor y sean tomadas como tensiones de modo común y por tanto rechazadas gracias a la entrada diferencial que presentan los amplificadores operacionales.

$$R_A || R_B \cong R_1 || R_2 \quad (3.19)$$

Con la aparición de estas nuevas consideraciones, se realiza el cálculo de los valores de resistencias de las etapas de adecuación de señal para cada uno de los sensores mostrados en la tabla 3.10, teniendo presente que a la salida de esta se debe obtener niveles de tensión en el rango impuesto por las características del ADC (ver tabla 3.11). La tabla 3.13 muestra los resultados obtenidos.

Valor de Las Resistencias en KOhm					
Resistencia	Humedad	Intensidad Luminosa		Amoniaco NH3	
	X-Bee	X-Bee	Telosb	X-Bee	Telosb
R1	43,54	124,89	94,21	74,4	13,7
R2	222,2	25,6	22,2	11	90,51
RA	79,74	29,96	21,67	10,24	12,3
RB	67,4	73,23	105,94	150,2	360,8

Tabla 3.13 *Valores de resistencias de las etapas de adecuación de la figura 3.30a para algunos sensores.*

Fuente: Autores.

Debido a inconsistencias a la hora de resolver las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19) en búsqueda del ajuste para los sensores de humedad (en el caso de la plataforma Telos B) y del sensor de temperatura (en ambos casos) se decidió implementar dos etapas de la misma configuración inversora dispuestas en

cascada y así obtener resultados coherentes. El esquema general de este sistema se puede ver en la figura 3.32.

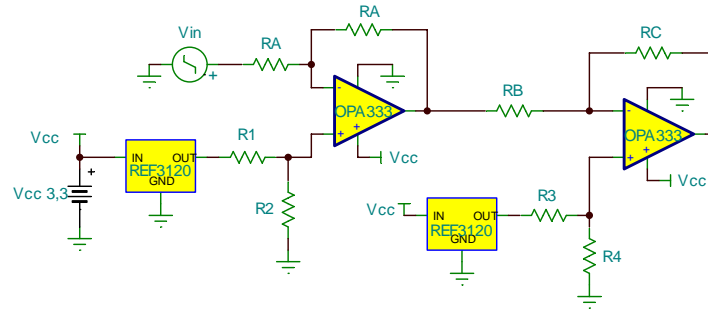


Figura 3.32 Etapa de acondicionamiento de señal implementada con doble configuración inversora modificada.

Fuente: Autores.

El análisis que se realizó sobre la configuración mostrada en la figura 3.27a para la obtención de las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19), es el mismo análisis que se debe realizar para la deducción de las ecuaciones que describen el comportamiento de la arquitectura presentada en la figura 3.32. Ha de saberse que las ecuaciones (3.20), (3.21) no están simplificadas porque más adelante se hace un análisis de error que incluye a todas las resistencias presentes en el sistema.

$$b = V_{ref} \left\{ \frac{R_B + R_C}{R_B} \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_C}{R_B} \frac{R_A + R_A}{R_A} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right\} \quad (3.20)$$

$$m = \frac{R_C R_A}{R_B R_A} \quad (3.21)$$

$$R_A || R_A \cong R_1 || R_2 \quad R_B || R_C \cong R_3 || R_4 \quad (3.22)$$

Resolviendo las ecuaciones de la (3.20) a la (3.22) para los sensores restantes, se llega a los valores de las resistencias necesarias para su respectivo ajuste.

Valor de las Resistencias en KOhm			
Resistencia	Humedad	Temperatura	
	Telosb	X-Bee	Telosb
R1	10,9	98,2	141,1
R2	140	77	100,1
RA	20,2	86,3	117,1
RB	84,1	26,16	13,17
RC	142,1	152,8	153,86
R3	111,67	142,13	100,52
R4	100	26,5	13,8

Tabla 3.14 Valores de resistencias de las etapas de adecuación de la figura 3.32 para algunos sensores.

Fuente: Autores.

Los valores de las tablas 3.13 y 3.14 son teóricos ya que estos no están disponibles en el mercado de los dispositivos electrónicos, es necesario realizar algunos ajustes para seleccionar dichos valores de acuerdo con los valores comerciales. En la tabla 3.15 se muestran los valores de resistencias comerciales que se ajustan a los requisitos teóricos. Para escoger las resistencias de esta tabla se toman principalmente las ecuaciones (3.17), (3.18), (3.20) y (3.21) y se deja como alternativa las ecuaciones (3.19) y (3.22) ya que estas son recomendaciones hechas por fabricantes para obtener una mejor relación de rechazo a tensiones de modo común producto de corrientes indeseables en el sistema.

Valor de las resistencias en KOhm								
R	DOS ETAPAS			UNA ETAPA				
	Humedad	Temperatura		Humedad	Intensidad Luminosa		Amoniaco NH3	
	Telosb	X-Bee	Telosb	X-Bee	X-Bee	Telosb	X-Bee	Telosb
R1	11	98,2	141	43,7	125,5	94,9	74,9	13,7
R2	140	77	100,1	222,2	25,6	22,2	11	90,5
RA	20	84,5	110	76,8	30,5	22,2	10,2	12
RB	84,5	25,6	13,8	64,9	74,9	110,1	149,4	350
RC	142,2	149,2	161,3	--	--	--	--	--
R3	112	142,2	100,3	--	--	--	--	--
R4	100	26,5	13,8	--	--	--	--	--

Tabla 3.15 Valores comerciales de resistencias de las etapas de adecuación para todos los sensores.

Fuente: Autores

De acuerdo con esto, la tabla 3.15 muestra los resultados del reemplazo de los valores de la tabla 3.16 en las ecuaciones (3.18), (3.20) y (3.21) (según sea el caso).

Vadc = m*Vsensor + b		
Sensor	Modulo	Ecuación Etapa de Adecuación
Humedad	X-Bee	Vout = -0,845052*Vin + 3,157652
	Telosb	Vout = 1,682840*Vin - 3,799056
Temperatura	X-Bee	Vout = 5,828125*Vin - 8,295033
	Telosb	Vout = 11,688406*Vin - 16,73416
Intensidad Luminosa	X-Bee	Vout = -2,455738*Vin + 1,19907
	Telosb	Vout = -4,959459*Vin + 2,13384
Amoniaco	X-Bee	Vout = -14,647059*Vin + 4,10357
	Telosb	Vout = -28,589109*Vin + 7,814320

Tabla 3.16 Funciones matemáticas que modelan el comportamiento eléctrico de las señales después de haber sido acondicionadas.

Fuente: Autores.

Con ayuda del programa simulador de circuitos TINA-TI se realizaron simulaciones para cada una de las adecuaciones descritas por las tablas 3.14 y 3.15 con el fin de corroborar que la salida de cada etapa efectivamente estaría en el rango que aceptan los ADC tanto del Xbee 30,1 a 1,2) como del Telos B (0,1 a 2,3). En las figuras 3.29 y 3.30 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas correspondientes a la etapa de adecuación de señal del sensor de humedad.

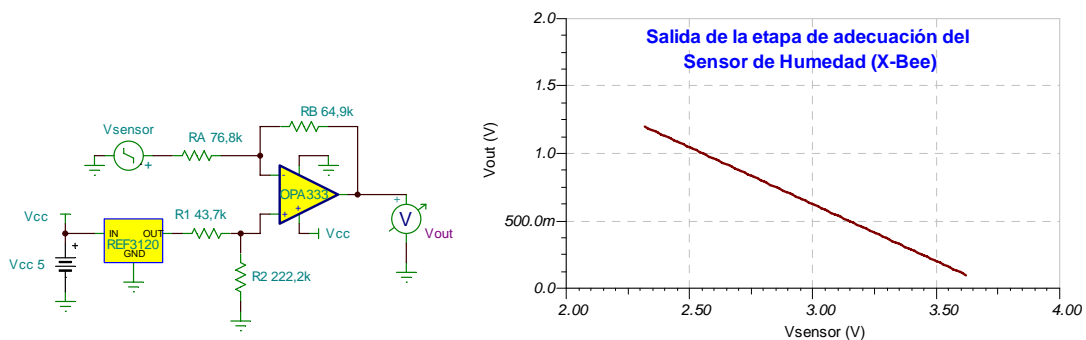


Figura 3.33 Etapa adecuación sensor Humedad y Función de transferencia (X-Bee)

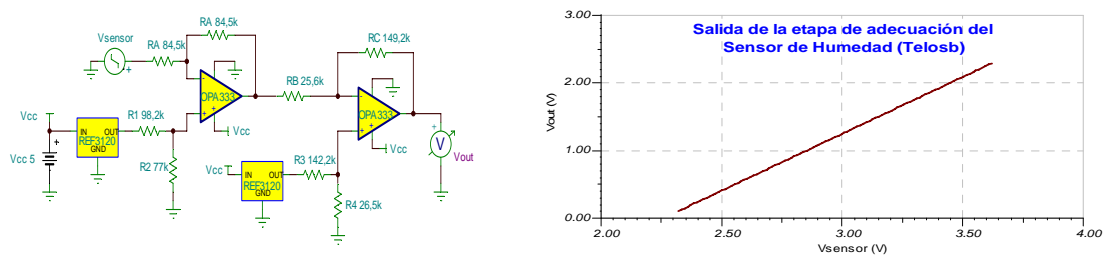


Figura 3.34 Etapa adecuación sensor de Humedad y. Función de transferencia (Telos B)

En el diseño de circuitos con amplificadores operacionales existen muchas fuentes de error que ocasionan alteraciones en la respuesta de los sistemas, es por esto que deben estudiarse los efectos de dichas fuentes de error y así determinar si el funcionamiento del dispositivo que se escoge es óptimo.

A través del conocimiento de la cantidad efectiva de bits necesaria en un ADC para que los efectos de las fuentes de error en sus puertos de entrada (como por ejemplo el ruido generado por los componentes electrónicos, desviaciones por tolerancias, etc.) no alteren el desempeño a la salida de este, es posible cuantificar que tan bien se comporta un determinado amplificador operacional escogido para interactuar con él. Es interesante ver que las fuentes de error que afectan el desempeño de los amplificadores operacionales están definidas en las hojas de datos brindadas por los fabricante, en donde características como tensión de desnivel (V_{os}), corrientes de polarización (I_{BIAS}), linealidad de la ganancia de lazo abierto (A_{OL}), factor de rechazo en modo común (CMRR), Factor de rechazo a variaciones en la fuente de alimentación (PSRR), densidad de tención y corriente de ruido (ruido térmico y ruido *flicker*) muestran un indicio del comportamiento real del dispositivo.

A continuación se exponen algunas recomendaciones dadas por expertos diseñadores de aplicaciones con amplificadores operacionales referentes a la escogencia de estos a partir de las características de desempeño otorgadas por los fabricantes. Hay que tener presente que estas consideraciones son hechas sabiendo que el objetivo es hacer una buena selección referente a un OpAmp que va a interactuar con un ADC de características específicas (el ADC es inmodificable).

- **Tensión de desnivel (Offset):** Esta es una de las fuentes de error más comunes en los sistemas que emplean el uso de amplificadores operacionales. Para las aplicaciones que se han tomado como referencia (aquellas en donde el OpAmp interactúa con un ADC), este valor no debe superar en gran medida a la tercera o cuarta parte de la resolución con la el ADC maneja los datos (Remitirse a la tabla 3.11).

- **Corriente de polarización (I_{BIAS}):** es otra fuente de error en OpAmps y al igual que la tensión de desnivel esta se debe a imperfecciones en el comportamiento de DC del dispositivo. La figura 3.7 muestra un esquema para calcular la salida de un amplificador operacional debido a imperfecciones de DC.

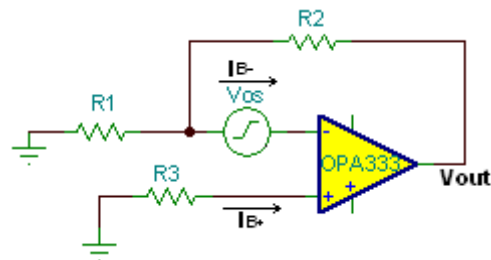


Figura 3.35 Esquema para calcular errores debido a imperfecciones en el comportamiento de DC de los OpAmps configurados con una topología inversora.

Fuente: Adaptado por el autor de Zabala Sergio.

La ecuación matemática (3.23) que representa el esquema de la figura 3.35 permite conocer el valor que inducen a la salida la tensión de desnivel y la corriente de fuga en las entradas del OpAmp.

El cálculo para sistemas de acondicionamiento de señal que contienen dos etapas inversoras conectadas en cascada, posee un factor adicional que contempla en la entrada de la etapa final los errores generados a la salida de la primera etapa, estos errores son multiplicados por la ganancia de la segunda etapa para posteriormente sumarlos con los errores propios de esta y así obtener los errores a la salida de todo el sistema.

$$V_{OUT} = -\frac{R2}{R1}V_{OS} + I_{BIAS+}R3 \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) - I_{BIAS-}R2 \quad (3.23)$$

- **Errores por ganancia:** El primero de estos errores se calcula por medio de la ecuación (3.24) en donde A_{OL} es la ganancia de lazo abierto y NG es la ganancia de ruido del sistema en lazo cerrado. Para cada sensor se tiene que:

$$EG = \frac{NG}{NG + A_{OL}} \quad \text{Donde} \quad NG = 1 + \frac{R2}{R1} \quad (3.24)$$

El otro error por ganancia mide la no linealidad de la ganancia de lazo cerrado a través de la no linealidad de la ganancia en lazo abierto debido a los efectos del ruido en el sistema.

La forma de calcular este error se muestra en la fórmula (3.25) en donde CLGN es el valor de la no-linealidad de ganancia de lazo cerrado.

$$CLGN \approx NG \left(\frac{1}{A_{OLmin}} - \frac{1}{A_{OLmax}} \right) \quad (3.25)$$

- **Errores por ruido:** Las fuentes más comunes de ruido en los OpAmp son la densidad espectral de corriente de ruido referida a la entrada, la densidad de tensión de ruido referida a la entrada y el ruido Johnson. El ruido Johnson para los OpAmp varía en su forma de cálculo dependiendo del valor de frecuencia que tenga la señal de interés, por ejemplo, para valores de frecuencias medias este fenómeno tiene el mismo comportamiento del “ruido blanco” pero para frecuencias bajas (0,1 a 10Hz), este se calcula utilizando el comportamiento del ruido flicker o también llamado ruido de 1/f. Las resistencias que se disponen en los OpAmp para establecer ciertas configuraciones generan ruido debido al calentamiento provocado por el movimiento electrónico al interior de estas. Existen otras clases de ruido (como el ruido ráfaga, el ruido “popcorn”, etc.) La figura 3.36 muestra el esquema general para encontrar la tensión de ruido debida a las fuentes ya mencionadas.

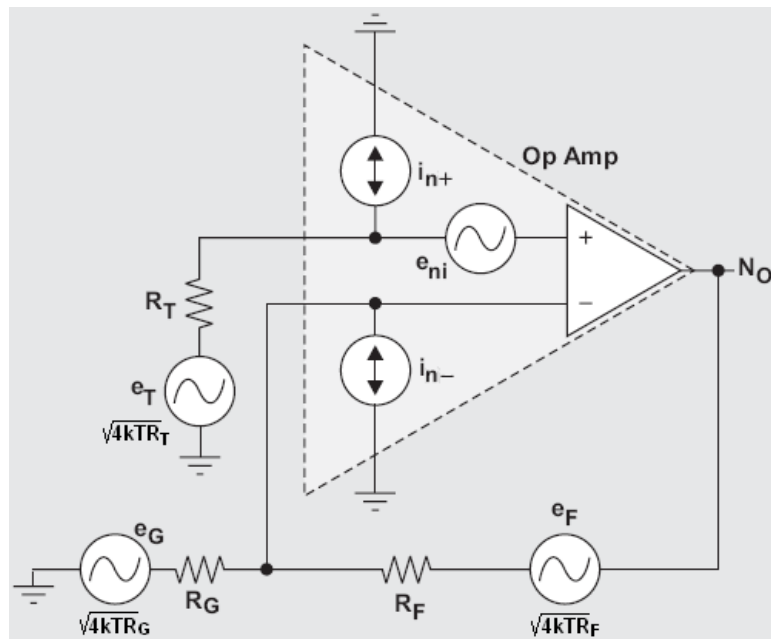


Figura 3.36 Esquema para calcular la tensión de ruido de un OpAmp conectado como una etapa inversora.

Fuente: Adaptado por los autores de Mancini Roy. Sensor to ADC- analog interface design. Texas Instruments Incorporated.

$$V_{NRMS} = \sqrt{BW} \sqrt{e_{ni}^2 \left(\frac{R_G}{R_F} + 1\right)^2 + \left(I_{N+} R_T \left(\frac{R_G}{R_F} + 1\right)\right)^2 + I_{N-}^2 R_G^2 + 4kTR_G + 4kTR_T \left(\frac{R_G}{R_F} + 1\right)^2 + 4kTR_F \left(\frac{R_G}{R_F}\right)^2} \quad (3.26)$$

La ecuación (3.26) describe la tensión de ruido a la entrada (RTI) del sistema de la figura 3.36. Para encontrar el ruido a la salida (RTO) se multiplica el ruido a la entrada por la ganancia de ruido de lazo cerrado NG (ver ecuación 3.24 para una configuración inversora) de la etapa de adecuación. En esta ecuación **BW** es el ancho de banda sobre el cual se ejecuta el cálculo, **f_{CL}** es el ancho de banda a lazo cerrado, **e_{ni}** es la tensión de ruido expresada en (V/\sqrt{Hz}) , **i_n** es la corriente de ruido expresada en (A/\sqrt{Hz}) , **k** es la constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} J/K$) y **T** la temperatura en Kelvins.

Teniendo el valor de la tensión de ruido de salida debidamente calculada como se describe en el párrafo anterior a partir de la ecuación 3.26 (RTO), se puede encontrar el Número Efectivo de Bits (ENOB) el cual se

mencionó en la parte inicial de esta sección como una herramienta para discernir entre el desempeño de diferentes OpAmps al interactuar con un ADC en particular.

$$ENOB = \frac{SNR - 1,76}{6,02} \quad \text{Donde}$$

$$SNR = \frac{\text{Máximo valor rms de admisión en los puertos del ADC}}{\text{Nivel de ruido rms referido a la salida del amplificador}} \quad (3.27)$$

El ENOB puede interpretarse de la siguiente manera: Suponer que se tiene un ADC que representa las tensiones analógicas con 8 bits, si al conectar un sistema de acondicionamiento de señal la suma de la tensión de ruido con respecto a la señal del sensor es decir la relación señal a ruido a la salida genera un número efectivo de bits (ENOB) inferior a 8, entonces los componentes del sistema están mal elegidos ya que se está desperdiciando bits a causa del ruido que generan los mismos componentes, en otras palabras el ENOB debe ser igual o mayor que los bits empleados por el ADC para representar las señales analógicas de entrada para asegurar que el sistema está empleando óptimamente el ADC.

Especificaciones como la relación de rechazo a tensiones de modo común (CMRR) y la relación de rechazo a variaciones en la fuente de alimentación (PSRR), que evidencia la existencia de errores en el comportamiento dinámico de los OpAmps, no se tendrán en cuenta debido a que la participación de estas especificaciones toma fuerza a frecuencias altas de operación y las señales con las que se trabaja en este proyecto tienen variaciones muy pequeñas en el tiempo, es decir las frecuencias de estas son muy cercanas a la del nivel de continua.

En aplicaciones donde las señales de interés tienen un comportamiento bastante estable con variaciones en el tiempo pequeñas, es decir con frecuencias muy cercanas al nivel de continua, es común colocar un filtro pasa-bajo entre la salida de la etapa de acondicionamiento y el ADC con el fin de disminuir posibles errores encontrados en altas frecuencias (sébase que los efectos de ruido afectan más a señales de alta frecuencia). Emplear filtros

pasivos en este tipo de aplicaciones genera resultados satisfactorios ahorrando el costo que significa emplear filtros activos, en conclusión el filtro que se considera adecuado para esta aplicación (considerando las bajas variaciones de las señales de interés) es un filtro RC tal y como se observa en la figura 3.37. La frecuencia de corte se calcula según muestra la formula (3.28).

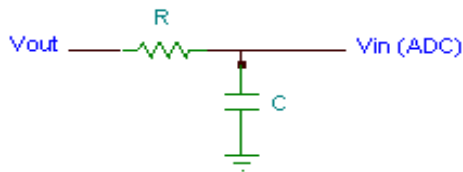


Figura 3.37 Filtro RC pasabajos ubicado después de la etapa de adecuación y antes del ADC
 Fuente: Adaptado por los autores de Kester Walt, Bryant James, Jung Walt, Wurcer Scott, Kitchin Chuck. *Sensor Signal Conditioning. Analog Device.*

$$f_{FILTRO} < \frac{1}{2\pi \cdot RC} \text{ y } f_{FILTRO} < \frac{f_s}{2} \ll f_{CL} \quad (3.28)$$

Se debe conservar la relación de Nyquist para no incurrir en sobre muestreos, es decir, la frecuencia de corte del filtro f_{filtro} debe ser como mucho igual a la mitad de la frecuencia de muestreo f_s del ADC que a su vez es mucho menor que el ancho de banda de lazo cerrado de la etapa de acondicionamiento f_{cl} .

3.2.1 Selección del amplificador operacional

El ingeniero Bruce Carter, miembro del equipo desarrollador de aplicaciones con OpAmps para la empresa Texas Instruments, en su artículo titulado “Interfacing OpAmp and Analog to Digital converters” y publicado en el analog application journal del 2002, propone una serie de preguntas que ayudan al diseñador a seleccionar adecuadamente los dispositivos que forman parte de un sistema que requiere realizar conversión analógica-digital, dentro de los análisis presentados en el artículo se dedica una pequeña discusión sobre selección de OpAmp, lastimosamente esta dicertación es muy superficial y se enfoca en aspectos poco técnicos de diseño, sin embargo sirve de guía hacia una primera aproximación en la búsqueda del mejor OpAmp [3.66].

En el artículo se proponen dos preguntas que el ingeniero debe hacerse antes de emprender la búsqueda del OpAmp:

- ¿Existen requerimientos especiales con respecto al encapsulado de los OpAmp?, por ejemplo ¿es necesario que sean lo más pequeño posible?
- ¿Es necesario utilizar la menor cantidad de OpAmp, perdiendo flexibilidad en el diseño?

La respuesta a estas preguntas se resuelve pensando en los criterios de diseño impuestas por las características que deben tener los nodos utilizados en redes inalámbricas de sensores. Como se mencionó en capítulos anteriores, estos dispositivos deben ser lo más pequeños posibles y consumir la menor cantidad de potencia posible lo cual asegura que el calentamiento de los dispositivos es mínimo por lo tanto es posible seleccionar encapsulados de tamaños ínfimos. En cuanto a la flexibilidad del sistema, para sistemas de baja complejidad se puede alcanzar un buen grado de tolerancia al cambio con dos OpAmps y con la combinación en serie o en paralelo de varios elementos pasivos (resistencias y capacitancias).

Si no se definen parámetros concretos para la elección de un OpAmp esta búsqueda podría tornarse indefinida, inclusive analizando los dispositivos ofrecidos por una sola casa de diseño (Texas Instruments, Analog Device, National Semiconductors, etc.) la búsqueda es extensa.

Para la selección del OpAmp utilizado en el proyecto se decidió restringir la búsqueda a los productos ofrecidos por la empresa Texas Instruments (TI) la cual posee alrededor de 200 ejemplares diferentes distribuidos entre 5 familias de dispositivos (OPA, THS, TLV, TLC y TLE), lo anterior muestra que pese a restringir la búsqueda a dispositivos fabricados por una sola empresa esto no se ve traducido en una reducción de las posibilidades en cuanto a variedad de especificaciones.

Teniendo en cuenta el análisis realizado y los criterios de selección hechos en la sección concerniente a la etapa de acondicionamiento de señal, se aborda la ayuda ofrecida por la guía de selección de OpAmp de TI y se buscan

amplificadores operacionales que se encuentren catalogados como amplificadores de precisión con baja tensión de desnivel y bajo consumo de potencia, las tablas 3.17 y 3.18 muestran los dispositivos que se encuentran en estos grupos.

Device	Description/Technology	Ch.	V _S (V) (min)	V _S (V) (max)	I _Q Per Ch. (mA) (max)	GBW (MHz) (typ)	Slew Rate (V/μs) (typ)	V _{OS} (25°C) (mV) (max)	V _{OS} Drift (μV/°C) (typ)	I _B (pA) (max)	CMRR (dB) (min)	V _n at 1kHz (nV/√Hz) (typ)	Single Supply	Rail-to-Rail	Package(s)	Price*
OPAy334/5	Zero-Drift, SHDN, CMOS	1, 2	2.7	5.5	0.35	2	1.6	0.005	0.02	200	110	—	Y	Out	SOT-23, MSOP, SOIC	\$1.00
OPAy734/5	12V, Auto-Zero, SHDN, CMOS	1, 2	2.7	12	0.75	1.6	1.5	0.005	0.01	200	115	110	Y	Out	SOT-23, SOIC	\$1.25
OPAy333	μPower, Zero Drift, CMOS	1, 2	1.8	5.5	0.025	0.35	0.16	0.01	0.02	200	106	—	Y	I/O	SC-70, SOT-23, SOIC	\$0.95
OPAy277	Precision, Bipolar	1, 2, 4	4	36	0.825	1	0.8	0.02	0.1	1000	130	8	N	N	SON, SOIC, PDIP	\$0.85
OPA378	Low Power, Wideband	1, 2	1.8	5.5	0.100	1	0.5	0.025	0.1	1000	100	15	Y	I/O	SC70, SOT-23, SOIC	\$0.95
OPAy380	Auto-Zero, 85MHz, TIA, CMOS	1, 2	2.7	5.5	8.8	90	80	0.025	0.03	50	100	110	Y	Out	MSOP, SOIC, SSOP	\$1.95
OPAy381	Precision, 18MHz, TIA, CMOS	1, 2	2.7	5.5	1	18	12	0.025	0.03	50	100	110	Y	Out	MSOP, SON	\$1.45
TLC2652A	Low Offset, Chopper Stabilized	1	3.8	16	2.4	1.9	3.1	0.001	0.003	100	120	23	N	N	SOIC	\$2.20
OPAy211	Low Offset Drift, Bipolar	1, 2	4.5	36	3.6	58	27	0.25	0.2	15,000	114	1.1	N	Out	SOIC, MSOP, SON	\$3.45
OPAy227/28	Low Noise, Bipolar	1, 2, 4	5	36	3.8	8	2.3	0.075	0.1	10000	120	3	N	N	SOIC, PDIP	\$1.10
OPA827	Precision, FET Input	1, 2	8	36	4.5	18	22	0.25	1	3	108	4.5	N	N	SOIC, MSOP	\$6.75
TLE2027/37	Wide Supply, Low Noise, Bipolar	1	8	38	5.3	13, 50	2.8, 7.5	0.1	0.4	90000	100	2.5	N	N	SOIC, PDIP	\$0.90
OPAy234	Low Power, Wide Supply, Bipolar	1, 2, 4	2.7	36	0.3	0.35	0.2	0.1	0.5	25000	96	25	N	N	MSOP, SOIC	\$1.05
OPA627/37	Ultra-Low THD+N, Difet	1	9	36	7.5	16	55	0.1	0.4	1	106	5.2	N	N	PDIP, SOIC	\$12.25
OPAy336	μPower, CMOS	1, 2, 4	2.3	5.5	0.032	0.1	0.03	0.125	1.5	10	80	40	Y	Out	SOT-23, SOIC	\$0.40
OPAy727/8	e-trim™, Precision CMOS	1, 2	4	12	4.3	20	30	0.15	0.3	100	86	23	N	N	MSOP, SON	\$0.95
OPA365	Wideband, Zero-Crossover	1, 2	2.2	5.5	5	50	25	0.2	1	10	100	5	Y	I/O	SOT-23-5, SOIC	\$0.95
OPAy241	μPower, Bipolar	1, 2, 4	2.7	36	0.03	0.035	0.01	0.25	0.4	20000	80	45	Y	Out	SOIC, DIP	\$1.15
OPAy251	μPower, ±15V Bipolar	1, 2, 4	2.7	36	0.038	0.035	0.01	0.25	0.5	20000	100	45	Y	Out	SOIC, DIP	\$1.15
OPA124	Wide Bandwidth, Bipolar	1	10	36	3.5	1.5	1.6	0.25	1	1	100	8	N	N	SOIC	\$3.95
TLC1078	Precision, CMOS	2	1.4	16	0.017	0.085	0.032	0.45	1.1	600	70	68	N	N	SOIC, DIP	\$2.30
TLV2211	Low Power, 10V, CMOS	1	2.7	10	0.025	0.065	0.025	0.45	0.5	150	70	22	Y	Out	SOT23	\$0.42

Tabla 3.17 Referencias de OpAmp fabricados por TI catalogados como OpAmp de precisión con baja tensión de desnivel (V_{os}).

Fuente: "Amplifier and Data converters selection guide", Texas Instruments 2007.

Device	Description	Ch.	V _S (V) (min)	V _S (V) (max)	I _Q Per Ch. (mA) (max)	GBW (MHz) (typ)	Slew Rate (V/μs) (typ)	V _{OS} (25°C) (mV) (max)	Offset Drift (μV/°C) (typ)	I _B (pA) (max)	CMRR (dB) (min)	V _n at 1kHz (nV/√Hz) (typ)	Rail-to-Rail	Package(s)	Price*
TLV240x	2.5V, Sub-μPower, SS, CMOS	1, 2, 4	2.5	16	0.00095	0.0055	0.0025	1.2	3	300	63	—	I/O	MSOP, PDIP, SOIC, SOT23, TSSOP	\$0.65
TLV224x	Low Voltage, 1μA, SS, CMOS	1, 2, 4	2.5	12	0.0012	0.0055	0.002	3	3	500	55	—	I/O	MSOP, PDIP, SOIC, SOT23, TSSOP	\$0.60
OPA369	Lowest Power, Zero Crossover	1, 2	1.8	5.5	0.001	0.01	0.005	1	2	10	100	160	I/O	SC70, SOT23	\$0.95
OPAy349	1μA, SS, CMOS	1, 2	1.8	5.5	0.002	0.07	0.02	10	10	15	52	—	I/O	SC70, SOIC, SOT23	\$0.75
OPAy333	μPower, SS, RRIO, Zero-Drift, CMOS	1, 2	1.8	5.5	0.025	0.35	0.16	0.01	0.05	200	106	60	I/O	SC70, SOT23, SOIC	\$0.95
OPA379	1.8V, Ultra-Low Power, CMOS	1, 2, 4	1.8	5.5	0.005	0.1	0.03	1.5	2.7	50	90	80	I/O	SC70, SOT23, SOIC	\$0.75
TLC1078	Low Voltage, Precision, Bipolar	2	1.4	16	0.017	0.085	0.032	0.45	1.1	600	70	68	Out	SOIC, PDIP	\$2.30
OPAy241	Bipolar, μPower, High CMRR	1, 2, 4	2.7	36	0.035	0.35	0.1	0.25	0.4	20000	80	45	Out	PDIP, SOIC	\$1.15
OPA703/4	12V, RRIO, General Purpose	1, 2, 4	4	12	0.2	1	0.6	0.75	4	10	70	45	I/O	MSOP, SOIC, TSSOP, PDIP	\$0.40
OPAy336	μPower, SS, CMOS	1, 2, 4	2.3	5.5	0.032	0.1	0.03	0.125	1.5	10	80	40	Out	SOT23, SOIC	\$0.40
OPAy347	μPower, Low Cost, SS, CMOS	1, 2, 4	2.3	5.5	0.034	0.35	0.17	6	2	10	70	60	I/O	SC70, SOT23, SOIC, PDIP	\$0.48
TLV245x	μPower, SS, CMOS	1, 2, 4	2.7	6	0.035	0.22	0.12	1.5	0.3	5000	64	51	I/O	SOT23, SOIC, PDIP	\$0.60
OPAy251	μPower, Precision, Bipolar	1, 2, 4	2.7	36	0.038	0.035	0.01	0.25	0.5	20000	100	45	Out	SOIC, PDIP	\$1.15
OPA378	Wide Bandwidth, microPower, e-trim™	1, 2	1.8	5.5	0.10	1	0.5	0.025	0.1	1000	100	15	I/O	SC70, SOT23, SOIC	\$0.85
OPAy244	μPower, SS, Low Cost, Bipolar	1, 2, 4	2.7	36	0.05	0.24	0.1	1.5	4	25000	84	22	N	MSOP, PDIP, SOIC, SOT23, TSSOP	\$0.55
OPAy348	High Open-Loop Gain, SS, CMOS	1, 2, 4	2.1	5.5	0.065	1	0.5	5	2	10	70	35	I/O	SC70, SOIC, SOT23, CSP	\$0.45
OPA345	Wideband, Single-Supply	1, 2, 4	2.7	5.5	0.25	4	4	0.5	2.5	10	80	32	I/O	SOT23, SOIC, MSOP	\$1.20
OPA137	Low Cost, FET-Input	1, 2, 4	4.5	36	0.27	1	3.5	3	15	100	76	45	N	SOT23, SOIC, DIP	\$0.60
OPA234	Low Power, Precision	1, 2, 4	2.7	36	0.3	0.35	0.2	0.1	0.5	25000	96	24	N	MSOP, SOIC	\$1.05
OPAy334/5	Zero-Drift, Precision, CMOS, SS, SHDN	1, 2	2.7	5.5	0.35	2	0.5	0.005	0.02	200	110	—	Out	MSOP, SOIC, SOT23	\$1.00

Tabla 3.18 Referencias de OpAmp fabricados por TI catalogados como OpAmp de precisión con bajo consumo de potencia (I_q).

Fuente: "Amplifier and Data converters selection guide", Texas Instruments 2007.

Las características que más pesan en la selección de un OpAmp para una aplicación en donde la señal que se busca acondicionar tiene variaciones en el tiempo pequeñas son aquellas que miden el desempeño en DC del amplificador. Estas características son:

- *Offset y desplazamiento del Offset.*
- *Corriente en los terminales de entrada del OpAmp (“input bias current I_b ”).*
- *Ganancia de lazo abierto.*
- *Linealidad integral.*
- *Tensión y corriente de ruido flicker ($1/f$).*

Lógicamente es necesario evaluar el costo y la disponibilidad en las tiendas de comercialización de dispositivos electrónicos de los dispositivos que se escojan.

Al observar rápidamente las tablas 3.17 y 3.18 se aprecia que el amplificador con referencia OPAy333 aparece en ambas, revisando más detalladamente, es posible darse cuenta que este dispositivo es el que maneja la segunda corriente de alimentación (I_q) más baja dentro del grupo de amplificadores con bajo nivel de *offset* y el segundo nivel de *offset* más bajo dentro del grupo de amplificadores con bajo consumo de potencia. En cuanto a consumo de potencia comparado con los amplificadores de mejor consumo de potencia ocupa el sexto lugar y el cuarto menor *offset* dentro del grupo de amplificadores con baja tensión de desnivel [3.57].

Para aplicaciones con ADC el nivel de *offset* no debe superar en gran medida a la tercera o cuarta parte de la resolución con la el ADC maneja los datos lo cual se cumple sobradamente [3.57].

Por ser el OPAy333 un OpAmp que maneja un buen compromiso entre desempeño y costo es el seleccionado en el desarrollo de este proyecto.

3.2.2 Medida del error y número efectivo de bits

Con la selección del OpAmp se puede continuar con el análisis de errores, cuyos resultados avalarán el correcto proceso de selección.

En las tabla 3.19 y 3.20 se muestran los errores de cada una de las etapas de adecuación para las señales de los sensores que van acoplados en el módulo X-Bee y el Telosb, aquí se muestran los errores en porcentaje y en ppm con un valor de fondo de escala, 1.2 para los X-Bee y 2.5 para el Telosb. También se muestra la tensión de ruido V_{NRMS} y el número efectivo de bits ENOB.

Errores en las etapas de adecuación para los sensores del X-BEE								
Parametro	Humedad		Temperatura		Intensidad Luminosa		Amoniaco NH3	
	Error %	Error (ppm)	Error %	Error (ppm)	Error %	Error (ppm)	Error %	Error (ppm)
Vos	-0,00070	-7,04	0,00000	0,0000	-0,002046	-20,4645	-0,012206	-122,059
Ibias	0,00004	0,41	-0,000121	-1,2117	-2,84E-07	-0,00284	0,00001	0,112828
EG	0,00077	7,71	0,003687	36,8701	0,0014433	14,43285	0,0065346	65,34576
CLGN	0,00072	7,22	0,0034545	34,5448	0,0013522	13,52243	0,0061228	61,22752
RUIDO 0,1 a 10Hz	0,00017	1,69	0,0018777	18,7773	0,0003168	3,16776	0,0014343	14,34314
TOTAL	0,00100	9,99	0,00890	88,9806	0,00107	10,656	0,00190	18,970
VNRMS	0,00002381		0,0001719		0,0000270		0,0000875	
ENOB	13,83007376		10,97812128		13,64965518		11,95213932	

Tabla 3.19 Resultado del cálculo de errores debido a características de los dispositivos.

Fuente: Autores

Errores en las etapas de adecuación para los sensores del TELOSB								
Parametro	Humedad		Temperatura		Intensidad Luminosa		Amoniaco NH3	
	Error %	Error (ppm)	Error %	Error (ppm)	Error %	Error (ppm)	Error %	Error (ppm)
Vos	0,00000	0,00	0,00000	0,0000	-0,001984	-19,8378	-0,011667	-116,667
Ibias	-0,00072	-7,21	-9,07E-06	-0,0907	-5,76E-07	-0,00576	0,00007	0,715656
EG	0,00294	29,44	0,0009388	9,3878	0,0011947	11,94686	0,0060467	60,46745
CLGN	0,00276	27,59	0,0008796	8,7956	0,0011193	11,1934	0,0056661	56,66078
Ruido 0,1 a 10Hz	0,00167	16,75	0,0003541	3,5413	0,0002622	2,622162	0,0013273	13,27333
TOTAL	0,00666	66,57	0,00216	21,6340	0,00059	5,919	0,00145	14,451
VNRMS	0,00000939		0,0000625		0,0000391		0,0001652	
ENOB	16,23146114		13,49674468		14,17223661		12,09459192	

Tabla 3.20 Resultado del cálculo de errores debido a características de los dispositivos.

Fuente: Autores

De las tablas 3.17 y 3.18 se observa que el ENOB en todos los casos es superior o igual a la cantidad de bits que los ADC tanto del Telos B como del Xbee lo que demuestra que el proceso de selección fue correcto.

Existe otro error que no se ha mencionado a lo largo de la sección, por tratarse de un tema aparte de la selección del OpAmp, esta fuente de error depende exclusivamente de la precisión que tengan los componentes pasivos, en especial las resistencias dentro del lazo de la etapa de acondicionamiento.

Los valores de resistencia planteados en la tabla 3.14 son valores comerciales escogidos así por su cercanía con los valores teóricamente encontrados y expuestos en las tablas 3.12 y 3.11. Debido a las tolerancias que poseen las resistencias, cada una de esta se convierte en una fuente de error.

Las ecuaciones 28 y 29 representan las modificaciones que hay que hacerle a la ecuación 18 para que las tolerancias de las resistencias sean tomadas en cuenta, cabe anotar que el cálculo debe efectuarse tomando el caso en donde la tolerancia afecte de mayor manera el valor de la señal de salida modelada por la ecuación 18.

$$V_{out(max)} = -\frac{R_B(1+T)}{R_A(1-T)}V_{in} + V_{ref}(1+T) \left(1 + \frac{R_B(1+T)}{R_A(1-T)}\right) \left(\frac{R_2(1+T)}{R_1(1-T)+R_2(1+T)}\right) \quad (3.28)$$

$$V_{out(min)} = -\frac{R_B(1-T)}{R_A(1+T)}V_{in} + V_{ref}(1-T) \left(1 + \frac{R_B(1-T)}{R_A(1+T)}\right) \left(\frac{R_2(1-T)}{R_1(1+T)+R_2(1-T)}\right) \quad (3.29)$$

Donde T es el valor de la tolerancia suponiendo que todas las resistencias están fabricadas de la misma manera y tiene el mismo valor de tolerancia.

Un ejemplo claro es observar la variación que se tiene con la adecuación del sensor de humedad para el X-Bee. Con los dos puntos de operación expresados en la tabla 3.10 para este sensor (2,319 -3,621) y los dos puntos extremos del ADC del X-Bee (0,1 a 1,2) se encuentra la ecuación de la línea recta como se expresó en la ecuación (3.17).

$$V_{ADC} = -0,844854 * V_{sen} + 3,159217 \quad (3.30)$$

Con los valores de resistencia de la tabla 3.14 y la ecuación (3.17) se tiene:

$$V_{OUT} = -0,845052 * V_{IN} + 3,157652 \quad (3.31)$$

Con esta ecuación se tiene un error en pendiente de 0,02% y de offset de 0,05% lo que muestra una aproximación muy buena. Ahora teniendo en cuenta la tolerancia de las resistencias que son del 1% y la fuente de referencia que es del 0,2% se obtiene:

$$V_{OUT(max)} = -0,862124 * V_{IN} + 3,203669$$

$$V_{OUT(min)} = -0,828318 * V_{IN} + 3,112422$$

Con estas dos ecuaciones se tiene un error pendiente de 2,04% y un error de offset de 1,48% en comparación con la ecuación ideal, estos porcentajes de error están en un rango bastante aceptable, al hacer la conversión de la salida de la etapa de adecuación al valor deseado (%H) a través de la ecuación (3.13) se obtienen errores no mayores a 0,67% lo cual muestra confiabilidad del sistema en general.

El procedimiento descrito anteriormente se realizó para todas las etapas de adecuación de todos los sensores, en la tabla 3.19 se muestra el porcentaje de error de las ecuaciones que describen cada sistema, estos porcentajes como se puede apreciar no superan el 5% y como en el caso que se estudió estos no altera en gran medida el error de conversión a la variable a medir.

Vadc = m*Vsensor + b							
Sensor	Modulo	Pendiente (m)			Offset (b)		
		Teorico	Real	Error	Teorico	Real	Error
Humedad	X-Bee	-0,8445	-0,8621	2,04%	3,1592	3,2037	1,48%
			-0,8283			3,1124	
	Telosb	1,6897	1,7515	4,31%	-3,8184	-3,9508	4,33%
			1,6169			-3,6533	
Temperatura	X-Bee	5,8411	6,066	4,13%	-8,3123	-8,678	4,61%
			5,5996			-7,9288	
	Telosb	11,6822	12,1654	4,14%	-16,7245	-17,5003	4,64%
			11,2301			-16,0015	
Intensidad Luminosa	X-Bee	-2,4444	-2,5053	2,49%	1,2	1,2391	3,30%
			-2,4071			1,1604	
	Telosb	-4,8889	-5,0596	3,49%	2,3	2,3959	4,17%
			-4,8613			2,2346	
Amoniaco	X-Bee	-14,6667	-14,9429	2,11%	4,1333	4,2631	4,44%
			-14,357			3,9499	
	Telosb	-29,3333	-29,7559	2,54%	8,1667	8,4433	4,31%
			-28,5891			7,8143	

Tabla 3.21 Ecuación de cada una de las etapas de adecuación para la señal de los sensores
Fuente Autores

4 IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

Materializar las ideas y los conceptos teóricos presentados en los capítulos anteriores, no es algo que se da en forma inmediata, por el contrario es un proceso iterativo en el cual es necesario hacer simulaciones, diseñar los “*layouts*” correspondiente a cada uno de los circuitos que se desea implementar, fabricar los circuitos impresos, realizar pruebas con estos y si se detectan algunos errores en cualquiera de las etapas mencionadas, entonces el proceso debe empezar nuevamente. Esta fue la metodología utilizada para desarrollar la última fase del proyecto [4.1].

4.1 SIMULACIONES

Con esta etapa del proceso de implementación se busca tener un indicio práctico sobre el comportamiento del sistema diseñado y advertir posibles errores que éste presente. Lo anterior se logra mediante herramientas software que son capaces de realizar cálculos con base en situaciones “*virtualmente*” posibles. Generalmente estos *software* permiten tomar en cuenta parámetros que afectan el desempeño de los dispositivos y que de otra manera serían muy difíciles de visualizar o contemplar. Por ejemplo, la incidencia de la temperatura del ambiente de trabajo y la respuesta que los dispositivos tienen ante esta condición, es uno de los fenómenos que puede ser visualizado utilizando este tipo de herramientas.

Para todo el proceso de simulación se utilizó la herramienta software TINA-TI versión 7, dado que con esta herramienta es posible tener los modelos exactos del amplificador operacional y fuente de referencia empleados en la etapa de acondicionamiento de señal de todos los sensores. Esta herramienta se encuentra disponible de manera gratuita en el portal web de la empresa Texas Instruments (www.ti.com) quien es la empresa proveedora y fabricante tanto de TINA como de los amplificadores OPA333 y fuentes de referencia REF3120.

El anexo C muestra los resultados obtenidos de las simulaciones hechas para cada uno de los sistemas de acondicionamiento de señal, necesarios para el acople de los dispositivos sensores con los sistemas de conversión analógica-digital de las plataformas Xbee y Telos.

4.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS (P.C.B)

Existiendo un aval otorgado por las pruebas realizadas mediante simulación, se decidió proseguir con el diseño y posterior implementación de las tarjetas de circuitos impresos.

Para el diseño de dichas tarjetas se tuvo en cuenta las reglas básicas plasmadas en el estándar IPC2221 además de algunas recomendaciones dadas, tanto por los fabricantes de dispositivos electrónicos como por fabricantes de tarjetas de circuito impresos, ambos basados en principios experimentales.

4.2.1 Consideraciones para el diseño de las tarjetas de circuitos impresos (P.C.B)

La siguiente es una lista de las recomendaciones seguidas para el diseño de las P.C.B, sabiendo de antemano que todo debe estar restringido por la premisa de fabricar la tarjeta de mayor economía posible sin afectar la buena calidad de esta.

Los fabricantes de tarjetas de circuitos impresos, tasan el valor de cada ejemplar de acuerdo con el tamaño de este. El tamaño de los dispositivos seleccionados, el tamaño de las “*pistas*” encargadas de llevar señales eléctricas de un punto a otro, la resolución que utilice el fabricante para la realización de la P.C.B y la cantidad de capas que tenga el diseño; son algunos de los factores que intervienen en el tamaño final de una tarjeta de circuito impreso. Para el presente diseño se consideró lo siguiente:

1. Para los dispositivos pasivos fue seleccionado el encapsulado estándar 0402. Esto permite reducir sustancialmente el tamaño del prototipo final si se tiene en cuenta que el ochenta por ciento de componentes en los diseños electrónicos, son de este tipo. Las tolerancias para los dispositivos pasivos oscilan entre 1% y 5% para obtener la menor cantidad de errores posibles (ver sección 3.2.2)
2. Para la elaboración de cada una de las tarjetas, se empleó la mínima resolución ofrecida por el fabricante escogido para la producción de estas. Lo anterior se hace con el fin de minimizar costos (una tarjeta fabricada en máxima resolución es aproximadamente un cuarenta por ciento más costosa que una tarjeta fabricada con mínima resolución).
3. Los dispositivos activos (OpAmp, reguladores, fuentes de referencia y sensores) fueron seleccionados por el mismo criterio expuesto en el numeral uno (los OpAmp y reguladores tienen una presentación en encapsulado SOIC8, mientras que las fuentes de referencia están en un encapsulado SOT23). En el caso de los sensores es necesario utilizar unos que no tengan una presentación en montaje superficial ya que incluir sensores de montaje superficial en el diseño implica que toda la tarjeta debe estar expuesta al ambiente hostil al cual estará sometido todo el sistema, arriesgando también el funcionamiento de los demás componentes.
4. Fabricar la tarjeta en mínima resolución impone ciertas restricciones en cuanto a tamaños de pistas incluyendo el aislamiento que estas deben llevar (distancia entre pista y *tierra eléctrica* de la tarjeta). El tamaño mínimo de pistas recomendado por el fabricante de las tarjetas es de 0.404mm al igual que su aislante. Esto difiere de la recomendación dada por el estándar IPC2221, el cual establece que el tamaño mínimo de cada pista puede llegar a ser 0,2mm lo cual permitiría obtener tarjetas de menor tamaño. El hecho de tener tarjetas de menor tamaño utilizando fabricación con mínima resolución, no implica tener una reducción de costo (ver numeral 2).

La figura 4.3 muestra la implementación de las tarjetas de circuitos impresos tanto del módulo central como del sensor de temperatura. En el centro (A) se aprecian dos tarjetas rojas (una arriba de la otra) las cuales son la implementación de los circuitos impresos diseñados por los autores del presente proyecto, a la derecha se observan dos tarjetas azules (B) que son las tarjetas de desarrollo otorgadas por los fabricantes de las plataformas XBee (abajo) y Telos (arriba). Finalmente, a la izquierda (C) se aprecia un prototipo de nodo radio transmisor diseñado por la empresa Texas Instruments junto a un bolígrafo.

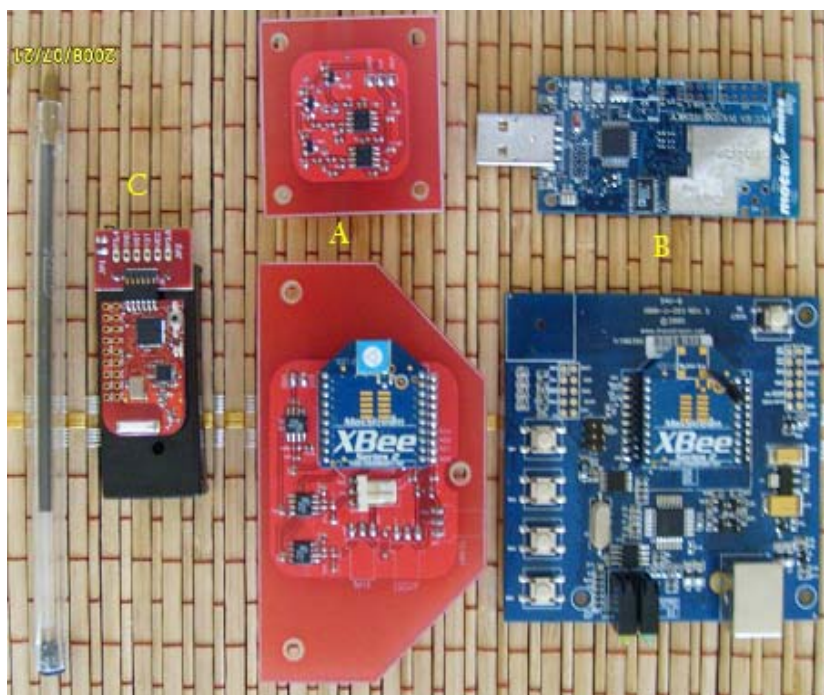
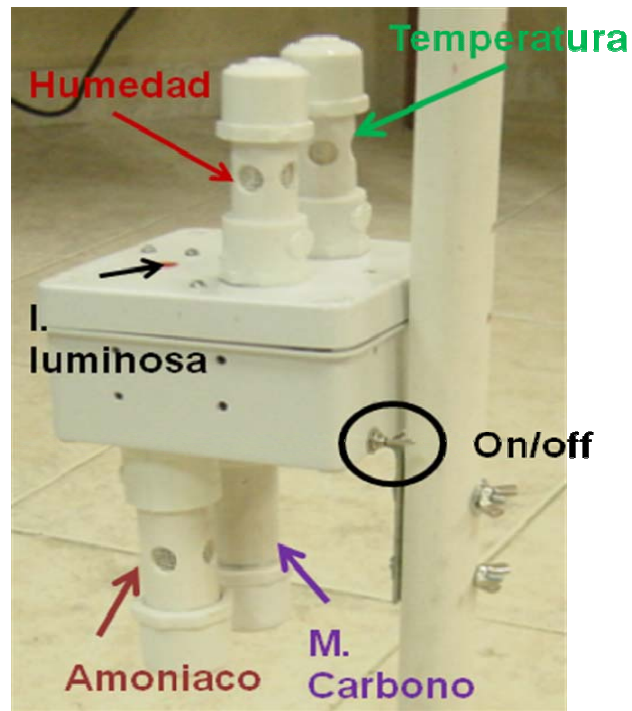
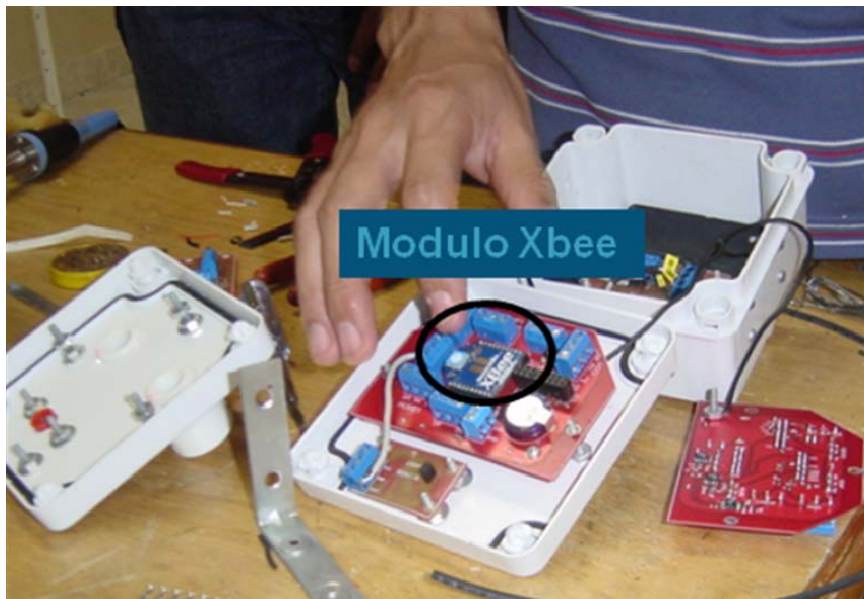


Figura 4.3 Implementación de la tarjeta central y de la tarjeta del sensor de temperatura comparados con otras tarjetas de propósito específicos

Las figuras 4.4a y 4.4b muestran como que do el prototipo final, en estas figuras se pueden observar donde están ubicados los diferentes sensores y los módulos radiotransmisores.



A



B

Figura 4.4 Prototipo Nodo Concentrador A) Distribución de los sensores B) Ubicación del módulo radiotransmisor
Fuente: Autores.

4.3 PRUEBAS

En esta fase el objetivo es corroborar el buen desempeño de los montajes realizados en la etapa anterior (a través de todo el proceso de diseño se ha venido probando teóricamente el funcionamiento del prototipo resultante de este proyecto).

Para la realización de las pruebas se escogieron 3 escenarios diferentes de acuerdo a los siguientes criterios:

- El primer escenario debe contar con cierto control sobre algunas de las variables físicas ambientales de interés (específicamente temperatura, porcentaje de humedad relativa e intensidad luminosa). Lo anterior permite, entre otras cosas, determinar que tan desviada es la medida del sensor con respecto al valor real de cada variable en el caso de mantener condiciones ambientales constantes por un periodo de tiempo relativamente amplio.

De acuerdo con esto último, se seleccionó el laboratorio de redes de computadores ubicado en el edificio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander (UIS) el cual cuenta con un sistema de ventilación por aire acondicionado con control de temperatura.

- El segundo escenario debe permitir que el sistema interactúe con un medio ambiente más natural, es decir, sin control alguno. Lo importante de este paso es poder contemplar el comportamiento del sistema frente a situaciones ambientales totalmente aleatorias y así determinar que tan sensible es este a dichos cambios.

La descripción anterior encaja perfectamente en las condiciones ambientales que puede ofrecer una habitación de cualquier recinto domiciliar.

- Por ultimo es necesario realizar pruebas en el escenario en donde los nodos serán ubicados y bajo las condiciones ambientales características de un galpón avícola local.

De tal manera, se decidió realizar esta última fase de pruebas en el galpón ubicado en la granja “Los Totumos”, el cual como ya se dijo anteriormente, es el sitio destinado para la ejecución de este proyecto de investigación (ver figura 3.22).

La figura 4.5 presenta los resultados de las pruebas realizadas en cada uno de los escenarios mencionados, mientras que las condiciones logísticas, físicas y ambientales con las que se desarrollaron estas pruebas son presentadas en el anexo B. Es importante mencionar que para las pruebas en todos los escenarios, los nodos sensores fueron configurados para tener un periodo de muestreo de 10 segundos.

Para contrastar los datos recolectados por el sensor HIH4000 (dispositivo seleccionado para medir %HR), se utilizó un higrómetro digital fabricado por la empresa Erasmus, el cual fue el mismo equipo empleado para realizar las pruebas preliminares de caracterización dentro del galpón (ver sección 3.1.2.1); igualmente se empleó, como método de contraste, un dispositivo digital fabricado por la empresa Sensirion, el cual es capaz de medir temperatura y porcentaje de humedad relativa al mismo tiempo. Este dispositivo tiene referencia SHT11 y es uno de los sensores ubicados en la plataforma Telos/Tmote Sky. Por otra parte la medida de la temperatura fue tomada utilizando un termómetro de mercurio (Hg) como complemento a las lecturas realizadas tanto por el sensor SHT11 como por el dispositivo FM20 (ver tabla 3.3 y 3.5).

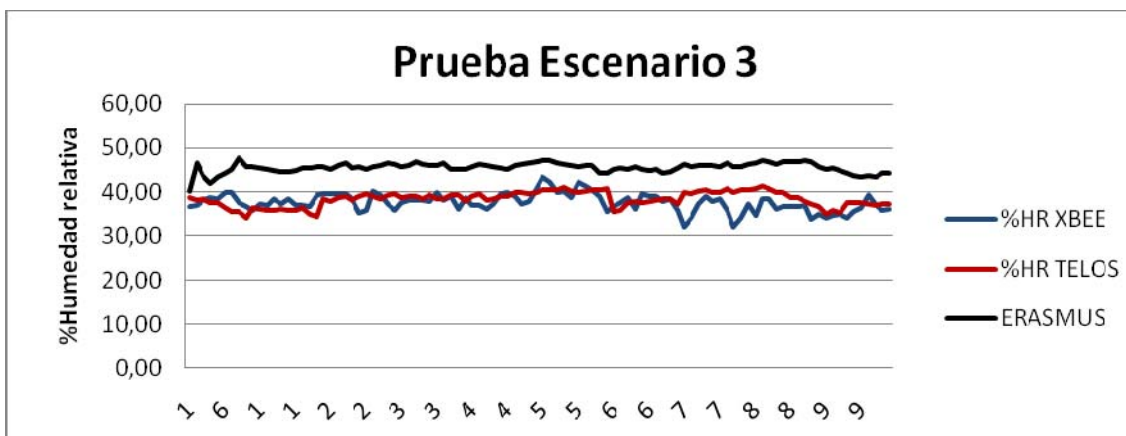
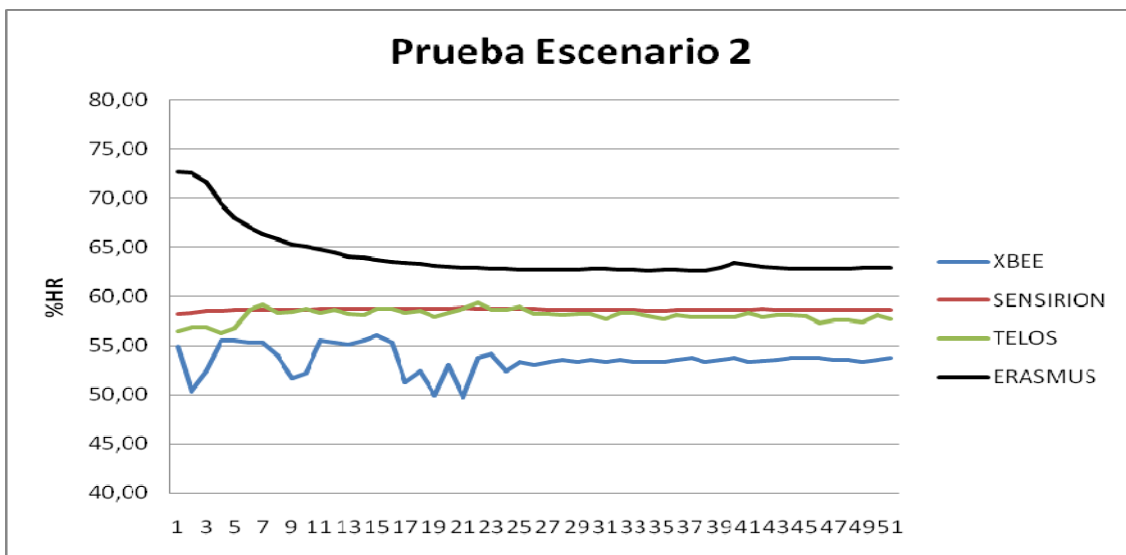
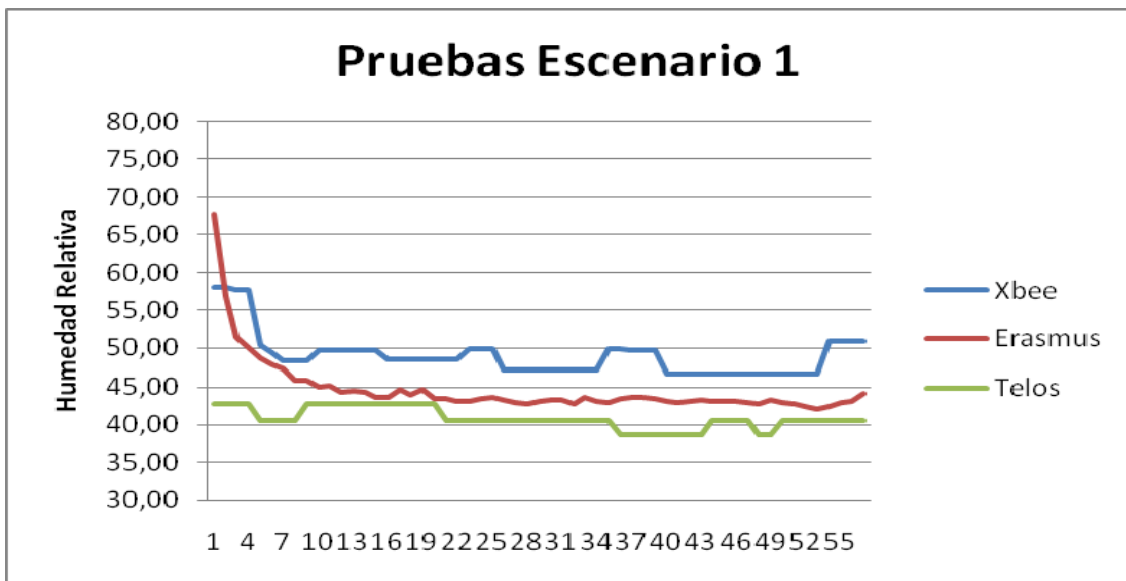


Figura 4.5 Resultados obtenidos tras haber realizado pruebas en tres escenarios distintos.
Fuente: Autores.

4.3.1 Conclusiones de las pruebas de desempeño del sistema

Las conclusiones a las que se llegó después de haber realizado las pruebas en los tres escenarios antes mencionados se listan a continuación:

- Efectivamente el sistema de acondicionamiento de señal, diseñado y mostrado en el capítulo anterior, tiene un desempeño excelente si se toma en cuenta que su salida permite que los sistemas ADC de las plataformas Xbee y Telos entreguen una señal que permite observar el comportamiento de las variables medidas.
- Al comparar los resultados obtenidos con ambos módulos, se aprecia que cuando los datos son adquiridos con el módulo Xbee se cometen más errores que cuando se toman con el Telos (aunque estos se encuentran dentro del diez por ciento de error considerado en el capítulo 3).
- Es necesario hacer un ajuste matemático que permita que las señales otorgadas, tanto por los módulos Xbee y Telos utilizando los sensores seleccionados en el capítulo 3, coincidan con las señales patrones. En el caso del porcentaje de humedad relativa este ajuste consiste en sumar 5 unidades a cada lectura del sensor HIH4000; La tabla 4.1 muestra los ajustes para todas las variables. Se sugiere que estos ajustes se implementen en un *software* utilizado como herramientas de visualización de dichas variables.
- La notable inestabilidad de la señal entregada por el módulo Xbee, en comparación con la entregada por el módulo Telos radica en que los primeros utilizan una conversión A/D de 10 bits, mientras que los segundos de 12 bits, es decir, la resolución del sistema ADC del módulo Telos es mayor que la de los módulos Xbee.
- En la grafica 4.5b, en donde se presentan los resultados de la prueba en el escenario 2, se aprecia que inclusive los dos métodos de contraste (Erasmus y SHT11) discrepan en sus medidas, por tanto es necesario considerar un margen de error admisible para las medidas tomadas para los sensores implementados en esta investigación.

4.4 VISUALIZACIÓN

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de la integración entre el sistema de acondicionamiento de señal y el sistema de radio transmisión de los nodos Xbee y Telos, es necesario tener una herramienta que permita visualizar los datos recolectados por la red inalámbrica de sensores; dicha herramienta fue diseñada utilizando el lenguaje de programación orientado a objetos JAVA.

En la figura 4.6 se muestra una estimación aproximada del diagrama de bloques de la herramienta de visualización

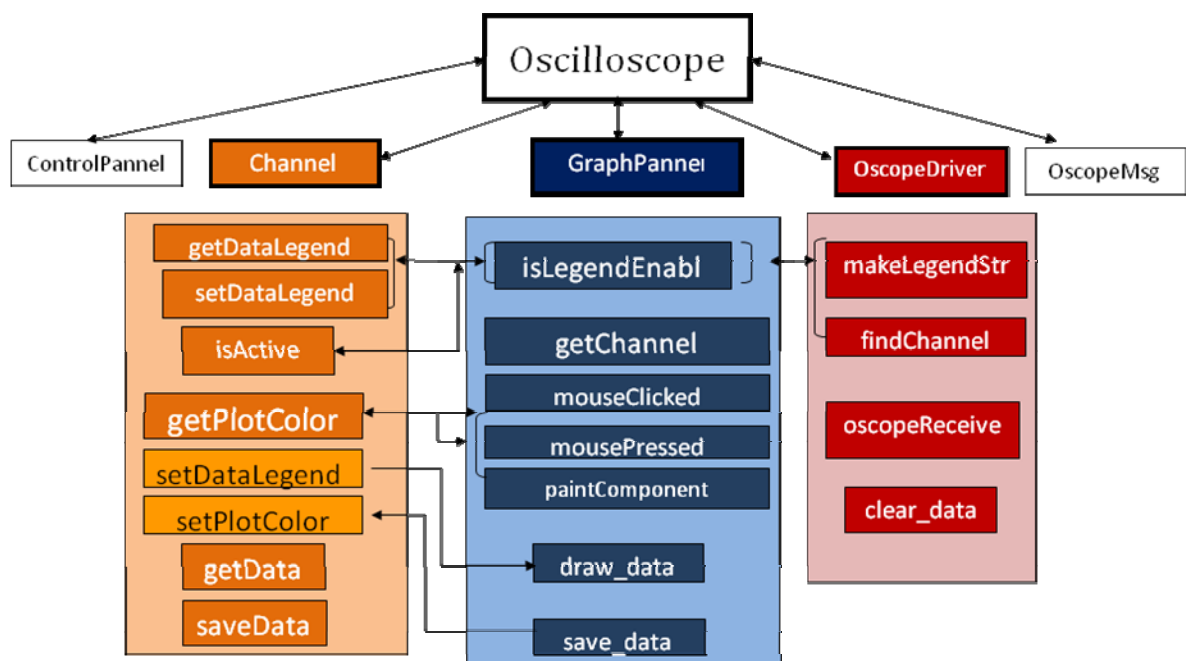


Figura 4.6 Diagrama de bloques del programa de visualización de las medidas de los sensores.
Fuente: Autores.

En la figura 4.7 se presenta la interfaz grafica diseñada en funcionamiento; el anexo D contiene el código en JAVA de este desarrollo.

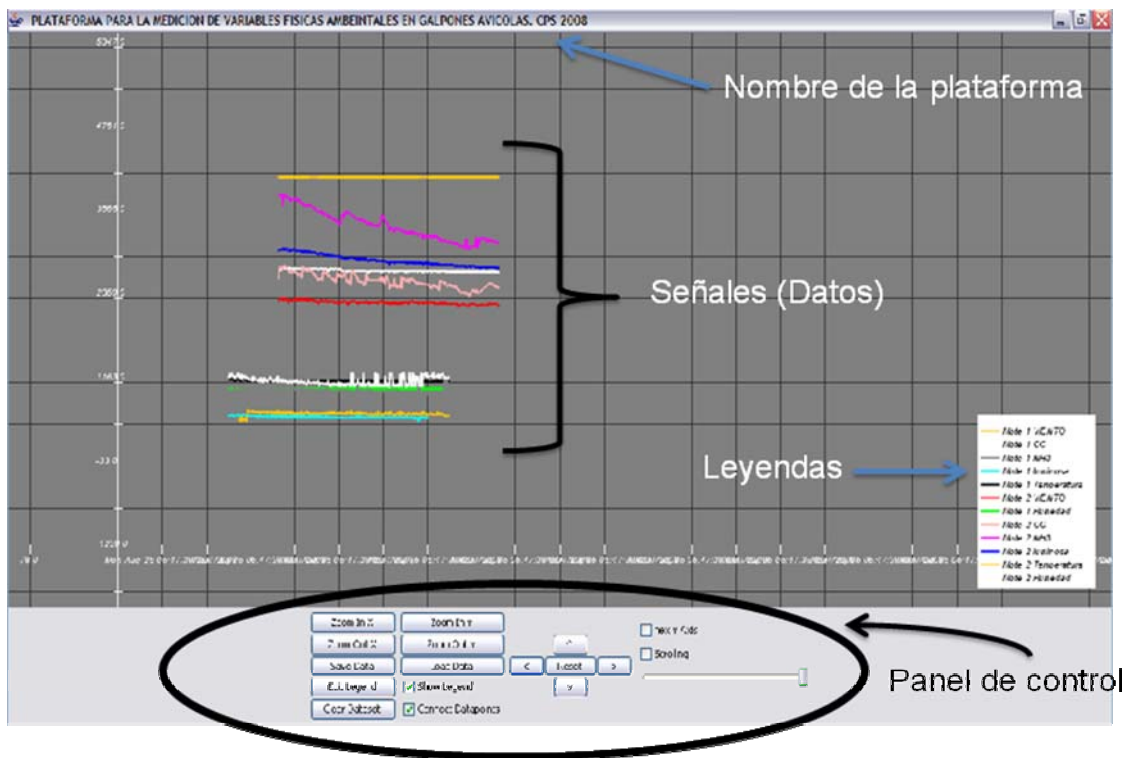


Figura 4.7 Ventana de interfaz grafica para la visualización de las medidas de los sensor.
 Fuente: Autores.

5 CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Al inicio de la investigación se planteo el siguiente objetivo general: *“Diseñar e implementar un prototipo de plataforma de red inalámbrica de sensores para avicultura, compatible con las plataformas hardware 802.15.4 Telos y Xbee, que permita la monitorización de las variables físicas: temperatura, humedad relativa, nivel de CO₂, nivel de NH₃, velocidad del viento e intensidad luminosa, al interior de un galpón de cría y levante de pollos de engorde.”*

Habiendo finalizado esta investigación se puede concluir que:

5.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

1. El prototipo de plataforma para redes inalámbricas de sensores diseñado e implementado en la presente investigación, permite la monitorización remota de parámetros físicos ambientales. Con esto se facilita el estudio y la evaluación de la incidencia de variables físicas en la mortalidad de aves de corral en granjas avícolas durante las etapas de cría y levante de pollos de engorde.
2. El sistema de acondicionamiento de señal diseñado hace que el prototipo desarrollado en este proyecto sea compatible con las plataformas hardware IEEE 802.15.4 Xbee y Telos al permitir que los rangos de las señales entregadas por los sensores se ajusten perfectamente a las características de los sistemas de conversión analógica-digital (ADC) pertenecientes a los módulos IEEE 802.15.4 antes mencionados.
3. El prototipo está diseñado para proporcionar al usuario total transparencia en el uso de las plataformas hardware IEEE 802.15.4 Telos y Xbee, es decir, es posible utilizar indistintamente cualquiera de las dos plataformas sin afectar el desempeño general del sistema de información.

4. Desde el punto de vista del diseño e implementación de las tarjetas de circuitos impresos (PCB), el prototipo es susceptible a mejoras si se piensa en la disminución de su tamaño al reducir el ancho de las pistas y realizando el diseño para circuitos impresos de dos o más capas conservando las recomendaciones del estándar IPC 2221.
5. Es necesario someter el prototipo a una etapa de diseño industrial con el cual se busque mayor robustez en el sistema frente a las condiciones hostiles del ambiente de trabajo al interior de un galpón avícola.
6. Se logró construir un sistema que cumple con los requisitos, de bajo consumo de potencia y buen desempeño (entre otros), establecidos para plataformas con aplicación en redes inalámbricas de sensores.
7. La serie de pruebas realizadas a lo largo del proyecto permitieron establecer una serie de criterios en cuanto al diseño de aplicaciones agroindustriales con ambientes similares a los de un galpón avícola.
8. La notable inestabilidad de la señal entregada por el módulo Xbee, en comparación con la entregada por el módulo Telos radica en que los primeros utilizan una conversión A/D de 10 bits, mientras que los segundos de 12 bits, es decir, la resolución del sistema ADC del módulo Telos es mayor que la de los módulos Xbee.
9. El sistema diseñado en este proyecto al ser sometido a pruebas de calibración, presentó una diferencia en las medidas obtenidas por dispositivos empleados como instrumentos patrones de menos de diez por ciento lo cual es óptimo para las necesidades del proyecto.
10. Es necesario realizar el proceso de calibración de los sensores utilizando instrumentos de alta fidelidad con esto se reduciría el porcentaje de error e incertidumbre mostrado por este prototipo.
11. Tanto en los módulos Telos como en los Xbee se observó que el consumo de potencia eléctrica no se ve afectado con el aumento o disminución de la potencia de transmisión del radio, por lo tanto es

posible utilizar toda la capacidad de los módulos radiotransmisores sin incurrir en gastos excesivos de potencia eléctrica.

5.2 PROGRAMACIÓN DE LOS NODOS SENSORES Y CONCENTRADORES

12. La programación de los módulos Xbee para los nodos sensores se basa en el ajuste de los parámetros AT que gobiernan el comportamiento de estos. Los “*firmwares*” de estos módulos le permiten establecer comunicaciones entre sí utilizando el estándar IEEE 802.15.4/ZigBee lo que los hace adecuados para aplicaciones en el campo de la agricultura de precisión.
13. La programación de los módulos Telos (Tmote Sky) se realiza mediante códigos desarrollados en el lenguaje de programación NesC. Estos algoritmos fueron desarrollados de tal manera que los módulos tuvieran la capacidad de interactuar con dispositivos externos a través de siete puertos extras dispuestos para este tipo de tareas.
14. Es posible optimizar los algoritmos desarrollados en NesC si se utilizan las librerías del sistema operativo TinyOS 2, sin embargo es posible que dicha optimización no genere grandes diferencias con respecto a lo implementado con TinyOS 1.
15. La programación de los módulos Xbee en comparación con los módulos Telos, es mucho más amigable en el sentido que le permite al usuario ajustar el módulo a sus necesidades con cambiar unos cuantos parámetros, mientras que programar el módulo Telos demanda de tiempo y un constante aprendizaje ya que es necesario desarrollar un código para que este pueda funcionar, la ventaja que esto tiene es que le permite al usuario más experimentado manipular parámetros nativos del estándar IEEE802.15.4 dándole la oportunidad al diseñador de generar nuevos conocimientos.

5.3 HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN

16. La herramienta de visualización desarrollada en el lenguaje de programación orientada objetos JAVA, no solo permite observar el comportamiento o tendencia de las variables físicas ambientales capturadas por los nodos remotos, sino que también permite realizar ajustes de calibración sobre las medidas.
17. Desafortunadamente el código fue desarrollado de tal manera que solamente funciona para los módulos Telos porque para estos ya existen librerías desarrolladas en JAVA para poder interactuar desde un computador personal con los módulos en cuestión.
18. Es posible desarrollar nuevos programas en JAVA utilizando una clase llamada "*Javacomm*", esta clase permite leer y escribir puertos seriales, paralelos y USB; dicha clase es un buen inicio para el desarrollo de una herramienta de visualización que funcione tanto para los módulos Telos como para los módulos Xbee.

5.4 DESARROLLO DE FUTUROS PROYECTOS EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN CPS

19. Gracias a la continua reducción en el costo de los nodos radiotransmisores el grupo de investigación CPS actualmente está explorando nuevas plataformas con el fin de ampliar las posibilidades de desarrollo de aplicaciones con tecnología de redes inalámbricas de sensores.
20. Es necesario desarrollar estudios que profundicen en la caracterización de los módulos ZigBee contemplando la necesidad de desarrollar modelos de radio propagación en ambientes agroindustriales con el fin de diseñar topologías de red bastante robustas y confiables en estos escenarios.

21. La integración de los resultados de esta investigación a sistemas de información mucho más completos es uno de los objetivos inmediatos del grupo de investigación CPS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1.1] Chong Yee-Chee, Kumar P. Srikanta Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges, 2004
- [1.2] Olivares Teresa, Orozco Luis, López Vicente, Bermejo Pablo, Pedrón Paz, Redes inalámbricas de sensores ambientales, 2005
- [1.3] AVIGEN. Manual de manejo de pollo de engorde Ross. 2002, sec-1,6 pag 13-21, 77-102
- [1.4] Estrada Mónica M; Márquez Sara M. Interacción de los factores ambientales con la respuesta del comportamiento productivo en pollos de engorde. Rev Col Cienc Pec Vol. 18:3, 2005, pag. 246, 248, 256.
- [1.5] Estrada-Pareja .MM, .Márquez-Girón .SM, .Restrepo-Betancur .Efecto de la temperatura y la humedad relativa en los parámetros productivos y la transferencia de calor en pollos de engorde. Rev Col Cienc Pec 2007; 20:288-303.
- [1.6] Rugeles Uribe José de Jesús, Redes de sensores inalámbricos: Diseño implementacion y caracterizacion de un prototipo de red Zig Bee en ambientes abiertos y cerrados, pag 3,4. 2007.
- [1.7] Bedoya EJ, Nuñez EM, Mendez L. Los municipios avícolas. Programa de estudios económicos de Fenavi fonav. Rev. Avicultores. 2001; 72(3): 8-12.
- [1.8] North MO, Bell DD. Manual de producción avícola. El manual moderno, S.A. Mexico, D.F. 1998.
- [1.9] Quiles A, Hevia ML. Fisiologismo de la termorregulación en las gallinas. Departamento de producción animal. Facultad de Veterinaria. Universidad de Murcia. España. 2003. URL: www.portalveterinaria.com.

[1.10] La cadena de cereales, alimentos balanceados para avicultura y porcicultura. Min. Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrocadenas Colombia 2005. [11] Sears-Zemansky, Fisica Universitaria vol.1, pag 460,461.

[1.12] Enciclopedia Encarta, Microsoft 2007.

[1.13] Connolly Martin, O'Reilly Fergus Sensor Networks and the Food Industry, 2004.

[1.14] Baggio Aline, Wireless sensor networks in precision agriculture, 2003.

[1.15] Dutta Prabal, Grimmer Mike, Arora Anish, Bibyk Steven, Culler David "Design of a Wireless Sensor Network Platform for Detecting Rare, Random, and Ephemeral Events" 2003.

[1.16] Dutta Prabal, Hui Jonathan, Jeong Jaein, Kim Sukun, Trio: Enabling Sustainable and Scalable Outdoor Wireless Sensor Network Deployments, 2004.

[1.17] Demirbas Murat INSIGHT: Internet-Sensor Integration for Habitat Monitoring, 2006.

[1.18] Maldonado Delgado Diego Armando "Caracterizacion de dispositivos de redes de sensores inalámbricos en ambientes indoor y outdoor"

[2.1] Rugeles José. "Caracterización de una red ZigBee en ambientes abiertos y cerrados". UIS 2007.

[2.2] Sarangapani Jagannathan, Wireless Ad-hoc and Sensor Networks. CRC press.

[2.3] Denis Dondi, *Student Member, IEEE*, Alessandro Bertacchini, *Member, IEEE*, Davide Brunelli, Luca Larcher, *Member, IEEE*, and Luca Benini, *Fellow, IEEE*

[2.4] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci Georgia Institute of Technology.

[2.5] Khanh Tuan Le, Designing a ZigBee-ready IEEE 802.15.4-compliant radio transceiver

[2.6] Gualdron Oscar. Redes uno, protocolo TCP/IP. UIS 2005.

[2.7] Wanner, Lucas Francisco."Um Ambiente de Suporte `a Execucao de Aplicacoes em Redes de Sensores sem Fios", UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PROGRAMA DE P´OS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO pag 11, 25, 29.

[2.8] Digi manual de usuario Xbee. www.digi.com

[2.9] Maldonado, Diego. Caracterizacion y diseño de un prototipo de red inalambrica de sensores.

[2.10] Solaiy Alagappan and Zach Hogya, AeroComm, Inc. Is ZigBee Ready For Industrial Networks?

[2.11] John Lach, David Evans, Jon McCune, Jason Brandon. Power-Efficient Adaptable Wireless Sensor Networks. University of Virginia.

[2.12] Steven D. Glaser¹ College of Engineering, University of California. Some real-world applications of wireless sensor nodes.

[2.13] S. Maheswaran. DESIGN OF WIRELESS SENSOR NODE B.Tech Project – Interim Report, Spring Semester 2007.

[2.14] Hoja de especificaciones técnicas, tmote sky Moteiv 2005. www.moteiv.com

[3.1] Diccionario de la real academia de la lengua española.

[3.2] Wanner, Lucas Francisco."Um Ambiente de Suporte `a Execucao de Aplicacoes em Redes de Sensores sem Fios", UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PROGRAMA DE P´OS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO pag 11, 25, 29.

[3.3] Universidad Nacional de Colombia.
WWW.VIRTUAL.UNAL.EDU.CO/CURSOS/SEDES/MANIZALES/4040003/IMAGES/CAP%203/FIG%203.9.JPG

[3.4] Kester Walt, Bryant James, Jung Walt, Wurcer Scott, Kitchin Chuck. Sensor Signal Conditioning. Analog Device.

[3.5] AN401. Analog Sensor Interfacing. Intersema.

[3.6] Mancini Roy. Sensor to ADC- analog interface design. Texas Instruments Incorporated.

[3.7] Amaya Palacio José, Instrumentacion Electrónica, Istrumentación y Medicion, Universidad Industrial de Santander, Febrero 2007.

[3.8] Cooper, William D. . Instrumentación Electrónica y mediciones. Prentice Hall.

[3.9] es.wikipedia.org/wiki/sensor.

[3.10] Sensores (electrónica). Microsoft® Student 2008 [DVD]. Microsoft Corporation, 2007.

[3.11] De La Hoz Héctor, Catro Alexander. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS AMBIENTALES EN UN GALPÓN AVÍCOLA.

[3.12] Sinclair, Ian R. Sensors and Transducers 3ra edición. Newnes.

[3.13] Sears-Zemansky, Fisica Universitaria vol.1, pag 460,461.

[3.14] Estrada-Pareja .MM, .Márquez-Girón .SM, .Restrepo-Betancur .Efecto de la temperatura y la humedad relativa en los parámetros productivos y la transferencia de calor en pollos de engorde. Rev Col Cienc Pec 2007; 20:288-303.

[3.15] Estrada Mónica M; Márquez Sara M. Interacción de los factores ambientales con la respuesta del comportamiento productivo en pollos de engorde. Rev Col Cienc Pec Vol. 18:3, 2005, pag. 246, 248, 256.

[3.16] kouro Samir, Glaría Jaime. Automatización Industrial: Sensores De Humedad. Universidad Tecnica Federico Santa María, Chile.

[3.18] Baker, Bonnie C. Matching the noise performance of the operational amplifier to the ADC. Texas Instruments Incorporated.

[3.19] AVIGEN. Manual de manejo de pollo de engorde Ross. 2002, sec-1,6 pag 13-21, 77-102

[3.20] Practica Temperature Measurements, Nota de aplicación 290. Hewlett Packard.

[3.21] Teikari, Petteri. Circadian Field photometry, Helsinki University of technology, Centre for metrology and accreditation, Metrology Research Institute.

[3.22] en.wikipedia.org/wiki/Photodiode.

[3.23] Commission Internationale de L'éclairage, CIE. WWW.CIE.ORG

[3.24] Hamamatsu Corporation. Photodiode Technical Guide. sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/index.htm.

[3.25] Hamamatsu Photonics k.k Solid State Division. Characteristics and use of Si APD (Avalanche Photodiode).

[3.26] Nota de aplicacion perkin-Elmer. Understanding Avalanche photodiode for improving system performance.

[3.27] OSHA

[3.28] NEMOTOTECH. How do gas sensors works?. www.nemototehc.com

[3.29] Chou, Jack. Hazardous Gas Monitors: A practical Guide To Selection, Operation and Applications. ATS AGRO

[3.30] ALPHASENSE, WWW.alphasense.com

[3.31] e2v, www.e2v.com

[3.32] figaro, www.figaro.com.jp

[3.33] Grupo de investigación en conectividad y procesamiento de señales CPS, www.cps.uis.edu.com.co.

[3.34] Hoja de especificaciones técnicas, TMP 35/36/37 Analog Device 2007.
www.analog.com

[3.35] Hoja de especificaciones técnicas, AD22100 Analog Device 2007.
www.analog.com

[3.36] Hoja de especificaciones técnicas, LM19 National Semiconductors 2007.
www.national.com

[3.37] Hoja de especificaciones técnicas, FM20 Fairchild Semiconductors 2006.
www.fairchild.com

[3.38] Hoja de especificaciones técnicas, MAX 6605 Maxim 2006.
www.maxim.com

[3.39] Hoja de especificaciones técnicas, TMP300 Texas Instruments 2207.
www.ti.com

[3.40] Hoja de especificaciones técnicas, HIH-4000 Honeywell 2007.
www.honeywell.com

[3.41] Hoja de especificaciones técnicas, HU-10 General electric 2006.
www.GE.com

[3.42] Hoja de especificaciones técnicas, HS15P thermometrics 2005.

[3.43] Hoja de especificaciones técnicas, SHT15 Sensirion 2007.
www.sensirion.com

[3.44] Hoja de especificaciones técnicas, APDS 9005 avago 2007.
www.avago.com

- [3.45] Hoja de especificaciones técnicas, TSL12S/13S/14S TAOS.
www.taos.com
- [3.46] Hoja de especificaciones técnicas, OPT101 Texas Instruments.
www.ti.com
- [3.47] Hoja de especificaciones técnicas, QSE973 Fairchild
Semiconductors. www.fairchild.com
- [3.48] Hoja de especificaciones técnicas, S1087/01 HAMAMATSU.
www.hamamatsu.com
- [3.49] Hoja de especificaciones técnicas, NP-ANSM Nemoto.
www.nemototech.com
- [3.50] Hoja de especificaciones técnicas, TGS2444 Figaro.
www.figaro.com
- [3.51] Hoja de especificaciones técnicas, P/N 705 Synkera.
www.Synkera.com
- [3.52] Hoja de especificaciones técnicas, NT-NH3 Nemoto.
www,nemototech.com
- [3.53] Mayné, Jordi. Acondicionadores y Procesadores de señal. Silica an avnet division.
- [3.54] Sedra Adel S, Smith Kenneth C. Circuitos Mircoelectrónicos, Oxford University Press.
- [3.55] Gray Paul, Hurts Paul, Lewis Stephenn. Analisis y diseño de circuitos analógicos integrados.
- [3.56] Mancini, Ron. Worst-case design of op amp circuits. Texas Instruments Incorporated.
- [3.57] Texas Instruments Incorporated, Amplifier and Data Converter Selection Guide.

[3.59] Hoja de especificaciones técnicas, tmote sky Moteiv 2005.
www.moteiv.com

[3.60] Hoja de especificaciones técnicas, Intell Mote2. www.intell.com

[3.61] Hoja de especificaciones técnicas,tgs5042 Figaro. www.figaro.com.jp

[3.62] Hoja de especificaciones técnicas,NT-CO-2F Nemot.
www.nemototech.com

[3.63] Hoja de especificaciones técnicas,D6F-V03A1 Omron. www.omron.com

[3.64] Hoja de especificaciones técnicas, D6FP-1007 Omron. www.omron.com

[3.65] Yu-Hsiang Wang 1, Chia-Yen Lee 1,* and Che-Ming Chiang 2. A MEMS-based Air Flow Sensor with a Free-standing Microcantilever Structure. Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University, Changhua, Taiwan.

[3.66] Carter Bruce,Interfacing op amps and analog-to-digitalconverters.Texas Instruments Incorporated.

[4.1] De La Hoz Héctor, Catro Alexander. Presentación Plan de proyecto, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA MONITORIZACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS AMBIENTALES EN UN GALPÓN AVÍCOLA.

ANEXO A. HOJAS DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SENSORES Y DISPOSITIVOS SELECCIONADOS

A.1 SENSOR DE HUMEDAD

Honeywell



Representative photograph, actual product appearance may vary.

Due to regional agency approval requirements, some products may not be available in your area. Please contact your regional Honeywell office regarding your product of choice.

HIH-4000-001

HIH-4000 Series Integrated Circuitry Humidity Sensor, 2,54 mm (0.100 in) Lead Pitch SIP

Features

- Molded thermoset plastic housing with cover
- Linear voltage output vs %RH
- Laser trimmed interchangeability
- Low power design
- High accuracy
- Fast response time
- Stable, low drift performance
- Chemically resistant

Typical Applications

- Refrigeration
- Drying
- Meteorology
- Battery-powered systems
- OEM assemblies

Description

The HIH-4000 Series Humidity Sensors are designed specifically for high volume OEM (Original Equipment Manufacturer) users. Direct input to a controller or other device is made possible by this sensor's linear voltage output. With a typical current draw of only 200 μ A, the HIH-4000 Series is ideally suited for low drain, battery operated systems. Tight sensor interchangeability reduces or eliminates OEM production calibration costs. Individual sensor calibration data is available.

The HIH-4000 Series delivers instrumentation-quality RH (Relative Humidity) sensing performance in a low cost, solderable SIP (Single In-line Package). Available in two lead spacing configurations, the RH sensor is a laser trimmed, thermoset polymer capacitive sensing element with on-chip integrated signal conditioning. The sensing element's multilayer construction provides excellent resistance to most application hazards such as wetting, dust, dirt, oils and common environmental chemicals.

HIH-4000-001

HIH-4000 Series Integrated Circuitry Humidity Sensor, 2,54 mm (0.100 in) Lead Pitch SIP

Product Specifications	
Package Style	Solderable SIP
Termination Details	2,54 mm [0.100 in] Lead Pitch
Series Name	HIH-4000 Series
RH Accuracy	± 3.5% RH, 0-100 % RH non-condensing, 25 °C, 5 Vdc supply
RH Interchangeability	± 5% RH, 0-60% RH; ± 8% @ 60-100% RH Typical
RH Hysteresis	± 3% of RH Span Maximum
RH Repeatability	± 0.5% RH
RH response time, 1/e	15 s in slowly moving air @ 25 °C
RH Stability	± 0.2% RH Typical at 50% RH in 1 Year
Supply Voltage	4.0 Vdc to 5.8 Vdc
Supply Current	500 µA Max.
Operating Humidity Range	0 to 100% RH, non-condensing
Operating Temperature Range	-40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F)
Temperature Compensation	True RH = Sensor RH / (1.0305 + 0.000044T - 0.0000011T ²) T in °C (True RH = Sensor RH / (0.9237 - 0.0041T + 0.000040T ²) T in °C)
Availability	Global
Comment	Light sensitive, shield from bright light.
UNSPSC Code	411121
UNSPSC Commodity	411121 Transducers

A.2 SENSOR DE TEMPERATURA



www.fairchildsemi.com

FM20

Ultra-Low-Power Analog Temperature Sensor

Features

- Analog Output, $-11.77\text{mV}/^\circ\text{C}$
- Range, -55 to 130°C
- Accuracy, $\pm 1^\circ\text{C}$ at 25°C
- Supply Current, $9\mu\text{A}$ typical
- Output Drive, $1\mu\text{A}$
- Self-heating $< 0.021^\circ\text{C}$
- Operating Voltage: $+2.4\text{V}$ to $+6\text{V}$

Applications

- Mobile Phones
- Computers
- Battery Management
- Office Equipment
- HVAC
- Power Supply Modules
- Disk Drives
- Automotive

Description

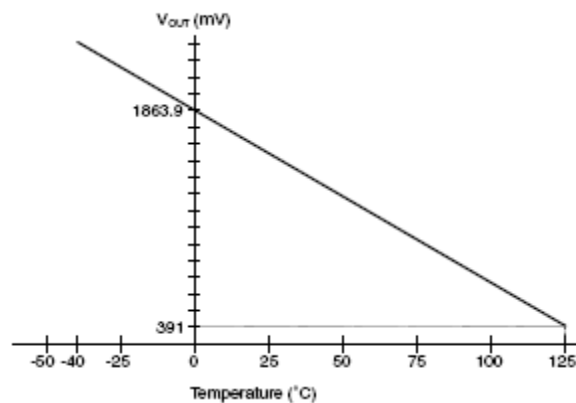
As a precision CMOS temperature sensor, the FM20 is cost-effective for accurate low-power temperature monitoring applications. Output voltage versus temperature is extremely linear. With no load, the supply current is typically $1\mu\text{A}$. For normal operation, the load on VOUT should be $5\text{M}\Omega$ or less.

In a typical application, a remotely mounted FM20 is monitored by a microcontroller with an analog A/D converter input. Alternatively, the FM20 can drive a comparator with a high impedance input.

Accuracy is typically $\pm 1^\circ\text{C}$ at room temperature; and better than $\pm 2.5^\circ\text{C}$ from 0 to 50°C .

Available packages are surface mount 5-pin SC70 and 3-pin SOT-23.

Thermal Response



$$\text{Temperature } (^\circ\text{C}) = \frac{V_{out} - 1863.9\text{mV}}{-11.77\text{mV}/^\circ\text{C}}$$

FM20 Output Voltage vs. Temperature

Absolute Maximum Ratings¹

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
Supply Voltage			+7	V
Output Voltage			V _{DD} + 0.5	V
Output Current			-20/+1	μA
Storage Temperature Range	-60		+150	°C
Lead Soldering Temperature			220	°C
ESD ²				
Human Body Model			2000	V
Machine Model			250	V

Notes:

1. Absolute maximum ratings are limits beyond which operation may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only; functional operation at or above these limits is not implied.
2. Human Body Model: 100pF capacitor discharged through a 1.5kΩ resistor into each pin. Machine Model: 200pF capacitor discharged directly into each pin.

Electrical Characteristics³

Limits apply for $-55^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +130^{\circ}\text{C}$ and $V_{DD} = +5.0\text{V}$ unless otherwise noted.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Transfer Characteristic						
Sensitivity				-11.77		mV/°C
Output at 0°C				1863.9		mV
Accuracy ⁴		T _A = +25°C T _A = -55°C (T _{MIN}) T _A = +130°C (T _{MAX})	-2 -3 -5	±1 ±2 ±2	+2 +3 +5	°C °C °C
Temperature Range			-55		+130	°C
Non-Linearity ⁵			-0.5		+0.2	°C
Output						
Output Voltage Range		V _{OUT} < V _{DD}	300		2550	mV
Output Current Source ⁶	I _{ONSN}	Sensing		1		μA
	I _{ONSG}	Surge				mA
Output Current Sink ⁶	I _{OL}			20		μA
Output resistance		T _A = 25°C				kΩ
Load regulation						mV/mA
Capacitive Load ⁷	C _L		100		1000	pF
Power						
Supply Voltage	V _{DD}		2.4		6.0	V
Quiescent Supply Current	I _{DD}	T _A = +25°C		9	11.5	μA
Output Floating		-55°C ≤ T _A ≤ +130°C		9	14	μA
Package						
Self Heating		SOT-23			0.02016	°C
		SC70			0.02082	°C

Notes:

3. These specifications are guaranteed only for the test conditions listed.
4. Accuracy (expressed in °C) = Difference between calculated output voltage and measured output voltage. Calculated output voltage = -11.77mV/°C multiplied by device's case temperature at specified conditions of temperature, voltage and power supply plus an offset of 1863.9 mV at 0°C.
5. Non-linearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.
6. Lowest output current should be targeted; higher currents result in more self-heating of the device.
7. High capacitive loads may be driven by the output in a static mode, but it may require a delay time before initial read at power up to allow for the RC time constant of the charging capacitor.

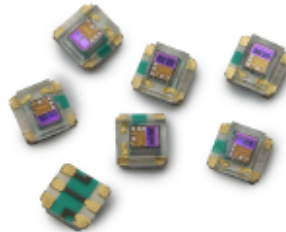
A.3 SENSOR DE INTENSIDAD LUMINOSA

APDS-9005

Miniature Surface-Mount Ambient Light Photo Sensor



Data Sheet



Description

The APDS-9005 is a low cost analog-output ambient light photo sensor in miniature chipLED lead-free surface mount package. It consists of a photo sensor, whose spectral response is close to the CIE standard photopic observer, as show in figure 2. The APDS-9005 is ideal for applications in which the measurement of ambient light is used to control display backlighting. Mobile appliances such as the mobile phones and PDAs that draw heavy current from display backlighting will benefit from incorporating these photo sensor products in their designs by reducing power consumption significantly.

Application Support Information

The Application Engineering Group is available to assist you with the application design associated with APDS-9005 ambient light photo sensor module. You can contact them through your local sales representatives for additional details.

Features

- Spectral responsivity close to that of human eye
- Miniature ChipLED Leadfree surface-mount package
 - Height – 0.55 mm
 - Width – 1.60 mm
 - Depth – 1.50 mm
- Low sensitivity variation across various light sources
- Recommended operating temperature : -40°C to 85°C
- Vcc supply 1.8 to 5.5V
- Lead-free package, RoHS compliance
- Output linearity across wide illumination range

Applications

- Detection of ambient light to control display backlighting
 - Mobile devices – Mobile phones, PDAs
 - Computing devices – Notebooks, Webpads
 - Consumer devices – TVs, Video Cameras, Digital Still Camera
- Automatic Residential and Commercial Lighting Management
- Electronic Signs and Signals

Ordering Information

Part Number	Packaging Type	Package	Quantity
APDS-9005-020	Tape and Reel	6-pins Chipled package	2500

Typical Application Circuit

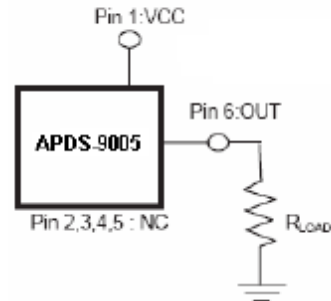


Figure 1. Typical application circuit for APDS-9005

Component	Recommended Application Circuit Component
RLOAD	1k ohm

Note :
Refer to Figure 11 for General Luminance Vs Typical Output Voltage for different RLOAD values

I/O Pins Configuration Table

Pin	Symbol	Description
1	VCC	VCC
2	NC	No Connect
3	NC	No Connect
4	Nc	No Connect
5	NC	No Connect
6	Iout	Out

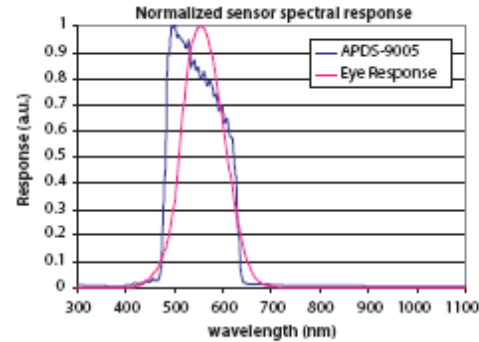


Figure 2. Relative Spectral Response Vs Wavelength

CAUTIONS : It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD

Absolute Maximum Ratings

For implementations where case to ambient thermal resistance is ≤ 50 °C/W

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units
Storage Temperature	T_S	-40	85	°C
Operating temperature	T_A	-40	85	°C
Supply Voltage	V_{CC}	0	6	V

Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units	Conditions
Supply Voltage	V_{CC}	1.8	5.5	V	

A.4 SENSOR DE AMONIACO (NH3)



• NEMOTO SENSORTECH DIVISION
• NANO & CYBERTECH DIVISION



TECHNICAL INFORMATION SHEET: NEMOTO NT-NH3 Electrochemical Ammonia Sensor



Response time ($T_{90\%}$): < 90 seconds
Temperature drift (zero) < 15ppm (-20to +50°C)
Expected lifetime > 2 years

Operating conditions:

Operating temperature: -40°C to + 40°C
Humidity range (constant) 15-90% RH
Humidity range (intermittent) 0-99% RH
Pressure: 0.9 – 1.1 atm
Recommended resistor: 10 ohms
Bias voltage: Not required
Recommended Storage temp 0-20°C
Storage time 6 months
(without compromising lifetime)

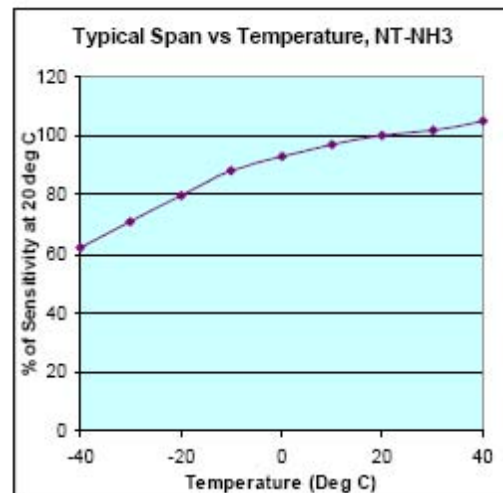
General Description

The NT-NH3 is a new electrochemical gas sensor with 3 electrodes for the detection of Ammonia in a variety of gas detection applications. Exhibiting high performance with long-term stability, this compact (20.4mm dia) sensor is suitable for portable Gas Detection Instruments or Fixed Gas Detection heads.

Nemoto's porous electrode technology enables accurate gas detection with high sensitivity. The mechanical design of the sensor gives optimum gas diffusion characteristics, and the hermetically sealed enclosure prevents costly electrolyte leakage.

Specifications NT-NH3

Detectable gas:	Ammonia
Detection range:	0 – 100 ppm
Maximum range (short periods)	200 ppm
Output current:	40 +/- 12 nA/ppm
Reproducibility:	+/- 10%
Zero in clean air:	< +/- 10ppm equivalent
Output drift in air:	< 2%/month



Further performance data and information on operating characteristics will be available on the Characterisation Document NTN3-CD (pending)

Nemoto has a policy of continuous development and improvement of its products. As such the specification for the device outlined in the data sheet may be changed without notice

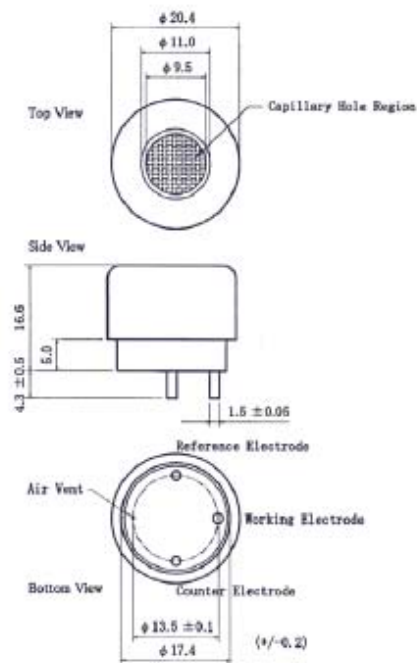
ds-n-ntnh3.doc, issue 2, Feb 2006



Typical Cross-Sensitivities:

Gas	Test Gas Used (ppm)	NH ₃ Concentration Equivalent (ppm)	% Cross Sensitivity
Ammonia	100	100	100
Hydrogen sulphide	10	<30	<300
Hydrogen	1000	0	0
Methane	5000	0	0
Carbon dioxide	5000	0	0
Sulphur dioxide	10	<15	<150
Nitric oxide	20	0	0
Nitrogen dioxide	20	<2	<10
Carbon Monoxide	200	0	0
Ethanol	100	0	0
Ethylene	1000	0	0
Chlorine	10	0	0

Dimensions:



A.5 SENSOR DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)



- NEMOTO SENSORTECH DIVISION
- NANO & CYBERTECH DIVISION



TECHNICAL INFORMATION SHEET: NEMOTO NT-CO-2F Electrochemical Carbon Monoxide Sensor

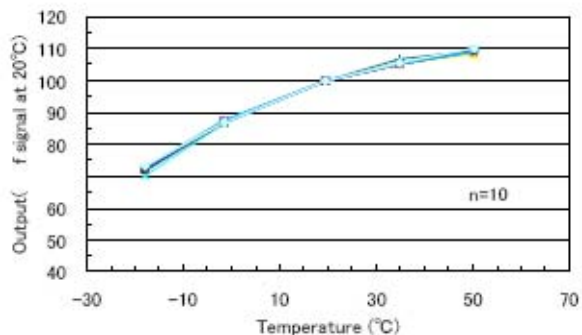
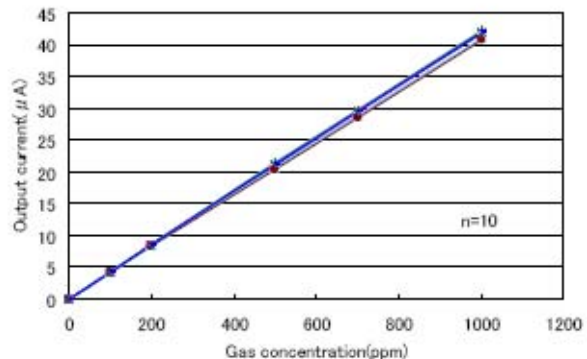


Operating conditions:

Operating temperature:	-20°C to + 50°C
Humidity range (constant)	15-90% RH
Humidity range (intermittent)	0-99% RH
Pressure:	0.9 – 1.1 atm
Recommended resistor:	10 ohms
Bias voltage:	Not required
Recommended Storage temp	0-20°C
Storage time*:	6 months

(*without compromising lifetime)

Linearity & Temperature Profiles:



General Description

The NT-CO-2F is a new generation electrochemical gas sensor with 3 electrodes for the detection of Carbon monoxide (CO). Designed specifically for use in the latest disposable industrial gas alarms, the NT-CO-2F combines cost effectiveness and high performance in a design conscious package.

Nemoto's porous electrode technology enables accurate gas detection with high sensitivity. The mechanical design of the sensor gives optimum gas diffusion characteristics, and the hermetically sealed enclosure prevents costly electrolyte leakage.

Specifications NT-CO-2F

Detectable gas:	Carbon Monoxide
Detection range:	0 – 1000 ppm
Maximum range (short periods)	2000 ppm
Output current:	40 +/- 10 nA/ppm
Reproducibility:	+/- 2%
Zero in clean air:	<+/-5ppm equivalent
Output drift in air:	< 20%/year
Response time (T _{90%}):	< 30 seconds
Temperature drift (zero)	<10ppm (-20to +50°C)
Operating lifetime:	2 years

ds-n-ntco2f.doc, issue 2, Feb 2006

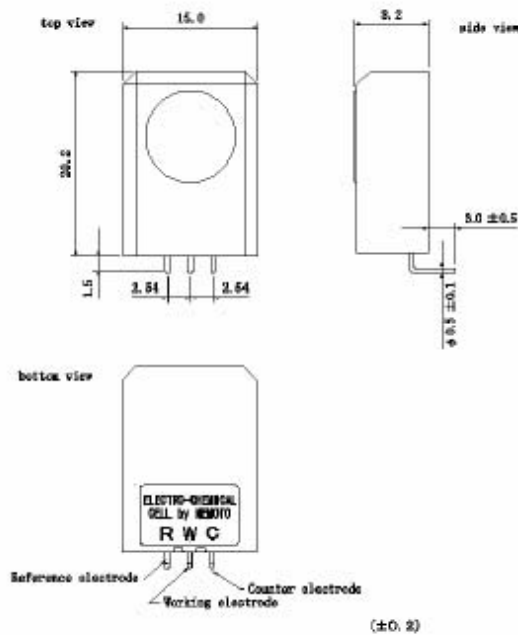


Typical Cross-Sensitivities:

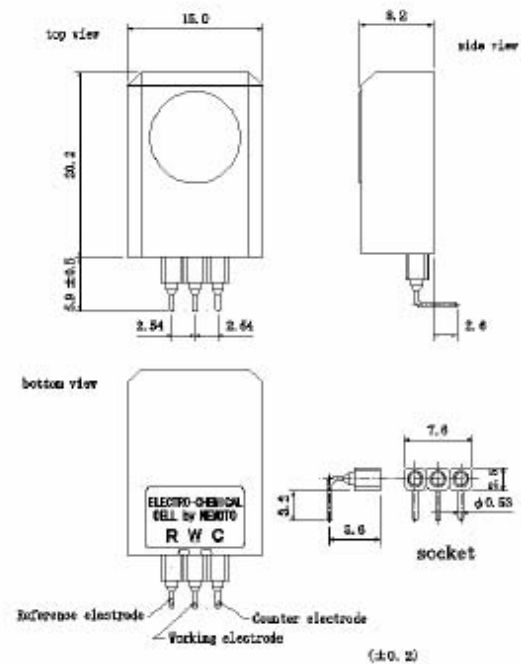
Gas	Test Gas Used (ppm)	CO Concentration Equivalent (ppm)	% Cross Sensitivity
Carbon monoxide	100	100	100
Hydrogen sulphide	10	0	0
Hydrogen	500	200	40
Methane	5000	0	0
Carbon dioxide	5000	0	0
Sulphur dioxide	25	0	0
Nitric oxide	30	0	0
Nitrogen dioxide	30	<10	<30
Ammonia	100	0	0
Ethyl Acetate	200	0	0
Iso-Butane	2500	0	0

Dimensions:

DIRECT SOLDERING MODEL



PCB SOCKET MODEL



ds-n-ntco-2f.doc, issue 2, Feb 2006

Nemto has a policy of continuous development and improvement of its products. As such the specification for the device outlined in the data sheet may be changed without notice.

A.6 SENSOR DE VELOCIDAD DEL VIENTO

OMRON

MEMS Flow-Sensor D6F-V03A1

The unique dust separating structure, developed by OMRON is a compact and highly efficient FLOW-SENSOR.

- A dust-resistant design has been taken into consideration, by the original dust segregation structure, of OMRON.
- +/-10% Full-Scale repeatable accuracy achieves consistent air velocity measurement.
- Applications include clogged-filter detection and air velocity.



Sensor specification

Type	D6F-V03A1
Flow Range	0 – 3 m/s @ 25°C, 1 atmosphere
Case Material	Thermoplastic resin
Gas	Air
Ambient Temperature	-10 to +60°C (with no condensation)
Using Humidity	Max. 85% RH (with no condensation)
Storage Temperature	-40 to +80°C (with no condensation)
Preservation Humidity	Max. 85% RH (with no condensation)
Power Supply Voltage	3.15 to 3.45 VDC
Output Signal	Analog output 0.5 to 2 VDC (non-linear output) Load resistance min. 10kΩ
Current Consumption	Max. 15mA (No-load, V _{cc} = 3.3 VDC, 25°C)
Insulation Resistance	20Mohm min. (500VDC, between lead terminal and the case)
Dielectric Withstanding Voltage	Leakage current is 1 mA max. (at 500 VAC, 50/60Hz for one minute). 500VAC, 50/60Hz judged at 1mA max. (between the lead terminals and the case)

Absolute maximum rating

Item	Symbol	Rating	Unit
Power supply voltage	V _{cc}	12.0	VDC
Output voltage	V _{out}	3.0	VDC

Output characteristic

Flow Velocity (m/sec)	0	0.75	1.50	2.25	3.00
Output Voltage (VDC)	0.50 ±0.15	0.70 ±0.15	1.11 ±0.15	1.58 ±0.15	2.00 ±0.15

Measurement condition: Power-supply voltage 3.3VDC, ambient temperature 25°C and dry air.

- Note:**
1. Air velocity is the value converted from the mass-flow in OMRON regulation wind tunnel φ48mm.
 2. The air velocity, set to the Measurement Law, is not shown. Please confirm in a real use environment in use.
 3. Temperature characteristics:
Over ambient temperature range -10 to +60°C: within ±20% F.S. of detected characteristics
Of at +25°C.

A.7 AMPLIFICADOR OPERACIONAL



OPA333
OPA2333

SBO3351C—MARCH 2006—REVISED MAY 2007

1.8V, *micro*POWER CMOS OPERATIONAL AMPLIFIERS Zero-Drift Series

FEATURES

- **LOW OFFSET VOLTAGE:** 10 μ V (max)
- **ZERO DRIFT:** 0.05 μ V/ $^{\circ}$ C (max)
- **0.01Hz to 10Hz NOISE:** 1.1 μ V_{pp}
- **QUIESCENT CURRENT:** 17 μ A
- **SINGLE-SUPPLY OPERATION**
- **SUPPLY VOLTAGE:** 1.8V to 5.5V
- **RAIL-TO-RAIL INPUT/OUTPUT**
- ***micro*SIP PACKAGES:** SC70 and SOT23

APPLICATIONS

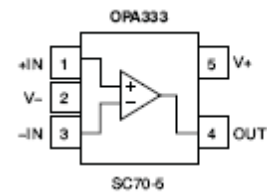
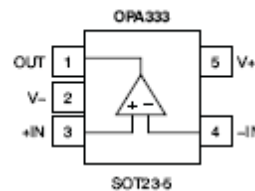
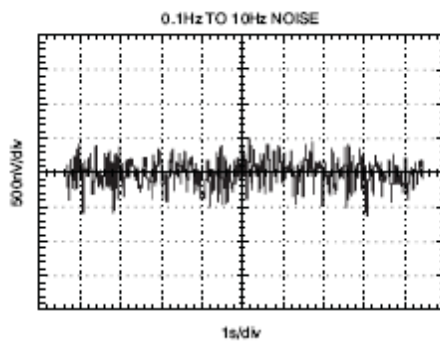
- **TRANSDUCER APPLICATIONS**
- **TEMPERATURE MEASUREMENTS**
- **ELECTRONIC SCALES**
- **MEDICAL INSTRUMENTATION**
- **BATTERY-POWERED INSTRUMENTS**
- **HANDHELD TEST EQUIPMENT**

DESCRIPTION

The OPA333 series of CMOS operational amplifiers uses a proprietary auto-calibration technique to simultaneously provide very low offset voltage (10 μ V max) and near-zero drift over time and temperature. These miniature, high-precision, low quiescent current amplifiers offer high-impedance inputs that have a common-mode range 100mV beyond the rails and rail-to-rail output that swings within 50mV of the rails. Single or dual supplies as low as +1.8V (\pm 0.9V) and up to +5.5V (\pm 2.75V) may be used. They are optimized for low-voltage, single-supply operation.

The OPA333 family offers excellent CMRR without the crossover associated with traditional complementary input stages. This design results in superior performance for driving analog-to-digital converters (ADCs) without degradation of differential linearity.

The OPA333 (single version) is available in the SC70-5, SOT23-5, and SO-8 packages. The OPA2333 (dual version) is offered in DFN-8 (3mm \times 3mm), MSOP-8, and SO-8 packages. All versions are specified for operation from -40° C to $+125^{\circ}$ C.



ELECTRICAL CHARACTERISTICS: $V_S = +1.8V$ to $+5.5V$

Boldface limits apply over the specified temperature range, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$.

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $R_L = 10\text{k}\Omega$ connected to $V_{B/2}$, $V_{CM} = V_{B/2}$, and $V_{OUT} = V_{B/2}$, unless otherwise noted.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	OPA333, OPA2333			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
OFFSET VOLTAGE					
Input Offset Voltage	$V_S = +5V$		2	10	μV
vs Temperature	dV_{OS}/dT		0.02	0.05	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
vs Power Supply	$V_S = +1.8V$ to $+5.5V$		1	5	$\mu\text{V}/V$
Long-Term Stability ⁽¹⁾			See ⁽¹⁾		
Channel Separation, dc			0.1		$\mu\text{V}/V$
INPUT BIAS CURRENT					
Input Bias Current			± 70	± 200	pA
over Temperature			± 150		pA
Input Offset Current			± 140	± 400	pA
NOISE					
Input Voltage Noise, $f = 0.01\text{Hz}$ to 1Hz			0.3		μV_{RMS}
Input Voltage Noise, $f = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			1.1		μV_{RMS}
Input Current Noise, $f = 10\text{Hz}$			100		$\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT VOLTAGE RANGE					
Common-Mode Voltage Range	V_{CM}	$(V-) - 0.1$		$(V+) + 0.1$	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$(V-) - 0.1V < V_{CM} < (V+) + 0.1V$	106	130	dB
INPUT CAPACITANCE					
Differential			2		pF
Common-Mode			4		pF
OPEN-LOOP GAIN					
Open-Loop Voltage Gain	A_{OL}	$(V-) + 100\text{mV} < V_O < (V+) - 100\text{mV}$, $R_L = 10\text{k}\Omega$	106	130	dB
FREQUENCY RESPONSE					
Gain-Bandwidth Product	GBW	$C_L = 100\text{pF}$		350	kHz
Slew Rate	SR	$G = +1$		0.16	V/ μs
OUTPUT					
Voltage Output Swing from Rail		$R_L = 10\text{k}\Omega$	30	50	mV
over Temperature		$R_L = 10\text{k}\Omega$		70	mV
Short-Circuit Current	I_{SC}		± 5		mA
Capacitive Load Drive	C_L		See Typical Characteristics		
Open-Loop Output Impedance		$f = 350\text{kHz}$, $I_O = 0$	2		k Ω
POWER SUPPLY					
Specified Voltage Range	V_S		1.8	5.5	V
Quiescent Current Per Amplifier	I_Q	$I_O = 0$	17	25	μA
over Temperature				28	μA
Turn-On Time		$V_S = +5V$	100		μs
TEMPERATURE RANGE					
Specified Range			-40	+125	$^\circ\text{C}$
Operating Range			-40	+150	$^\circ\text{C}$
Storage Range			-65	+150	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance	θ_{JA}				$^\circ\text{C}/\text{W}$
SOT23-5			200		$^\circ\text{C}/\text{W}$
MSOP-8, SO-8			150		$^\circ\text{C}/\text{W}$
DFN-8			50		$^\circ\text{C}/\text{W}$
SC70-5			250		$^\circ\text{C}/\text{W}$

(1) 300-hour life test at $+150^\circ\text{C}$ demonstrated randomly distributed variation of approximately $1\mu\text{V}$.

A.8 REGULADOR



High Accuracy, Low I_Q , anyCAP® Adjustable Low Dropout Regulator

ADP3334

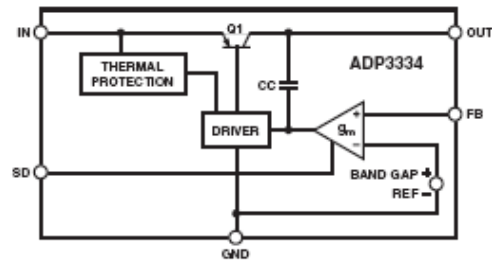
FEATURES

High Accuracy over Line and Load: $\pm 0.9\%$ @ 25°C ,
 $\pm 1.8\%$ over Temperature
 500 mA Current Capability
 Ultralow Dropout Voltage
 Requires Only $C_O = 1.0 \mu\text{F}$ for Stability
 anyCAP = Stable with Any Type of Capacitor
 (Including MLCC)
 Current and Thermal Limiting
 Low Noise
 Low Shutdown Current: $< 1.0 \mu\text{A}$ (Typ)
 2.6 V to 11 V Supply Range
 1.5 V to 10 V Output Range
 -40°C to $+85^\circ\text{C}$ Ambient Temperature Range

APPLICATIONS

Cellular Phones
 TFT LCD Modules
 Camcorders, Cameras
 Networking Systems, DSL/Cable Modems
 Cable Set-Top Boxes
 DSP Supplies
 Personal Digital Assistants

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



GENERAL DESCRIPTION

The ADP3334 is a member of the ADP333x family of precision low dropout anyCAP voltage regulators. The ADP3334 operates with an input voltage range of 2.6 V to 11 V and delivers a continuous load current up to 500 mA. The novel anyCAP architecture requires only a very small $1 \mu\text{F}$ output capacitor for stability, and the LDO is insensitive to the capacitor's equivalent series resistance (ESR). This makes the ADP3334 stable with any capacitor, including ceramic (MLCC) types for space restricted applications.

The ADP3334 achieves exceptional accuracy of $\pm 0.9\%$ at room temperature and $\pm 1.8\%$ over temperature, line, and load. The dropout voltage of the ADP3334 is only 200 mV (typical) at 500 mA. This device also includes a safety current limit, thermal overload protection, and a shutdown feature. In shutdown mode, the ground current is reduced to less than $1 \mu\text{A}$. The ADP3334 has low quiescent current of $90 \mu\text{A}$ (typical) in light load situations.

The ADP3334 is available in three different package options:

1. Excellent thermal capability, space saving $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ LFCSP.
2. Popular low profile MSOP-8.
3. Traditional thermal enhanced SOIC-8.

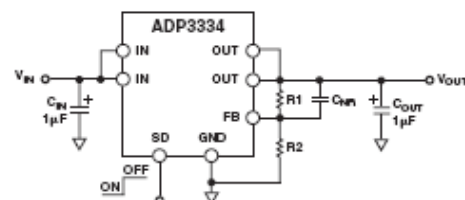


Figure 1. Typical Application Circuit

ADP3334—SPECIFICATIONS^{1, 2, 3} ($V_{IN} = 6.0\text{ V}$, $C_{IN} = C_{OUT} = 1.0\ \mu\text{F}$, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
OUTPUT						
Voltage Accuracy ⁴	V_{OUT}	$V_{IN} = V_{OUT(NOM)} + 0.4\text{ V}$ to 11 V $I_L = 0.1\text{ mA}$ to 500 mA $T_A = 25^\circ\text{C}$	-0.9		+0.9	%
		$V_{IN} = V_{OUT(NOM)} + 0.4\text{ V}$ to 11 V $I_L = 0.1\text{ mA}$ to 500 mA $T_A = 85^\circ\text{C}$	-1.8		+1.8	%
		$V_{IN} = V_{OUT(NOM)} + 0.4\text{ V}$ to 11 V $I_L = 0.1\text{ mA}$ to 500 mA $T_J = 150^\circ\text{C}$	-2.3		+2.3	%
Line Regulation ⁴		$V_{IN} = V_{OUT(NOM)} + 0.4\text{ V}$ to 11 V $I_L = 0.1\text{ mA}$ $T_A = 25^\circ\text{C}$		0.04		mV/V
Load Regulation		$I_L = 0.1\text{ mA}$ to 500 mA $T_A = 25^\circ\text{C}$		0.04		mV/mA
Dropout Voltage	V_{DROP}	$V_{OUT} = 98\%$ of $V_{OUT(NOM)}$ $I_L = 500\text{ mA}$ $I_L = 300\text{ mA}$ $I_L = 100\text{ mA}$ $I_L = 1\text{ mA}$		200 140 60 10	400 250 140	mV mV mV mV
Peak Load Current	I_{LDPK}	$V_{IN} = V_{OUT(NOM)} + 1\text{ V}$		800		mA
Output Noise	V_{NOISE}	$f = 10\text{ Hz}$ – 100 kHz , $C_L = 10\ \mu\text{F}$ $I_L = 500\text{ mA}$, $C_{NR} = 10\text{ nF}$ $f = 10\text{ Hz}$ – 100 kHz , $C_L = 10\ \mu\text{F}$ $I_L = 500\text{ mA}$, $C_{NR} = 0\text{ nF}$		27 45		$\mu\text{V rms}$ $\mu\text{V rms}$
GROUND CURRENT⁵						
In Regulation	I_{GND}	$I_L = 500\text{ mA}$ $I_L = 300\text{ mA}$ $I_L = 50\text{ mA}$ $I_L = 0.1\text{ mA}$		4.5 2.6 0.5 90	10 6 1.5 130	mA mA mA μA
In Dropout	I_{GND}	$V_{IN} = V_{OUT(NOM)} - 100\text{ mV}$ $I_L = 0.1\text{ mA}$		150	450	μA
In Shutdown	I_{GNDSD}	$SD = 6\text{ V}$, $V_{IN} = 11\text{ V}$		0.9	3	μA
SHUTDOWN						
Threshold Voltage	V_{THSD}	LDO OFF LDO ON	2.0		0.4	V V
SD Input Current	I_{SD}	$0 \leq SD \leq 5\text{ V}$		1.2	3	μA
Output Current in Shutdown	I_{OSD}	$SD = 2\text{ V}$, $V_{IN} = 11\text{ V}$		0.01	5	μA

NOTES

¹All limits at temperature extremes are guaranteed via correlation using standard statistical quality control (SQC) methods.

²Ambient temperature of 85°C corresponds to a junction temperature of 125°C under pulsed full load test conditions.

³Application stable with no load.

⁴ $V_{IN} = 2.6\text{ V}$ to 11 V for $V_{OUT(NOM)} \leq 2.2\text{ V}$.

⁵Ground current includes current through external resistors.

Specifications subject to change without notice.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Input Supply Voltage	-0.3 V to +16 V
Shutdown Input Voltage	-0.3 V to +16 V
Power Dissipation	Internally Limited
Operating Ambient Temperature Range	-40°C to $+85^\circ\text{C}$
Operating Junction Temperature Range	-40°C to $+150^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	-65°C to $+150^\circ\text{C}$
θ_{JA} 2-Layer SOIC-8	122.3°C/W
θ_{JA} 4-Layer SOIC-8	86.6°C/W
θ_{JA} 2-Layer LFCSP-8	62°C/W
θ_{JA} 4-Layer LFCSP-8	48°C/W
θ_{JA} 2-Layer MSOP-8	220°C/W
θ_{JA} 4-Layer MSOP-8	158°C/W
Lead Temperature Range (Soldering 6 sec)	300°C

*Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only. Functional operation of the device at these or any other conditions above those listed in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

PIN FUNCTION DESCRIPTIONS

Mnemonic	Function
GND	Ground Pin.
SD	Shutdown Control. Pulling this pin low turns on the regulator.
IN	Regulator Input.
OUT	Output. Bypass to ground with a $1.0\ \mu\text{F}$ or larger capacitor.
FB	Feedback Input. FB should be connected to an external resistor divider that sets the output voltage.
NC	No Connection.

A.9 TENSIÓN DE REFERENCIA



REF3112
REF3120
REF3125
REF3130
REF3133
REF3140

SBVS046C – DECEMBER 2003 – REVISED FEBRUARY 2006

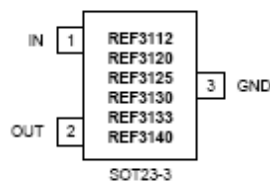
15ppm/°C Max, 100µA, SOT23-3 SERIES VOLTAGE REFERENCE

FEATURES

- **MicroSIZE PACKAGE:** SOT23-3
- **LOW DROPOUT:** 5mV
- **HIGH OUTPUT CURRENT:** ±10mA
- **HIGH ACCURACY:** 0.2% max
- **LOW I_O:** 115µA max
- **EXCELLENT SPECIFIED DRIFT PERFORMANCE:**
15ppm/°C (max) from 0°C to +70°C
20ppm/°C (max) from -40°C to +125°C

APPLICATIONS

- PORTABLE, BATTERY-POWERED EQUIPMENT
- DATA ACQUISITION SYSTEMS
- MEDICAL EQUIPMENT
- HAND-HELD TEST EQUIPMENT



DESCRIPTION

The REF31xx is a family of precision, low power, low dropout, series voltage references available in the tiny SOT23-3 package.

The REF31xx's small size and low power consumption (100µA typ) make it ideal for portable and battery-powered applications. The REF31xx does not require a load capacitor, but is stable with any capacitive load and can sink/source up to 10mA of output current.

Unloaded, the REF31xx can be operated on supplies down to 5mV above the output voltage. All models are specified for the wide temperature range of -40°C to +125°C.

PRODUCT	VOLTAGE (V)
REF3112	1.25
REF3120	2.048
REF3125	2.5
REF3130	3.0
REF3133	3.3
REF3140	4.096

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Supply Voltage, V+ to V-	7.0V
Output Short-Circuit	Continuous
Operating Temperature	-55°C to +135°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Junction Temperature	+150°C

NOTES: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these, or any other conditions beyond those specified, is not implied.



ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

PACKAGE/ORDERING INFORMATION⁽¹⁾

PRODUCT	PACKAGE-LEAD	PACKAGE DESIGNATOR	SPECIFIED TEMPERATURE RANGE	PACKAGE MARKING	ORDERING NUMBER	TRANSPORT MEDIA, QUANTITY
REF3112	SOT23-3	DBZ	-40°C to +125°C	R31A	REF3112AIDBZT	Tape and Reel, 250
"	"	"	"	"	REF3112AIDBZR	Tape and Reel, 3000
REF3120	SOT23-3	DBZ	-40°C to +125°C	R31B	REF3120AIDBZT	Tape and Reel, 250
"	"	"	"	"	REF3120AIDBZR	Tape and Reel, 3000
REF3125	SOT23-3	DBZ	-40°C to +125°C	R31C	REF3125AIDBZT	Tape and Reel, 250
"	"	"	"	"	REF3125AIDBZR	Tape and Reel, 3000
REF3130	SOT23-3	DBZ	-40°C to +125°C	R31E	REF3130AIDBZT	Tape and Reel, 250
"	"	"	"	"	REF3130AIDBZR	Tape and Reel, 3000
REF3133	SOT23-3	DBZ	-40°C to +125°C	R31F	REF3133AIDBZT	Tape and Reel, 250
"	"	"	"	"	REF3133AIDBZR	Tape and Reel, 3000
REF3140	SOT23-3	DBZ	-40°C to +125°C	R31D	REF3140AIDBZT	Tape and Reel, 250
"	"	"	"	"	REF3140AIDBZR	Tape and Reel, 3000

NOTE: (1) (1) For the most current package and ordering information, see the Package Option Addendum at the end of this document, or see the TI website at www.ti.com.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

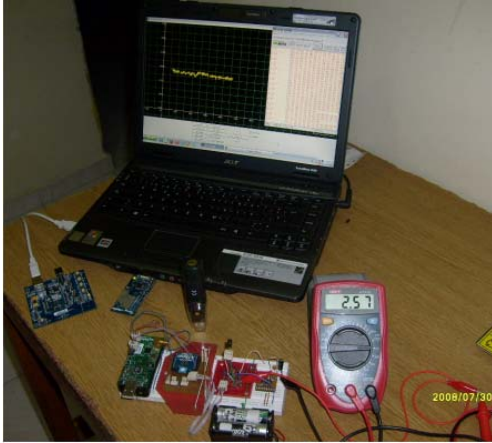
Boldface limits apply over the specified temperature range, T_A = -40°C to +125°C.

At T_A = +25°C, I_{LOAD} = 0mA, V_{IN} = 5V, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	REF31xx			UNITS
		MIN	TYP	MAX	
REF3112⁽¹⁾ - 1.25V					
OUTPUT VOLTAGE Initial Accuracy	V _{OUT}	1.2475 -0.2	1.25	1.2525 0.2	V %
NOISE Output Voltage Noise Voltage Noise	f = 0.1Hz to 10Hz f = 10Hz to 10kHz		17 24		μV _{pp} μVrms
REF3120 - 2.048					
OUTPUT VOLTAGE Initial Accuracy	V _{OUT}	2.0439 -0.2	2.048	2.0521 0.2	V %
NOISE Output Voltage Noise Voltage Noise	f = 0.1Hz to 10Hz f = 10Hz to 10kHz		27 39		μV _{pp} μVrms
REF3125 - 2.5V					
OUTPUT VOLTAGE Initial Accuracy	V _{OUT}	2.4950 -0.2	2.50	2.5050 0.2	V %
NOISE Output Voltage Noise Voltage Noise	f = 0.1Hz to 10Hz f = 10Hz to 10kHz		33 48		μV _{pp} μVrms

ANEXO B. PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN Y DESEMPEÑO

PRUEBAS REALIZADAS PARA CALIBRAR LOS SENSORES

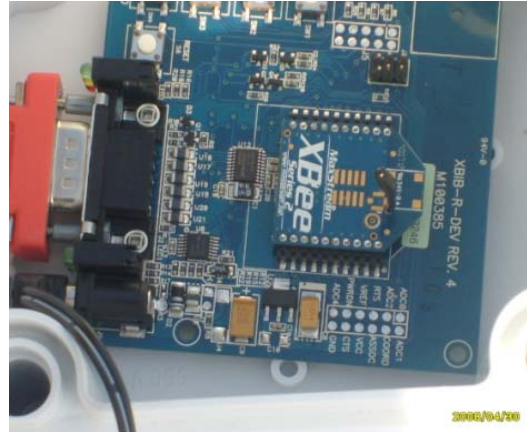
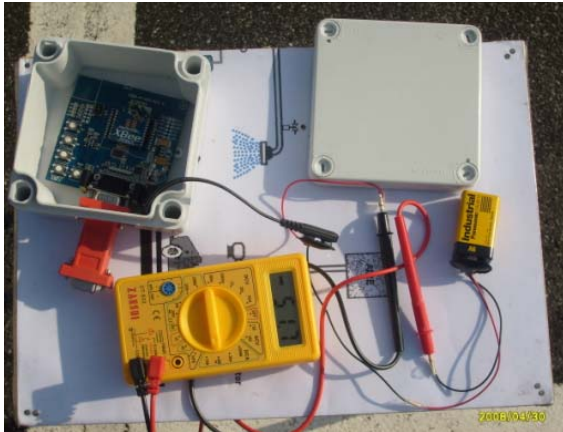


PROTOTIPO DE LA PLATAFORMA DISEÑADA PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS AMBIENTALES EN GALPONES AVÍCOLAS



PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MÓDULOS X-BEE ZNET 2.5



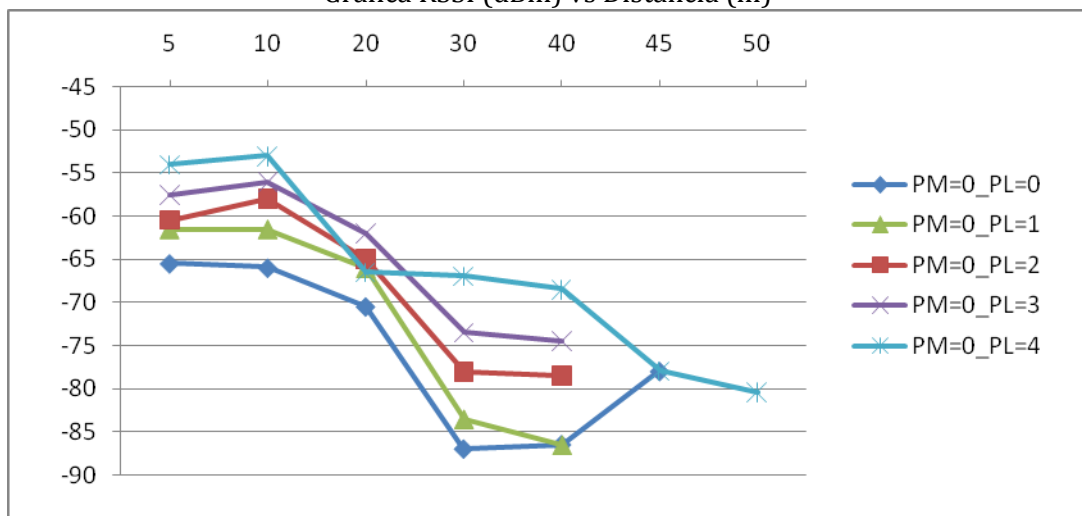


PRUEBAS REALIZADAS CON EL COORDINADOR CONFIGURADO A MÁXIMA POTENCIA (PM = 1 Y PL = 4)

RSSI que entrega, a distintas distancias y configuraciones de potencia, el X-Bee ZNET 2.5 (router/end device) al X-Bee ZNET 2.5 (coordinador)

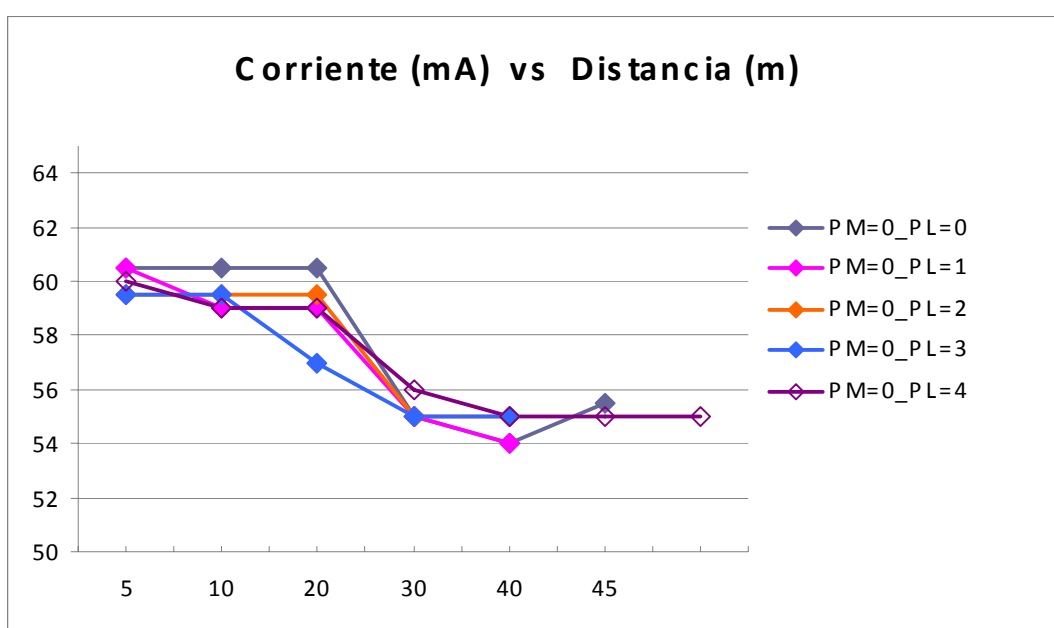
DISTANCIA (metros)	RSSI dBm				
	PM=0_PL=0	PM=0_PL=1	PM=0_PL=2	PM=0_PL=3	PM=0_PL=4
5	-65,5	-61,5	-60,5	-57,5	-54
10	-66	-61,5	-58	-56	-53
20	-70,5	-66	-65	-62	-66,5
30	-87	-83,5	-78	-73,5	-67
40	-86,5	-86,5	-78,5	-74,5	-68,5
45	-78				-78
50					-80,5

Grafica RSSI (dBm) vs Distancia (m)



Corriente de X-Bee ZNET 2.5 (router/end device) a distintas distancias y distintas configuraciones de potencia

DISTANCIA (metros)	Corriente mA				
	PM=0_PL=0	PM=0_PL=1	PM=0_PL=2	PM=0_PL=3	PM=0_PL=4
5	60,5	60,5	59,5	59,5	60
10	60,5	59	59,5	59,5	59
20	60,5	59	59,5	59,5	59
30	55	55	55	55	56
40	54	54	55	55	55
45	55,5				55
50					55

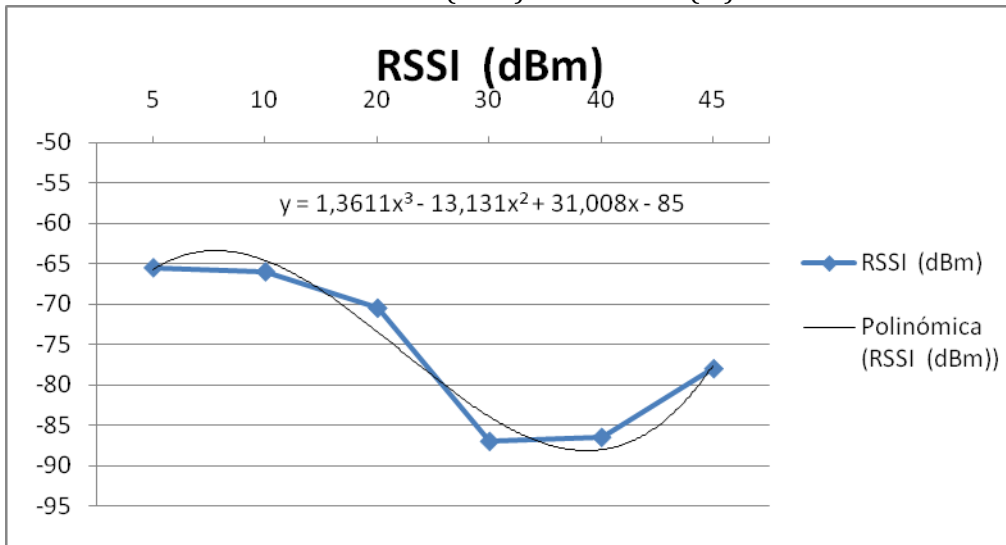


POTENCIA DE XBEE ROUTER = MÍNIMA

POWER LEVEL (PL=0) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación		promedio	variación		promedio
				Min	Max		Min	Max	
5	30	0	100	59	62	60,5	-64	-67	-65,5
10	30	0	100	59	62	60,5	-63	-69	-66
20	30	0	100	59	62	60,5	-68	-73	-70,5
30	30	0	100	53	57	55	-82	-92	-87
40	29	1	96,67	50	58	54	-81	-92	-86,5
45	30	0	100	53	58	55,5	-74	-82	-78

Grafica RSSI (dBm) vs Distancia (m)

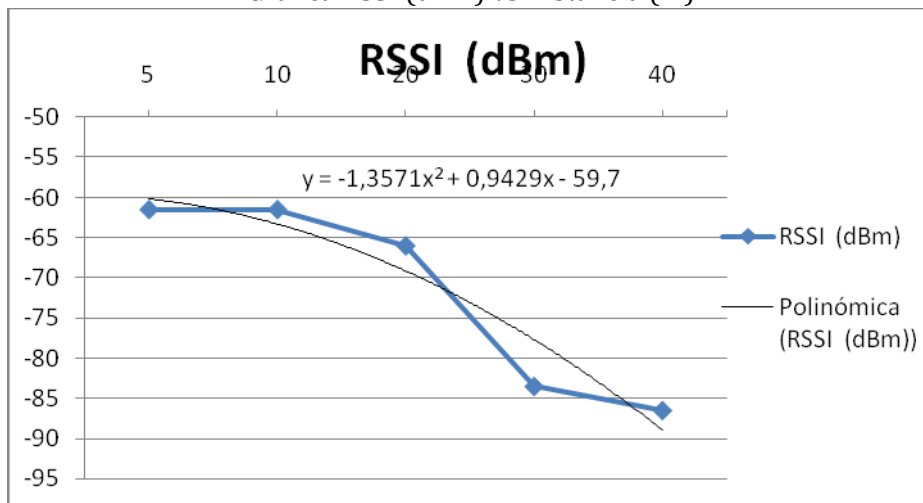


POTENCIA DE X-BEE ROUTER = BAJA

POWER LEVEL (PL=1) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación		promedio	variación		promedio
				Min	Máx.		Min	Máx.	
5	30	0	100	59	62	60,5	-59	-64	-61,5
10	30	0	100	58	60	59	-59	-64	-61,5
20	30	0	100	58	60	59	-64	-68	-66
30	30	0	100	53	57	55	-80	-87	-83,5
40	25	5	83,33	50	58	54	-81	-92	-86,5

Grafica RSSI (dBm) vs Distancia (m)

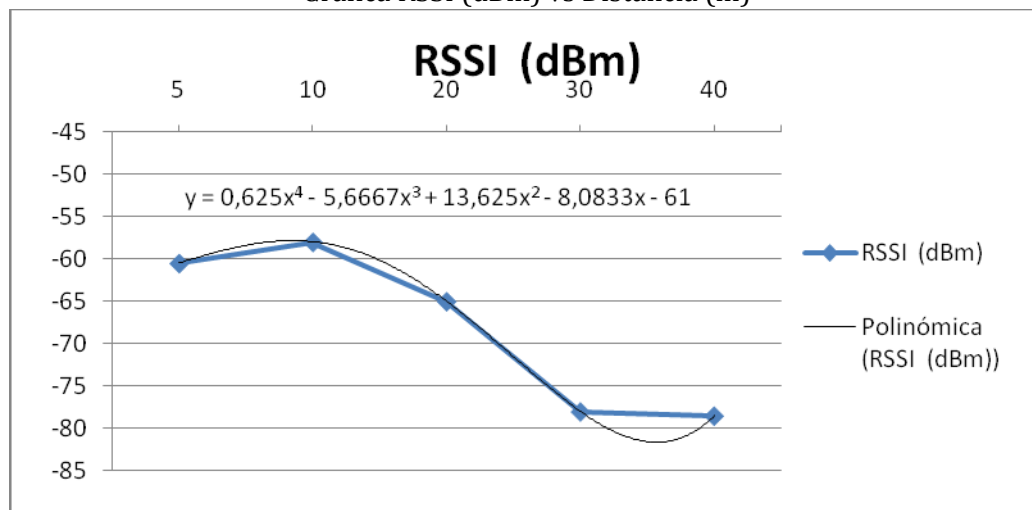


POTENCIA DE X-BEE ROUTER = MEDIA

POWER LEVEL (PL=2) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación		promedio	variación		promedio
				Min	Máx.		Min	Máx.	
5	30	0	100	58	61	59,5	-57	-64	-60,5
10	30	0	100	58	61	59,5	-56	-60	-58
20	30	0	100	58	61	59,5	-63	-67	-65
30	30	0	100	53	57	55	-72	-84	-78
40	30	0	100	53	57	55	-72	-85	-78,5

Grafica RSSI (dBm) vs Distancia (m)

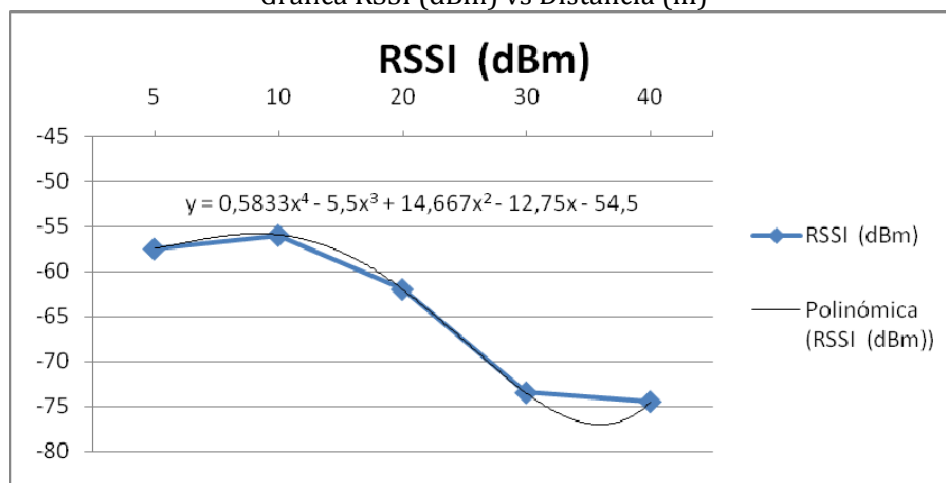


POTENCIA DE X-BEE ROUTER = ALTA

POWER LEVEL (PL=3) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación		promedio	variación		promedio
				Min	Máx.		Min	Máx.	
5	30	0	100	58	61	59,5	-56	-59	-57,5
10	30	0	100	58	61	59,5	-54	-58	-56
20	30	0	100	58	61	59,5	-60	-64	-62
30	30	0	100	53	57	55	-62	-85	-73,5
40	30	0	100	53	57	55	-68	-81	-74,5

Grafica RSSI (dBm) vs Distancia (m)

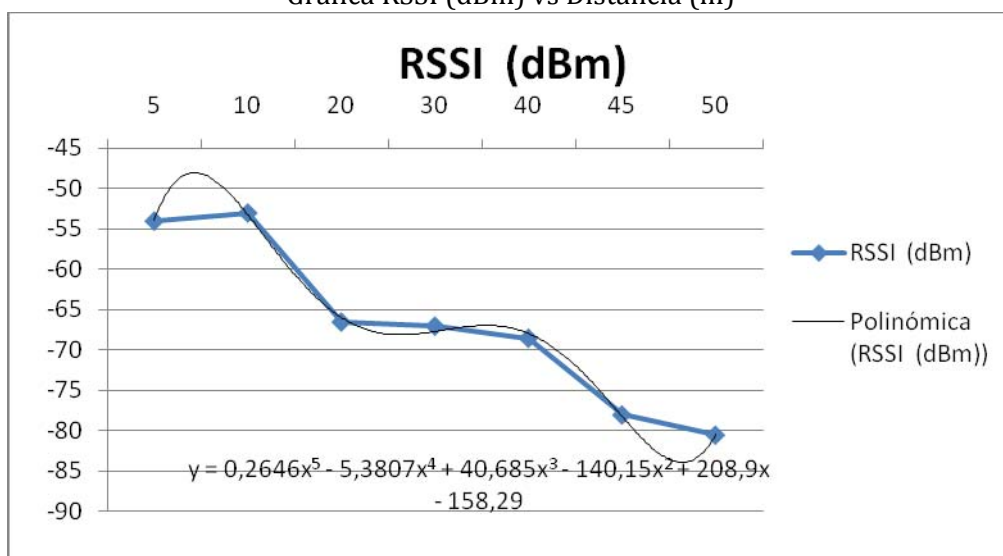


POTENCIA DE X-BEE ROUTER = MÁXIMA

POWER LEVEL (PL=4) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación Min	Máx.	promedio	variación Min	Máx.	promedio
5	30	0	100	58	62	60	-53	-55	-54
10	30	0	100	58	60	59	-52	-54	-53
20	30	0	100	58	60	59	-63	-70	-66,5
30	30	0	100	53	59	56	-64	-70	-67
40	30	0	100	53	57	55	-65	-72	-68,5
45	30	0	100	53	57	55	-76	-80	-78
50	30	0	100	53	57	55	-78,0	-83,0	-80,5

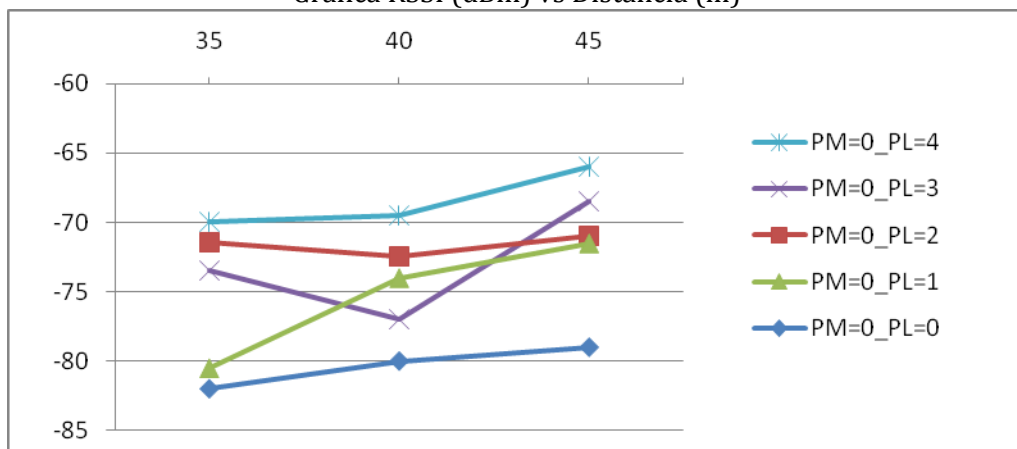
Grafica RSSI (dBm) vs Distancia (m)



RSSI que entrega, a distintas distancias y configuraciones de potencia, el X-Bee ZNET 2.5 (router/end device) al X-Bee ZNET 2.5 (coordinador)

DISTANCIA (metros)	RSSI dBm				
	PM=0_PL=0	PM=0_PL=1	PM=0_PL=2	PM=0_PL=3	PM=0_PL=4
35	-82	-80,5	-71,5	-73,5	-70
40	-80	-74	-72,5	-77	-69,5
45	-79	-71,5	-71	-68,5	-66

Grafica RSSI (dBm) vs Distancia (m)

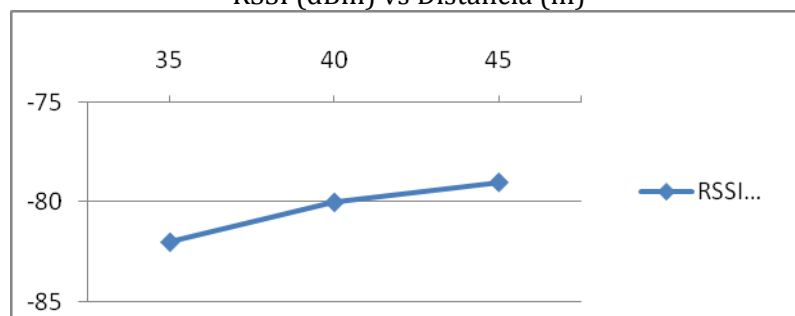


POTENCIA DE XBEE ROUTER = MÍNIMA

POWER LEVEL (PL=0) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación		promedio	variación		promedio
				Min	Max		Min	Max	
35	30	0	100	53	58	55,5	-77	-87	-82
40	29	1	96,67	53	58	55,5	-78	-82	-80
45	30	0	100	53	58	55,5	-78	-80	-79

RSSI (dBm) vs Distancia (m)

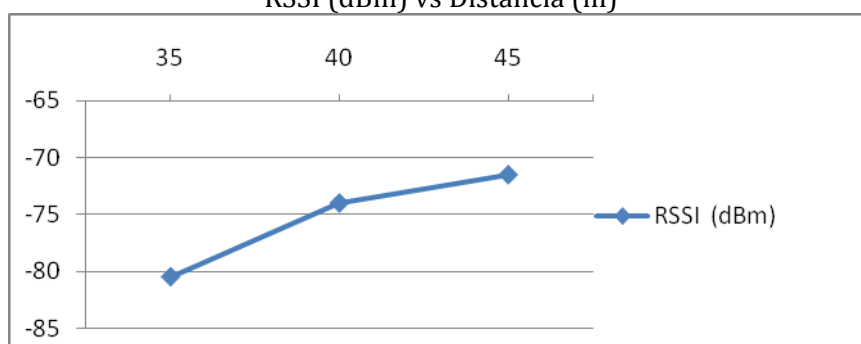


POTENCIA DE XBEE ROUTER = BAJA

POWER LEVEL (PL=1) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación Min	Max	promedio	variación Min	Max	promedio
35	30	0	100	53	58	55,5	-74	-87	-80,5
40	30	0	100,00	53	58	55,5	-72	-76	-74
45	30	0	100,00	53	58	55,5	-71	-72	-71,5

RSSI (dBm) vs Distancia (m)

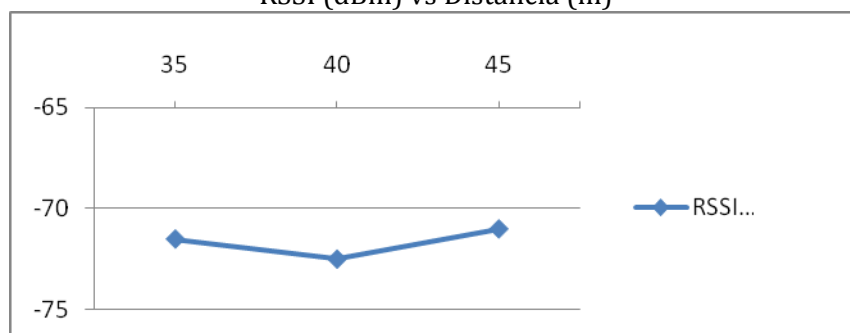


POTENCIA DE XBEE ROUTER = MEDIA

POWER LEVEL (PL=2) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación Min	Max	promedio	variación Min	Max	promedio
35	30	0	100	53	57	55	-70	-73	-71,5
40	30	0	100	53	57	55	-70	-75	-72,5
45	30	0	100	53	57	55	-70	-72	-71

RSSI (dBm) vs Distancia (m)

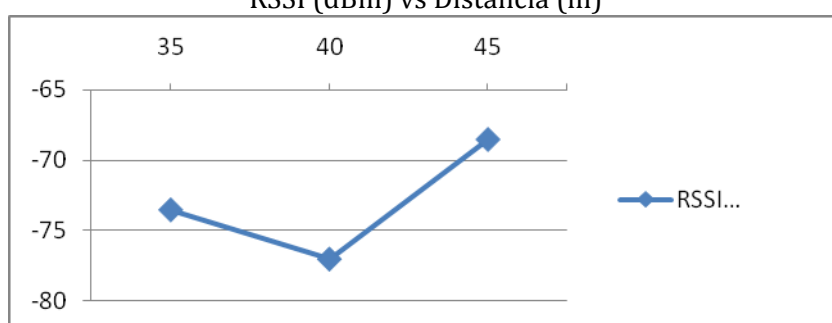


POTENCIA DE XBEE ROUTER = ALTA

POWER LEVEL (PL=3) Y POWER MODE (PM=0)

DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación		promedio	variación		promedio
				Min	Max		Min	Max	
35	30	0	100	50	58	54	-70	-77	-73,5
40	30	0	100	50	58	54	-74	-80	-77
45	30	0	100	50	58	54	-68	-69	-68,5

RSSI (dBm) vs Distancia (m)

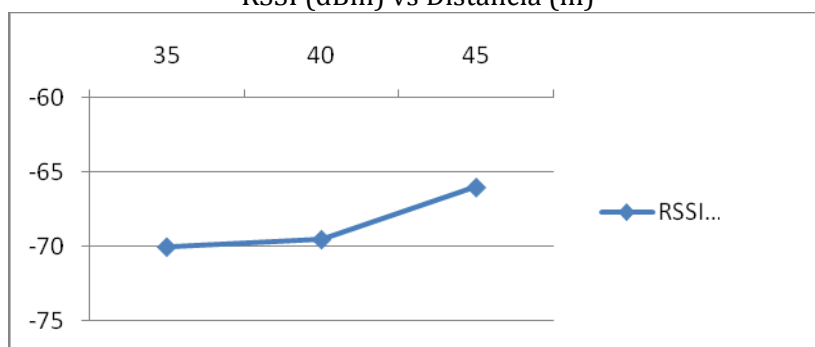


POTENCIA DE XBEE ROUTER = MÁXIMA

POWER LEVEL (PL=4) Y POWER MODE (PM=0)

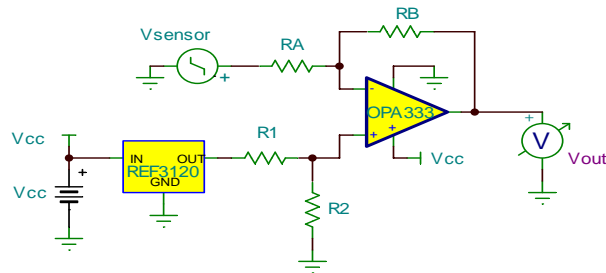
DISTANCIA (metros)	Tramas recibidas	Tramas perdidas	% tramas recibidas	Corriente (mA)			RSSI (dBm)		
				variación		promedio	variación		promedio
				Min	Max		Min	Max	
35	30	0	100	50	58	54	-67	-73	-70
40	30	0	100	50	58	54	-66	-73	-69,5
45	30	0	100	50	58	54	-65	-67	-66

RSSI (dBm) vs Distancia (m)

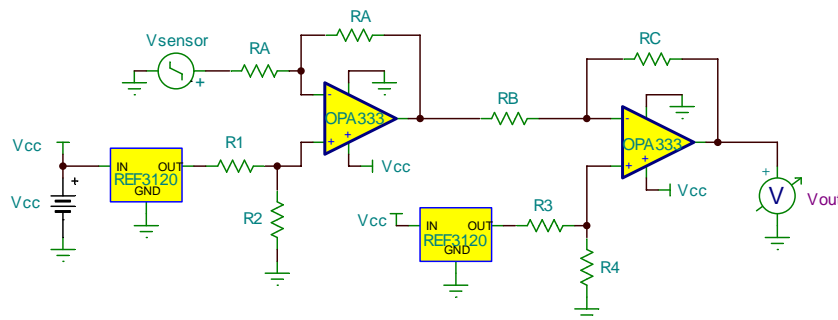


ANEXO C. SIMULACIONES

Para las simulaciones realizadas de los diseños de las etapas de acondicionamiento de señal se tenían dos esquemas, una configuración inversora y una doble configuración inversora como se muestra en las figuras que siguen.



Etapa de acondicionamiento de señal implementada con una configuración inversora modificada



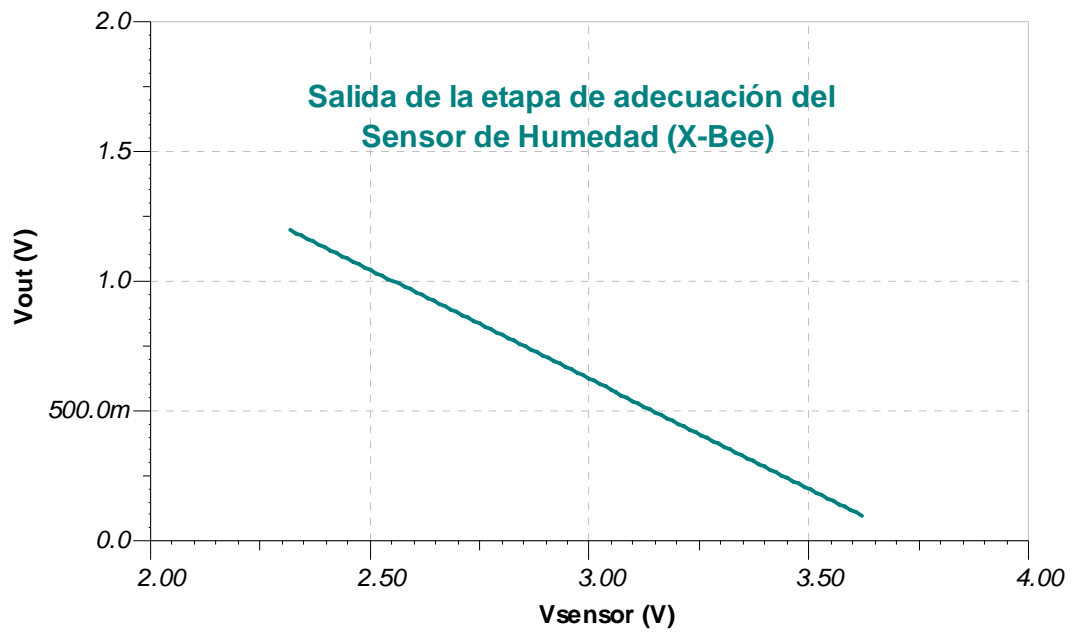
Etapa de acondicionamiento de señal implementada con doble configuración inversora modificada

Los valores de las resistencias para cada adecuación de cada uno de los sensores y cada plataforma se muestra en la siguiente tabla.

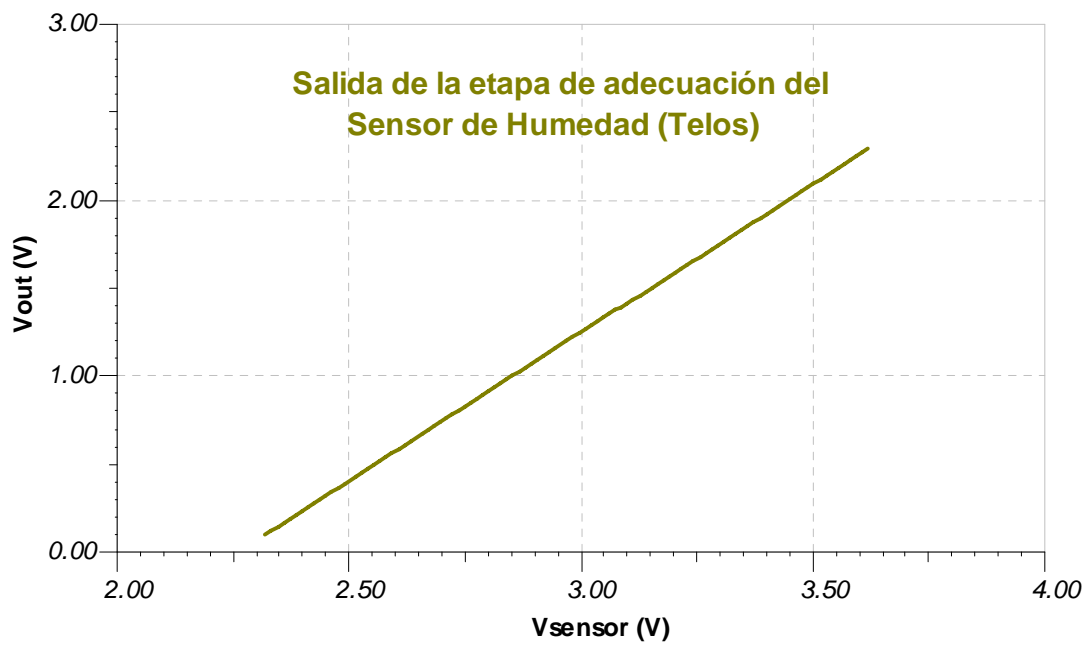
Valor de las resistencias en KOhm								
R	DOS ETAPAS			UNA ETAPA				
	Humedad	Temperatura		Humedad	Intensidad Luminosa		NH3 - CO	
	Telosb	X-Bee	Telosb	X-Bee	X-Bee	Telosb	X-Bee	Telosb
R1	11	98,2	141	43,7	125,5	94,9	74,9	13,7
R2	140	77	100,1	222,2	25,6	22,2	11	90,5
RA	20	84,5	110	76,8	30,5	22,2	10,2	12
RB	84,5	25,6	13,8	64,9	74,9	110,1	149,4	350
RC	142,2	149,2	161,3	--	--	--	--	--
R3	112	142,2	100,3	--	--	--	--	--
R4	100	26,5	13,8	--	--	--	--	--

Valores de las resistencias de las etapas de adecuación para todos los sensores

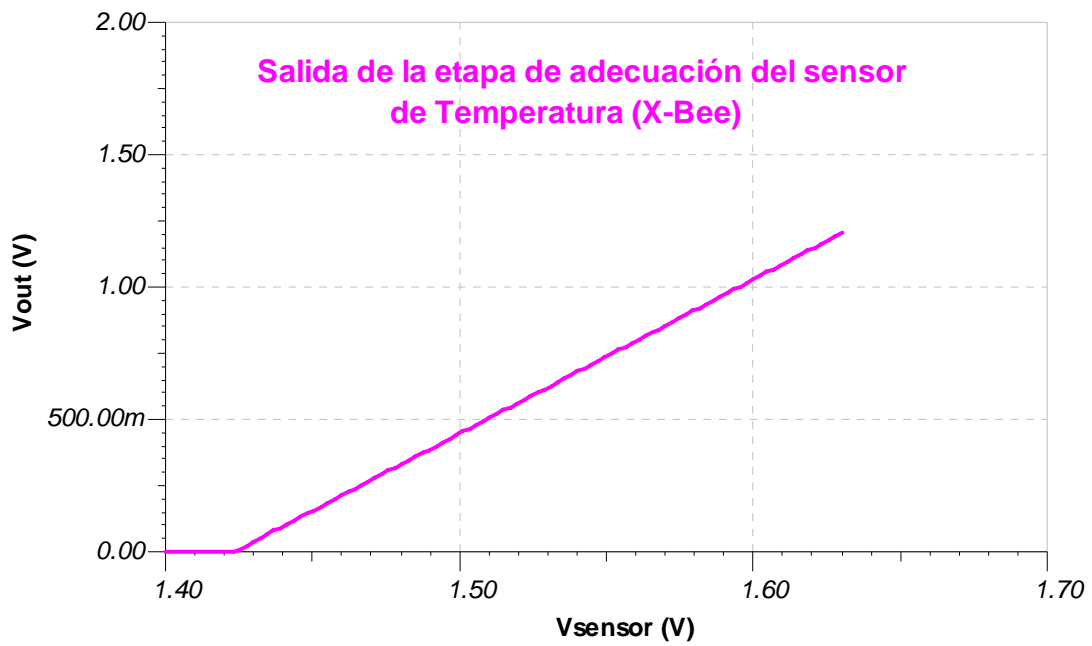
ADECUACIÓN SENSOR DE HUMEDAD (X-Bee)



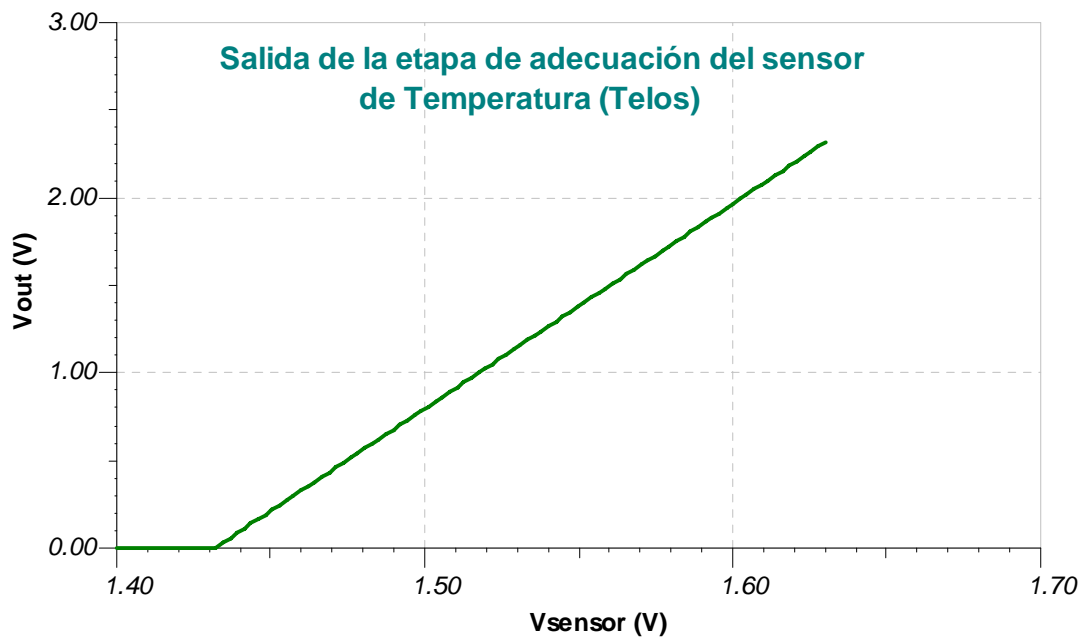
ADECUACIÓN SENSOR DE HUMEDAD (Telos)



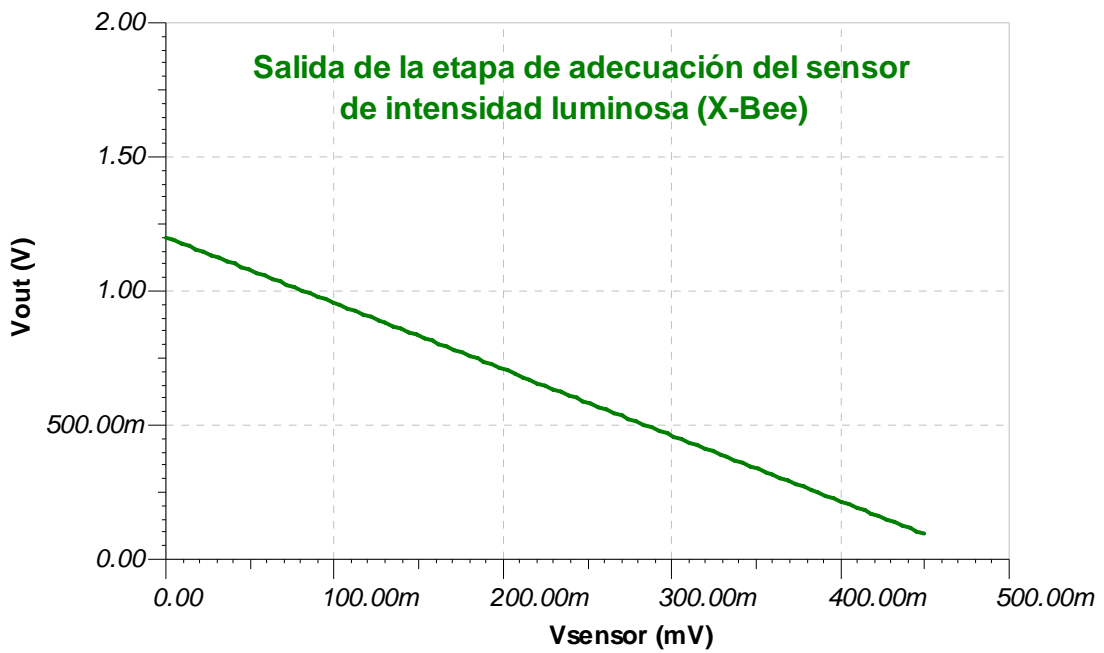
ADECUACIÓN SENSOR DE TEMPERATURA (X-Bee)



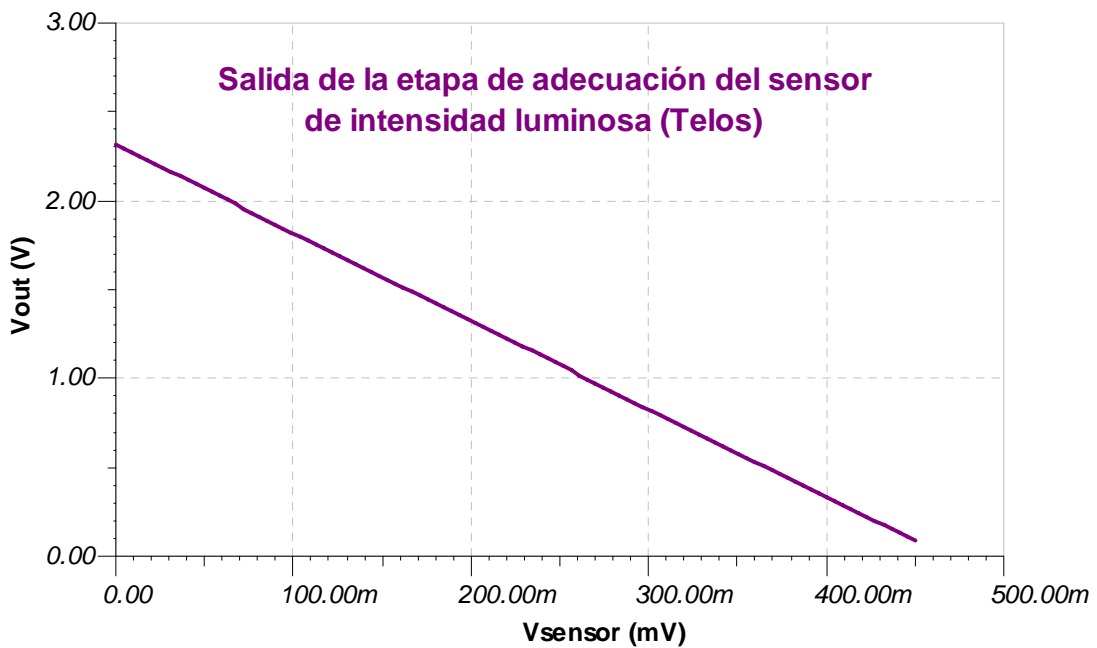
ADECUACIÓN SENSOR DE TEMPERATURA (Telos)



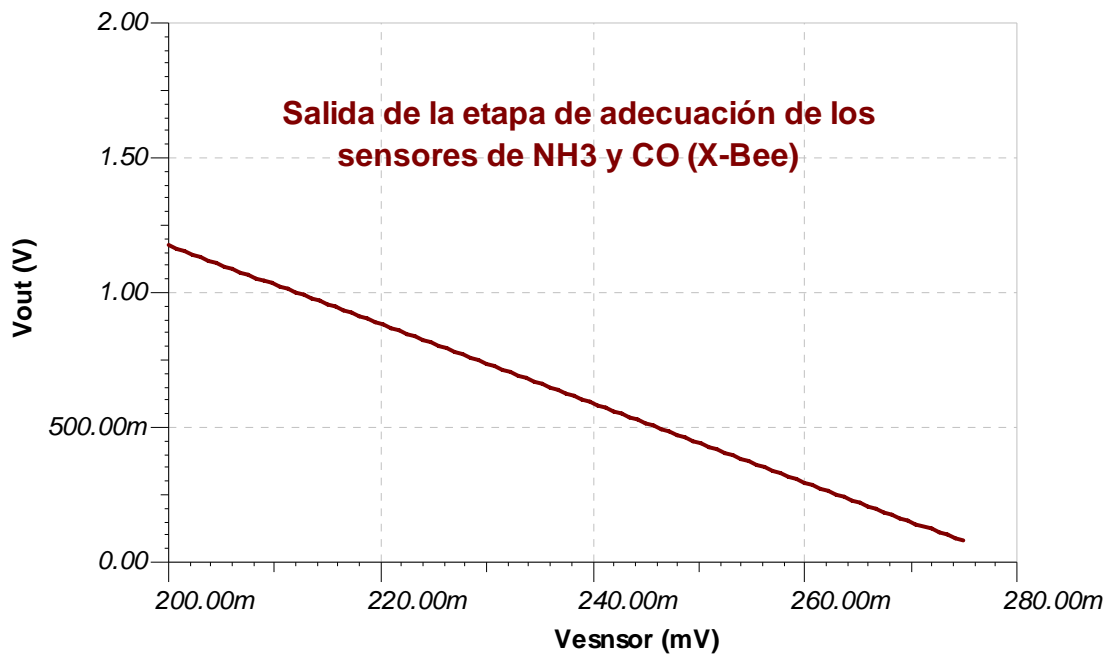
ADECUACIÓN SENSOR DE INTENSIDAD LUMINOSA (X-Bee)



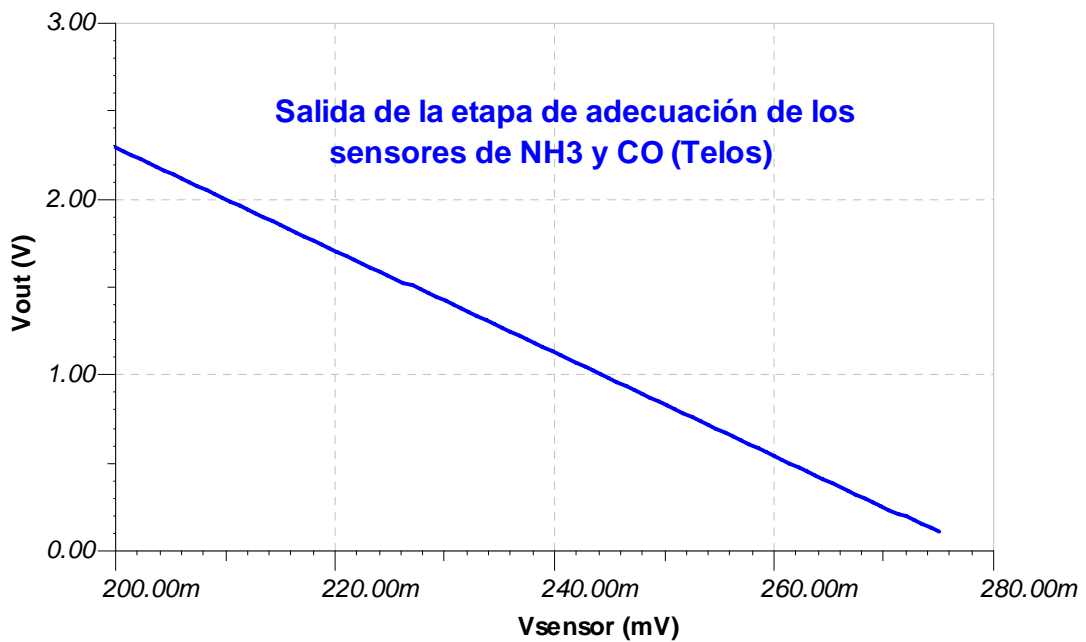
ADECUACIÓN SENSOR DE INTENSIDAD LUMINOSA (Telos)



ADECUACIÓN SENSORES DE NH3 Y CO (X-Bee)

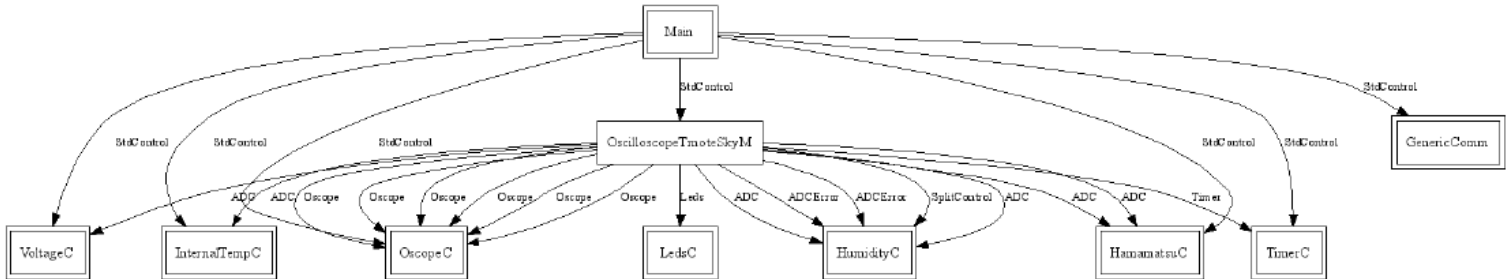


ADECUACIÓN SENSORES DE NH3 Y CO (Telos)



ANEXO D. CODIGOS JAVA Y NESC

D 1 programa OscilloscopeTmoteSky2 (NESC)



D 1.1 OscilloscopeTmoteSky2.nc

```
configuration OscilloscopeTmoteSky { }
implementation
{
```

```
  components Main
    , OscilloscopeTmoteSkyM as OscilloscopeM
    , TimerC
    , LedsC
    , HumidityC
    , SensoresC
    , InternalTempC
    , VoltageC
    , OscopeC
    , GenericComm as Comm
  ;
  components DelugeC;
```

```
  Main.StdControl -> TimerC;
  Main.StdControl -> Comm;
  Main.StdControl -> OscopeC;
  Main.StdControl -> SensoresC;
  Main.StdControl -> InternalTempC;
  Main.StdControl -> VoltageC;
  Main.StdControl -> OscilloscopeM;
```

```
  OscilloscopeM.Timer -> TimerC.Timer[unique("Timer")];
  OscilloscopeM.Leds -> LedsC;
  OscilloscopeM.HumidityControl -> HumidityC;
  OscilloscopeM.Humidity -> HumidityC.Humidity;
  OscilloscopeM.Temperature -> HumidityC.Temperature;
  OscilloscopeM.HUM -> SensoresC.HUM;
  OscilloscopeM.TEMP -> SensoresC.TEMP;
  OscilloscopeM.LUZ -> SensoresC.LUZ;
  OscilloscopeM.NH3 -> SensoresC.NH3;
  OscilloscopeM.CO -> SensoresC.CO;
  OscilloscopeM.VIENTO -> SensoresC.VIENTO;
  OscilloscopeM.InternalTemperature -> InternalTempC;
```

```
OscilloscopeM.InternalVoltage -> VoltageC;
OscilloscopeM.HumidityError -> HumidityC.HumidityError;
OscilloscopeM.TemperatureError -> HumidityC.TemperatureError;
```

```
//canal 0 humedad, 1 temperatura, 2 intensidad luminosa, 3 no se muestra, 4 nh3, 5 co, 6 velocidad del viento.
```

```
OscilloscopeM.OHUM -> OscopeC.Oscope[0];
OscilloscopeM.OTEMP -> OscopeC.Oscope[1];
OscilloscopeM.OLUZ -> OscopeC.Oscope[2];
OscilloscopeM.ONH3 -> OscopeC.Oscope[4];
OscilloscopeM.OCO -> OscopeC.Oscope[5];
OscilloscopeM.OVIENTO -> OscopeC.Oscope[6];
}
```

D 1.2 OscilloscopeTmoteSkyM.nc

```
module OscilloscopeTmoteSkyM
{
    provides interface StdControl;
    uses {
        interface Timer;
        interface Leds;

        interface SplitControl as HumidityControl;

        interface ADC as Humidity;
        interface ADC as Temperature;
        interface ADC as HUM;
        interface ADC as TEMP;
        interface ADC as LUZ;
        interface ADC as NH3;
        interface ADC as CO;
        interface ADC as VIENTO;
        interface ADC as InternalTemperature;
        interface ADC as InternalVoltage;

        interface Oscope as OHUM;
        interface Oscope as OTEMP;
        interface Oscope as OLUZ;
        interface Oscope as ONH3;
        interface Oscope as OCO;
        interface Oscope as OVIENTO;

        interface ADCError as HumidityError;
        interface ADCError as TemperatureError;
    }
}
Implementation {
    enum {
        OSCOPE_DELAY = 13, };
    enum {
        HUMIDITY,
```

```

TEMPERATURE,
HUMSENSOR,
TEMPSENSOR,
LUZSENSOR,
NH3SENSOR,
COSENSOR,
VIENTOSENSOR,
ITEMP,
IVOLT };

```

```

norace uint16_t humidity, temperature, hum, temp, luz, nh3, co, viento, itemp, ivolt;
norace int state;

```

```

// inicializar el componente
command result_t StdControl.init() {
    call Leds.init();
    call Leds.set(0);
    state = HUMIDITY;
    call HumidityControl.init();
    return SUCCESS; }

```

```

event result_t HumidityControl.initDone() {
    return SUCCESS; }

```

```

//comienza el control del sensor.
//@return Always returns SUCCESS.

```

```

command result_t StdControl.start() {
    call HumidityControl.start();
    return SUCCESS; }

```

```

event result_t HumidityControl.startDone() {
    call HumidityError.enable();
    call TemperatureError.enable();
    call Timer.start( TIMER_ONE_SHOT, 250 );
    return SUCCESS; }

```

```

//detiene el control del sensor.
//@return Always returns SUCCESS.

```

```

command result_t StdControl.stop() {
    call HumidityControl.stop();
    call Timer.stop();
    return SUCCESS; }

```

```

event result_t HumidityControl.stopDone() {
    call HumidityError.disable();
    call TemperatureError.disable();
    return SUCCESS; }

```

```

event result_t Timer.fired() {
    // establece un tiempo muerto en caso de errores
    call Timer.start(TIMER_ONE_SHOT, 100);
    switch(state) {
    case HUMIDITY:

```

```

    call Humidity.getData();
    break;
case TEMPERATURE:
    call Temperature.getData();
    break;
case HUMSENSOR:
    call HUM.getData();
    break;
case TEMPSENSOR:
    call TEMP.getData();
    break;
case LUZSENSOR:
    call LUZ.getData();
    break;
case NH3SENSOR:
    call NH3.getData();
    break;
case COSENSOR:
    call CO.getData();
    break;
case VIENTOSENSOR:
    call VIENTO.getData();
    break;
case ITEMP:
    call InternalTemperature.getData();
    break;
case IVOLT:
    call InternalVoltage.getData();
    break;
default:
    call Timer.start(TIMER_ONE_SHOT, 10);
}
return SUCCESS; }

task void putHUM() {
    call OHUM.put(hum);
    call Timer.start(TIMER_ONE_SHOT, OSCOPE_DELAY); }
task void putTEMP() {
    call OTEMP.put(temp);
    call Timer.start(TIMER_ONE_SHOT, OSCOPE_DELAY); }
task void putLUZ() {
    call OLUZ.put(luz);
    call Timer.start(TIMER_ONE_SHOT, OSCOPE_DELAY); }
task void putNH3() {
    call ONH3.put(nh3);
    call Timer.start(TIMER_ONE_SHOT, OSCOPE_DELAY); }
task void putCO() {
    call OCO.put(co);
    call Timer.start(TIMER_ONE_SHOT, OSCOPE_DELAY); }
task void putVIENTO() {
    call OVIENTO.put(viento);
    call Timer.start(TIMER_ONE_SHOT, OSCOPE_DELAY); }

async event result_t Humidity.dataReady(uint16_t data) {
    humidity = data;

```

```

state = TEMPERATURE;
return SUCCESS; }

event result_t HumidityError.error(uint8_t token) {
    humidity = 0;
    state = TEMPERATURE;
    return SUCCESS; }

async event result_t Temperature.dataReady(uint16_t data) {
    temperature = data;
    state = HUMSENSOR;
    return SUCCESS; }

event result_t TemperatureError.error(uint8_t token) {
    temperature = 0;
    state = HUMSENSOR;
    return SUCCESS; }

async event result_t HUM.dataReady(uint16_t data) {
    hum = data;
    post putHUM();
    state = TEMPSENSOR;
    return SUCCESS; }

async event result_t TEMP.dataReady(uint16_t data) {
    temp = data;
    post putTEMP();
    state = LUZSENSOR;
    return SUCCESS; }

async event result_t LUZ.dataReady(uint16_t data) {
    luz = data;
    post putLUZ();
    state = NH3SENSOR;
    return SUCCESS; }

async event result_t NH3.dataReady(uint16_t data) {
    nh3 = data;
    post putNH3();
    state = COSENSOR;
    return SUCCESS; }

async event result_t CO.dataReady(uint16_t data) {
    co = data;
    post putCO();
    state = VIENTOSENSOR;
    return SUCCESS; }

async event result_t VIENTO.dataReady(uint16_t data) {
    viento = data;
    post putVIENTO();
    state = ITEMP;
    return SUCCESS; }

async event result_t InternalTemperature.dataReady(uint16_t data) {

```

```

    itemp = data;
    state = IVOLT;
    return SUCCESS; }

async event result_t InternalVoltage.dataReady(uint16_t data) {
    ivolt = data;
    state = HUMIDITY;
    return SUCCESS; }
}

```

D 2 programa de visualización Oscopio (java)

D 2.1 ScopeDriver

```

package com.moteiv.oscope;
import net.tinyos.util.*;
import net.tinyos.message.*;
import net.tinyos.oscope.OscopeMsg;
import net.tinyos.oscope.OscopeResetMsg;
import java.io.*;
import java.util.Enumeration;
import java.util.Hashtable;
import java.util.Date;
import javax.swing.*;
import java.awt.geom.*;

public class ScopeDriver implements MessageListener {
    MotIF mote;
    GraphPanel panel;
    static int NUM_READINGS = 10;
    private static final boolean VERBOSE = false;

    Hashtable t = new Hashtable();

    public ScopeDriver(MotIF _mote, GraphPanel _panel) {
        mote = _mote;
        panel = _panel;
        mote.registerListener(new OscopeMsg(), this); }

    public void messageReceived(int dest_addr, Message msg) {
        if (msg instanceof OscopeMsg) {
            oscopeReceived( dest_addr, (OscopeMsg)msg); }
        else {
            throw new RuntimeException("messageReceived: Got bad message type: "+msg); }
    }

    public String makeLegendString(int motelD, int channelID) {
        if (channelID==0) {
            return "Mote "+motelD+" Humedad ";
        } else if (channelID==1) {
            return "Mote "+motelD+" Temperatura ";
        } else if (channelID==2) {
            return "Mote "+motelD+" luminosa ";
        } else if (channelID==4) {
            return "Mote "+motelD+" NH3 ";
        }
    }
}

```

```

} else if (channelID==5) {
    return "Mote "+motelID+" CO ";
} else if (channelID==6) {
    return "Mote "+motelID+" VIENTO ";
}
else {
    return "Mote "+motelID+" Chan"+channelID;  }
}
public Channel findChannel(int motelID, int channelID) {
    boolean foundPlot = false;
    int i;
    String legend = makeLegendString(motelID, channelID);
    Channel c = (Channel)t.get(legend);
    if (c == null) {
        System.out.println("Creating Channel for "+legend);
        c = new Channel();
        c.setGraphPanel(panel);
        c.setDataLegend(legend);
        c.setActive(true);
        if (panel.getNumChannels() == 0) {
            c.setMaster(true);        }
        t.put(legend,c);
        panel.addChannel(c);
    }
    return c;  }

public void oscscopeReceived(int dest_addr, OscscopeMsg omsg) {
    boolean foundPlot = false;
    int motelID, packetNum, channelID, i;
    Channel channel;

    motelID = omsg.get_sourceMotelID();
    channelID = omsg.get_channel();
    packetNum = omsg.get_lastSampleNumber();
    channel = findChannel(motelID, channelID);
    if (channel.getLastPoint() == -1) {
        channel.setLastPoint(packetNum); }

    int packetLoss = packetNum - channel.getLastPoint() - NUM_READINGS;

    for(int j = 0; j < packetLoss; j++) {
        for(i = 0; i < NUM_READINGS; i++)
            channel.addPoint(null);  }
    channel.setLastPoint(packetNum);

    int limit = omsg.numElements_data();
    for (i = 0; i < limit; i++) {
        Point2D newPoint;
        int val = omsg.getElement_data(i);

        if (VERBOSE)
            System.err.println("val: "+val+" (0x"+Integer.toHexString(val)+")");
        newPoint = new Point2D.Double( ((double)(packetNum+i)), (double)val );

        channel.addPoint( newPoint);  }

```

```

}
public void clear_data() {
    // Reset all motes
    try {
        System.err.println("SENDING OscopereResetmsg\n");
        mote.send(MoteIF.TOS_BCAST_ADDR, new OscopereResetMsg());
    } catch (IOException ioe) {
        System.err.println("Warning: Got IOException sending reset message: "+ioe);
        ioe.printStackTrace(); }
}

```

D 2.2 GraphPanel.java

```

package com.moteiv.oscope;
import java.util.*;
import java.awt.*;
import java.applet.Applet;
import java.awt.event.*;
import javax.swing.*;
import javax.swing.event.*;
import java.awt.geom.*;
import java.io.PrintWriter;
import java.io.FileOutputStream;
import java.io.File;
import java.io.FileWriter;
import java.io.IOException;
import java.util.Date;
import java.text.DateFormat;
import java.lang.Object;
import java.text.Format;

public class GraphPanel extends JPanel implements MouseListener, MouseMotionListener {

    private static final boolean LOG = false;
    private static final String LOG_FILENAME = "log";
    private static final double _DEFAULT_BOTTOM = 1024.0;
    private static final double _DEFAULT_TOP = 4096.0-1024.0;
    private static final int _DEFAULT_START = -100;
    private static final int _DEFAULT_END = 1000;
    private static final double X_AXIS_POSITION = 0.1;
    private static final double Y_AXIS_POSITION = 0.1;
    private double DEFAULT_BOTTOM;
    private double DEFAULT_TOP;
    private int DEFAULT_START;
    private int DEFAULT_END;
    boolean sliding = true;
    boolean legendEnabled = true;
    boolean connectPoints = true;
    boolean valueTest = false;
    int valueX, valueY;
    Channel testChannel = null;
    boolean hexAxis = false;

    public boolean isConnectPoints() {
        return connectPoints; }
}

```

```

public void setConnectPoints(boolean b) {
    connectPoints = b;
    repaint(100);

public boolean isHexAxis() {
    return hexAxis; }

public void setHexAxis(boolean newHexAxis) {
    this.hexAxis = newHexAxis;
    repaint(100); }

public boolean isSliding() {
    return sliding; }

public void setSliding(boolean _sliding) {
    sliding = _sliding;
    repaint(100); }

public boolean isLegendEnabled() {
    return legendEnabled; }

public void setLegendEnabled(boolean newLegendEnabled) {
    this.legendEnabled = newLegendEnabled;
    repaint(100); }
String xLabel;

public String getXLabel() {
    return xLabel; }

public void setXLabel(String newXLabel) {
    this.xLabel = newXLabel; }

String yLabel;

public String getYLabel() {
    return yLabel; }

public void setYLabel(String newYLabel) {
    this.yLabel = newYLabel; }

PrintWriter log_os;

double bottom, top;
int start, end;
int maximum_x = 0, minimum_x = Integer.MAX_VALUE;
Vector cutoff;
Point highlight_start, highlight_end;
.
.
.
}

```