UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL PARA EL CONTROL DE PARÁMETROS DE LA CADENA DE FRÍO EN LOS ALMACENES DE UNA EMPRESA DE LOGÍSTICA DE ALIMENTOS

REALIZADO POR *Br. De Sousa, José Antonio*

Br. García, Carlos

PROFESOR GUÍA *Torres, Wilfredo*

FECHA *08 de Octubre de 2010*

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo y el trabajo realizado en el Proyecto, ha sido impulsado por personas importantes en mi vida que me han demostrado su apoyo incondicional en todo momento y por ende, me gustaría nombrarlas con el más profundo cariño y respecto.

Les doy gracias principalmente a mis padres, Oswaldo y Olga, por el amor, aguante y sabios consejos en cada una de mis decisiones y por ser el pilar fundamental en mi educación. Ustedes son dos modelos de personas a seguir y para mí representan una gran fuente de inspiración, por eso y mucho más, es que este Trabajo Especial de Grado va dedicado a ustedes principalmente.

A mi hermana Laura, quien ha confiado en mí en todo momento y ha sabido apoyarme en los buenos y malos momentos de la vida.

No puedo dejar de hacer notar mi gratitud a mis tíos, primos y abuelos, que siempre han mostrado interés en mi persona. Estoy seguro que todos ustedes sentirán este triunfo como propio.

Quisiera dedicarle también este esfuerzo al Ing. Wilfredo Torres por ser el guía y consejero del proyecto, ya que sin sus conocimientos y dirección, no hubiera sido posible la consecución de este trabajo.

A mis amigos más cercanos, Eduardo, Hayrlin, Yeleyca, Fernando, Verónica y los no tan cercanos, con los cuales compartí muchas anécdotas inolvidables, cumpliendo siempre nuestros objetivos y disfrutando de todos nuestros logros.

Finalmente, agradezco y dedico esta labor a mi compañero de tesis José Antonio De Sousa, por contribuir siempre para poder sacar este proyecto adelante.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento...

Carlos Alberto García Cámara

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas aquellas personas e instituciones que, con su apoyo y esfuerzo, colaboraron con la exitosa realización de este trabajo de investigación:

A nuestro tutor académico, *Ing. Wilfredo Torres*

Por confiar en nosotros y brindarnos su colaboración, apoyo y orientación en todo momento para poder culminar con éxito nuestro Trabajo Especial de Grado.

A la Universidad Católica Andrés Bello

Por ser para nosotros la máxima casa de estudio, donde aprendimos y crecimos como personas, permitiendo formarnos como profesionales en la ***Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones.***

A la empresa *Axis Logística de Venezuela*

Por habernos abierto sus puertas para realizar la investigación y por hacernos sentir como parte de su equipo de trabajo durante la realización de este proyecto, en especial a:

Ing. Walter Jaramillo (Gerente General)

Yilber Martínez (Departamento de Mantenimiento)

Lizbel Castillo (Departamento de Control de Calidad)

Alias "***La Máquina***" (Operador de montacargas del almacén refrigerado)

A *Hayrlin Calzadilla* y *Yeleyca Alcalá*

Por todo su apoyo, tiempo y colaboración en el desarrollo de nuestro Trabajo

SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL PARA EL CONTROL DE PARÁMETROS DE LA CADENA DE FRÍO EN LOS ALMACENES DE UNA EMPRESA DE LOGÍSTICA DE ALIMENTOS

García Cámara, Carlos Alberto
camely2k@gmail.com

De Sousa De Sousa, José Antonio
joseantonio0110@gmail.com

RESUMEN

En busca de dar solución al proceso manual de recolección de datos que se puede presentar en la gestión de la cadena de frío de algunas empresas de logística de alimentos, se plantea como alternativa, un sistema de monitoreo en tiempo real basado en redes inalámbricas de sensores. Para lograr esta meta, se propuso un proyecto cuyos objetivos son: recopilar la información que resulta de interés para la comprensión de los retos que plantea la cadena de frío, determinar los procesos y parámetros para garantizar una gestión de alimentos de calidad, evaluar equipos para ser utilizados en el desarrollo del Trabajo Especial de Grado, diseñar la red que sirva como prototipo de la solución, realizar pruebas a escala del diseño planteado, evaluar y realizar los ajustes respectivos, para finalmente elaborar la documentación necesaria para determinar un plan de implementación. Dichos objetivos fueron alcanzados con la aplicación de una metodología que consta de seis fases, en donde se realizó primeramente el levantamiento de la información *in situ* de las necesidades del caso de estudio. Acto seguido, se realizaron pruebas con los sensores para tener conocimiento de su funcionamiento y luego de tener el diseño de red, se ejecutaron las pruebas de campo que ayudaron al análisis general del proyecto. Como resultado de lo antes descrito, se logró diseñar una red de captura de datos que automatiza el registro de los parámetros necesarios para la conservación de los alimentos a bajas temperaturas. La conclusión principal de este proyecto es que resulta factible monitorear la gestión de la cadena de frío durante el proceso de distribución y almacenamiento de alimentos, a través de la utilización de tecnologías especializadas que permiten la comunicación e integración de todo el sistema.

Palabras clave: Cadena de frío, logística de alimentos, redes inalámbricas de sensores, conservación de alimentos a bajas temperaturas.

DEDICATORIA

Este Trabajo Especial de Grado va dedicado:

Primeramente a Dios, por darme la vida e iluminar siempre mi camino, dándome salud, fuerza, una excelente familia y todas sus bendiciones.

A mis padres y mi hermano, Antonio, María José y Juan José, por estar siempre a mi lado, brindándome su ejemplo, su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y las fuerzas para culminar con éxito cada una de mis metas. Este trabajo va especialmente para ustedes.

A mis abuelos y tíos, por estar siempre pendientes, brindándome su apoyo.

A Carlos, mi compañero, porque aunque el viento soplara en contra, en las buenas y en las no tan buenas, siempre salimos adelante para lograr esta meta común. Nada mejor que trabajar con un buen amigo.

A los buenos amigos, Yeleyca, Hayrlin, Fernando, Luis, Amarayma y todos aquellos que dentro o fuera de la universidad nos animaron a seguir adelante y nos dieron su ayuda y su mano amiga.

José Antonio De Sousa De Sousa

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN i

DEDICATORIA: *José Antonio De Sousa De Sousa* ii

DEDICATORIA: *Carlos Alberto García Cámara* iii

AGRADECIMIENTOS iv

ÍNDICE GENERAL v

ÍNDICE FIGURAS x

ÍNDICE DE TABLAS xii

ÍNDICE DE GRÁFICOS xiv

INTRODUCCIÓN xv

Capítulo I. Planteamiento del problema 1

I.1. Objetivos del proyecto 2

I.1.1. Objetivo general 2

I.1.2. Objetivos específicos 2

I.2. Justificación para la elaboración del proyecto 2

I.3. Alcance y limitaciones 3

I.3.1. Alcance 3

I.3.2. Limitaciones 3

Capítulo II. Marco referencial 4

II.1. Gestión de la Cadena de Frío 4

II.1.1. Comprensión de la cadena de frío 4

II.1.2. Evolución de la gestión de la cadena de frío 5

II.1.3. Retos de la cadena de frío 6

II.1.4. Instalaciones y elementos necesarios en la cadena de frío 7

II.1.4.1. Almacenes refrigerados 7

II.1.4.2. Vehículos refrigerados 8

II.1.4.3. *Containers* refrigerados 8

II.1.5. Monitores de temperatura 9

II.1.6. Consideraciones adicionales en la gestión de la cadena de frío 10

II.1.6.1. Características de los productos 11

II.1.6.1.1. Temperatura 11

II.1.6.1.2. Tiempo 12

II.1.6.1.3. Almacenamiento acorde a las frutas y vegetales 13

II.1.6.2. Guías y regulaciones asociadas a la cadena de frío 13

II.1.7. Antecedentes de aplicaciones para la gestión de la cadena de frío en Venezuela y el mundo 14

II.2. Redes inalámbricas de sensores 16

II.2.1. Arquitectura del sistema 17

II.2.1.1. Nodo inalámbrico 18

II.2.1.1.1. Unidad de energía 19

II.2.1.1.2. Unidad de adquisición de datos 21

II.2.1.1.3. Unidad de procesamiento 22

II.2.1.1.4. Unidad de comunicación 23

II.2.1.2. Puerta de enlace (*Gateway*) 25

II.2.1.3. Estación base 25

II.2.2. Topologías de red 25

II.2.2.1. Topología en estrella 26

II.2.2.2. Topología en malla 27

II.2.2.3. Topología híbrida (Malla - Estrella) 27
II.2.3. Protocolos 28
II.2.3.1. Protocolos MAC 29
II.2.3.2. Protocolos en capa de red 30
II.2.3.3. Estandarización 31
II.2.3.3.1. IEEE 802.15.4 31
II.2.3.3.2. ZIGBEE 32
II.2.3.3.3. Compatibilidad entre ZIGBEE y Wi-Fi 33
II.2.4. Sistema Operativo 34
II.2.5. Aplicaciones de Redes Inalámbricas de Sensores 35
Capítulo III. Marco metodológico 36
III.1. Tipo y diseño de la investigación 36
III.2. Metodología aplicada 36
Capítulo IV. Desarrollo 38
IV.1. Investigación documental. Estudio del problema 38
IV.2. Comprensión de las necesidades del caso de estudio 39
IV.3. Estudio de la solución 40
IV.3.1. Dispositivos utilizados 42
IV.3.2. Pruebas preliminares con dispositivos 42
IV.3.2.1. Consumo de energía 42
IV.3.2.2. Programación de los nodos 43
IV.3.2.3. Plataforma para la visualización de datos 44
IV.3.2.4. Estructura de los mensajes 45
IV.3.3. Comparación de instrumentos de medición de temperatura 45

IV.4. Diseño de red 47

IV.4.1. Consideraciones de diseño 47

IV.4.1.1. Topología a emplear 48

IV.4.1.2. Niveles de potencia 48

IV.4.2. Parámetros a medir 49

IV.4.3. Tiempo de muestreo 50

IV.5. Evaluación y ajustes 50

IV.6. Plan de implementación y manual de mantenimiento 51

Capítulo V. Resultados 52

V.1. Investigación documental. Estudio del problema. 52

V.2. Comprensión de las necesidades del caso de estudio 52

V.2.1. Instalaciones con las que cuenta la empresa para la gestión de la cadena de frío 53

V.2.1.1. Cavas o cuartos fríos 54

V.2.1.2. Monitores de temperatura 56

V.2.2. Procesos, estándares y parámetros manejados por la empresa del caso de estudio 57

V.2.3. Situación actual de los procesos en la empresa del caso de estudio 59

V.2.3.1. Estudio del comportamiento de la temperatura en almacenes 61

V.2.3.2. Estudio de radiofrecuencia en planta 64

V.3. Estudio previo de la solución 67

V.3.1. Estructura de mensajes 67

V.3.2. Comparación de instrumentos de medición de temperatura 69

V.4. Diseño de red 70

V.4.1. Ubicación de sensores y cantidades propuestas por cavas 70

V.5. Evaluación y ajustes 71

V.5.1. Ejecución de pruebas de campo 71

V.5.1.1. Parámetros de interés 76

V.5.1.1.1. Temperatura 76

V.5.1.1.2. Humedad 76

V.5.1.1.3. Luminosidad 77

V.5.1.1.4. Voltaje de alimentación 78

V.5.2. Ajustes sobre el diseño propuesto 78

V.6. Requerimientos para la elaboración de la herramienta de visualización 79

Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones 82

Bibliografía 85

Anexo A. Características técnicas del kit de desarrollo "*MICAZ Professional Kit – 2.4 GHz*" 88

Anexo B. Rendimiento de baterías de Litio vs. Alcalinas en condiciones de frío 98

Anexo C. Descripción de mensajes TINYOS 104

Anexo D. Fórmulas de conversión de medidas 109

Anexo E. Monitor de temperatura utilizado 111

Apéndice A. Gráficas de comparación de instrumentos de medición de temperatura 112

Apéndice B. Plan de implementación de la solución propuesta 115

Apéndice C. Manual de mantenimiento de la Red Inalámbrica de Sensores 118

Apéndice D. Selección de equipos para plan de implementación 119

Apéndice E. Resultados del gradiente de temperatura 123

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Arquitectura de una red inalámbrica de sensores.....18

Figura 2: Arquitectura de un nodo inalámbrico.....18

Figura 3: Estados de consumo de energía de un nodo WSN.....21

Figura 4: Topologías de una red inalámbrica de sensores.....28

Figura 5: Canales IEEE 802.15.4 (ZIGBEE) y IEEE 802.11b (Wi-Fi).....34

Figura 6: Diagrama de trabajo de la metodología utilizada.....36

Figura 7: Disposición del conjunto de dispositivos en las áreas del almacén 47

Figura 8: Esquema del almacén refrigerado de la empresa de estudio.....54

Figura 9: Rango de temperaturas de operación por cavas 57

Figura 10: Arquitectura del sistema de monitoreo propuesto.....60

Figura 11: Pruebas para el estudio del gradiente de temperatura 62

Figura 12: Gradiente de temperatura 63

Figura 13: Punto de Acceso N° 1 65

Figura 14: Punto de Acceso N° 2 65

Figura 15: Lectura a los alrededores de las cavas 66

Figura 16: Perturbación percibida dentro de las cavas, generada por los puntos de acceso número 1 y 2 respectivamente.....66

Figura 17: Canales ZIGBEE Vs. Wi-Fi.....67

Figura 18: Disposición del conjunto de instrumentos en el punto de control N° 6.....69

Figura 19: Disposición del conjunto de instrumentos en el punto de control N° 5.....70

Figura 20: Ubicación de sensores por cavas.....71

Figura 21: Topología de nodos en cava de congelados 72

Figura 22: Nodo 7 apagado 73

Figura 23: Nodo 6596 apagado 73

Figura 24: Nodo 7 apagado y nodo 6608 en cava de refrigerados 74

Figura 25: Nodos en cava de refrigerados 74

Figura 26: Nodos 6 y 7 con potencia de -7 dBm 75

Figura 27: Nodo 6618 apagado y Nodos 6 y 7 con potencia de -7 dBm 75

Figura 28: Valor promedio de humedad por zonas 77

Figura 29: Topología deseada para la red WSN desplegada en almacenes 79

Figura 30: Estructura de los datos útiles del mensaje 105

Figura 31: *Gateway* ETHERNET Modelo MIB600 120

Figura 32: Unidad de RF. *Mote* IRIS, modelo XM2110CA 121

Figura 33: Tarjeta de sensores Modelo MTS400CA 122

Figura 34: Primera toma en cava de congelados 123

Figura 35: Segunda toma en cava de congelados 124

Figura 36: Tercera toma de congelados 124

Figura 37: Cuarta toma de congelados 125

Figura 38: Quinta toma de congelados 126

Figura 39: Primera toma de refrigerados 127

Figura 40: Segunda toma de refrigerados 127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Soluciones para el monitoreo de temperaturas en la gestión de la cadena de frío 10

Tabla 2: Principales entes reguladores adoptados para eventos de seguridad alimentaria 14

Tabla 3: Frecuencias disponibles para aplicaciones ISM. 24

Tabla 4: Descripción de la metodología utilizada 37

Tabla 5: Características de dispositivos WSN CROSSBOW Vs. XBEE 40

Tabla 6: Información de trama 68

Tabla 7: Caída del voltaje de alimentación tras 12 horas de prueba 78

Tabla 8: Valores límites para configuración de alarmas 81

Tabla 9: Campos de la estructura general del mensaje 104

Tabla 10: Campos de la cabecera TINYOS del mensaje 105

Tabla 11: Campos de la cabecera TINYOS del mensaje 106

Tabla 12: Campos de la cabecera básica del mensaje 107

Tabla 13: Número de identificación de algunas tarjetas de sensores CROSSBOW 107

Tabla 14: Campos de la estructura del mensaje de la tarjeta de sensores MTS400 108

Tabla 15: Materiales y equipos a utilizar 119

Tabla 16: Precios de los equipos a utilizar en la implementación 122

Tabla 17: Primera toma en cava de congelados 123

Tabla 18: Segunda toma en cava de congelados 123

Tabla 19: Tercera toma de congelados 124

Tabla 20: Cuarta toma de congelados 125

Tabla 21: Quinta toma de congelados 125

Tabla 22: Primera toma de refrigerados 126

Tabla 23: Segunda toma de refrigerados 127

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 1.....112

Gráfica 2: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 2.....112

Gráfica 3: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 3.....113

Gráfica 4: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 4.....113

Gráfica 5: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 5.....114

Gráfica 6: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 6.....114

INTRODUCCIÓN

El control de temperaturas es uno de los puntos más importantes para la conservación de los alimentos que consumimos y por ende, el monitoreo de dicho parámetro a lo largo de todos los procesos por lo que estos productos atraviesan desde la cosecha, el transporte, el almacenamiento hasta su destino final, es el principal objetivo y la razón de ser de lo que se conoce como cadena de frío.

La manera tradicional en que se realiza el seguimiento de la temperatura en dicha cadena, supone sistemas de monitoreo poco interactivos que ofrecen registros de datos después de la ocurrencia de eventos que resultan perjudiciales para la seguridad de los alimentos. Sin embargo, en la industria de la logística de alimentos, se utilizan herramientas que pueden acusar las interrupciones de temperatura durante el proceso de distribución o almacenamiento, pero esto no evita la pérdida de los alimentos. Ideal es que se disponga de un sistema de monitoreo que alerte a tiempo cuando existan situaciones irregulares en los almacenes que operan bajo temperatura controlada, permitiendo tomar decisiones correctivas a tiempo.

El propósito del Trabajo Especial de Grado que se presenta, es crear un sistema que permita monitorear, en tiempo real, los parámetros que ayudan para la gestión de calidad de la Cadena de Frío en empresas de logística de alimentos. El desarrollo de la investigación se centra en el estudio de las redes inalámbricas de sensores como principal alternativa a los sistemas tradicionales que se utilizan para realizar el monitoreo de dichos parámetros.

Para ello, el estudio realizado se presenta bajo una estructura de capítulos que ayudarán al lector a entender las actividades realizadas durante el desarrollo del proyecto. En el Capítulo I se encuentra principalmente los objetivos del Trabajo Especial de Grado junto con un análisis de los aspectos claves para el manejo de la cadena de frío, evaluando así el problema que origina la propuesta del caso de estudio y dejando claro el alcance y las limitaciones de la investigación.

El Capítulo II contiene una síntesis de la bibliografía consultada con los aspectos más relevantes del tema de tesis, presentando de manera concreta, la evolución de la cadena de frío y los retos que se ven involucrados durante el proceso de distribución y almacenamiento de alimentos a bajas temperaturas. Adicionalmente, se presenta información técnica relacionada con las redes inalámbricas de sensores que ayudan a entender la arquitectura y el funcionamiento de estos dispositivos de medición.

En el Capítulo III se detalla la metodología aplicada durante la realización del estudio, definiendo el tipo y diseño de la investigación. Adicionalmente, se definen las fases en las que fue divido el proyecto, de manera de poder dar cumplimiento a los objetivos planteados.

El Capítulo IV especifica el desarrollo de las actividades que fueron realizadas en cada una de las fases en las que fue dividido el proyecto, siguiendo el mismo esquema definido en el capítulo tres.

En el Capítulo V se encuentran los resultados de la investigación que ofrecen un análisis para desarrollar las respectivas conclusiones y recomendaciones, las cuales son presentadas finalmente en el Capítulo VI.

Todos estos aspectos son contemplados en el presente documento y sirven como referencia para entender la labor desarrollada durante el Trabajo Especial de Grado.

Capítulo I. Planteamiento del problema

Supervisar el almacenamiento, transporte y distribución de alimentos perecederos, puede ser fundamental para garantizar la calidad de los mismos de cara al consumidor final. Estos productos pueden sufrir daños y pérdida de calidad debido a descontroles durante su logística, cuyos procesos, requieren que exista un mantenimiento constante e inalterable de las bajas temperaturas por estar asociados estrechamente a la conservación de los alimentos por el frío.

A diferencia de otras técnicas de conservación, las bajas temperaturas hacen que se inhiban total o parcialmente los procesos alterantes como la degradación metabólica de las proteínas de los alimentos y otras reacciones enzimáticas, con el consiguiente retraso de la degradación del propio alimento y de sus propiedades organolépticas. Cuando se reduce la temperatura, también lo hace la velocidad de desarrollo de la gran mayoría de los microorganismos termófilos, impidiendo que aumente su población a niveles suficientemente altos como para causar alguna enfermedad. Por tal motivo, es que resulta necesario disponer de adecuadas instalaciones de almacenamiento en las zonas de producción, así como también, contar con un sistema de transporte especializado con temperatura regulada y con los medios apropiados para la distribución y venta de los alimentos.

La gestión de la cadena de frío obliga a tomar decisiones rápidas en caso de existir variaciones de temperatura; sin embargo, no siempre resulta evidente detectar dichas variaciones, por lo que es imprescindible, disponer de dispositivos electrónicos automáticos que acusen los incidentes sufridos en cualquiera de las fases de la cadena que puedan trascender en perjuicio de la calidad de los productos perecederos.

Las redes inalámbricas de sensores, están compuestas por dispositivos especializados para el registro de mediciones que prometen revolucionar las aplicaciones de monitoreo en tiempo real. El estudio de la asociación de estos dispositivos a la gestión de la cadena de frío es el objetivo principal del Trabajo

Especial de Grado propuesto, buscando optimizar la manera en la que se realiza el monitoreo de la temperatura en las empresas de logística de alimentos.

I.1. Objetivos del proyecto

I.1.1. Objetivo general

Diseñar una solución basada en Redes Inalámbricas de Sensores (*Wireless Sensor Networks*, WSN), para el monitoreo en tiempo real de parámetros que garanticen la gestión de la Cadena de Frío en los almacenes de una empresa de logística de alimentos.

I.1.2. Objetivos específicos

- Investigar los fundamentos de la tecnología WSN y su posible aplicación para la gestión de la Cadena de Frío en la logística de alimentos perecederos.
- Determinar los procesos y parámetros de calidad para la gestión de la Cadena de Frío en los almacenes de una empresa de logística de alimentos.
- Evaluar equipos y componentes disponibles en el mercado para ser utilizados en la red que se desea desarrollar.
- Diseñar una red inalámbrica de sensores para el monitoreo en tiempo real de parámetros que garanticen la Cadena de Frío, en los almacenes refrigerados y congelados de una empresa de logística de alimentos, contemplando la propuesta de arquitectura de la red.
- Realizar pruebas a escala del diseño planteado con todos sus componentes.
- Ajustar el diseño en base a las pruebas realizadas.
- Elaborar la documentación necesaria para el plan de implementación y las recomendaciones de mantenimiento de la posible solución.

I.2. Justificación para la elaboración del proyecto

Las soluciones comerciales actuales para monitorear la gestión de calidad de la cadena de frío, ofrecen información incompleta acerca de las condiciones de los productos que se almacenan, básicamente porque las mediciones son hechas en un

solo punto y el sistema no maneja todos los parámetros a los cuales se le debe hacer seguimiento. El monitoreo apropiado requiere de un gran número de mediciones en tiempo real para ser efectivo en la logística de alimentos. Es así como registros precisos, frecuentes y automatizados, interpretados por *software*, se pueden traducir en el manejo inteligente de alimentos con menos envíos rechazados por pérdida de calidad de los productos. Los dispositivos que se pretenden utilizar, pueden ofrecer una continua lectura de la temperatura a lo largo de todo el proceso de almacenamiento de alimentos, solventando los retos que implica la cadena de frío, a medida que se reducen los costos de estas actividades como consecuencia de la automatización.

I.3. **Alcance y limitaciones**

I.3.1. **Alcance**

El desarrollo del Trabajo Especial de Grado contempla la elaboración de un diseño de red para el monitoreo de parámetros que garanticen la gestión de la cadena de frío, basado en el estudio de una solución empleando tecnología WSN. El estudio incluye el levantamiento de la información necesaria para desarrollar un prototipo que permita evaluar el funcionamiento en campo de la red inalámbrica de sensores. Adicionalmente, la investigación realizada aportará la documentación necesaria para la futura implementación de la solución propuesta, así como también, las recomendaciones de materiales y/o equipos requeridos para el montaje de la red y las observaciones para el buen uso y mantenimiento de la misma.

I.3.2. **Limitaciones**

No se contempla en este Trabajo Especial de Grado, las aplicaciones de *software* que se deben desarrollar en el nivel de servidor de datos y el nivel de cliente de la red. De igual forma, no será implementada la red diseñada para el almacén de alimentos fríos y congelados. En consecuencia, las simulaciones y el prototipo de prueba montado con los equipos disponibles en laboratorio, serán los que fundamenten buena parte de las futuras decisiones y observaciones del proyecto.

Capítulo II. Marco referencial

En los últimos años, la industria de la refrigeración ha presentado un crecimiento importante como consecuencia del incremento en la proporción de productos perecederos a nivel internacional. Para satisfacer las necesidades de los clientes, las empresas que participan en la gestión de la cadena de frío enfrentan los retos que ésta implica, de manera de poder integrar todo el proceso de distribución, desde la fuente de origen del producto, hasta que llega al consumidor final.

II.1. Gestión de la Cadena de Frío

Antes de discutir cualquier aspecto de la gestión de la cadena de frío, es necesario tener un concepto de las definiciones centrales de la materia, las cuales son presentadas en el apartado siguiente.

II.1.1. Comprensión de la cadena de frío

El concepto de cadena de frío se refiere a los equipos y procesos utilizados para asegurar la preservación de la temperatura de conservación de productos perecederos, durante la distribución y almacenamiento de los mismos, desde la producción hasta el consumo final (Sowinski, 1999; Salin & Nayga, 2003). Esta definición resalta los dos factores necesarios que pueden determinar el rendimiento y el consecuente éxito de una cadena de frío: instalaciones y procesos, siendo el control de temperatura el punto clave a tener en cuenta.

El manejo global de la gestión de la cadena de frío consiste en un proceso de integración que contempla tanto la planificación, como la implementación y el control eficiente de la distribución y almacenamiento de los alimentos perecederos, así como también los servicios e información relacionados a uno o más puntos de origen, hasta los puntos de producción, distribución y consumo, de acuerdo a las necesidades y requerimientos conocidas de los consumidores a escala mundial (Bogataj, Bogataj, & Vodopivec, 2005).

II.1.2. **Evolución de la gestión de la cadena de frío**

En el pasado, una cadena de frío simplemente denotaba sencillos almacenes y vehículos con cavas refrigeradas. No existía ningún compromiso para integrar los diferentes eslabones de la cadena de suministro y como resultado, el equivalente de billones de dólares en pérdidas ocurría cada año (Fernie & Sparks, 2004).

El interés por el desarrollo en el manejo de la cadena de frío comienza en el año 1990 y desde entonces, los productos que se distribuyen bajo temperatura controlada han generado mucha atención, lo cual ha repercutido en la tendencia a la expansión mundial de mercados. C.H. Robinson – *Iowa State University* (2001) – indica que los productos perecederos representan la mitad de los gastos de los supermercados en Estados Unidos. En el mercado del Reino Unido, el volumen de productos distribuidos bajo temperatura controlada ha sido incrementado de un 3% a un 4% anual en los últimos 40 años (Fernie & Sparks, 2004). El incentivo proviene de la alta rentabilidad que tienen los productos perecederos, en comparación con los productos secos. Además, el auge en el comercio de productos perecederos es motivado por las demandas de los consumidores de alimentos de alta calidad, sin importar las épocas estacionales en que se da la cosecha de los productos (Sowinski, 1999; Bogataj *et al.*, 2005).

A través del desarrollo tecnológico, los almacenes refrigerados han sido construidos para manejar alimentos perecederos bajo temperatura controlada; cavas con diferentes rangos de temperaturas y requerimientos de atmósferas son equipadas para el manejo profesional de un amplio rango de productos (Duiven & Binard, 2002). Adicionalmente, el desarrollo de la industria de productos perecederos, ha conducido al progreso de avanzados sistemas de transportes refrigerados (James, James, & Evans, 2006).

De igual forma, los procesos en el manejo de la cadena de frío han sido mejorados. En este sentido, el ciclo de reabastecimiento y las cantidades de pedidos han sido en gran parte reducidos, al punto de que en la actualidad, la normativa para el manejo de alimentos no permite retenciones de nueva mercancía en los centros de

distribución fríos por más de un día y se ha impuesto que el almacenamiento de existencias de productos congelados no sobrepase de 10 días (James *et al.*, 2006).

II.1.3. **Retos de la cadena de frío**

Existen muchos riesgos relacionados en la gestión de la cadena de frío debido a que la mayoría de los productos perecederos son vulnerables a las interrupciones de temperatura; sin embargo, otros factores como la humedad, la iluminación y la producción de gases, son estudiados también para tratar de garantizar la calidad de los alimentos, estableciendo de esta manera, los factores que definen los requerimientos de atmósferas para el almacenamiento y distribución de los alimentos.

Una deficiente cadena de frío causa deterioro y los productos pueden descomponerse antes de venderse. Aún peor, productos que no estén perceptiblemente dañados o que apenas comienzan a descomponerse estando dentro de la fecha de vencimiento, puede socavar el éxito de cualquier negocio por las razones que esto implicaría.

La temperatura es sin lugar a dudas el parámetro crucial de la cadena de frío; muchos autores refuerzan la idea de identificar el eslabón más débil de la cadena de frío para poder disminuir los daños y pérdidas de productos perecederos. De esta manera, se deben revisar las instalaciones para la cadena de frío, las tecnologías utilizadas, los estándares para los procesos de manejo y la sinergia de los participantes en todos los niveles de la cadena para poder garantizar la calidad de los productos perecederos. Todo esto resulta aún más difícil en el ámbito del manejo de la cadena de frío a nivel mundial, debido a que son más factores o complejidades las que se encuentran involucradas. Todos los esfuerzos deben ir dirigidos al continuo desarrollo y mejoramiento en el manejo de la cadena de frío, entendiendo sus retos y tomando como referencia las pérdidas que se producen anualmente y los motivos por los cuales suceden.

II.1.4. **Instalaciones y elementos necesarios en la cadena de frío**

Para poder mantener la temperatura en todo momento, desde los productores y fabricantes hasta el consumidor final, instalaciones y tecnologías especializadas son esenciales para conformar una cadena de frío robusta.

Salin y Nayga (2003) señalan que las autopistas, los puertos, la infraestructura de información, los sistemas de energía eléctrica y las leyes y regulaciones son elementos que pueden determinar el ámbito de toda la cadena de frío en un país. Estos, son establecidos o promulgados por las autoridades gubernamentales y el desarrollo de todas estas infraestructuras es importante para el desarrollo de la cadena de frío y el consecuente progreso económico de una nación.

Los *containers* refrigerados, las instalaciones de almacenamiento frío y los vehículos refrigerados, son generalmente adquiridos por empresas de logística de alimentos perecederos para encargarse de la distribución y el almacenamiento. Una pequeña parte de las instalaciones son adquiridas por los mismos comerciantes, lo cual pasa a formar parte de la estrategia de mercadeo de cada uno de ellos (Salin & Nayga, 2003).

La instalación de la cadena de frío es uno de los factores que puede diferenciar a una compañía, permitiéndole competir contra otras empresas. Esto también determina la calidad y el rendimiento de los productos involucrados. Es necesario que los profesionales que trabajen en esta área tengan un entendimiento general de cómo operan esas instalaciones para mantener intacta la cadena de frío al más bajo costo.

II.1.4.1. **Almacenes refrigerados**

Los almacenes refrigerados son instalaciones que permiten manejar productos perecederos bajo un control estricto de temperaturas, para así poder mantener la calidad de los mismos. Un almacén refrigerado representa una forma intensiva de inversión de capital con grandes edificaciones y costosos equipos, generalmente más de dos veces el costo de un almacén convencional. En consecuencia, el reto en el diseño de las instalaciones de los almacenes refrigerados, consiste en asegurar el

control preciso del ambiente con los más bajos consumos de energía. Las instalaciones dentro de los almacenes refrigerados, como por ejemplo los sistemas de estanterías y las plataformas de cargas refrigeradas, determinan la eficiencia de operación y la utilización del espacio en ellos (Duiven & Binard, 2002).

II.1.4.2. **Vehículos refrigerados**

El transporte es un enlace importante en la cadena de frío y el mantenimiento de temperatura para este tipo de instalación es el punto crítico para preservar la calidad y seguridad de los alimentos perecederos. En consecuencia, el costo, la productividad y eficiencia son tres factores que necesitan ser tomados en cuenta para el diseño de los vehículos refrigerados.

La demanda de cargas de productos mixtos requiere diferentes temperaturas de almacenamiento y la tendencia de los transportes refrigerados es a utilizar vehículos de compartición múltiple. Los compartimientos son divididos por paneles aislantes o movibles longitudinalmente. La ventaja de utilizar vehículos de compartición múltiple es la flexibilidad y el ahorro de espacio, pero los procedimientos operativos son más complicados y los costos de los transportes son mayores (James *et al.*, 2006).

II.1.4.3. ***Containers* refrigerados**

El desarrollo de la refrigeración mecánica, las atmósferas controladas y el embalaje de los productos, ha facilitado información técnica precisa para el comercio internacional de varios productos bajo condiciones de temperatura controlada. Durante esta fase de la cadena de frío, los productos son preservados en *containers* refrigerados, cuya fuente de alimentación proviene de una unidad de energía externa que se puede encontrar a bordo de la embarcación marítima o desde un generador de energía del vehículo refrigerado (James *et al.*, 2006).

Aparte del control de temperatura, tecnología para el control de atmósferas es utilizada para preservar la frescura de los alimentos durante el envío, sobre todo en el caso de alimentos agrícolas. El sistema mantiene una atmósfera de oxígeno y otros

gases como nitrógeno para minimizar la transpiración de frutas y hortalizas. La tecnología de control de atmósfera puede también incrementar el control de insectos y plagas de algunas áreas y ayuda a prevenir la pérdida de agua y la consecuente pérdida de peso (Sowinski, 1999).

Es importante mencionar que un *container* refrigerado no puede disminuir la temperatura de un producto. La función de esta instalación es mantener la temperatura que tenga un producto, de manera de poder garantizar la integridad del mismo. Por esta razón es fundamental asegurarse que tanto el *container* refrigerado como el producto, estén en la temperatura apropiada antes de realizar el proceso de carga (James *et al.*, 2006).

II.1.5. **Monitores de temperatura**

Las tecnologías utilizadas en el manejo de la cadena de frío incluyen termógrafos (*data loggers*), etiquetas de tiempo-temperatura y sistemas de identificación por radiofrecuencia (*Radio Frecuency IDentification*, RFID). En la Tabla 1, se resaltan las tecnologías más trascendentes desarrolladas por algunos proveedores de soluciones para el monitoreo de temperaturas.

Proveedor	Solución	Características
SENSITECH	*Coldstream*	Monitoreo inalámbrico por Radio Frecuencia para la concurrencia confiable de datos de tiempo, ubicación e información de condición de los productos.
EVIDENCIA	*ThermAssureRF*	Termógrafo que posee el tamaño de una tarjeta de crédito, flexible, 100% resistente al agua, libre de cables, ofrece una fácil y amistosa recuperación inalámbrica de datos.
ALVIN SYSTEMS	Sensor de RFID con etiquetas inteligentes	Adherible a los productos o paletas, monitor y registro de la temperatura ambiente en predefinidos intervalos durante el transporte del producto. La data registrada puede ser leída y analizada en tiempo real a través de todos los nodos con la solución *Alvin Pocket PC*.
ALIEN TECHNOLOGY	Etiquetas RFID y lectores con funciones de monitoreo de temperatura.	Identificación para el monitoreo de temperaturas con el uso de etiquetas pasivas de RFID pueden ser leídas a distancias de 30 metros

Tabla 1: Soluciones para el monitoreo de temperaturas en la gestión de la cadena de frío (Fuente: Zhang, 2007).

II.1.6. Consideraciones adicionales en la gestión de la cadena de frío

La Gestión de la Cadena de Frío no se define únicamente por las instalaciones y por el equipo utilizado en las diferentes etapas. La integración de ésta se debe mantener desde el propio inicio del proceso de producción, a través de cada eslabón de la cadena o enlace (carga, descarga, transporte, manejo, almacenamiento) hasta el consumidor final (Salin & Nayga, 2003). Para manejar una cadena de frío deben considerarse otros conocimientos, como las características de los productos, las leyes regionales y regulaciones asociadas a la misma, los desarrollos geográficos involucrados, la colaboración entre los miembros participantes y las mejores prácticas para la manipulación de los alimentos (Sahin, Babaï, Dallery, & Vaillant, 2007).

II.1.6.1. **Características de los productos**

No todos los productos son iguales y en consecuencia, no tienen las mismas características. La variedad de productos y sus diversos requerimientos aumentan la complejidad de los cuidados que se deben tener en la Gestión de la Cadena de Frío.

Sahin *et al.* (2007) y Bogataj *et al.* (2005), señalan que tiempo y temperatura son los principales factores que contribuyen a mantener los niveles nutritivos, higiene y calidad de los productos perecederos.

II.1.6.1.1. **Temperatura**

Los requerimientos de temperatura varían para diferentes tipos de productos. En la industria de los alimentos, pueden ser clasificados como alimentos congelados o refrigerados a nivel de enfriamiento medio o exótico, dependiendo de la temperatura que se utilice (Fernie & Sparks, 2004):

- **Temperatura de congelación:** -25°C para helados, -18°C para otros alimentos e ingredientes.
- **Temperatura de refrigeración:** entre 0°C y 1°C para carnes y aves frescas, vegetales y algunas frutas.
- **Temperatura de enfriamiento medio:** mayor de 5°C para productos con base de masa, mantequillas, grasas y quesos.
- **Temperatura de enfriamiento exótico:** entre 10°C y 15°C para papas, huevos, frutas exóticas y bananas.

Si una cadena de suministros de alimentos se dedica a un rango específico de productos, la temperatura debe ser ajustada al nivel que requiere cada producto, por lo cual debe utilizar diferentes tipos de unidades de transporte e instalaciones de almacenamiento para satisfacer todos los requerimientos.

II.1.6.1.2. **Tiempo**

El tiempo en la cadena de frío se refiere al periodo que determina la vida útil de los productos y la duración en la que puede permanecer en cada eslabón de la cadena.

Es común que la vida útil del producto y con ella la fecha de vencimiento del mismo, sea asumida en términos del promedio de las condiciones de distribución y no en las variaciones de temperaturas que puedan ocurrir durante las diferentes etapas de la cadena de suministro (Sahin *et al.*, 2007). Proveedores enfrentan un dilema común al decidir la fecha de vencimiento de los productos. Hacer la vida útil del producto más corta para asegurar los niveles de servicio puede traducirse en un aumento en las pérdidas de los productos por no llegar a consumirse a tiempo, mientras que extender la fecha de vencimiento puede significar un incremento en el riesgo de ofrecer productos ya vencidos.

Desde el punto de vista del control de temperatura, la rapidez es la esencia para ofrecer productos de calidad. El tiempo entre las etapas de la cadena de frío debe ser reducido en la medida de lo posible, desde el origen hasta el destino, de acuerdo a las características de vida útil. Adicionalmente, las operaciones que se realizan fuera del control de temperatura deben ser completadas tan rápido como sea posible. Para este caso, los procesos de carga y descarga son probablemente los enlaces más débiles en la cadena de frío y las operaciones realizadas fuera de las premisas de enfriamiento deben agilizarse para reducir los riesgos de daños.

La operación eficiente puede recortar el tiempo en cada fase de la cadena de frío, lo cual es crítico para obtener una vida útil más larga para productos perecederos, de manera de mantener una frescura y calidad superior. Este procedimiento proviene de la colaboración entre los miembros de la cadena de frío y la recomendación para las mejores prácticas, hechas por profesionales.

II.1.6.1.3. **Almacenamiento acorde a las frutas y vegetales**

El almacenamiento ideal conserva la frescura de los alimentos tanto como sea posible, por esta razón, el almacenamiento es probablemente, uno de los eslabones o enlaces principales para la cadena de frío. El Departamento de Agricultura de EE.UU (*United States Department of Agriculture*, USDA) sugiere que para obtener los mejores resultados se tiene que ser lo más específico posible. Temperatura, humedad y olor son tres factores que necesitan ser considerados antes de colocar el producto en el almacén para poder producir frescura.

Son tres las temperaturas apropiadas para los productos vegetales:

- De 0°C a 2°C De 90% a 98% de humedad
- De 7°C a 10°C De 85% a 95% de humedad
- De 16°C a 18°C Sin requerimientos de humedad.

Los segmentos de humedad van con los segmentos de temperatura, pero se debe tomar en cuenta también la producción/sensibilidad de olores y la producción/sensibilidad de etileno. Algunos productos tienen requerimientos de ventilación para el almacenamiento y una duración de almacenamiento que no puede ser sobrepasada.

En el caso de las frutas, los requerimientos de temperatura son más complicados debido a que poseen diferentes estados de madurez, por lo tanto, las características de las frutas requieren de manejos delicados y avanzados sistemas de monitoreo.

II.1.6.2. **Guías y regulaciones asociadas a la cadena de frío**

En muchos países, especialmente en los países de la comunidad europea y los Estados Unidos, tienen establecido un conjunto de regulaciones para reglamentar los procesos de la cadena de frío. Las regulaciones respecto al control de temperatura de productos perecederos, pueden ser resumidas como el propósito de prescribir los requerimientos para mantener la temperatura-atmósfera a lo largo de la cadena de

suministro, pero adicionalmente persiguen estandarizar los equipos que son utilizados en la cadena de frío (Bogataj *et al.*, 2005). Los principales entes reguladores de seguridad alimentaria son listados en la Tabla 2.

Ente regulador	Tiempo de implementación	Contenidos principales
Agreement on the international carriage of perishable foodstuff and on the special equipment to be used for such carriage (ATP)	Septiembre de 1970. Enmendada en abril de 2007.	Uso de equipos especiales de transporte para el envío internacional de ciertos productos alimenticios perecederos.
Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP)	Agosto de 1997	Sistema de manejo en donde la seguridad alimentaria está dirigida al análisis y control de los peligros biológicos, químicos y físicos de la producción de materia prima, obtención y manejo para la fabricación, distribución y consumo de los productos terminados.
USDA. Regulaciones y guías (*quality food for quality meals*)	Septiembre de 2005	Estándares para asegurar la calidad de las frutas y vegetales.
The Bioterrorism Act	Junio de 2002	Mejora de toda la seguridad alimentaria de los Estados Unidos.
Mandatory Country of Origin Labeling (COOL)	Octubre de 2004 Creado por la USDA	Los proveedores deben notificarle a sus clientes el país de origen de un grupo específico de materia prima, incluyendo cortes de muslo de carnes, corderos y puercos, pescados y materia prima de agricultura perecedera.

Tabla 2: Principales entes reguladores adoptados para eventos de seguridad alimentaria (Fuente: Zhang, 2007)

Es importante hacer notar en la Tabla 2, que los países en vías de desarrollo no tienen guías específicas o entes reguladores para el manejo de la cadena de frío en la actualidad, por lo que la mayoría de las regulaciones para estos países están orientadas precisamente en base a regulaciones extranjeras.

II.1.7. Antecedentes de aplicaciones para la gestión de la cadena de frío en Venezuela y el mundo

Las aplicaciones para la gestión de la cadena de frío, están basadas en las tecnologías existentes para monitorear las temperaturas de las instalaciones de los

almacenes o de los vehículos refrigerados utilizados para el transporte de los alimentos perecederos. El concepto de "seguimiento del frío" fue introducido para examinar grupos de productos sensibles a cambios de temperatura, los cuales requieren también diferentes ambientes de atmósferas. Bogataj *et al.* (2005) presentan este concepto factible si se utilizan las diferentes herramientas de medición disponibles en el mercado, algunas de ellas nombradas en la sección II.1.5. De esta manera, la comunicación y la tecnología de información pueden hacer de la cadena de frío, un proceso más visible y flexible.

Este concepto representa un gran reto debido a que la efectiva asociación entre el control de temperaturas y la identificación de productos no está aún garantizada y para ello, muchos estudios se están llevando a cabo.

Si bien es cierto que la ubicación física de productos es esencial en la cadena de suministros, la implementación de RFID en la gestión de la cadena de frío posee limitaciones, sobre todo porque la mayoría de las etiquetas utilizadas para leer la temperatura de los productos, ofrecen información únicamente acerca de este parámetro, dejando a un lado otras condiciones de atmosferas que también deben ser consideradas. Sin embargo, la integración de todo el proceso puede ser factible, a tal punto que en varios países del mundo implementan está tecnología para hacer seguimiento del frío, pero los equipos utilizados son muy complejos y costosos.

La mayoría de las empresas de logística de alimentos, optan por utilizar termógrafos, pero estos dispositivos necesitan ser descargados a un microprocesador o recurrir a unidades lectoras como una impresora para generar la información de la distribución y almacenamiento de los alimentos, tomando en cuenta nuevamente sólo la temperatura. El inconveniente de este sistema es que ofrece reportes posteriores a la ocurrencia de las interrupciones de temperatura, por lo que el daño para los productos perecederos es irreversible.

Por otro lado, las etiquetas de tiempo-temperatura es un método menos utilizado en la actualidad dentro de la gestión de la cadena de frío por ser un procedimiento rudimentario. Estas etiquetas incluyen indicadores irreversibles de

tiempo y temperatura, conocidos como TTI's (*Time-Temperature Indicators*) en donde el dispositivo de registro indicará si la temperatura cambió en algún momento durante el tránsito de los alimentos.

La solución más factible que se encuentra actualmente en el mercado para la gestión de la cadena de frío son las redes de sensores, por conformar un sistema que puede hacer seguimiento de los parámetros que garanticen la calidad y frescura de los productos perecederos. En Venezuela y el resto del mundo, esta es posiblemente la solución más empleada, pero la tendencia es de utilizar sistemas cableados. Las redes inalámbricas de sensores son dispositivos de reciente aparición en el mercado y se proyectan como los sustitutos de las redes de sensores cableadas, pues siempre resulta mucho más práctica y económica la implementación de redes inalámbricas.

A partir del siguiente apartado, se comienzan a estudiar estos dispositivos, de manera de introducir los conceptos necesarios para desarrollar el tema de tesis propuesto.

II.2. **Redes inalámbricas de sensores**

Una red inalámbrica de sensores ó WSN por sus siglas en inglés de *Wireless Sensor Network*, es un sistema formado por nodos que incorporan a su capacidad de comunicación, la capacidad de capturar la magnitud de alguna variable física (Villón Valdiviezo, 2009). Estos dispositivos al distribuirse de forma espacial, pueden combinarse con otros nodos para crear un sistema WSN típico, formando redes de comunicaciones ad-hoc sin infraestructura física establecida ni administración central, dejando a todos los dispositivos de la red en igualdad de condiciones, colaborando en una tarea común. El objetivo de cada nodo de la red es que cualquier paquete de Datos llegue a su destino, sin importar que el destinatario sea inaccesible directamente desde el origen, siendo el protocolo de enrutamiento el responsable de descubrir las rutas entre los dispositivos de la red para hacer posible la comunicación del sistema (Fernández Martínez, y otros, 2009).

Esta clase de redes se diferencian de las redes de sensores cableadas por su facilidad de despliegue y por ser auto configurables, pudiendo convertirse cualquiera de los nodos de la red en emisor o receptor para así ofrecer servicios de enrutamiento entre nodos sin visión directa, teniendo como principal característica, la gestión eficiente de energía por parte de los elementos de la red, permitiendo obtener una alta tasa de autonomía haciendo a las redes plenamente operativas.

II.2.1. **Arquitectura del sistema**

En una arquitectura WSN común, los nodos de medida capturan una serie de mediciones sobre el medio y transmiten la información de manera inalámbrica a otro dispositivo de la red, el cual puede ser otro nodo o un *Gateway* directamente. Este último dispositivo retrasmite toda la información a un controlador principal, conocido como estación base, el cual proporciona la conexión al entorno cableado donde se pueden adquirir, procesar, analizar y presentar los datos de medida captados, convirtiéndolos en información útil para la aplicación que se desee implementar (NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, 2010).

Eventualmente, la información puede ser llevada a un servidor de mayor capacidad para poder almacenar un histórico o realizar análisis respectivos. Este modelo de funcionamiento, ayuda a identificar los principales elementos que conforman una red inalámbrica de sensores, la cual queda definida básicamente por los nodos de medición inalámbricos, la puerta de enlace o *Gateway* y la estación base. En la Figura 1 se puede apreciar un esquema en donde se identifican estos elementos.

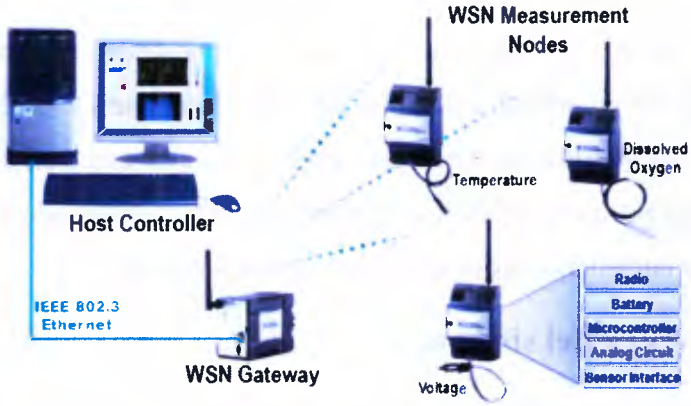


Figura 1. Arquitectura de una red inalámbrica de sensores

(Fuente: *NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION*; 2010)

II.2.1 1 Nodo inalámbrico

Los nodos inalámbricos, son dispositivos electrónicos con capacidad de procesamiento que se comunican por radio, ofreciendo la posibilidad de captar información proveniente del entorno en el que se encuentran. Estos dispositivos se basan en sistemas micro electromecánicos (*Microelectromechanical Systems*, MEMS), e integran un *hardware* ligero y de reducido tamaño en un solo *chip*, como se aprecia en el diagrama de bloques de la Figura 2.

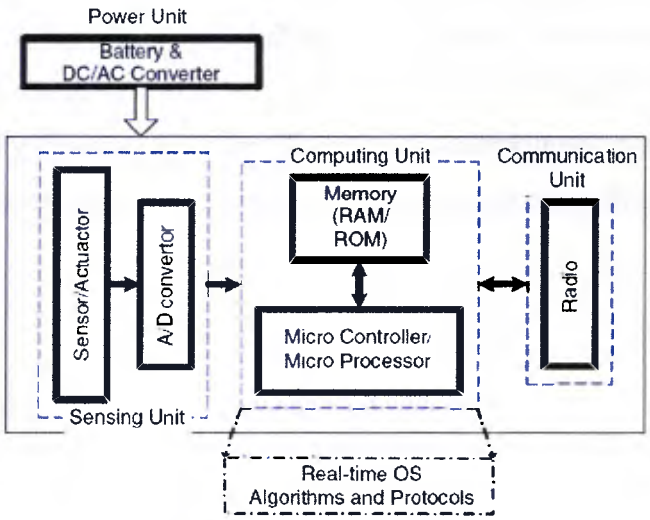


Figura 2: Arquitectura de un nodo inalámbrico

(Fuente: Villón Valdiviezo; 2009. p. 33)

De la figura anterior, se pueden señalar los 4 elementos principales para el funcionamiento de un nodo inalámbrico:

- **Unidad de energía**
- **Unidad de adquisición de datos**
- **Unidad de procesamiento**
- **Una unidad de comunicaciones**

Adicionalmente, los nodos inalámbricos poseen un micro Sistema Operativo en tiempo real que se encargada de operar y controlar a la unidad de sensores. Todos estos elementos serán descritos con mayor detalle en las secciones siguientes.

II.2.1.1.1. Unidad de energía

Normalmente, la fuente de alimentación de los nodos de una red inalámbrica de sensores son baterías o transformadores con salida adecuada para los nodos que son utilizados en lugares en donde se disponga de tomas de corriente alterna (AC). Para las situaciones en donde no se dispone de una red eléctrica y las posibilidades de sustituir las baterías es muy complicada por la ubicación de los nodos, se están estudiando diferentes técnicas para alimentar al sensor, como puede ser la utilización de paneles solares y la termo generación (Fernández Martínez, y otros, 2009).

Para extender la duración de la batería, un nodo WSN se enciende para adquirir y transmitir datos al encender el radio y después se vuelve a apagar durante un tiempo periódico programable. El radio WSN debe transmitir una señal de manera eficiente y permitir que el sistema se apague con un uso mínimo de energía. Asimismo, el procesador también debe ser capaz de encenderse y apagarse de modo eficiente (NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, 2010). Todas estas exigencias ayudan a modelar el consumo de energía de un nodo inalámbrico, del cual se pueden diferenciar cinco estados básicos de funcionamiento: adquisición, transmisión, recepción, modo de escucha y modo *sleeping* (Mohammad & Imad, 2005).

- **Adquisición:** incluye la medición, la conversión analógica digital, el procesado y el almacenaje de los datos.
- **Transmisión:** incluye el procesamiento para la determinación de la dirección de destino, empaquetado del mensaje, codificación y la posible colocación en cola del paquete. Para la unidad de radio, comprende la alimentación de los circuitos en banda base y RF (se debe considerar que usualmente la relación potencia de transmisión vs. energía consumida no es lineal).
- **Recepción:** incluye el uso del amplificador de bajo ruido (*Low-noise amplifier*), oscilador, filtro, detección, decodificación, detección de errores y verificación de dirección.
- **Modo de escucha (*Listening*):** la misma secuencia de la recepción, excepto a que la cadena del procesamiento de la señal se detiene en la detección.
- **Modo *Sleeping*:** Consumo mínimo de energía necesario para que el nodo pueda mantenerse alerta para algún cambio de estado de funcionamiento.

Cuando los nodos se encuentran en el modo *sleeping*, están a la espera de alguna instrucción a ejecutar, previniendo el desperdicio de energía con la recepción de un mensaje que no está destinado para él; en este momento, el nodo no está ni transmitiendo, ni recibiendo, ni capturando información del entorno y tiene un consumo promedio de 110μA en contraposición con los 21.48mA empleados en la transmisión de datos o los 7mA empleados en la recepción (Datos promedios de la familia de sensores MICA de la empresa CROSSBOW).

En la Figura 3, se presenta una gráfica que esquematiza el funcionamiento habitual de los nodos para garantizar el ahorro de energía, describiendo un ciclo de trabajo en donde se intenta mantener al nodo en el estado *sleep* la mayor parte del tiempo posible, realizando la adquisición de datos y los procesos de transmisión y recepción de mensajes en tiempos relativamente cortos. La activación del procesador del nodo inalámbrico queda enmarcada en la etapa descrita como "*Wake up*" dentro de la misma figura, siendo la etapa "*Active*" la que agrupa los estados de adquisición, recepción y transmisión de Datos.

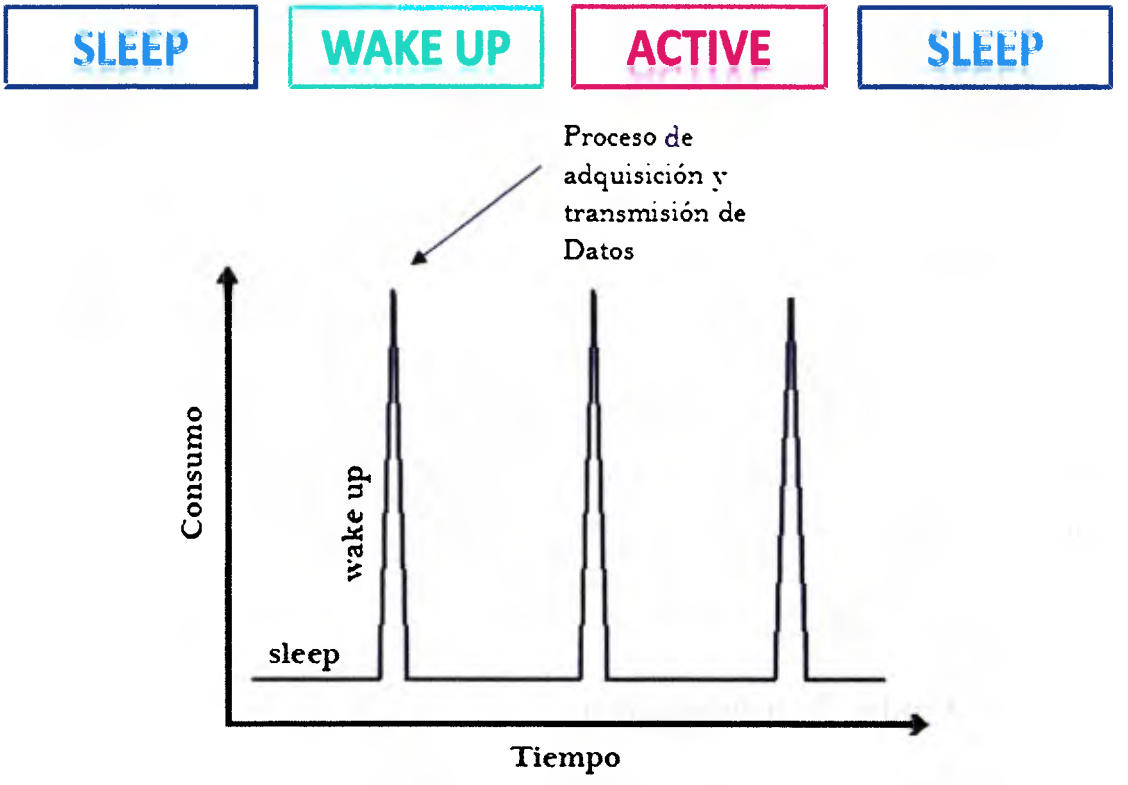


Figura 3: Estados de consumo de energía de un nodo WSN (Fuente: Fernández Martínez y otros; 2009. p. 56)

Como se puede apreciar, es sustancial la diferencia de trabajo que realiza el nodo cuando está en modo *sleep* que cuando está en cualquier otro estado. Esto supone ciclos de trabajos inferiores al 1%, lo cual quiere decir que los nodos se encuentran "durmiendo" el 99% del tiempo que funcionan (Villón Valdiviezo, 2009).

II.2.1.1.2. **Unidad de adquisición de datos**

Tal y como se pudo apreciar en Figura 2, la unidad de adquisición de datos (*Sensing Unit*) se encuentra dividida en dos partes principales. El sensor, es el encargado de transformar la medida física en impulsos eléctricos analógicos, mientras que el convertidor analógico digital es quien convierte en bits dicha medida para entregársela a la unidad de cálculo y procesado (Villón Valdiviezo, 2009).

Las características y requerimientos que un sensor debe tener son: un pequeño tamaño, un consumo bajo de energía, tener capacidad para adaptarse al ambiente y ser autónomo para que puedan funcionar de manera desatendida.

Para poder lograr un bajo consumo de energía, la unidad de adquisición de datos debe incluir amplificadores capaces de cumplir con los requerimientos para el procesamiento de señal del sistema y a la vez requiera la más baja potencia. Los parámetros que influyen en el consumo de energía de amplificadores operacionales son principalmente el desempeño frente al ruido, las tasas de transmisión y la corriente de salida del dispositivo. Para sistemas en los cuales el consumo se mide en microamperios, los amplificadores operacionales que normalmente tienen una corriente de fuga de 1μA, cuentan con un interruptor de apagado que reduce este valor a 0.01μA. Este aspecto es importante ya que la mayor parte del tiempo estos amplificadores operacionales se encuentran inactivos debido al mínimo ciclo de trabajo empleado en los nodos de medida y todo ese tiempo puede significar un ahorro de energía importante.

II.2.1.1.3. **Unidad de procesamiento**

La unidad de procesamiento gestiona todas las operaciones que realiza el nodo inalámbrico. En esta interfaz se almacena el conjunto de procedimientos y tareas que hace que un nodo pueda colaborar con los demás nodos de la red para lograr el transporte de la data. Está conformada básicamente por la memoria y la unidad de procesamiento *per se*, la cual puede ser un micro controlador o micro procesador (Fernández Martínez, y otros, 2009).

Las tendencias de la tecnología de microprocesadores para aplicaciones WSN incluyen la reducción del consumo de potencia y mantener o aumentar la velocidad del procesador. Dependiendo del procesador específico, el consumo de potencia en modo *sleep* puede variar desde 1 a 50 μW, mientras que en modo de encendido el consumo puede ser desde 8 a 500 mW (NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, 2010).

Investigaciones realizadas por la empresa AvalonRF con microcontroladores que no son reconocidos precisamente por su ahorro de energía (Blackfin ADF 7020) muestran que es posible llegar a corrientes de operación promedio de 1μA cuando se trabaja y regula adecuadamente el ciclo de trabajo. Estas investigaciones demuestran

que si se apaga el reloj del micro controlador, éste se puede considerar un dispositivo de bajo consumo de energía, independientemente del modelo que se utilice. Se ha demostrado que es bastante importante que el micro controlador sea capaz de apagar su reloj en su estado de *sleep* y posteriormente responder al instante, requisito que no muchos micro controladores pueden cumplir debido a que tienen que pasar por un lento proceso de re-inicio que consume grandes cantidades de energía.

Desde el mismo punto de vista de consumo de energía, las memorias también deben generar el menor gasto de energía posible. Las clases más relevantes de memorias son las que vienen integradas en el *chip* de un micro controlador, la memoria *flash* y la memoria RAM (*Random Access Memory*), la cual raramente es utilizada fuera del *chip*.

La memoria *flash* es una forma desarrollada de la memoria EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*) que permite que múltiples posiciones de memoria sean escritas o borradas en una misma operación de programación mediante impulsos eléctricos. Por esta razón, la memoria *flash* permite funcionar a velocidades muy superiores cuando los sistemas emplean lectura y escritura en diferentes puntos al mismo tiempo.

Los requerimientos de memoria van a depender de la capacidad que necesite la aplicación WSN que se desee desarrollar, pero básicamente, las memorias siempre son utilizadas para almacenar datos recogidos por la aplicación y para almacenar el programa o *firmware* del nodo inalámbrico que le permite operar en la red.

II.2.1.1.4. **Unidad de comunicación**

La comunicación inalámbrica del nodo se realiza por medio de un dispositivo de radio a modo de transceptor, que permite enviar y recibir datos para enlazar al nodo inalámbrico con el resto de dispositivos de la red, dentro de su rango de transmisión.

Los nodos WSN utilizan la banda ISM de radiofrecuencia, las cuales están reservadas internacionalmente para uso no comercial de transmisión electromagnética

en áreas industriales, científicas y médicas. El uso de estas bandas de frecuencia está abierto a todo el mundo sin necesidad de licencia, siempre y cuando se respeten las regulaciones que limitan los niveles de potencia transmitida. La Tabla 3 muestra las bandas de frecuencias que están disponibles para su uso.

Banda de Frecuencia	Frecuencia Central
6765 - 6795 Khz	6780 Khz
13553 - 13567 Khz	13560 Khz
26957 - 27 283 Khz	27120 Khz
40.66 - 40.70 Mhz	40.68 Mhz
433.05 - 434.79 Mhz	433.92 Mhz
868 - 870 Mhz	869 Mhz (Europa)
902 - 928 Mhz	915 Mhz (EE.UU.)
2400 - 2500 Mhz	2450 Mhz
5725 - 5875 Mhz	5800 Mhz
24 - 24.25 Ghz	24.125 Ghz
61 - 61.5 Ghz	61.25 Ghz
122 - 123 Ghz	122.5 Ghz
244 - 246 GHz	245 GHz

Tabla 3: Frecuencias disponibles para aplicaciones ISM.
(Fuente: Villón Valdiviezo, 2009)

Algunas de estas frecuencias son utilizadas para comunicaciones inalámbricas de teléfonos y sistemas WLAN. En lo referente a WSN, casi todos los productos usan la banda de 900 – 928 MHz y la de 2.4 – 2.483 GHz (Conner, 2006).

El uso de la banda de 900 MHz tiene como ventaja que alcanza mayores rangos de cobertura para iguales potencias de transmisión debido a su relativamente más larga longitud de onda, lo cual acarrea que la autonomía de cada nodo sea mayor. Sin embargo una frecuencia inferior trae consigo el uso de antenas más grandes en comparación con las requeridas por la frecuencia de 2.4 GHz.

II.2.1.2. **Puerta de enlace (*Gateway*)**

El *Gateway* o puerta de enlace, es el elemento que sirve de interfaz de comunicación entre la estación base y los nodos que componen la red. Toda la información recibida por el *Gateway* es acumulada y reenviada a la estación base, lugar desde donde la información es procesada para posteriormente ser presentada al usuario. En el sentido opuesto, cuando se envía un comando desde la estación base hacia la red, el *Gateway* es el encargado de empaquetar el mensaje y re-enviarlo por la red de sensores. Así mismo, es el *Gateway* quien se encarga de hacer la conversión de protocolos para redes de sensores que se comunican con otro tipo de estándares de redes industriales.

II.2.1.3. **Estación base**

Es un recolector de datos basado en una computadora o sistema empotrado que permite manejar la información para posteriormente ser presentada al usuario final de la red WSN. Generalmente, en un sistema WSN común, las aplicaciones desarrolladas llevan los datos a un equipo servidor que gestiona una base de datos y le ofrecen al usuario la posibilidad de acceder a toda la información de manera remota. Cada aplicación que se desarrolla, cuenta con un API (*Application Programing Interface*) y/o un GUI (*Graphical User Interface*), en donde la API, es la encargada de la programación del *software* en los nodos de la red y sólo es utilizada por los desarrolladores de las aplicaciones, mientras que la GUI es la encargada de presentar la información detallada para el usuario final.

II.2.2. **Topologías de red**

Existen varias arquitecturas de red que pueden ser utilizadas para implementar aplicaciones WSN, pero antes de describirlas, resulta necesario definir los diferentes componentes de este tipo de redes, los cuales fueron mencionados en secciones anteriores, pero que de acuerdo a su función dentro de la red, pueden tener una clasificación distinta, tal y como se verá a continuación:

- **Nodos finales:** corresponde a los nodos inalámbricos compuestos por sensores y actuadores donde se capturan o miden los datos de interés.

- **Nodos intermedios:** conocidos también como enrutadores o *routers*, son los elementos que ofrecen cobertura a redes muy extensas o redes complicadas con obstáculos que causen interferencia en la comunicación a nivel de radiofrecuencia. Adicionalmente, estos nodos pueden solventar problemas de congestión en la emisión de la información y posibles fallos en alguno de los otros nodos de la red. Estos elementos no necesariamente incluyen la unidad de adquisición de datos, puesto a que su ubicación puede no ser representativa para las mediciones que se toman en cuenta en dicho sector. En estos casos, los nodos son conocidos como "*motes*" por su terminología inglesa para referirse a dispositivos ligeros y de reducido tamaño que sirven para interconectar dos o más elementos de red.

- **Puertas de enlace *(Gateway)*:** recoge los datos de la red y sirve como punto de unión con una red LAN o ETHERNET.

Es así como entonces, el concepto de topología se utiliza para referirse a la configuración de los componentes de *hardware* que definen la red y a la especificación de cómo los datos son transmitidos a través de dicha configuración. De esta manera, pueden configurarse topologías en estrella, topologías en malla o topologías híbridas entre ellas dos, dependiendo de las necesidades de la aplicación WSN que se desee implementar.

II.2.2.1. **Topología en estrella**

Este tipo de configuración es la principal y más básica de todas las topologías, pues cada nodo mantiene una trayectoria de comunicación directa con el *Gateway* y por esta razón es considerada como redes de un solo salto. Los nodos inalámbricos utilizados funcionan como nodos finales y en consecuencia el alcance de la red es determinado por la cobertura inalámbrica que ofrezca cada uno de los dispositivos que conformen la red (ver Figura 4-a).

Esta topología ofrece como ventaja una baja latencia y permite a los nodos operar en estados de bajo consumo de energía, razón por la cual resulta eficiente para aplicaciones donde el ahorro de energía es esencial y las áreas de coberturas son de corta distancia. En contraparte tiene la desventaja de que el alcance no llega a ser mayor de 100 metros de distancia desde el *Gateway*.

II.2.2.2. **Topología en malla**

La topología en malla es un sistema multi-saltos donde todos los nodos actúan como *routers*. De esta manera, cada nodo puede enviar y recibir información de cualquier otro dispositivo, siendo capaces de configurarse automáticamente en el caso de que algún nodo falle. La cualidad de auto-configuración depende básicamente del protocolo sobre el cual estén programados los nodos que conforman la red.

La propagación de los datos a través de los nodos hacia la puerta de enlace hace posible crear una red con una extensión ilimitada, al menos teóricamente. Adicionalmente se puede decir que este tipo de topología resulta inmune a fallos o errores, ya que cada nodo tiene diferentes caminos para comunicarse con la puerta de enlace (ver Figura 4-b). En contraparte, la principal desventaja de este sistema es que puede presentar una alta latencia, dependiendo de la cantidad de nodos y de la distancia entre ellos. En comparación a la topología en estrella, este tipo de redes exige mayor consumo de energía para los nodos debido a que no sólo tienen que ocuparse de transmitir su propia información, sino que también la información de los nodos que le llegan más lejanos.

II.2.2.3. **Topología híbrida (Malla - Estrella)**

Este tipo de topología es conocida también como topología de árbol o clúster y representa un híbrido de los casos anteriores, combinando el bajo consumo y simplicidad de la configuración en estrella con el amplio rango de cobertura e inmunidad a errores de la configuración en malla. A simple vista, esta topología puede resultar mejor que las otras dos, sin embargo, presenta un grave problema, pues si el nodo intermedio falla, todos los nodos que dependen de ese enrutador también

pierden su trayectoria de comunicación con el *Gateway*. Por esta razón se debe tener cuidado de cómo se configuran los nodos finales, ya que lo ideal sería agregarle redundancia por medio de otros nodos intermedios (ver Figura 4-c).

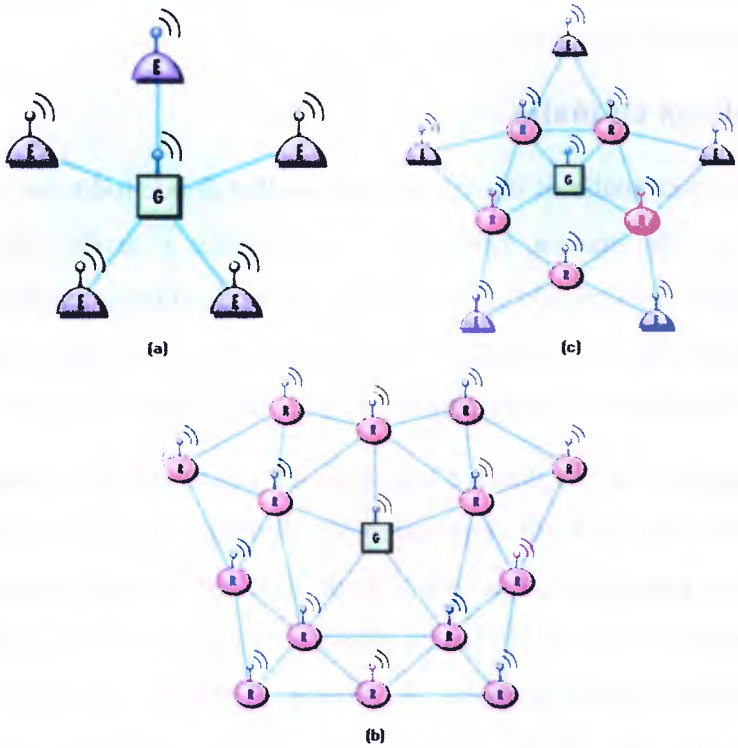


Figura 4: Topologías de una red inalámbrica de sensores
(Fuente: Villón Valdiviezo, 2009)

II.2.3. Protocolos

Tomando en cuenta las consideraciones señaladas en los apartados anteriores, queda claro que el consumo de energía en una red inalámbrica de sensores es el aspecto más limitante. De igual forma, se puede inferir, que el uso del canal de radio es la actividad que consume más energía de todas las tareas en un nodo. Es por esta razón, que los protocolos diseñados para este tipo de redes, deben ser desarrollados para lograr la autonomía más larga posible reduciendo la cantidad de veces que se utiliza el canal de radio. De este modo, se hacen más eficientes los procesos de descubrimiento de rutas y la transmisión de paquetes sin información, así como

también, la capacidad de la red para poder auto-configurarse frente a cambios en la topología.

El enrutamiento en redes WSN se realiza siguiendo la misma línea de desarrollo de las redes tradicionales, en donde los protocolos MAC (*Media Access Control*) del nivel de capa de enlace sirven de base para los protocolos de la capa de red. De esta manera, las funciones implementadas en la MAC, son utilizadas por los protocolos de enrutamiento de la capa de red para enviar y recibir paquetes o sincronizar sus operaciones.

En las secciones siguientes, se describirán los protocolos que han sido utilizados en las redes inalámbricas de sensores y su respectiva evolución con el tiempo para solucionar el tema del ahorro de energía.

II.2.3.1. **Protocolos MAC**

En redes tradicionales, el propósito de los protocolos MAC es el de organizar el uso del medio compartido, mitigando el efecto de las colisiones; sin embargo, en redes inalámbricas de sensores, dicha organización busca además maximizar la autonomía de la red. La colisión de paquetes es uno de los principales causantes de este desperdicio dado a que el nodo tiene que re-transmitir los paquetes perdidos. Adicionalmente, muchos recursos son desperdiciados por el lado del receptor al escuchar activamente el medio para determinar los mensajes que son destinados al nodo. Este proceso es conocido como *idle listening* (escucha desocupada) y trae como consecuencia el *over-hearing* (sobre-escucha), lo cual no es más que la recepción de demasiados paquetes que no tienen como destino dicho nodo.

Protocolos TDMA (*Time Division Multiple Access*) fueron utilizados en los primeros diseños de aplicaciones WSN. En estos protocolos, se programaban los accesos al medio compartido y de este modo se evitaban las colisiones, el *idle hearing* y el *over-hearing*. Su mayor problema era que asumían como un hecho el almacenaje de datos, haciendo la operación con dispositivos móviles muy difícil y compleja, razón por la cual fueron descartados con el tiempo.

Usualmente las redes inalámbricas de sensores tienen muy bajas tasas de transferencia de datos, por esta razón también fueron descartados protocolos como el 802.11 (Wi-Fi) pues está optimizado para ofrecer altas tasas de transferencia y no optimiza el consumo de energía. Pensando en esta característica, posteriormente se desarrollaron protocolos como el S-MAC (*Sensor networks - Media Access Control*) que sincronizaba los nodos organizando sus periodos de *sleep*. Los nodos de este modo se encendían de una manera regular cada cierto tiempo, competían por el medio si tenían data que enviar y luego pasaban nuevamente al modo *sleep* (Ye, Heidemann, & Estrin, 2002).

Ajustando los tiempos de *sleep*, ciclos de trabajos de 1 a 50% eran posibles de lograrse para reducir el gasto de energía producido por el *idle listening*. Posteriormente se desarrollaron protocolos como el T-MAC (*Time-out Media Access Control*) que extendían estas ideas para proveer un periodo de *sleep* adaptativo para obtener un mejor *throughput* cuando se trabaja con multi-saltos.

Finalmente, cabe mencionar el protocolo del estándar 802.15.4 (ZIGBEE). Este protocolo incluye opcionalmente el uso de un *duty cycle* ajustable para evitar el *idle listening*.

II.2.3.2. **Protocolos en capa de red**

El aspecto más importante a considerar en los protocolos de la capa de red sin lugar a dudas es el *overhead*, que no es más que la sobrecarga producida por los paquetes de control de tráfico, los paquetes que solicitan una nueva ruta (paquetes de *request*) y los paquetes de actualización de las nuevas rutas.

Los protocolos para redes ad-hoc están usualmente agrupados en protocolos proactivos y protocolos reactivos. En el caso de los protocolos proactivos, el ejemplo más representativo es el del OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*), el cual pre-calcula las rutas a algunos o todos los destinos de modo que cuando una ruta es solicitada esta ya se encuentra disponible. En el caso de los protocolos reactivos, se tiene como ejemplos representativos al AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*)

y el DSR (*Dynamic Source Routing protocol*) que calcula las rutas a destinos específicos sólo cuando el tráfico así lo requiere. El *overhead* del control de tráfico en protocolos proactivos es proporcional a la tasa con la que los nodos cambian y en los reactivos es proporcional a la cantidad de veces que los nodos solicitan nuevas rutas. Los protocolos reactivos son preferibles para redes que contarán con nodos móviles ya que solo mantienen las rutas hábiles. En contraparte, muchas redes hoy en día tienen solo nodos estacionarios por lo que se recomienda en ese caso usar protocolos proactivos ya que son mucho más sencillos y no tienen retardo por el descubrimiento de una nueva ruta (Heidemann & Govindan, 2004).

II.2.3.3. **Estandarización**

Dada la particularidad de los requerimientos que las redes inalámbricas de sensores necesitan, para mayo de 2003 se impulsó la creación del estándar IEEE 802.15.4, el cual se concluyó para octubre del mismo año. Seis meses después la ZIGBEE ALLIANCE publicó las especificaciones indicando las recomendaciones para aplicaciones funcionando sobre dicho estándar con el fin de compatibilizar la producción de dispositivos y uniformizar las investigaciones.

II.2.3.3.1. **IEEE 802.15.4**

La norma IEEE 802.15.4 (IEEE, 2003) define el protocolo y conexiones compatibles para dispositivos de comunicación de datos usando transmisiones de radio frecuencia con baja tasa de bits, baja potencia y baja complejidad en redes inalámbricas de área personal (*Wireless Personal Area Network*, WPAN). Este estándar uniformiza el uso de redes en malla o redes *mesh* usando 2 bandas diferentes de frecuencia, la de 868/915 MHz y la de 2.4 GHz, con tasas de datos de 20, 40 y 250 Kbps respectivamente.

El estándar fue considerado básico en su momento por tratar únicamente el desarrollo de la capa física y la capa MAC. Sin embargo, es un protocolo importante ya que estas capas son los bloques elementales para el desarrollo que se pueda lograr más adelante en capas superiores de una forma más abstracta y más eficiente. Esta

norma no estandariza muchos aspectos de la red que son importantes regular como el enrutamiento y la administración de sesión.

En la capa de enlace se define el modo en que los nodos acceden al canal, en especial cuando se tienen múltiples nodos intentando transmitir a la vez. A nivel de capa física, cubre la detección de la señal RF y mejora la calidad de la señal, además determina los métodos de acceso a los canales de radio a usarse y especifica el tamaño de los paquetes.

En lo referente a la transmisión, delinea un esquema de transmisión basado en DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), utilizando modulación BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) para la banda de 868/915 MHz y O-QPSK (*Offset-Quadrature Phase Shift Keying*) para la banda de 2.4 GHz.

II.2.3.3.2. **ZIGBEE**

El estándar ZIGBEE (ZIGBEE ALLIANCE, 2009) se creó con el objetivo de delimitar aquellos vacíos que dejó la norma 802.15.4, con el fin de homologar la producción de dispositivos y las investigaciones que se venían realizando.

La primera versión de la pila de protocolos suele denominarse ahora ZIGBEE 2004 para diferenciarla de la segunda versión de junio de 2006 que se denomina ZIGBEE 2006. Esta segunda versión reemplaza la estructura de mensajes MSG/KVP (*Message / Key Value Par*) con una librería de clústeres, dejando obsoleta a la versión anterior. ZIGBEE ALLIANCE está trabajando con la versión de la pila de protocolos de 2007, centrándose en optimizar funcionalidades del nivel de red para la agregación de datos, seguridad y aplicaciones.

El desarrollo de la tecnología se basa en la sencillez y el bajo coste más que en otras redes inalámbricas semejantes de la familia WPAN, como puede ser por ejemplo BLUETOOTH. El nodo ZIGBEE más completo, requiere en teoría cerca del 10% del *hardware* de un nodo BLUETOOTH o Wi-Fi típico; esta cifra se reduce al 2% para los nodos más sencillos. No obstante, el tamaño del código en sí es mucho más complejo y se acerca al 50% del tamaño del código de BLUETOOTH, razón por

la cual ZIGBEE resulta ser más robusto que cualquier otra tecnología WPAN del mercado.

Quizás la atracción principal en las redes ZIGBEE es que son auto-configurables y auto-regenerables, lo que permite que los mensajes puedan pasar de un nodo a otro por múltiples caminos, pues los nodos son lo suficientemente inteligentes como para re-direccionar el tráfico en el caso de que un nodo se pierda.

En lo referente a seguridad, hay lineamientos para lograr encriptaciones de 128 bits tanto a nivel de capa de red como de nivel de enlace. Para lograr esto se cuenta con varias "*link keys*" y tan solo una "*network key*". De este modo, la comunicación *unicast* entre dos nodos a nivel de aplicación es encriptada por una llave compartida tan solo por los nodos involucrados a nivel de enlace, mientras que la comunicación *broadcast* es encriptada por una sola llave común de todos los nodos a nivel de red. Así un nodo que recibe un mensaje es siempre consciente acerca del arreglo exacto de seguridad utilizado.

II.2.3.3.3. **Compatibilidad entre ZIGBEE y Wi-Fi**

Es probable que en algunas aplicaciones estos dos sistemas de comunicación inalámbrica estén funcionando simultáneamente muy cerca, y se debe tener la seguridad en que no se causaran interferencias entre sí.

En la Figura 5, se puede apreciar la frecuencia en la que opera la radio de los dos sistemas de comunicación. Ambas tecnologías pueden ser emitidas en varios canales, pero una vez fijado el canal, todos los nodos de la red deben estar fijados en dicho canal para que puedan comunicarse entre sí. Una observación importante es que la asignación del canal de radio se hace en el centro de la banda de frecuencias y en base a esto es que se determina la frecuencia de operación efectiva de la red. En este sentido se puede apreciar que los canales Wi-Fi son más anchos que los canales ZIGBEE, los cuales ocupan 22 MHz y 5 MHz respectivamente, manteniendo una banda de guarda de 2 MHz para el caso de ZIGBEE y 3 MHz en el caso de Wi-Fi.

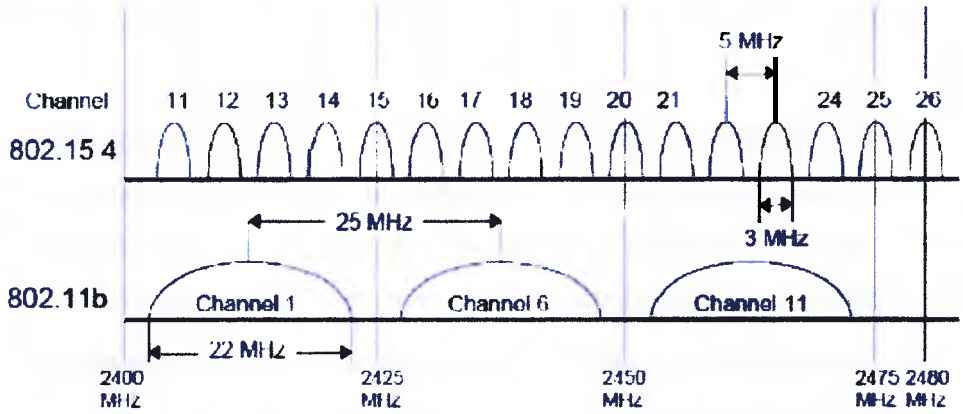


Figura 5: Canales IEEE 802.15.4 (ZIGBEE) y IEEE 802.11b (Wi-Fi)

(Fuente: Fernández Martínez, y otros; 2009. p. 31)

II.2.4. Sistema Operativo

TINYOS es quizás el primer sistema operativo diseñado específicamente para redes WSN. A diferencia de la mayoría de los otros sistemas operativos, TINYOS se basa en un modelo de la programación controlado por eventos en vez de multiprocesos. De esta manera, el diseño del *Kernel* del TINYOS está basado en una estructura de dos niveles de planificación:

- **Eventos:** pensados para realizar un proceso pequeño, por ejemplo, cuando el contador del timer se interrumpe, o atender las interrupciones de un conversor análogo-digital. Además, pueden interrumpir las tareas que se están ejecutando.
- **Tareas:** las tareas son pensadas para hacer una cantidad mayor de procesamiento y no son críticas en tiempo, por ejemplo, calcular el promedio de un arreglo. Las tareas se ejecutan en su totalidad, pero la solicitud de iniciar una tarea y el término de ella son funciones separadas.

El lenguaje en el que se encuentra programado TINYOS es un meta-lenguaje que deriva de C, cuyo nombre es NESC. Además existen varias herramientas que ayudan al estudio y desarrollo de aplicaciones para las redes de sensores, que van desde aplicaciones para la obtención y manejo de datos, hasta sistemas completos de simulación.

II.2.5. Aplicaciones de Redes Inalámbricas de Sensores

Debido a la amplia gama de sensores que se pueden integrar a los nodos de una red inalámbrica de sensores y a las características descritas en los apartados anteriores, las aplicaciones en las que estos sistemas pueden funcionar son prácticamente infinitas. Siempre que se pueda acoplar el sensor adecuado a la red, esta puede servir eventualmente para monitorear o adquirir información del fenómeno al que se le desee realizar el seguimiento. Adicionalmente, las redes pueden no solo monitorear, sino también pueden llegar a ser capaces de tomar decisiones y realizar las acciones adecuadas frente a un determinado evento. Esto se puede lograr mediante el acople de actuadores a los nodos de la red. A continuación se presentan algunas aplicaciones y desarrollos que se han logrado en este campo hasta el momento:

- **Vigilancia y seguridad:** Capaces de detectar movimiento, sonido, temperatura, y en definitiva, cualquier característica que sea necesaria controlar para mejorar la seguridad (cámaras acorazadas de bancos, bases militares, entre otras).
- **Investigaciones medioambientales:** Permiten un estudio detallado y objetivo tanto de animales como de parajes o ecosistemas, como por ejemplo, detectar alarmas ecológicas o perseguir a cazadores furtivos.
- **Control de calidad en la industria:** Detección y corrección de fallos puntuales y diminutos con gran facilidad. Ejemplo: piezas más largas de lo normal o transmisiones que no llegan al receptor.
- **Automoción:** Accionar limpiaparabrisas si ha empezado a llover, reducción de la velocidad si hay un automóvil delante, entre otras aplicaciones.
- **Medicina:** Sensores capaces de indicar las variaciones en el organismo del paciente y actuar de una manera rápida y eficiente.
- **Domótica:** Alcanzar el concepto de "casa inteligente". Información sobre la temperatura y la luminosidad para accionar ciertos electrodomésticos
- **Aplicaciones Militares:** Sensores en un determinado paraje con el fin de detectar movimientos del enemigo y detección de misiles en aviones.

Capítulo III. Marco metodológico

En este capítulo se presenta la metodología aplicada durante el desarrollo del proyecto para alcanzar el objetivo principal del Trabajo Especial de Grado. De igual forma, se describen los pasos que especifican la manera en la que se recogieron los datos, los cuales sirven como basamento para proveer el análisis respectivo de la investigación y sus resultados.

III.1. Tipo y diseño de la investigación

De acuerdo a las características fundamentales de la investigación, el enfoque utilizado para la metodología fue cuantitativo. En la fase inicial, se definió el tipo de investigación como un estudio de proyecto factible con carácter exploratorio y descriptivo.

Asimismo, el desarrollo de la investigación se apoya en referencias del estudio de campo, identificando las variables de un evento sobre la base de patrones de relación implícitos, a fin de llegar a una comprensión general del problema. El evento a ser analizado es la gestión de la cadena de frío y la propuesta es desarrollar un sistema de monitoreo que permita garantizar la calidad y seguridad de los alimentos.

III.2. Metodología aplicada

En la Figura 6 se aprecia la forma en que se relacionan cada una de las fases de la metodología empleada en el desarrollo del Trabajo Especial de Grado. Luego, en la Tabla 4 se describen cada una de estas fases.

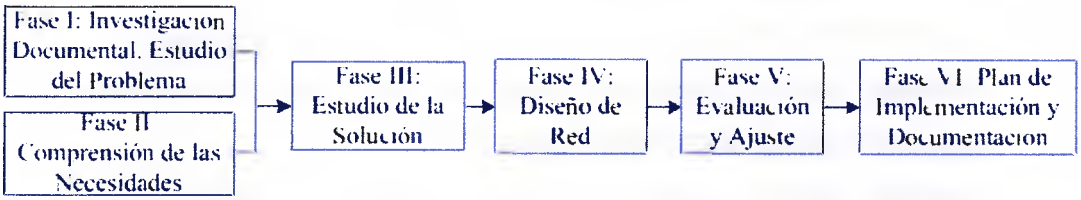


Figura 6: Diagrama de trabajo de la metodología utilizada

(Fuente: Elaboración propia)

	Descripción
Fase I: Investigación documental. Estudio del problema	Se recopiló toda la información de interés con respecto a la gestión de la cadena de frío, la tecnología de redes inalámbricas de sensores y su potencial uso para el monitoreo en tiempo real de los parámetros que intervienen en dicha cadena en base a antecedentes de otras investigaciones, para así, describir las variables que se deben considerar para comprender la problemática existente a nivel general.
Fase II: Comprensión de las necesidades del caso de estudio	Se lograron determinar los parámetros de interés para una empresa piloto y se levantó la información *in situ* de datos referentes a las áreas que se desean monitorear. Parte importante de esta investigación tuvo que ver con el conocimiento de las características radioeléctricas presentes en los almacenes de la empresa y con el comportamiento de la temperatura en cada uno de sus cuartos fríos, puesto que ambas observaciones contribuyeron a determinar algunas características para el diseño de red que forma parte del sistema de monitoreo que se plantea.
Fase III: Estudio de la solución	Se probaron los dispositivos WSN disponibles en laboratorio, para comprender algunos aspectos técnicos que tienen que ver con las redes inalámbricas de sensores. Por medio de este estudio, se pudieron determinar los componentes de *hardware* necesarios para la posible implementación del proyecto, los cuales fueron incluidos en la documentación para el plan de implementación del sistema de monitoreo.
Fase IV: Diseño de red	Se procedió a realizar el diseño de la red inalámbrica de sensores, contemplando la propuesta de la arquitectura de red en base a las consideraciones de diseño del proyecto, de manera de ofrecer una solución accesible, funcional, eficiente y de fácil instalación para su posible implementación.
Fase V: Evaluación y ajustes	Se procedió a evaluar los aspectos técnicos del estudio, apoyados en pruebas sobre el prototipo de la solución. Se realizaron los ajustes del proyecto, tomando en cuenta las consideraciones necesarias para que los demás equipos de trabajo desarrollen sus aplicaciones de *software* de acuerdo a la solución propuesta.
Fase VI: Plan de implementación y documentación	Se propusieron los pasos a seguir para la futura implementación del diseño piloto, siempre y cuando así lo decida la empresa del caso de estudio. Adicionalmente a esto, se documentaron las recomendaciones para el buen uso y mantenimiento de la solución propuesta.

Tabla 4: Descripción de la metodología utilizada

(Fuente: Elaboración propia)

Capítulo IV. Desarrollo

En este capítulo se detallan los estudios, pruebas y procedimientos realizados a lo largo de la investigación y que fueron necesarios para cumplir con los objetivos propuestos en el Capítulo I.

IV.1. Investigación documental. Estudio del problema

En esta etapa se procedió a documentar toda la información necesaria sobre la gestión de la cadena de frío que es fundamental para entender el problema planteado y se consideró el estudió de la tecnología WSN, para analizar su aplicación al proyecto.

De acuerdo a la investigación piloto realizada en los inicios del proyecto, se pudo observar que el tema de la gestión de la cadena de frío es limitado y poco difundido. En relación a la investigación que tuvo que ver con la tecnología WSN no se presentaron inconvenientes en la identificación de la información, pues a pesar de ser una tecnología de reciente aparición en el mercado, se consigue bibliografía suficiente en medios electrónicos. Por esta razón, se decidió profundizar en la investigación correspondiente a la gestión de la cadena de frío, evaluando los aspectos que más se ven involucrados en dicha cadena. La elaboración de mapas mentales y las estrategias de búsquedas empleadas, fueron determinantes para el cumplimiento de este objetivo.

Durante el proceso inicial de revisión de literatura, fue necesario identificar las palabras claves que serían utilizadas posteriormente en las bases de datos de Internet como frases de búsquedas. La revisión de libros ayudó a determinar los parámetros que finalmente se ajustarían al campo de estudio. La identificación de los procedimientos empleados en la cadena de frío, así como los estándares empleados a nivel de control de temperaturas fueron aspectos suficientes para entender los retos que implica la gestión de la cadena de frío.

IV.2. Comprensión de las necesidades del caso de estudio

En las visitas realizadas a la empresa del caso de estudio, se pudo determinar por el análisis de la situación de esta empresa para el manejo de la cadena de frío, modelando así el diseño del sistema piloto que se desea desarrollar. Los aspectos considerados para determinar las necesidades de la empresa del caso de estudio fueron los siguientes:

- **Instalaciones para la gestión de la cadena de frío:** en esta parte de la investigación se recogió información específica acerca de los almacenes o cuartos fríos de la empresa, los vehículos refrigerados, los contenedores refrigerados y los instrumentos empleados para monitorear las temperaturas en cada una de estas instalaciones.
- **Procesos, estándares y parámetros:** por medio de este estudio se obtuvo información acerca de los procesos y estándares por los cuales se rige la empresa, determinando así los parámetros de la cadena de frío que se deben monitorear y especificando a su vez, las temperaturas de operación que deben tener las cavas de alimentos refrigerados y congelados.
- **Manejo de la cadena de frío en la empresa:** se estudiaron todos los aspectos que tienen que ver con el protocolo que deben seguir los empleados de la empresa para la verificación de la temperatura dentro de los almacenes, así como también, la manera en la que se maneja la mercancía dentro del andén de cargas o pasillo frío.
- **Aspectos técnicos para el diseño de red WSN:** en este sentido, se consideró el comportamiento específico de la temperatura en cada uno de los cuartos fríos de los almacenes de la empresa, por medio de un estudio de **gradiente de temperatura**. Adicionalmente, se realizó un barrido de frecuencias sobre la banda de 2.4 GHz para determinar los canales de comunicación óptimos para poder transmitir la información con la menor interferencia posible.

Toda la información obtenida de este estudio es presentada en el capítulo de resultados (Capítulo V).

IV.3. **Estudio de la solución**

Para comprender la tecnología WSN, fue necesario realizar un estudio previo de mercado, de manera de poder determinar los aspectos que se pueden evaluar de estos dispositivos. La investigación condujo a comparar los componentes de los fabricantes XBEE y CROSSBOW, por ser los equipos con los que se contaba para realizar las pruebas piloto al momento de la realización del Trabajo Especial de Grado. El cuadro resumen que se presenta a continuación (Ver Tabla 5), contiene las características que fueron evaluadas como parte del objeto de este estudio.

	CROSSBOW	**XBEE**
Lenguaje de programación	NESC, una variante de C.	C++
Rango de operación	Sensores de temperatura: -40°C a +71°C	Sensores de temperatura: -40°C a +85°C
Rango de Alcance	30 metros	30 metros
Potencia de Transmisión	-25 a 0 dbm	1mw
Sensibilidad de Recepción	-94 dbm	-106 dbm
Precisión	Sensor de Temperatura: +/- 0.5°C a +25°C, desconocido a otras temperaturas.	Sensor de Temperatura: +/- 0.25°C
Desempeño	Problemas con rangos de voltajes inferiores a 2.2v	No hay problemas reportados.
Encapsulado	Disponible	No disponible
Software de visualización	MOTEVIEW	No Dispone de un *software* de visualización.
Seguridad	Desconocido	Encriptación AES 128bit
Dimensiones	Medidas: 63x38x43 mm Peso: 91gr	Medidas: 75.5x51.13 mm Peso: 20gr
Sensores incluidos y agregables	Incluidos: Acelerómetro, temperatura, luz, humedad, presión. Adicionalmente está disponible una tarjeta con entradas analógicas y digitales para agregar nuevos sensores	El diseño es modular y se encargan los que se deseen. Se encuentran disponibles sensores de temperatura, acelerómetro, luminosidad, gases y eventos de todo tipo.
Gateway	USB , Serial y ETHERNET	USB

Tabla 5: Características de dispositivos WSN CROSSBOW Vs. XBEE

(Fuente: Mendonça & Pérez, 2010)

Por tratarse de un sistema de monitoreo para la cadena del frio, el principal aspecto considerado en la comparación de los dispositivos mostrados en la Tabla 5 es la capacidad de operación de la electrónica a bajas temperaturas. En este sentido, ambos componentes cumplen con las exigencias del proyecto, ya que operan favorablemente dentro del rango de temperatura manejado en los almacenes de la empresa del caso de estudio. El resto de las características representan propiedades para ser tomadas en cuenta en base a las necesidades del diseño de red, pero como se puede apreciar, existen muchas similitudes al respecto. Sin embargo, la balanza se vio inclinada hacia los equipos CROSSBOW por diferentes razones que se numeran a continuación:

- Los dispositivos CROSSBOW cuentan con una tarjeta de sensores que puede servir para monitorear los parámetros que pueden garantizar la gestión de la cadena de frío (temperatura, humedad, luminosidad) mientras que los dispositivos XBEE se arman por módulos y para el momento de la investigación no se contaba con los sensores necesarios.
- La potencia de transmisión en las unidades de radio de los equipos CROSSBOW es configurable, mientras la unidad de radio XBEE que se tenía disponible transmitía con una sola potencia.
- Los dispositivos CROSSBOW disponen de un *software* para la visualización de Datos propietario de la compañía, que puede servir para integrar los niveles de cliente y servidor explicados en el Capítulo I, pues se debe recordar que estas aplicaciones no serían desarrolladas por los autores.
- La compañía CROSSBOW ofrece diversidad de dispositivos que pueden servir de puerta de enlace o *Gateway* con interfaz USB, ETHERNET y serial, por lo que la arquitectura de red puede ser más flexible en este sentido.

Por estas razones y por la posibilidad de contar con los equipos CROSSBOW disponibles en el laboratorio para iniciar los estudios, se decidió utilizar estos dispositivos para el desarrollo del Trabajo Especial de Grado, siendo las pruebas de

campo realizadas en la empresa del caso de estudio las que determinaran si se deben considerar estos dispositivos en el plan de implementación.

IV.3.1. **Dispositivos utilizados**

El equipo con el que se contó para la elaboración de este Trabajo Especial de Grado corresponde con el *kit* de evaluación y desarrollo de la compañía CROSSBOW, denominado "*MICAZ Professional Kit – 2.4 GHz*", el cual contiene los siguientes elementos:

- 6 Nodos sensores embebidos (Modelo SN24040).
    - Unidad de radio modelo MPR2600
    - Tarjeta de sensores modelo MTS400/420CA
- 1 Unidad de radio (Modelo MPR2400)
- 1 *Gateway* USB (Modelo MIB520)
- 1 Tarjeta de programación (Modelo MIB520)
- 1 Tarjeta de adquisición de datos (Modelo MDA300)
- 1 CD con el *software* necesario para el desarrollo de aplicaciones WSN

Adicionalmente, la Universidad Católica Andrés Bello disponía de 2 unidades de radio modelo MPR2400 y con el *Gateway* ETHERNET modelo MIB600. En el Anexo A, se puede encontrar la descripción técnica del fabricante para este *kit* de desarrollo.

IV.3.2. **Pruebas preliminares con dispositivos**

Una vez determinados los dispositivos a utilizar, se procedió a realizar algunas pruebas de laboratorio para comprender el funcionamiento básico de las redes inalámbricas de sensores. Los aspectos tomados en cuenta en la realización de este estudio son señalados en los apartados siguientes.

IV.3.2.1. **Consumo de energía**

De acuerdo a la información teórica presentada en el Capítulo II, este aspecto resulta ser determinante para las aplicaciones WSN. El estudio realizado estuvo

enfocado en el consumo de energía en condiciones de baja temperatura, pues adicionalmente se manejaba la teoría de que el rendimiento de las baterías de carbono no era estable bajo condiciones de frío. Esta investigación fue llevada a cabo por Mendonça & Pérez (2010) en un ambiente bajo temperatura controlada a -11°C (ver Anexo B: Rendimiento de baterías de Litio vs. Alcalinas en condiciones de frío). Sus resultados sirvieron de referencia para tomar en consideración la utilización de baterías de litio en el desarrollo del proyecto.

IV.3.2.2. **Programación de los nodos**

Las pruebas realizadas en esta parte de la investigación estuvieron fundamentadas en la revisión de los documentos y manuales de la compañía CROSSBOW para la programación de los dispositivos. La primera consideración al respecto que se debe tomar en cuenta es que el *software* requerido para el funcionamiento en conjunto de la red inalámbrica de sensores reside en forma de *firmware* en cada uno de los nodos. Por medio del conjunto de herramientas del paquete MOTEWORKS propiedad de CROSSBOW, se logró modificar la programación de las unidades de radio MPR2400 de manera local y remota, por medio de la interfaz de programación MIB520, cargando en la memoria *flash* del nodo, el programa correspondiente a la tarjeta de sensores modelo MTS400/420CC que se disponía en el *kit* de desarrollo. Para ello, fue utilizada la herramienta PROGRAMMER NOTEPAD 2, la cual utiliza programación NESC sobre TINYOS. Es importante hacer la salvedad que durante el desarrollo del proyecto, no se modificó la programación de los nodos embebidos que vienen encapsulados en el *kit* de desarrollo por desconocer el *software* que traen de fábrica.

El desarrollo de este estudio, permitió configurar los valores de potencia de transmisión y los canales de comunicación de los nodos inalámbricos, utilizando la herramienta MOTECONFIG 2.0, la cual ofrece una opción más sencilla para cambiar estos parámetros en contraposición al PROGRAMMERS NOTEPAD 2 que utiliza un lenguaje de programación poco conocido, sobre todo por la manera en la que se realiza la llamada a eventos. Sin embargo, fue necesario dedicar tiempo a la

comprensión del código del programa XMTS420CC, puesto a que es la aplicación que fue utilizada para recoger los datos en planta y representa la única manera para cambiar el ciclo de trabajo de las unidades de radio. La ventaja que representó este esfuerzo es que se pudo conocer, de manera muy general, cómo los nodos de medida realizan el proceso de recolección y agrupación de Datos, así como también el tiempo empleado por los nodos para transmitir entre tramas, el cual define el tiempo entre muestras o tiempo de muestreo.

IV.3.2.3. **Plataforma para la visualización de datos**

Adicionalmente a la programación de las unidades de radio, se utilizó la herramienta de visualización de datos MOTEVIEW 2.0F de CROSSBOW, para monitorear las mediciones tomadas por los nodos en las pruebas de laboratorio realizadas y así verificar el funcionamiento de la red inalámbrica de sensores. El estudio de este programa fue de suma importancia para definir el alcance y las limitaciones del proyecto, debido a que en la fase de investigación previa al Trabajo Especial de Grado, se consideró utilizar esta aplicación para conformar el sistema de monitoreo propuesto. Sin embargo, de acuerdo a las necesidades de la empresa del caso de estudio, la aplicación para el monitoreo de parámetros que garanticen la gestión de la cadena de frío en planta, debe ser accesible a través de la *Web* y el programa estudiado no ofrece esta posibilidad, siendo además un programa mono usuario. Ante esta situación, la propuesta fue que las aplicaciones del nivel de cliente y servidor fuesen desarrolladas por un grupo de trabajo de informática, tomando como referencia algunos aspectos del *software* de visualización de datos MOTEVIEW 2.0F, sobre todo a nivel de interfaz gráfica.

El objetivo perseguido en este sentido, fue detallar el funcionamiento de este programa y proporcionar los conocimientos adquiridos respecto a la estructura de trama con el grupo de trabajo encargado de desarrollar el *software* a nivel de servidor de datos, entendiendo específicamente la manera en la que se encapsulan los paquetes que son transmitidos por los nodos hacia el *Gateway* de red. De esta manera, el sistema de monitoreo para el control de parámetros de la cadena de frío en los

almacenes de una empresa de logística de alimentos *per sé*, queda conformado por la integración del trabajo realizado por todos los entes participantes del proyecto, aunque se deja claro que de acuerdo al estudio piloto realizado, con la aplicación del programa MOTEVIEW 2.0F se podría llevar a cabo también el sistema de monitoreo propuesto, tan es así, que las pruebas de campo realizadas en la empresa del caso de estudio se hicieron con la utilización de dicho programa.

IV.3.2.4. **Estructura de los mensajes**

Durante las primeras pruebas de la investigación, se utilizó el *Gateway* USB MIB520 para poder recibir la información de los nodos de manera local. Esta unidad procesa los datos por medio de una interfaz serial y la trama recibida se logró visualizar a través del programa de captura serial de datos REALTERM v2.0.0.57. Posteriormente, se definió como puerta de enlace la interfaz ETHERNET MIB600, la cual maneja la información en paquetes IP y para su estudio, se requirió de la utilización del programa WIRESHARK. En esta fase de la investigación se analizaron las tramas proporcionadas por ambos *Gateways*, entendiendo la estructura de los paquetes en base a la documentación del Sistema Operativo TINYOS (ver Anexo C: Descripción de mensajes TINYOS). Adicionalmente, se probaron las fórmulas de conversión conseguidas en el programa XMTS420CC, emulando de esta manera parte del procedimiento realizado por el MOTEVIEW en el nivel de servidor de datos para presentar los valores de medidas tomados por los sensores en unidades de ingeniería (ver Anexo D: Fórmulas de conversión de medidas).

IV.3.3. **Comparación de instrumentos de medición de temperatura**

Con el fin de describir el comportamiento de la temperatura en los cuartos fríos de la empresa del caso de estudio, se planificaron unas pruebas preliminares entendiendo que antes de hacer cualquier medición, era necesario contar con otros instrumentos que pudieran establecer un patrón de referencia para la calibración de los nodos.

En el momento de la realización de la prueba, se contó con un conjunto de termógrafos y termómetros digitales de varilla bimetálica, proporcionados por *la empresa de logística de alimentos piloto*, y con la utilización de estos dispositivos se probó la precisión de los nodos WSN. Debido a que la falta de documentación que certifique la correcta calibración de todos estos instrumentos, no se puede considerar el procedimiento que se llevó a cabo como una prueba de validación formal, pero sirve para tener una idea de la precisión que puede tener la tarjeta de sensores modelo MTS400/420CC en condiciones de bajas temperatura.

La estrategia para esta prueba de comparación de instrumentación fue escoger puntos específicos en diferentes áreas del almacén donde se colocaron un conjunto de equipos conformado por un elemento de cada tipo disponible, registrando periódicamente los datos correspondientes durante un tiempo determinado, con el fin de presentar mediante gráficos las comparaciones respectivas.

Por programación de fábrica, los nodos WSN toman registro de temperatura cada 22 segundos, mientras que los termógrafos estuvieron configurados para capturar datos cada 2 minutos con 30 segundos. En el caso de los termómetros digitales, fue necesario el registro manual de los datos puesto a que estos instrumentos no cuentan con memoria para el almacenamiento de la data, por esta razón y por la dificultad que representaba el hecho de que una persona pudiera permanecer en cada uno de los puntos de control para el levantamiento de la información, se planteó realizar un recorrido cada 5 minutos para tal fin.

En la Figura 7 se muestran los puntos seleccionados para el despliegue de los respectivos conjuntos de elementos. En el Apéndice A, se pueden apreciar las gráficas que describen el comportamiento de los instrumentos utilizados en cada uno de estos puntos.

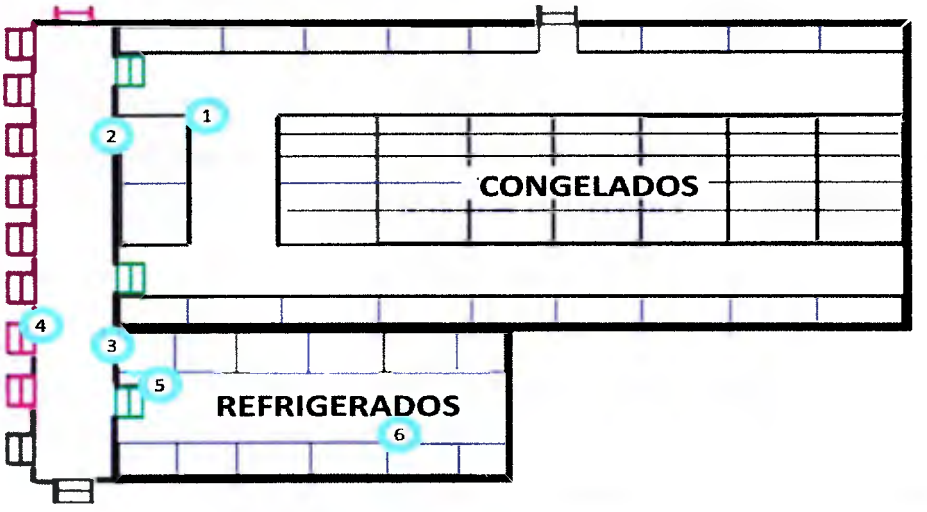


Figura 7: Disposición del conjunto de dispositivos en las áreas del almacén

(Fuente: Elaboración propia)

IV.4. Diseño de red

Una vez finalizado el proceso de investigación y manipulación de los dispositivos que se iban a utilizar, se procedió a diseñar la red de acuerdo a las necesidades de la empresa del caso de estudio. En esta sección se describen precisamente las características que definen el diseño de la red inalámbrica de sensores que cubren el nivel de captura de datos de la aplicación WSN desarrollada.

IV.4.1. Consideraciones de diseño

El diseño de la red inalámbrica de sensores para el monitoreo de parámetros de calidad de la cadena de frío está fundamentado por 2 consideraciones principales. La primera de ellas está dada por el resultado del estudio del gradiente de temperatura, con el cual se definen las zonas a monitorear en cada una de las cavas o cuartos fríos, y en segundo lugar se encuentran, las consideraciones de radiofrecuencia dadas por la configuración de potencia y alcance en la comunicación entre nodos que de cierta manera definen la arquitectura de la red. Estos argumentos determinaron la cantidad y ubicación de los nodos a lo largo del almacén de la empresa estudiada.

IV.4.1.1. **Topología a emplear**

Parte del estudio realizado en la fase anterior, permitió corroborar la capacidad que tienen las redes inalámbricas de sensores para configurarse de manera automática, adaptando su topología de acuerdo a la distribución espacial de los nodos.

Si bien es cierto que esto representa una ventaja porque el sistema puede funcionar de manera desatendida desde el momento que se despliega la red, en la fase de diseño, se debe considerar el consumo de energía que puede producir la retransmisión de datos como consecuencia de una mala elección en los nodos enrutadores que sirven de salto para llegar al *Gateway*.

La estrategia para diseñar la topología de red se basa en forzar las condiciones para crear una topología tipo malla, en donde cada nodo pueda comunicarse sólo con sus vecinos más próximos, de manera que puedan operar con una mínima potencia de transmisión para así optimizar el uso de energía y sus recursos.

De este modo no sólo se disminuye el consumo de energía sino que además se obliga a los nodos más alejados del *Gateway* a utilizar nodos cercanos como enrutadores para aligerar el trabajo de recepción de datos por parte del *Gateway* y disminuir colisión de paquetes de datos transmitidos.

IV.4.1.2. **Niveles de potencia**

Los resultados que relacionaban los niveles de potencia de transmisión con la distancia de cobertura de los nodos en las pruebas de laboratorio, no pudieron ser aplicados en los almacenes de la empresa del caso de estudio, ya que la estructura de las cavas y los elementos que se encuentran presentes en ellas, sirven como obstáculos o interferencia para atenuar la transmisión de la señal. Por esta razón y ante la imposibilidad de realizar pruebas de campo bajo condiciones estables, se aplicó una técnica de ensayo y error que permitió determinar el nivel de potencia de cada nodo de la red, garantizando así la topología de malla bajo las condiciones descritas en la sección anterior. Para ello, se desplegaron los nodos configurados a máxima potencia en las ubicaciones respectivas, de manera de poder confirmar el

máximo alcance que podía tener la red. Luego, se disminuyó la configuración de este parámetro hasta conseguir el valor de potencia con el que los nodos fueron capaces de comunicarse únicamente con sus nodos vecinos. Bajo este esquema se define por completo la arquitectura de red del sistema WSN, la cual queda determinada por la ubicación de los sensores, los niveles de potencia y la topología de malla empleada.

IV.4.2. **Parámetros a medir**

Los retos que implica la gestión de la cadena de frío están orientados principalmente al seguimiento estricto de la temperatura y de la misma manera, el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado tiene el mismo enfoque. Sin embargo, aprovechando que los nodos que se utilizaron tienen la capacidad de medir diversos parámetros, se propuso tomar en cuenta también la humedad para garantizar la conservación de los alimentos, según las condiciones de temperatura de almacenamiento discutidas en el Capítulo II. Adicionalmente, otros parámetros que manejan los sensores fueron aprovechados para normalizar algunos procesos en la empresa en base a sus necesidades.

De esta manera, monitorear la luminosidad de los almacenes puede ser tomado en cuenta para validar que las luces han sido apagadas al culminar la jornada de trabajo. De igual modo, el nivel de voltaje de las baterías puede ayudar en el proceso de mantenimiento de la solución para emitir alarmas en los casos en que los dispositivos comiencen a presentar fallas por insuficiencias de energía.

Es importante destacar que la empresa del caso de estudio no tiene definido los umbrales para la determinación de estos parámetros, excepto en el caso de la temperatura, para la cual sí tiene patrones específicos. Es por esta razón que el estudio realizado aporta los valores que sirven para la generación oportuna de alarmas, definiendo únicamente su estrategia más no la aplicación de la misma. Todos estos aspectos representan un valor agregado al estudio realizado, pero se debe recordar que el objetivo principal de la investigación está centrado principalmente en el diseño de la red inalámbrica de sensores.

IV.4.3. **Tiempo de muestreo**

El tiempo de adquisición y transmisión de datos define el ciclo de trabajo de los nodos y puede ser configurado mediante su programación. Este parámetro debe ser lo suficientemente grande como para mantener al nodo sensor en estado de *sleep*, pero a su vez, lo suficientemente corto como para permitir tener un monitoreo confiable de los diferentes parámetros de interés, de manera que no se comprometa el buen estado de los alimentos conservados en cada una de las cavas.

Es importante señalar que durante el desarrollo de la investigación no fue considerado el cambio en la configuración de este parámetro. De esta manera, queda como parte del análisis de las pruebas de campo realizadas, verificar el consumo de energía que produce el tiempo de muestreo con el que vienen configurados los nodos sensores del *kit* de desarrollo con el que se trabajó durante la realización de este estudio, para determinar en conjunto al departamento de control de calidad de la empresa el tiempo de muestreo a utilizar.

IV.5. **Evaluación y ajustes**

Una vez contempladas las características de diseño red, se plantearon las pruebas de campo que permitieron evaluar el comportamiento en planta de los nodos sensores y en base a los requerimientos de la empresa del caso de estudio, se llegó a definir la capacidad que debía tener la red inalámbrica para establecer una referencia y realizar los ajustes respectivos del diseño de red. Los aspectos estimados fueron los siguientes:

- **Arquitectura y protocolo escalable:** de este modo la red puede crecer sin mayores dificultades, siendo capaz de restablecer las rutas multi-salto tanto de los nodos nuevos como de los nodos que ya estaban instalados.
- **Diseño ahorrador de recursos:** en las redes inalámbricas de sensores, el uso de la energía es vital. Durante las pruebas realizadas se debe verificar está condición para tratar de extender al máximo el tiempo de vida del sistema.

- **Auto-configuración:** la red debe ser capaz de conectarse y comunicarse independientemente del estado en que se encuentre el nodo. Adicionalmente, nuevos enlaces y rutas deben poder ser creadas en caso de fallo de algún nodo.
- **Fiabilidad y tolerancia a errores:** las redes deben poder entregar la información de manera confiable independientemente de las condiciones de la red. Para lograr esto, se debe verificar la información en el concentrador de la red. Además, se espera que con una certificación se puedan realizar los ajustes para la calibración de los sensores.

Esta información resulta importante para hacer inferencias en los resultados obtenidos y así poder establecer conclusiones y recomendaciones al respecto.

IV.6. **Plan de implementación y manual de mantenimiento**

Como se señaló en el Capítulo III, el carácter de esta investigación está enmarcado en el estudio de un proyecto factible y en consecuencia, uno de los objetivos planteados consistió en desarrollar el plan de implementación como apoyo para el futuro despliegue de la red.

En el Apéndice B: Plan de implementación de la solución propuesta, se detalla este documento, el cual incluye un bosquejo de la metodología empleada durante el desarrollo del proyecto y contempla la propuesta para la adquisición de nuevos dispositivos WSN. Adicionalmente, se presenta un manual con las consideraciones básicas para garantizar el mantenimiento y el buen uso de la red inalámbrica de sensores (ver Apéndice C: Manual de mantenimiento de la Red Inalámbrica de Sensores).

Finalmente, en el Apéndice D se describen los equipos propuestos para implementación, indicando el número de unidades y su costo actual indicado en Dólares Americanos (USD) y su equivalente en Bolívares (BsF) de acuerdo al cambio oficial vigente de 4,30 Bolívares por Dólar Americano.

Capítulo V. Resultados

El presente capítulo contiene la descripción de los resultados obtenidos en las diversas etapas del desarrollo del Trabajo Especial de Grado, tomando como referencia la estructura que definió las fases del proyecto y que fueron presentadas en la sección Metodología aplicada del Capítulo III.

V.1. Investigación documental. Estudio del problema.

Los resultados más importantes de esta etapa de la investigación fueron presentados en el Capítulo II, en donde se realiza un resumen bibliográfico con los distintos conceptos que engloba la tecnología WSN y se explican los retos que se ven involucrados en la gestión de la cadena de frío.

V.2. Comprensión de las necesidades del caso de estudio

La empresa de logística de alimentos estudiada, es una compañía proveedora de soluciones integrales para la gestión de la cadena de frío, especializada en el almacenamiento y distribución de alimentos perecederos con presencia en Argentina, Chile, México, Colombia y Venezuela.

En el caso particular de Venezuela, el surtido de mercancía que maneja la empresa está conformado por más de 1.500 artículos, los cuales son clasificados como productos secos, refrigerados o congelados, de acuerdo a las necesidades específicas de almacenamiento. El conocimiento de los estándares y procedimientos ejecutados por la empresa, hicieron posible comprender las deficiencias del departamento de control de calidad para monitorear el almacenamiento y la distribución de estos productos, verificando de esta manera, como un primer resultado importante, que efectivamente el manejo de las instalaciones y el uso de tecnologías especializadas influyen directamente en la gestión de la cadena de frío.

En las secciones siguientes son detallados estos factores, ofreciéndole al lector un análisis que lleva a entender la situación actual de la empresa y sus necesidades.

V.2.1. **Instalaciones con las que cuenta la empresa para la gestión de la cadena de frío**

Para permitir la racionalización de los niveles de mercancía y asegurar las condiciones de almacenamiento de los productos que comercializa la empresa, el centro de operaciones del caso de estudio cuenta con los siguientes elementos:

- Cámaras de congelados y refrigerados monitoreados electrónicamente;
- Almacén para productos secos con estanterías dinámicas y selectivas;
- Andenes de carga y descarga con plataformas hidráulicas y a temperatura controlada;
- Amplios espacios que posibilitan la maniobra de transportes de gran tamaño;
- Áreas especiales para preparación de pedidos en zona de carga (*picking*) y para realizar procesos de etiquetado y empaquetamiento de mercancía;
- Programas de mantenimiento preventivo de equipos de refrigeración con planes de contingencia que aseguran el control de temperaturas.

Estas instalaciones se encuentran ubicadas en el Estado Miranda, específicamente en la Carretera Nacional La Raiza de Santa Teresa del Tuy, donde el promedio anual de temperatura alcanza 25 y 26 °C (Gobierno en línea, s.f.).

La importancia de señalar las condiciones del clima de la región radica en que, en una instalación típica, aproximadamente la mitad de la capacidad de refrigeración es utilizada para retirar el calor acumulado en los pisos, paredes, techos y puertas de los almacenes, por lo que manejar este tipo de pérdidas de frío ayuda a comprender algunos de los resultados obtenidos, ofreciendo la posibilidad de hacer algunas inferencias al respecto.

V.2.1.1 Cavas o cuartos fríos

La clasificación de los cuartos fríos que componen el almacén refrigerado de la empresa estudiada, está definida en base a la temperatura de almacenamiento de los alimentos que comercializa En la Figura 8 se puede apreciar la distribución y dimensiones de las cavas que conforman el almacén de la empresa.

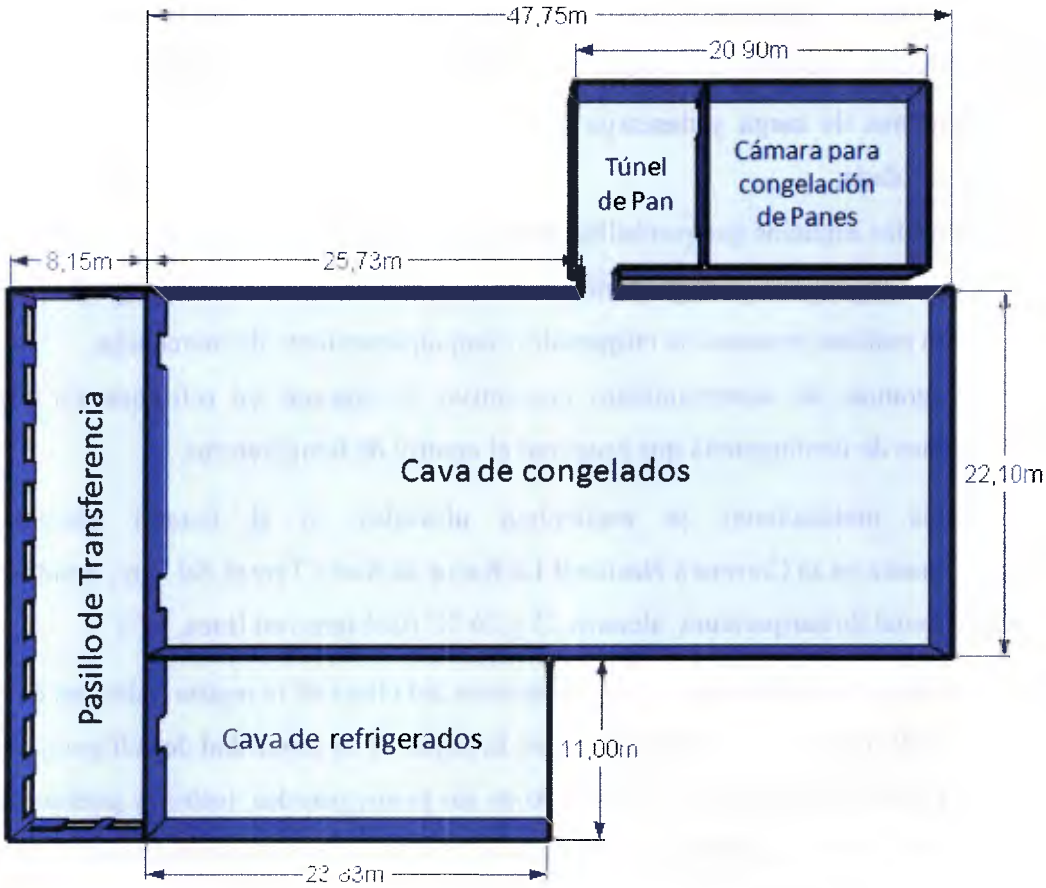


Figura 8: Esquema del almacén refrigerado de la empresa de estudio
(Fuente: Elaboración propia)

Se debe señalar que el estudio realizado fue llevado a cabo únicamente en las cavas de almacenamiento refrigerado y congelado, pues el pasillo de transferencia y el túnel de pan son estructuras utilizadas para reducir el impacto que producen los

cambios bruscos de temperaturas durante los procesos de carga y descarga de los alimentos.

Cada cuarto frío contiene sistemas de refrigeración que ayudan a mantener los niveles adecuados de temperatura dentro de la cava y el material envolvente del cuarto sella completamente la estructura ante cualquier posible filtración de agua, al mismo tiempo que reduce las entradas de calor provenientes de las zonas vecinas. En este sentido, todos los paneles divisorios del almacén refrigerado presentan el mismo acabado, conteniendo en su interior, espuma de poliuretano con 100mm de espesor que pueden soportar temperaturas de hasta - 30 °C.

De acuerdo a la información suministrada por el departamento de mantenimiento de la empresa, este material proporciona un excelente grado de aislamiento térmico, ofreciendo resistencia al agua salada, aceites, ácidos muy diluidos, soluciones alcalinas y no es afectado por hongos, bacterias y olores.

Adicionalmente de los sistemas utilizados para el control de temperatura de las cavas, estas arquitecturas cuentan con equipos de des-humidificación para remover la humedad del aire. Este sistema promueve un medio con óptimas condiciones de almacenamiento y un ambiente seguro para trabajar, ayudando a prevenir también la oxidación de los equipos por el vapor y la humedad.

El diseño de estanterías del almacén refrigerado, se fundamenta en el tiempo de permanencia de los productos en cada uno de los cuartos fríos. En la cava de congelados se encuentran estantes de doble profundidad, sistemas con carriles y sistemas de rieles que funcionan por gravedad, para de esta manera agilizar la operación de rotación de mercancía que tienen que realizar los montacargas en el almacén. En contraparte, la cava de refrigerados no dispone de estantería fija, ya que los tiempos de almacenamiento son relativamente cortos.

El pasillo de transferencia y el túnel de pan, cuentan con áreas demarcadas en el piso donde es colocada la mercancía y es clasificada de acuerdo a la orden de pedidos de los clientes, permitiendo así trabajar de manera organizada.

V.2.1.2. **Monitores de temperatura**

Para garantizar las condiciones de temperatura en las diferentes áreas del almacén refrigerado, cada uno de los cuartos fríos dispone de equipos de medición para llevar a cabo el respectivo proceso de monitoreo.

De acuerdo a la investigación realizada, se pudo observar específicamente, que la empresa del caso de estudio dispone de termopares con sondas de aire e indicadores de temperatura instalados en los paneles de cada una de las cavas. Con estos dispositivos, se lleva a cabo el registro manual de las temperaturas y la regla establece que el personal de supervisión de planta realice dicho proceso cada tres (3) horas.

Como método alterno para el registro de temperaturas, la empresa dispone de una cantidad de termógrafos (*data loggers*) distribuidos dentro de cada uno de los cuartos fríos del almacén refrigerado, los cuales cada dos minutos y medio registran en memoria interna el valor de temperatura a la que se encuentran expuestos. Por medio de este procedimiento, el departamento de Control de Calidad lleva un registro que avala el cumplimiento de los estándares de calidad para garantizar la seguridad y conservación de los alimentos.

Adicionalmente a esto, el personal encargado de armar los pedidos verifica la temperatura de los alimentos a través de la utilización de termómetros bimetálicos de varilla con indicador digital, de manera de tener un registro en el momento de llevar a cabo el proceso de carga y descarga de productos perecederos.

Las exigencias de la empresa para la selección de equipos de monitoreo de temperatura, establece que los dispositivos operen en un rango de temperaturas entre -30 y 20°C y que adicionalmente, tengan un margen de error de más o menos 0.5°C, razón por la cual todos los instrumentos deben estar respaldados por un certificado de calibración válido.

V.2.2. **Procesos, estándares y parámetros manejados por la empresa del caso de estudio**

Para el cuidado de sus productos, la empresa estudiada se rige por los estándares pautados por su principal cliente, cuya exigencia fundamental se centra en el tema del control de la temperatura, donde se prevé para los almacenes de productos congelados una temperatura óptima de almacenamiento entre -23 y -18°C. Para los productos refrigerados, la temperatura óptima se encuentra en el rango entre 1 y 4°C. Finalmente, para el pasillo de transferencia, se espera que la temperatura no sobrepase los 7 °C. Del mismo modo, se exige que los vehículos de transporte para acoplarse al andén de carga deban llegar pre enfriados a una temperatura de 7 °C.

En la Figura 9, se puede apreciar de manera gráfica, los rangos de operación de las áreas de interés para el caso de estudio, bajo un esquema de colores que ofrece una sensación térmica, en donde el color azul representa la zona más fría y el color amarillo la zona más caliente del almacén refrigerado.

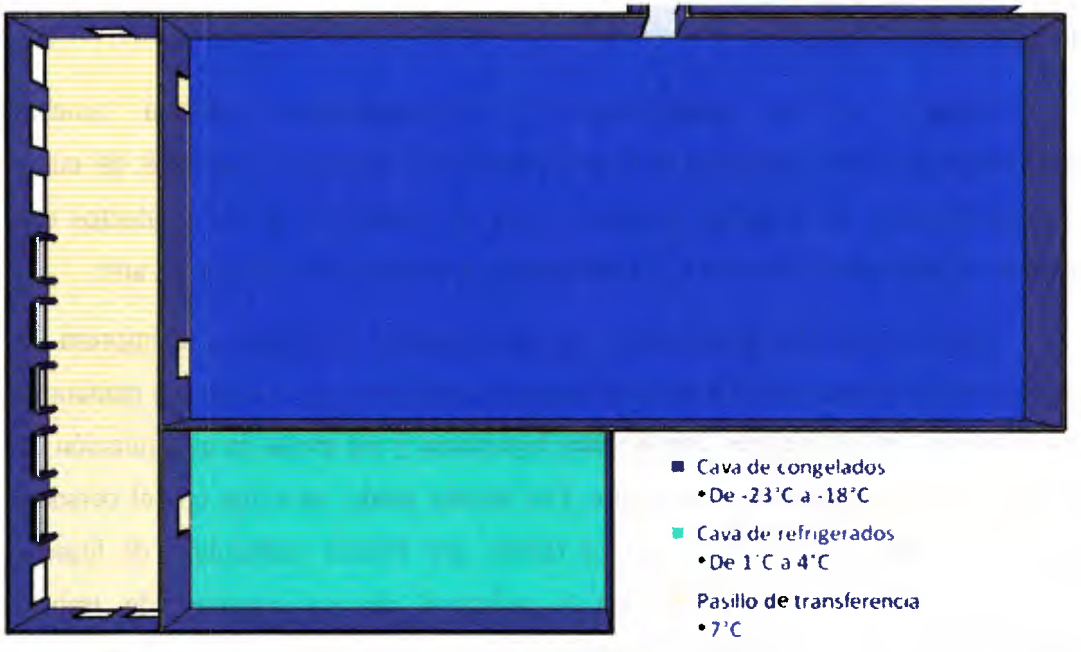


Figura 9: Rango de temperaturas de operación por cavas

(Fuente: Elaboración propia)

Además de los estándares relacionados al control de temperatura de los almacenes refrigerados, la empresa del caso de estudio cuenta con un conjunto de normas, cuidados y procedimientos relacionados con el manejo de los productos a nivel de distribución y almacenamiento que también deben entenderse.

En este sentido, los tiempos de almacenamiento resultan ser importantes, pues no depende sólo del tipo de producto y de sus condiciones de mercadeo, sino también del aprovechamiento del espacio dentro de las instalaciones. De esta manera, productos altamente perecederos requieren menor espacio de almacenamiento que alimentos menos perecederos, simplemente porque los primeros no pueden ser almacenados por largos periodos de tiempo sin ocasionar pérdidas en su calidad.

Asimismo, los procesos para la preparación de pedidos deben ser realizados dentro de los espacios correspondientes por un personal debidamente protegido contra las bajas temperaturas, facilitando el proceso de separación de pedidos, ofreciendo mayor celeridad a la carga de mercancía en los vehículos de transporte sin que la seguridad de los alimentos se vea afectada por largos periodos de espera durante dicho proceso.

Dentro de las condiciones de almacenamiento, existen muchas recomendaciones relacionadas con la ubicación de los productos y equipos, así como también del tipo de embalaje a utilizar y de la separación de los productos con respecto a las paredes, el techo y el suelo para una circulación eficiente del aire.

Con respecto al mantenimiento de los almacenes refrigerados, la empresa del caso de estudio exige que el área de almacenamiento esté bien cuidada, de manera de poder conservar las mejores condiciones higiénicas y así evitar la acumulación de polvo y otros contaminantes en el aire. Del mismo modo, se exige que el personal operativo y manipulador de alimentos resalte por buenas costumbres de higiene personal y por mantener el orden y pulcritud de los espacios de trabajo conservándolos libre de insectos y roedores.

V.2.3. Situación actual de los procesos en la empresa del caso de estudio

De la apreciación *in situ* de las actividades que realiza la empresa estudiada para la gestión de la cadena de frío a nivel nacional, se puede hacer un listado resumen con las consideraciones más importantes de los procesos empleados, los cuales sirven como referencia para comprender la situación de la empresa:

- Los procedimientos de monitoreo están orientados únicamente a la verificación de la temperatura. Los parámetros de humedad e iluminación no son tomados en consideración y el control ineficaz de estos valores puede afectar la seguridad de los alimentos, sobre todo para productos refrigerados de alto riesgo de contaminación micro bacteriana como vegetales y frutas, productos que también son manejados por la empresa.
- El proceso de recolección de datos de temperatura describe un sistema manual y poco interactivo, en donde se le deja toda la responsabilidad de registrar la información correspondiente al personal de supervisión encargado y al departamento de control de calidad.
- La empresa no cuenta con un sistema de alarmas para verificar posibles interrupciones de temperaturas. El procedimiento escogido por la empresa es dejar nuevamente la responsabilidad al personal de mantenimiento, quienes realizan recorridos periódicamente por la planta para verificar las condiciones de las unidades de refrigeración.
- Los termógrafos de las cavas del almacén refrigerado toman pocos puntos de medición. El estándar manejado por la empresa establece la utilización de dos de estos dispositivos por cava y se pudo observar que hay casos en los que se encuentra presente uno solo.

Estos procedimientos dejan de lado un poco el concepto estricto de la cadena de frío que considera el seguimiento continuo de la temperatura durante todo el proceso de almacenamiento y distribución de los alimentos. Sin embargo, de acuerdo a la información obtenida, se aprecia cómo se realizan esfuerzos para tratar de

conservar las temperaturas de las cavas del almacén refrigerado, poniendo el mismo empeño para monitorear las temperaturas en los transportes durante la distribución de los alimentos. De esta manera, se afirma entonces que la carencia en los procesos que maneja la empresa es debida al sistema de monitoreo y a los dispositivos utilizados para hacer el seguimiento del frío.

La empresa entiende que la clave para acceder a mercados importantes radica en una gestión eficiente de la cadena de frío. Es por esta razón que decide apostar en el desarrollo de nuevas tecnologías que le permita mantener los más altos estándares calidad, higiene y seguridad alimentaria, para ofrecer de esta manera un servicio de mayor calidad a sus clientes. Las necesidades particulares de esta empresa ayudaron a modelar un sistema de monitoreo completo, cuya dirección fue asumida por la Universidad Católica Andrés Bello para desarrollar un proyecto de investigación que verificara la posibilidad de llevar a cabo la ejecución del mismo. En la Figura 10 se encuentra el esquema del sistema de monitoreo propuesto.

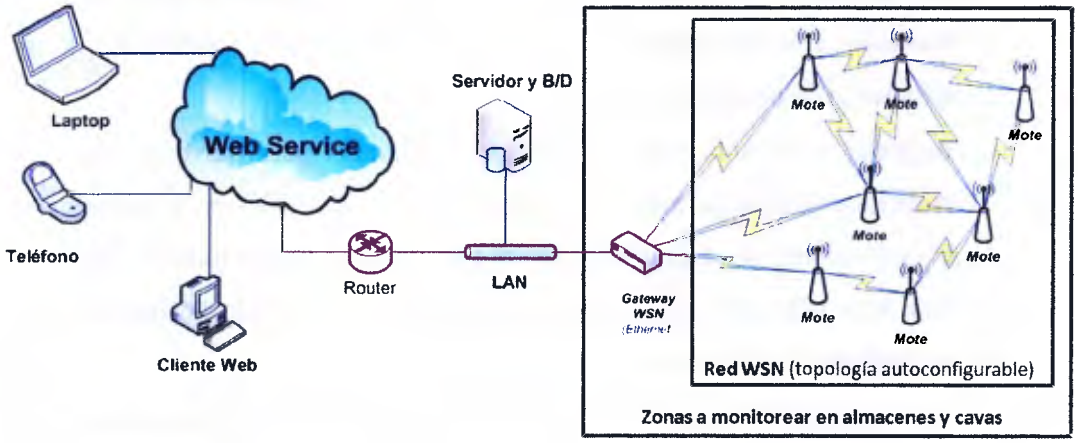


Figura 10: Arquitectura del sistema de monitoreo propuesto

(Fuente: Elaboración Propia)

La diferencia entre el sistema de monitoreo de la figura anterior y el sistema de monitoreo con el que actualmente cuenta la empresa estudiada radica en la automatización de los procesos de registro de temperatura, aliviando así la carga que recibe el personal supervisor encargado de esta labor, siendo el sistema propuesto

mucho más interactivo y de fácil acceso para que los departamentos de la empresa interesados puedan tener acceso a la información, creando una red robusta para el monitoreo de la gestión de la cadena de frío.

El desarrollo del proyecto está dividido por etapas y la fase de arranque del mismo se basa en el diseño de la red inalámbrica de sensores que permitirá el estudio en planta de la solución propuesta.

Para ello, el entendimiento del comportamiento de la temperatura de las cavas del almacén refrigerado resulta ser un punto importante de partida para ofrecer el diseño de red con la ubicación de todos los elementos claves del sistema, específicamente en esta área. Así mismo, el estudio de las condiciones de radiofrecuencia del almacén, permite tomar en consideración aspectos de programación de sensores que tiene que ver con la selección de los canales de operación para la comunicación. Estos estudios son considerados como parte de los aspectos técnicos para el desarrollo del diseño de red WSN y sus resultados son detallados en la sección siguiente, junto con la explicación de la manera en la que fueron realizadas estas pruebas.

V.2.3.1. **Estudio del comportamiento de la temperatura en almacenes**

Siendo el monitoreo de temperatura la principal preocupación de la cadena de frio para la empresa del caso de estudio, es importante conocer el comportamiento y la distribución de este parámetro dentro de las diferentes cavas de almacenamiento. De esta manera, es posible detectar aquellas zonas críticas, donde las temperaturas registradas se encuentras muy cerca de los límites o incluso fuera de los rangos de operación aceptables de cada una de las áreas de interés para la investigación.

Para la realización de este estudio, las cavas se dividieron por zonas para desplegar los instrumentos seleccionados y tomar registro periódico de la temperatura. Los instrumentos seleccionados para tal fin fueron los termógrafos TEMPTALE4 de SENSITECH pertenecientes a la empresa, principalmente por

contar con mayor número de unidades disponibles para tales pruebas y porque sus mediciones brindan un grado de fiabilidad a la empresa.

Las zonas en que se dividieron las cavas, junto con la distribución de los termógrafos se pueden apreciar en la Figura 11. Estos dispositivos fueron ubicados en los pasillos de la cava de alimentos congelados a 2 alturas, específicamente a 2,5 m y 4,5 m. Dentro de la misma cava de congelados, se definió una zona a mitad de la cava, donde se encuentra la estantería principal y se colocó un termógrafo por punto, a una altura de 3 m aproximadamente por cuestiones de acceso.

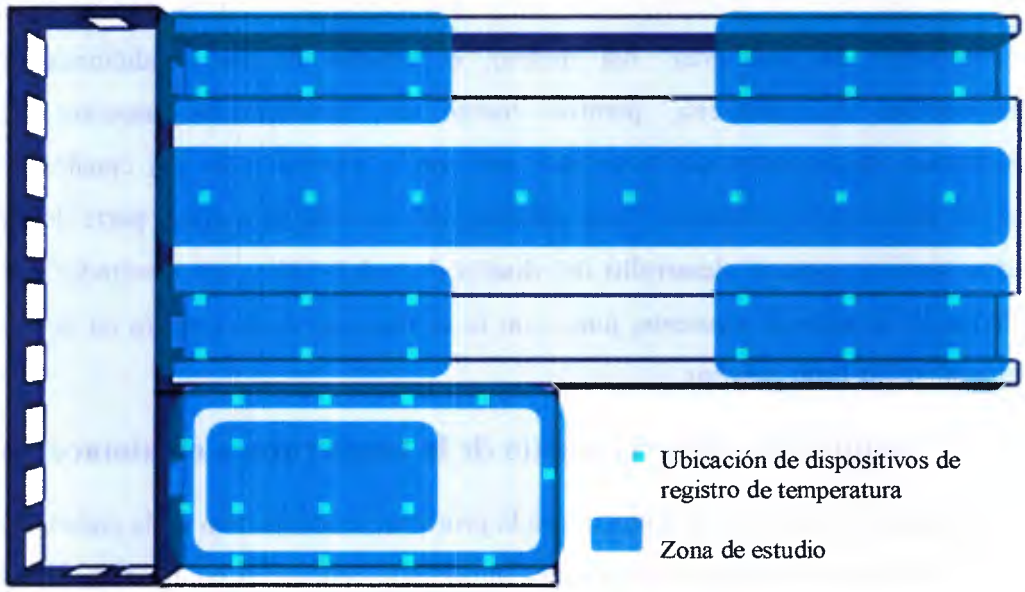


Figura 11: Pruebas para el estudio del gradiente de temperatura
(Fuente: Elaboración propia)

En la misma Figura 11 se puede apreciar la ubicación de los termógrafos en la cava de alimentos refrigerados, cuyas pruebas fueron realizadas en 2 partes. Una cubriendo la zona central de la cava, con termógrafos colgando del techo, con una altura aproximada de 3 metros con respecto al suelo. La otra zona cubierta fue alrededor de la cava, posicionando los termógrafos a 2,5 metros de altura, fijándolos a la pared interna de la misma.

Es importante señalar que los termógrafos utilizados fueron programados para tomar registro de la temperatura cada 2 minutos y medio, durante 3 días por cada zona estudiada, lo que ofrece un estudio prolongado de las zonas de interés. Las características técnicas de los termógrafos TEMPTALE4 son detalladas en el Anexo E.

El resultado obtenido tras realizar las pruebas correspondientes en el tiempo establecido, se traduce en la elaboración de un mapa de las cavas de almacenamiento con franjas que representen los valores de temperaturas promedio correspondientes a cada zona, diferenciadas por colores, tal como se muestra en la Figura 12.

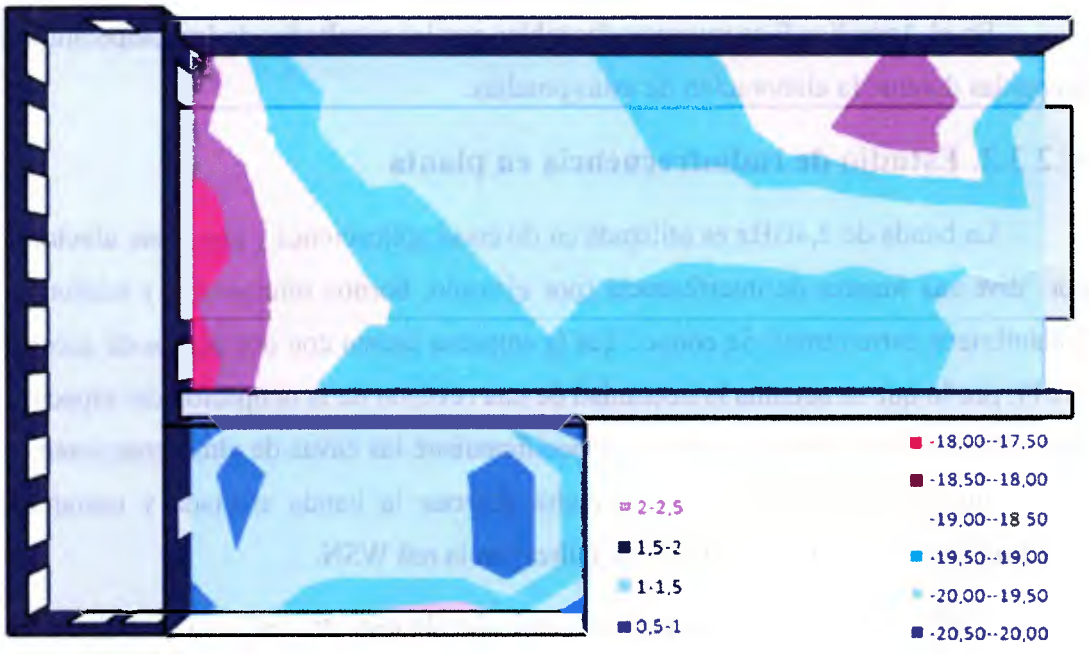


Figura 12: Gradiente de temperatura

(Fuente: Elaboración propia)

Se puede apreciar según las gráficas, que la temperatura promedio de las cavas en general se encuentra dentro de los valores aceptados según los estándares que maneja la empresa del caso de estudio, con la excepción de una porción de la cava de congelados, justo a la entrada de la misma, donde el valor promedio llega hasta medio grado centígrado por encima de lo permitido. Un fenómeno esperado, ya que la temperatura del pasillo de carga es una fuente de calor con respecto a la cava de

congelados que en horas de alta circulación afecta visiblemente las zonas cercanas a la puerta de acceso de la cava. Sin embargo, conforme se avanza hacia el interior de la cava, la temperatura promedio disminuye.

Al fondo de la cava de congelados llama la atención una zona crítica que pudiera estar relacionada con la puerta que comunica con el "túnel de pan" donde se realiza el proceso de congelación del pan que se recibe del proveedor aún caliente.

En la cava de refrigerados, los valores son mucho más estables por lo que se observa en la Figura 12 un comportamiento casi uniforme de la temperatura, con poca variación y dentro de los valores aceptados por la empresa, sin zonas críticas.

En el Apéndice E se muestran las tablas con los resultados de las temperaturas recogidas durante la elaboración de estas pruebas.

V.2.3.2. **Estudio de radiofrecuencia en planta**

La banda de 2,4GHz es utilizada en diversas aplicaciones y puede ser afectada por diversas fuentes de interferencia (por ejemplo: hornos microondas y teléfonos inalámbricos entre otros). Se conoce que la empresa cuenta con dos puntos de acceso Wi-Fi, por lo que se acentúa la necesidad de una revisión de la ocupación del espectro radioeléctrico en las áreas de interés, específicamente las cavas de almacenamiento a ser monitoreadas. De este modo se podrá detectar la banda afectada y tomar la decisión adecuada en cuanto al canal a utilizar en la red WSN.

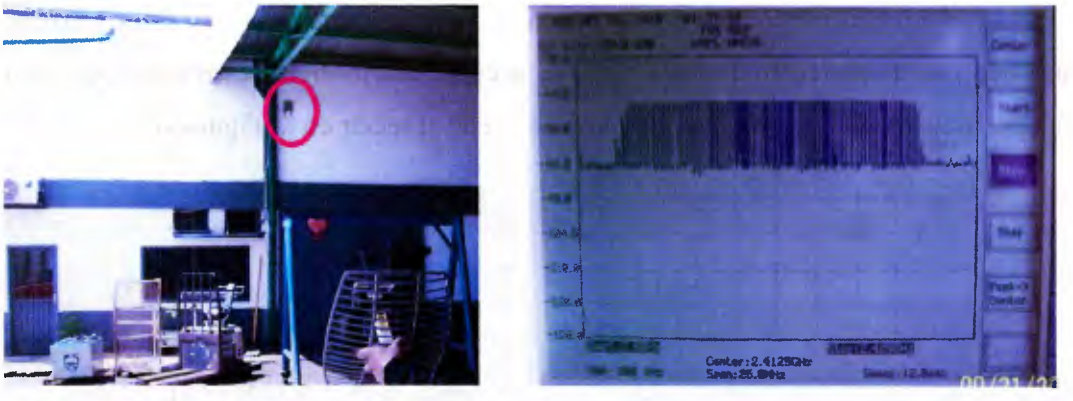
Con la utilización de un equipo analizador de espectro, se realizó un barrido de frecuencia con el fin de encontrar un espacio libre en la frecuencia de 2,4GHz, así como detectar el canal de operación de los equipos de Wi-Fi y otras señales que pudieran generar interferencia en la nueva red WSN.

a) Ubicación del equipo Wi-Fi b) Banda ocupada

Figura 13: Punto de Acceso N° 1

(Fuente: Elaboración propia)

Antes de hacer un barrido completo de la banda de 2,4GHz dentro de la cava, se apuntó la antena del analizador de espectro directamente hacia cada uno de los puntos de acceso de la red Wi-Fi de la empresa para identificar la banda en la que estos operan, obteniendo como resultado las siguientes lecturas.



a) Ubicación del equipo Wi-Fi b) Banda ocupada

Figura 14: Punto de Acceso N° 2

(Fuente: Elaboración propia)

Sobre el punto de acceso número 1 el analizador de espectro muestra una ocupación del canal 1 de Wi-Fi, centrado en la frecuencia de 2,4125GHz como se aprecia en la Figura 13. Mientras el resto de la banda no presenta perturbaciones significativas. Por su parte, el punto de acceso número 2, situado al lado opuesto de la

empresa, utiliza el canal de frecuencia número 11 como se puede apreciar en la Figura 14 por la señal centrada en 2,4625GHz.

Haciendo un barrido de frecuencia en los alrededores de las cavas no se encontraron perturbaciones significativas, tal como se aprecia en la Figura 15.

Figura 15: Lectura a los alrededores de las cavas

(Fuente: Elaboración propia)

Del mismo modo, dentro de las cavas no hay perturbaciones significativas, más que las provenientes de los puntos de acceso anteriormente evaluados pero con una potencia evidentemente menor como se puede apreciar en la Figura 16.

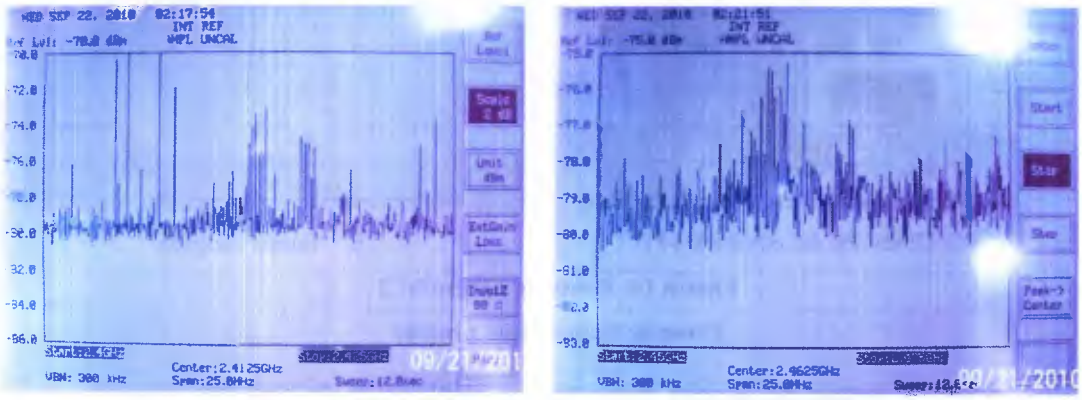


Figura 16: Perturbación percibida dentro de las cavas, generada por los puntos de acceso número 1 y 2 respectivamente

(Fuente: Elaboración propia)

Teniendo en cuenta que los canales 1 y 11 de Wi-Fi coinciden con los canales de ZIGBEE 11, 12, 13, 14 y los canales 20, 21, 22, 23 y 24 respectivamente, tal como

se muestra en la Figura 17, estos son los canales menos apropiados para la configuración de la red WSN. En contraparte, los canales más apropiados serían el 15, 16, 17, 18, 19, 25 y 26, siendo los canales 17 y 26 los recomendados por estar más alejados de las bandas ocupadas.

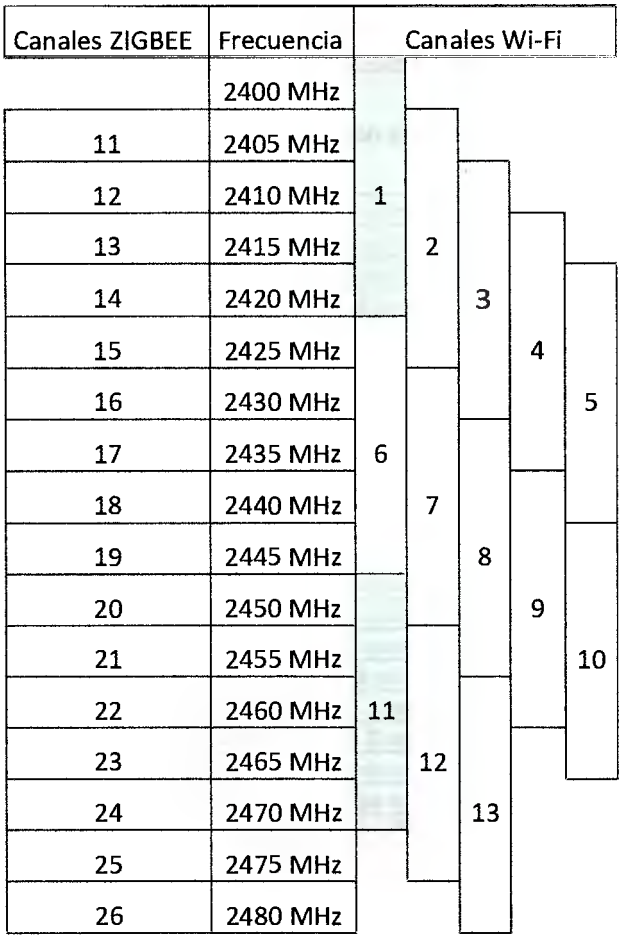


Figura 17: Canales ZIGBEE Vs. Wi-Fi

(Fuente: Elaboración propia)

V.3. Estudio previo de la solución

V.3.1. Estructura de mensajes

En este apartado se muestra el resultado de interceptar la data transmitida por el *Gateway* ETHERNET MIB600 con el programa WIRESHARK. Los datos fueron analizados y organizados de acuerdo a las características de la trama del TINYOS y

se presentan en la Tabla 6 junto con la información del valor al que corresponde cada dato.

: 7D : 5E : 00 : 0B : 7D : 5D : 37 : 00 : 00 : D0 : 19: 00 : 00 : 33 : 86 : 87 : 00 : 00 : AE : 01
: 69 : BA : D8 : 25 : DD : 9C : 43 : BB : 16 : 78 : 13 : 41 : A9 : FF : 00 : 00 : B8 : 01 : BF : 01
00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 00 : 1E : 32 : 7E

7E		Byte de sincronismo. Inicio de mensaje
0D		Tipo de mensaje (Paquete que no requiere ACK)
5E	7D	Bytes de información de trama
0B	00	
5D	7D	
37		
00	00	Dirección de la fuente del mensaje
19	D0	ID del nodo que envía el mensaje original
00	00	Numero de secuencia estimado por el enlace
33		ID de la aplicación (Socket)
86		Sensor Board
87		Sensor Packet
00	00	Parent
01	AE	**Lectura de la batería**
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
BA	69	Parte 1 utilizada para calibrar la presión
25	D8	Parte 2 utilizada para calibrar la presión
9C	DD	Parte 3 utilizada para calibrar la presión
BB	43	Parte 4 utilizada para calibrar la presión
78	16	**Lectura de temperatura del sensor Intersema**
41	13	**Lectura de presión barométrica del sensor Intersema**
FF	**A9**	**Parte 1 de la cantidad de luz**
00	**00**	**Parte 2 de la cantidad de luz**
01	B8	**Lectura de aceleración en el eje X**
01	BF	**Lectura de aceleración en el eje Y**
00		Tiempo del GPS: horas
00		Tiempo del GPS: minutos
00		Latitud del GPS: grados
00		Longitud del GPS: grados
00	00	Tiempo del GPS: segundos
00	00	
00	00	Latitud del GPS: minutos
00	00	
00	00	Longitud del GPS: minutos
00	00	
00		Velocidad del GPS
00		Estado de reparación del GPS
32	1E	CRC
7E		Byte de sincronismo. Fin de mensaje

Mensaje de la tarjeta de sensores MTS420

Tabla 6: Información de trama

(Fuente: Elaboración propia)

V.3.2. Comparación de instrumentos de medición de temperatura

De las pruebas descritas en la etapa de desarrollo, realizadas a los instrumentos disponibles para el cálculo del gradiente, se obtuvieron las gráficas presentadas en el Apéndice A que muestran los valores de temperatura registrados por los diferentes dispositivos.

Dado que las diferentes áreas del almacén operan en rangos de temperatura diferente, que estas temperaturas a su vez no son constantes a lo largo del tiempo y que se desconoce la existencia de certificación de alguno de los instrumentos utilizados, no se puede hablar de cual instrumento es más o menos acertado en las mediciones obtenidas, sin embargo se pueden establecer comparaciones con respecto a las tendencias de los valores obtenidos. Como ejemplo de ello, en los seis puntos de control tomados como referencia, la mayor parte del tiempo los registros del termómetro se obtienen las mediciones de temperatura más bajas y los sensores WSN las más altas.

Asimismo se puede apreciar que para una temperatura extremadamente baja, los registros del termómetro y el termógrafo se aproximan rápidamente al rango de -18°C mientras que el sensor WSN (nodo 1) lleva más tiempo para alcanzar estos registros, lo que da a entender que este instrumento tiene una respuesta más lenta en el ajuste a cambios de temperatura.

En las Figuras 18 y 19, se puede apreciar la disposición de los diferentes instrumentos en dos de los puntos de control seleccionados para el experimento realizado.

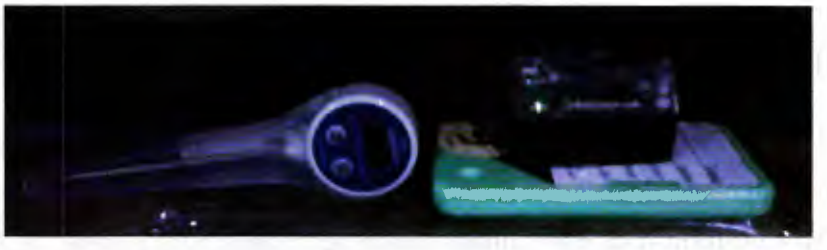


Figura 18: Disposición del conjunto de instrumentos en el punto de control N° 6
(Fuente: Elaboración propia)

Figura 19: Disposición del conjunto de instrumentos en el punto de control N° 5

(Fuente: Elaboración propia)

V.4. Diseño de red

V.4.1. Ubicación de sensores y cantidades propuestas por cavas

En base a las investigaciones realizadas, la propuesta para la ubicación de sensores contempla la colocación de 7 nodos WSN para la cava de congelados como se muestra en la Figura 20 de modo que se mantengan monitoreadas las entradas de la cava, la zona critica descrita por el diagrama del gradiente de temperatura, el fondo de la cava, las cercanías de la puerta que comunica la cava con el túnel del pan y nodos intermedios que mantengan monitoreadas el resto de las zonas de la cava y que además sirvan de salto para la comunicación entre nodos. Estos nodos pueden ser fácilmente fijados a las estanterías fijas que definen dos pasillos a lo largo de la cava de congelados.

Para la cava de refrigerados se propone colocar 4 sensores que registren la temperatura de diversas áreas de la cava, ya que el comportamiento de la temperatura presenta mayor uniformidad. Estos nodos deben ser fijados a las paredes de las cavas puesto que no hay estructuras fijas a la cual se puedan sujetar los dispositivos. En esta

cava se dispone de estantes móviles, por lo que la distribución de dichos estantes y la ubicación de la mercancía son variables.

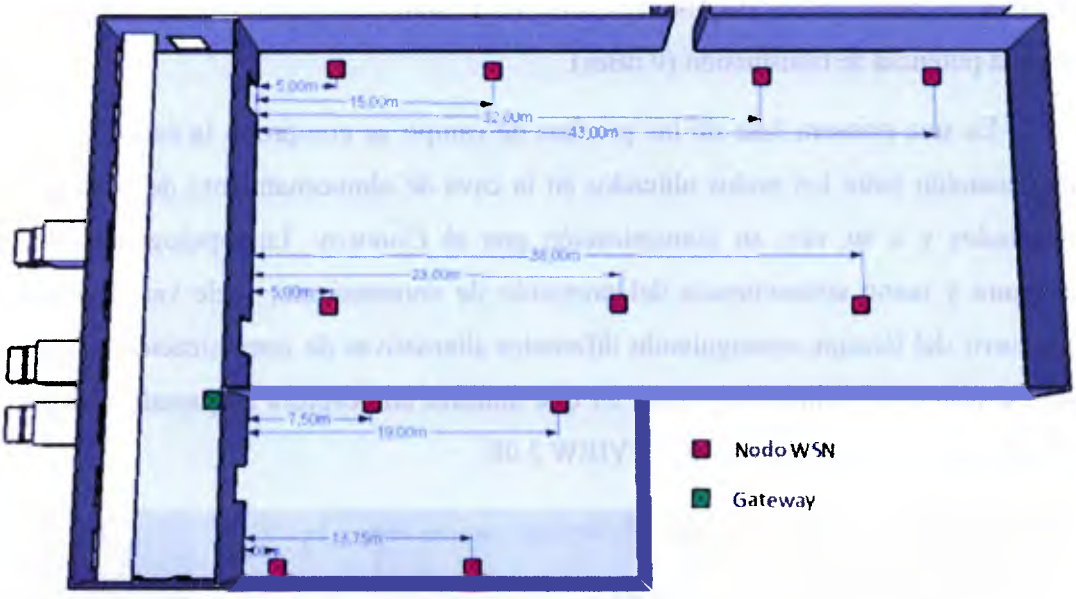


Figura 20: Ubicación de sensores por cavas

(Fuente: Elaboración propia)

V.5. **Evaluación y ajustes**

V.5.1. **Ejecución de pruebas de campo**

Una vez descrito el comportamiento de la temperatura dentro de las cavas de almacenamiento y definidos los puntos para la ubicación de los nodos WSN, se realizaron pruebas de campo para la evaluación del diseño propuesto.

Por contar con un número limitado de dispositivos WSN se realizaron diversas pruebas, analizando la topología empleada por los nodos, variando su ubicación, potencia y también la forma como se reorganiza la red en caso de falla de algunos de los nodos más próximos al *Gateway*.

Para estas pruebas se utilizó el kit de desarrollo disponible en el laboratorio, que consta de un *Gateway* ETHERNET y 6 nodos encapsulados identificados como 6607, 6608, 6596, 6588, 8760 y 6618. Adicionalmente se cuenta con 2 unidades de radio sin tarjeta de sensores, identificadas como 6 y 7 que dado el limitado número de

unidades encapsuladas, serían utilizados como enrutadores para emular 2 unidades encapsuladas más, aunque sin la capacidad de presentar datos medidos. Todas las unidades de radio de los dispositivos utilizados están configuradas para utilizar su máxima potencia de transmisión (0 dBm).

En una primera fase de las pruebas de campo se comprobó la capacidad de comunicación entre los nodos ubicados en la cava de almacenamiento de alimentos congelados y a su vez, su comunicación con el *Gateway*. La topología se auto configura y como consecuencia del protocolo de enrutamiento, suele variar con el transcurrir del tiempo, consiguiendo diferentes alternativas de comunicación, una de estas se puede apreciar en la Figura 21 que muestra una captura de pantalla tomada del *software* de visualización MOTEVIEW 2.0F.

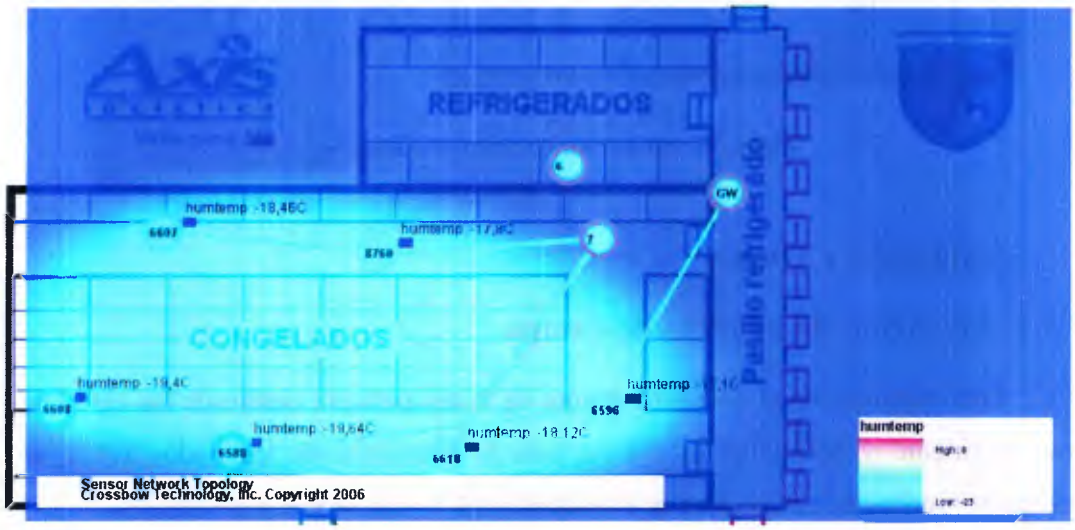


Figura 21: Topología de nodos en cava de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

En una segunda fase, conservando la ubicación anterior se apagó el nodo 7 para apreciar la reconfiguración de la red y validar la posibilidad de que el resto de los nodos consiguieran una nueva ruta para llevar sus datos al *Gateway*. Así se puede apreciar en la Figura 22 cómo el resto de los nodos se apoyan en el nodo 6596 por ser el más cercano a la puerta de enlace.

Con la misma intención, se encendió el nodo 7 y se apagó el nodo 6596 obteniendo la topología mostrada en la Figura 23 donde se aprecia el tráfico de datos orientado hacia el nodo 7 por ser el más próximo al *Gateway*.

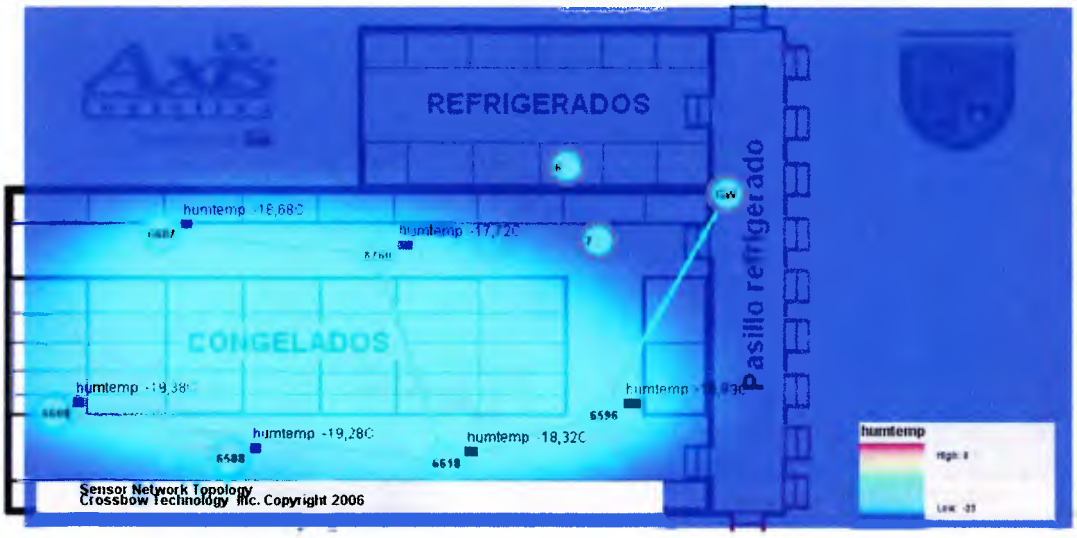


Figura 22: Nodo 7 apagado

(Fuente: Elaboración propia)

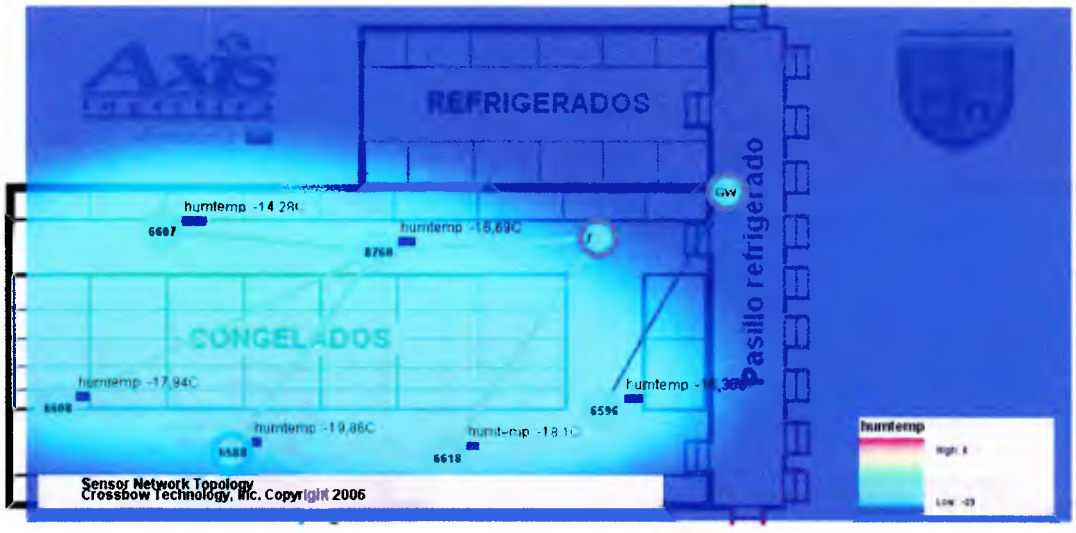


Figura 23: Nodo 6596 apagado

(Fuente: Elaboración propia)

En otra de las pruebas, manteniendo el nodo 7 apagado se movió el nodo 6608 hacia la cava de refrigerados asumiendo que los dispositivos ubicados en esta cava

pudieran servir de enrutadores también a los nodos de la cava vecina. Como resultado, varios nodos de la cava de congelados utilizaron el nodo 6608 como enrutador para alcanzar el *Gateway* (ver Figura 24).

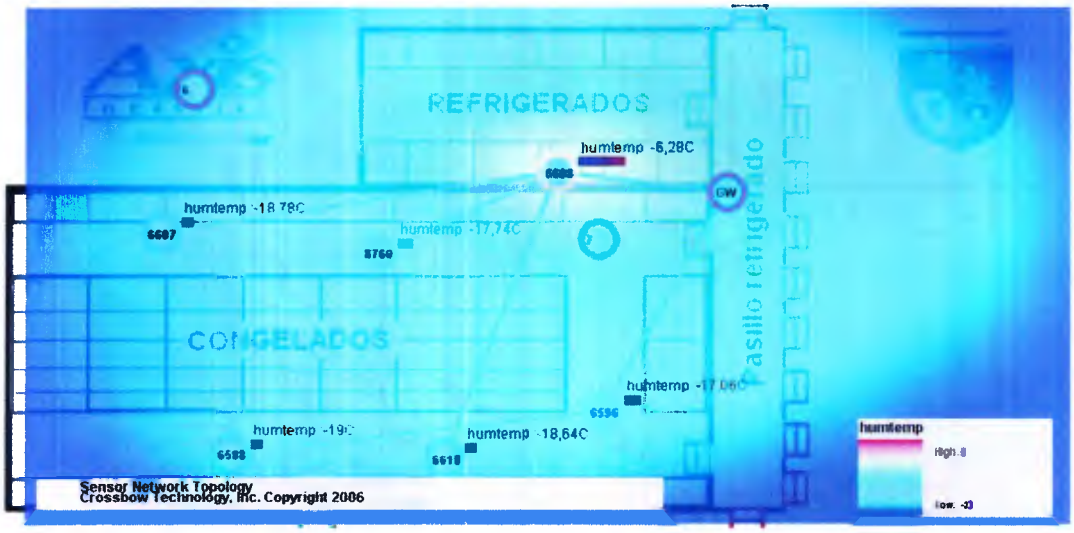


Figura 24: Nodo 7 apagado y nodo 6608 en cava de refrigerados

(Fuente: Elaboración propia)

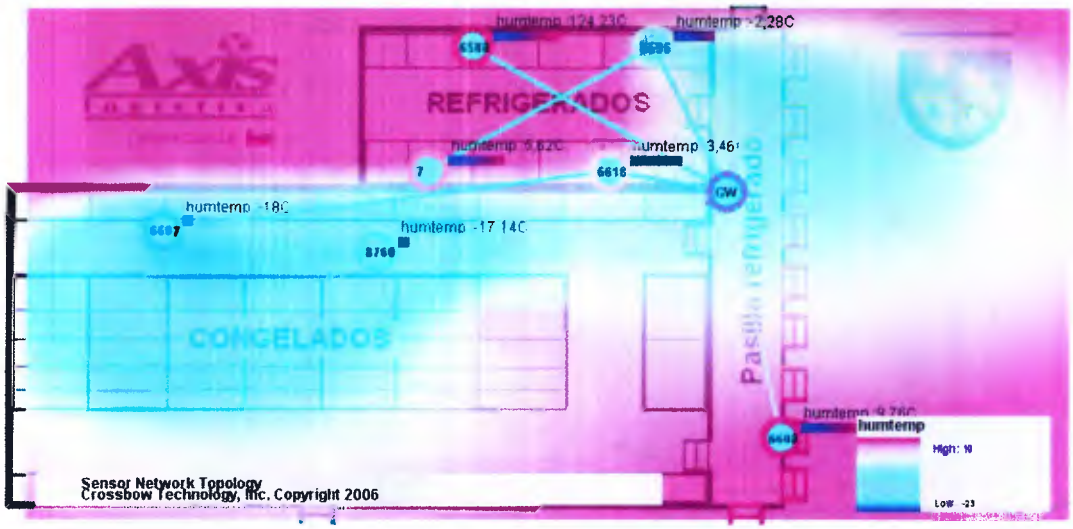


Figura 25: Nodos en cava de refrigerados

(Fuente: Elaboración propia)

Se fueron moviendo nodos hacia la cava de refrigerados para apreciar el comportamiento de la red en esta sección del almacén tal como se observa en la

Figura 25. Siendo un área más pequeña y con menos obstáculos, los nodos ubicados en la cava de refrigerados consiguen una mejor comunicación con el *Gateway*, incluso los nodos más alejados. Tomando en cuenta este comportamiento se reprogramaron los nodos 6 y 7 disminuyendo su potencia de transmisión a -7dBm y como resultado, se aprecia la nueva topología adoptada por la red en la Figura 26.

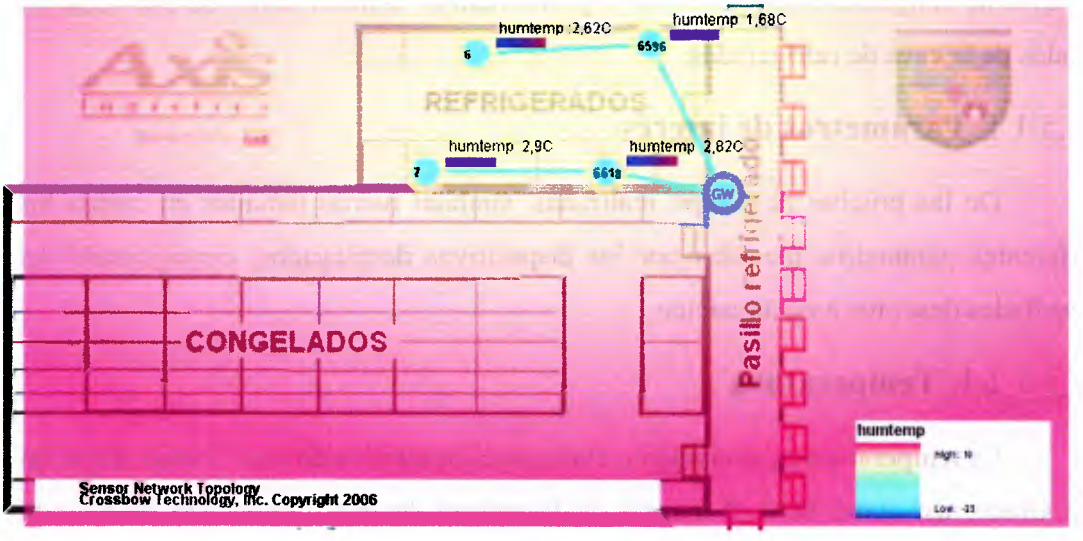


Figura 26: Nodos 6 y 7 con potencia de -7 dBm

(Fuente: Elaboración propia)

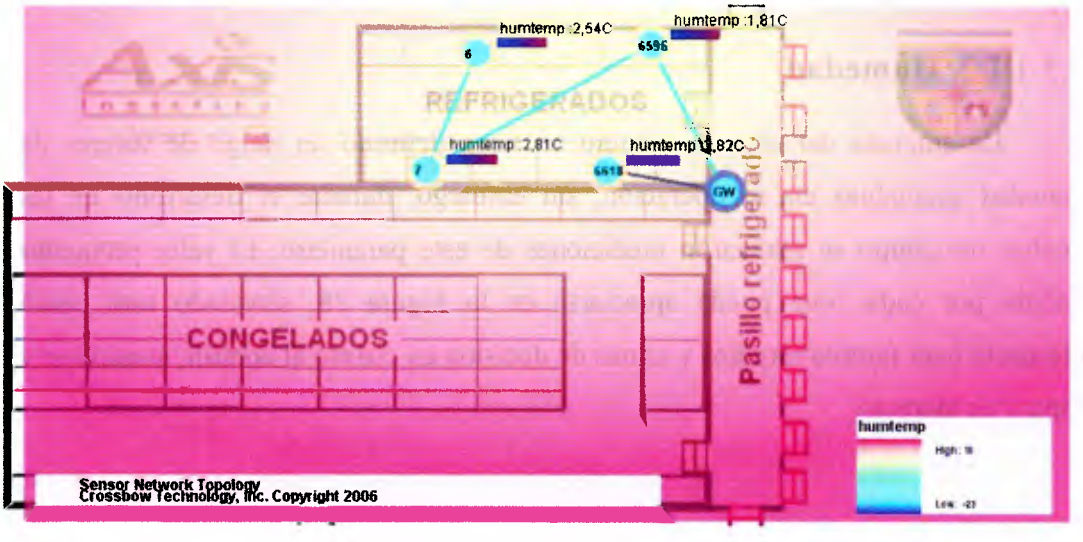


Figura 27: Nodo 6618 apagado y Nodos 6 y 7 con potencia de -7 dBm

(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, repitiendo la experiencia realizada en la cava de congelados, se apagó el nodo 6618 por ser el más próximo al *Gateway*, para apreciar la reestructuración de la red. Dadas las experiencias anteriores, lo más esperado es que la comunicación de los nodos activos vaya a través del nodo 6596 por ser el nuevo nodo activo más próximo al *Gateway* (ver Figura 27). Sin embargo, con los nodos de la cava de congelados activos existe la posibilidad de comunicación de éstos con los nodos de la cava de refrigerados.

V.5.1.1. **Parámetros de interés**

De las pruebas de campo realizadas, también fueron tomados en cuenta los diferentes parámetros medidos por los dispositivos desplegados, consiguiendo los resultados descritos a continuación.

V.5.1.1.1. **Temperatura**

La temperatura es el elemento clave en el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, así como para el manejo de la cadena de frío, por lo que ya ha sido evaluado en experimentos anteriores con el fin de describir su comportamiento en las diferentes áreas de interés y para la definición de los puntos para la ubicación de los dispositivos WSN.

V.5.1.1.2. **Humedad**

La empresa del caso de estudio no tiene definido un rango de valores de humedad aceptables en su operación, sin embargo, durante el desarrollo de las pruebas de campo se realizaron mediciones de este parámetro. El valor promedio medido por cada zona puede apreciarse en la Figura 28, sirviendo esto como referencia para futuros estudios y tomas de decisión en cuanto al control, monitoreo y disparo de alarmas.

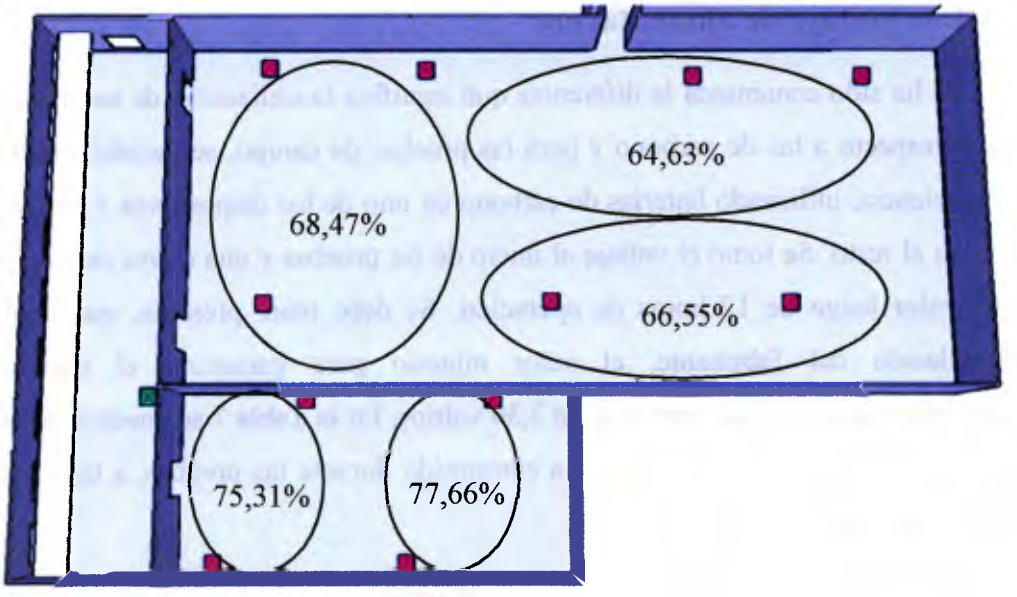


Figura 28: Valor promedio de humedad por zonas

(Fuente: Elaboración propia)

V.5.1.1.3. **Luminosidad**

El valor de la luminosidad será utilizado básicamente para validar que las luces de las cavas hayan sido apagadas en las horas no laborables. Este es un parámetro bastante sensible y fácil para discriminar entre apagado o encendido de luces, dado que un valor promedio para luces encendidas puede ser entre 10 y 100 lux o incluso superior si es expuesto a luz directa. El apagado puede ser valores menores a 10 lux, muy cercanos de cero.

Un detalle con respecto a este parámetro es que durante las pruebas de campo, se utilizaron los dispositivos WSN embebidos, mientras que para la solución se propone una caja de intemperie de diseño propio que a pesar de contener una ventana transparente, pudiera generar mediciones distintas a la de este experimento. Además, la posición y la orientación en que se fijen los dispositivos con sus nuevas cajas de intemperie, podría variar la incidencia de la luz ambiente de la cava sobre el sensor de luminosidad, por lo que se propone hacer una nueva evaluación para este parámetro una vez se hayan colocado los dispositivos en su lugar correspondiente.

V.5.1.1.4. **Voltaje de alimentación**

Ya ha sido comentada la diferencia que significa la utilización de baterías de litio con respecto a las de carbono y para las pruebas de campo, se decidió evaluar esta experiencia, utilizando baterías de carbono en uno de los dispositivos y baterías de litio en el resto. Se tomó el voltaje al inicio de las pruebas y una nueva referencia de este valor luego de 12 horas de operación. Se debe tener presente, que según recomendación del fabricante, el valor mínimo para garantizar el correcto funcionamiento de los dispositivos es de 2,30 voltios. En la Tabla 7 se puede apreciar la ubicación de cada nodo y la potencia consumida durante las pruebas, a través de los valores de voltaje de las baterías.

Nodo	Tipo de batería	Voltaje inicial	Voltaje final	Porcentaje de caída del voltaje	Ubicación
6588	Carbono	2,78	2,4	13,67	Cava de congelados
6607	Litio	2,79	2,78	0,36	Cava de congelados
8760	Litio	2,95	2,93	0,68	Cava de congelados
6596	Litio	2,89	2,88	0,35	Cava de congelados
6618	Litio	3	2,99	0,33	Cava de refrigerados
6608	Litio	3,01	2,99	0,66	Cava de refrigerados

Tabla 7: Caída del voltaje de alimentación tras 12 horas de prueba

(Fuente: Elaboración propia)

Es notable la diferencia de rendimiento entre los distintos tipos de batería con sólo observar el porcentaje de energía consumida en un mismo periodo de tiempo. Sin embargo, estos datos no son determinantes y pudieran ser mejorados aplicando técnicas para optimizar el consumo de energía como los ajustes en la topología y potencia de transmisión, así como cambios en los tiempos de transmisión de datos entre otros.

V.5.2. **Ajustes sobre el diseño propuesto**

Tras haber realizado las respectivas pruebas de campo se ha decidido conservar la ubicación propuesta para los nodos y a su vez, tomar en consideración los ajustes realizados en cuanto a la configuración de la potencia de transmisión.

Siendo los nodos ubicados en las cavas de almacenamiento para productos refrigerados los que mayor alcance mostraron, se decidió disminuir el valor de potencia en los 2 nodos más alejados del *Gateway* a un valor de -7dbm, forzando estos a utilizar a sus nodos vecinos como enrutadores, a favor de conseguir un mejor rendimiento energético y evitar congestión de datos en el *Gateway*. Del mismo modo, se debe disminuir la potencia de los sensores más próximos al *Gateway*, para asegurar que ese sea su único camino de transmisión.

De este modo, con los ajustes propuestos, la topología esperada debe tener una estructura similar a la presentada en la Figura 29.

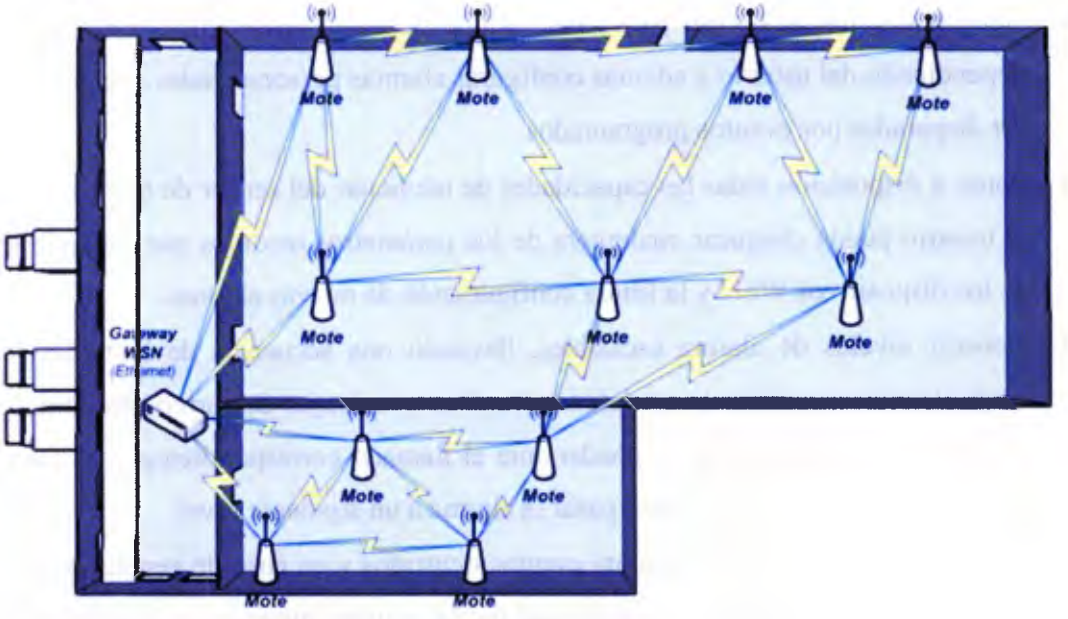


Figura 29: Topología deseada para la red WSN desplegada en almacenes

(Fuente: Elaboración propia)

V.6. Requerimientos para la elaboración de la herramienta de visualización

A partir de las necesidades particulares de este proyecto y las expresadas por el departamento de Calidad y Mantenimiento de la empresa del caso de estudio, se han desarrollado los siguientes puntos como objetivos deseables que debe cumplir el

software de visualización a desarrollar. En algunos casos MOTEVIEW será utilizado como referencia por ser el *software* con el que se ha trabajado a lo largo del proyecto.

A continuación se presentan una lista de requerimientos y sugerencias para ser tomadas en cuenta en la elaboración de esta herramienta:

- La herramienta debe tener una interfaz *web* que sea fácilmente accesible por el personal autorizado desde cualquier locación y en cualquier momento brindando la posibilidad de que múltiples usuarios puedan chequear los datos simultáneamente, diferenciándose del MOTEVIEW que es en principio un *software* local que debe estar instalado en una PC y además mono usuario.
- Generar niveles de acceso para usuarios que permitan mostrar u ocultar datos dependiendo del usuario y además configurar alarmas personalizadas que puedan ser disparadas por eventos programados.
- Poner a disposición todas las capacidades de medición del sensor de manera que el usuario pueda chequear cualquiera de los parámetros medidos por cualquiera de los dispositivos WSN y la futura configuración de nuevas alarmas.
- Generar niveles de alarma escalables, llevando una secuencia de llamados y envío de mensajes de texto a teléfonos móviles o mensajes de correo electrónico al personal responsable de responder ante el llamado correspondiente y en caso que este no solvente la novedad, pasar la alarma a un siguiente nivel.
- Generar una base de datos con los eventos ocurridos y en caso de generar algún tipo de alarma, llevar un registro de cuál fue la posible causa, quien la solucionó y cómo lo hizo, de modo que este registro sirva de referencia para solventar situaciones similares en el futuro.
- Manejo de diferentes unidades de medición (por ejemplo: °C, °F, entre otros)
- Detectar nodos que por un periodo que exceda al menos 3 veces el tiempo de envío de datos, no lo hayan hecho, apareciendo como inactivos. Esto debería generar una alarma que indique la necesidad de verificar la razón por la cual este nodo no se ha podido comunicar con la red.

- Agregar el mapa del área monitoreada con la topología y la ubicación de los nodos de forma que sea fácil de apreciar los resultados. Esto requerirá de un usuario administrador que será quien ubique los sensores en su correcta ubicación dentro del mapa.

En cuanto a los valores límite para el disparo de alarmas, la temperatura activará alarma de alerta al salirse de los parámetros establecidos como aceptables por la empresa para cada cava. El voltaje, no tendrá límite máximo, pero deberá emitir alerta cuando su valor se encuentre por debajo de 2,36 V.

Con respecto a la humedad, será necesaria la aplicación de un estándar por parte de la empresa que defina los valores máximos y mínimos de operación aceptada. Finalmente, la luminosidad sería definida al tener instalados los sensores con su respectiva caja de intemperie y además, que se hayan normalizado los horarios de trabajo.

Parámetro	Mínima	Máxima
Temperatura del almacén de congelados	-23°C	-18°C
Temperatura del almacén de refrigerados	1°C	4°C
Voltaje	2,36 V	No aplica
Humedad	Por definir	Por definir
Luminosidad	Por definir	Por definir

Tabla 8: Valores límites para configuración de alarmas

(Fuente: Elaboración propia)

Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones

Los objetivos planteados, previo a la realización del proyecto, han sido cumplidos satisfactoriamente. Con la utilización de los dispositivos transmisores/receptores de comunicación inalámbrica, se logró diseñar un sistema que permita el monitoreo de parámetros de calidad de la cadena de frío que puede ser aplicado en cualquier empresa de logística de alimentos, siempre y cuando se realicen los estudios particulares del caso.

En la Gestión de la Cadena de Frío para alimentos perecederos, se debe cumplir con una serie de procedimientos y cuidados para garantizar la calidad de los alimentos manipulados. Un sistema de monitoreo basado en Redes Inalámbricas de Sensores brinda la posibilidad de realizar un seguimiento de diversos parámetros de interés en tiempo real, manteniendo un monitoreo continuo y un estricto control de las condiciones del entorno, permitiendo respuestas oportunas, e incluso preventivas, ante eventos que puedan poner en riesgo la seguridad de los alimentos.

Del análisis realizado en las instalaciones de la empresa del caso de estudio, se pudo determinar que sus estándares de calidad están enfocados al monitoreo exclusivo de la temperatura, dejando de lado otros parámetros como la humedad y la luminosidad. La empresa cuenta con diversos termómetros que deben ser leídos periódicamente y registrados manualmente por el personal de calidad. Además cuenta con un conjunto de termógrafos, cuya data es procesada cada 15 días aproximadamente, obteniendo un análisis a posteriori de los eventos de temperatura ocurridos en las diferentes cavas de almacenamiento.

Las Redes Inalámbricas de Sensores es una tecnología en plena evolución, por lo que constantemente aparecen nuevos equipos y dispositivos en el mercado, reduciendo costos y agregando nuevas funcionalidades. Durante el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado se evaluaron los equipos de los fabricantes CROSSBOW y XBEE, pioneros en el área, favoreciendo la elección de los dispositivos de CROSSBOW por su simplicidad e integridad.

Siendo la temperatura el parámetro más importante en la Cadena del Frío, el estudio del gradiente de temperatura ayuda a comprender el comportamiento de la misma dentro de los espacios de interés, detectando las zonas críticas y facilitando la toma de decisiones en cuanto a la ubicación de los sensores para el despliegue de la red.

Con las pruebas de campo se comprobó que el diseño de red planteado brinda las soluciones esperadas por el departamento de calidad de la empresa del caso de estudio, permitiendo el monitoreo en tiempo real de diversos parámetros de interés a fin de garantizar la calidad de los alimentos almacenados y la toma de decisiones temprana ante diferentes eventos que puedan poner en riesgo la seguridad de los alimentos. Sin embargo, ciertos cambios fueron realizados en la potencia de transmisión de algunos nodos para ajustar la topología adoptada por los dispositivos WSN a la topología propuesta en el diseño de la red.

Se presenta un reto importante en el tema de optimización y ahorro de energía en cuanto al uso de los nodos WSN, dado que diversos autores e incluso el fabricante de los dispositivos estiman un tiempo de vida de 2 a 3 años pero se desconoce su comportamiento en ambientes con bajas temperaturas.

Es importante tomar en cuenta algunas recomendaciones que sirvan de referencia para investigadores interesados en aplicaciones de Redes Inalámbricas de Sensores, especialmente para aquellos que deseen realizar un seguimiento constante de parámetros que garanticen la Gestión de la Cadena de Frío en empresas de logística de alimentos perecederos.

En este sentido, se debe mencionar que la red propuesta está basada en la necesidad de monitorear las zonas con valores promedio de temperatura cercanos a los límites aceptados por la empresa del caso de estudio; a su vez estos puntos críticos vienen dados por el estudio del gradiente de temperatura de las cavas, por lo que se recomienda repetir este estudio de forma detallada, disponiendo de un mayor número de dispositivos y por un tiempo prolongado. Además, se debería contar con la asesoría de un especialista que trabaje en conjunto con expertos del área de Logística

de alimentos y Calidad, para ayudar en la manipulación e interpretación de la data recolectada.

Por otro lado, de acuerdo con el fabricante, los dispositivos WSN utilizados pueden operar a temperaturas de hasta -40°C. Sin embargo, garantiza una precisión de ± 0.5°C en pruebas a 25°C, lo que hace necesario una certificación de los valores medidos de acuerdo a las temperaturas a las que se espera sean expuestos y de ser necesario, se debe realizar la calibración por *software* de los mismos.

El comportamiento de las baterías utilizadas durante las pruebas preliminares demuestra que la vida útil de estas se ve limitada al operar en condiciones de bajas temperaturas, por lo que se recomienda estudiar alternativas para la optimización en el uso de energía o incluso la utilización de fuentes alternativas de alimentación. Opciones válidas para esta investigación pueden ser, la consideración de nuevas topologías, la disminución de potencia de transmisión, la aplicación de nuevos protocolos de comunicación, la reprogramación de los nodos sensores para alargar los tiempos de transmisión de datos, entre otros estudios.

Después que el proyecto sea puesto en marcha, es necesario analizar los datos registrados durante un periodo de tiempo determinado a fin de comprender el comportamiento de los parámetros medidos. Con esto sería posible desarrollar un *software* capaz de analizar el riesgo de una tendencia para emitir alarmas preventivas.

A pesar de instalar un sistema de monitoreo basado en Redes Inalámbricas de Sensores, no se deben descartar otros sistemas de monitoreo que sirvan de respaldo ante cualquier evento o falla inesperada.

Es importante señalar que durante la ejecución de las pruebas de campo no se contó con las cajas de intemperie para nodos, por lo que la utilización de la misma puede hacer que algunos resultados varíen.

La empresa tiene intenciones de ampliar la red de Wi-Fi, por lo que se debe planificar cuidadosamente la selección de canales para no generar interferencia entre las redes. En caso de ser necesario, se recomienda la elaboración de un *site survey*.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, A. (2005). *Cadena del frío ¿tiempos de modernización?* Recuperado el 13 de Febrero de 2010, de Refrigeración industrial: http://www.refrigeracionindustrial.com/cgi-bin/RRI.pl?s=a&a=print&id=6

Bogataj, M., Bogataj, L., & Vodopivec, R. (2005). Stability of perishable goods in cold logistic chains. *International Journal of Production Economics* , *93-94*, 345-346.

Coates, J. D. (2003). Cold chain challenge: profit potential in a 'chilly' new world. (Logistics and Supply Chain Management). *World Trade* , *16* (4), 44.

Conner, M. (16 de Marzo de 2006). *Wireless-sensor networks find a fit in the unlicensed band.* Recuperado el 02 de Septiembre de 2010, de sitio web EDN: http://www.edn.com/article/463601-Wireless_sensor_networks_find_a_fit_in_the_unlicensed_band.php

Contreras, V. (25 de Diciembre de 2008). *La cadena de frío, elemento clave en seguridad alimentaria.* Recuperado el 15 de Febrero de 2010, de marearoja.cl: http://www.marearoja.cl/spip.php?article320

Duiven, J. E., & Binard, P. (2002). *Refrigerated Storage: New Developments.* Recuperado el 24 de Abril de 2010, de International Institute of Refrigeration: http://www.iifiir.org/en/doc/1042.pdf

Fernández Martínez, R., Ordieres Meré, J., Martínez de Pisón Ascacíbar, F. J., González Marcos, A., Alba Elías, F., Lostado Lorza, R., y otros. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: Teoría y aplicación práctica.* Recuperado el 04 de Abril de 2010, de Universidad de la Rioja: http://www.unirioja.es/servicios/sp/catalogo/monografias/mdi26.shtml

Fernie, J., & Sparks, L. (2004). *Logistics and retail management: insights into current practice and trends from leading experts* (2da ed.). Reino Unido y Estados Unidos: Kogan Page Limited.

Gobierno en línea: Estado Miranda. (s.f.). Recuperado el 12 de Mayo de 2010, de http://www.gobiernoenlinea.ve/venezuela/perfil_miranda.html

Heidemann, J., & Govindan, R. (Noviembre de 2004). *An Overview of Embedded Sensor Networks.* Recuperado el 20 de Agosto de 2010, de http://www.isi.edu/~johnh/PAPERS/Heidemann04a.pdf

IEEE. (01 de Octubre de 2003). *GetIEEE802 Download.* Recuperado el 05 de Agosto de 2010, de IEEE Wireless Standards Zone: http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf

James, S., James, C., & Evans, J. (2006). Modelling of Food Transportation Systems - a Review. *International Journal of Refrigeration* , *29*, pp.947-957.

Mendonça, J., & Pérez, E. (2010). *Segunda prueba XBOW: Batería de Litio vs. Alcalina.* Universidad Católica Andrés Bello, Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Mohammad, I., & Imad, M. (2005). *Handbook of Sensors Networks: Compacts Wireless and Wired Sensing.* EEUU: CRC Press LLC.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. (2010). *¿Qué es una red inalámbrica de sensores (WSN)?* Recuperado el 26 de Marzo de 2010, de National Intruments:
http://sine.ni.com/np/app/culdesac/p/ap/imc/lang/es/pg/1/sn/n17:imc,n21:11297/docid/tut-9507

Sahin, E., Babaï, M., Dallery, Y., & Vaillant, R. (2007). Ensuring supply chain safety through time temperature integrators. *The International Journal of Logistics Management*, *18* (1), pp.102-124.

Salin, V., & Nayga, R. (2003). A Cold Chain Network for Food Exports to Developing Countries. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *33* (9/10), pp.918-933.

Sowinski, L. (1999). Keep Your Big Deal From Melting Away: Shipping Perishables Call for Efficiency and Expertise. *World Trade*, *12* (3), pp.70-72.

Villón Valdiviezo, D. (Junio de 2009). *Diseño de una red de sensores inalámbrica para agricultura de precisión.* Recuperado el 16 de Junio de 2010, de Tesis PUCP: http://tesis.pucp.edu.pe/files/PUCP000000001117/DISE%D1O%20DE%20UNA%20RED%20DE%20SENSORES%20INALAMBRICA%20PARA%20AGRICULTURA%20DE%20PRECISION.pdf

Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (Junio de 2002). *An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks.* Recuperado el 17 de Agosto de 2010, de http://www.isi.edu/~johnh/PAPERS/Ye02a.pdf

Zhang, L. (Agosto de 2007). *Cold Chain Management.* Recuperado el 09 de Abril de 2010, de Cranfield CERES: http://hdl.handle.net/1826/3131

ZIGBEE ALLIANCE. (2009). *Understanding ZIGBEE RF4CE.*

Anexo A. Características técnicas del kit de desarrollo

"MICAZ Professional Kit – 2.4 GHz"

Crossbow

PROFESSIONAL KIT

FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Professional Kit

- Out-of-the-box Evaluation and Development Kit for Wireless Sensor Networks
- Packaged, Pre-programmed Wireless Sensors for Temperature, Humidity, Barometric Pressure and Ambient Light Monitoring
- FCC and CE Certified*
- Reliable Networking Software for Self- forming, Self-healing Mesh Networks (XMesh)
- Gateway for Connecting Wireless Sensor Network with PC or Internet
- Windows® based User Interface for Visualization and Analysis of Network and Sensor Data
- Support for Different ISM Frequencies
  - 2.4 GHz, 802.15.4/ZigBee
  - 868/916 MHz
  - 433 MHz

The Crossbow Professional Kit provides a comprehensive and cost-effective platform for the evaluation and development of wireless sensor network applications either in the 2.4GHz, 868/916 MHz or 433 MHz ISM bands. The professional kit provides all the components needed for rapidly deploying a multi hop wireless sensor mesh network. The sensor nodes and gateway are pre-configured with Crossbow s reliable, self-forming, self-healing mesh networking software (XMesh)

The MoteView application for Windows-based PCs provides an intuitive graphical user interface to monitor and manage the wireless sensor network including displaying network topologies, charts and graphs of sensor readings, as well as configuring sensor nodes

MoteWorks™
The development of custom sensor applications is enabled through Crossbow s MoteWorks™ software platform, which is available as an option with the professional kit. MoteWorks™ is specifically optimized for low-power battery-operated networks and provides support for:

- **Sensor Devices**: Network stack and operating system, standards support (802.15.4), over-the-air-programming and cross development tools (XMesh).
- **Server gateways**: Middleware for connecting wireless sensor networks to enterprise information and management systems (XServe).
- **User Interface**: Client application for remote analysis and monitoring, management and configuration of the sensor network.

Ordering Information

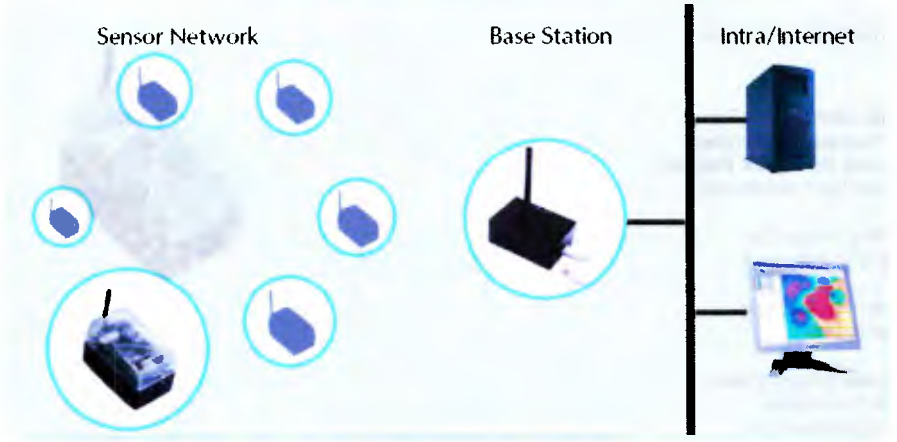
Model	Description
WSN PRO900CA	MICA2 Professional Kit 868/916 MHz
WSN-PRO400CA	MICA2 Professional Kit - 433 MHz
WSN PRO2400CA	MICAz Professional - 2.4 GHz
WSN-PRO-MWE900CA	MICA2 Professional Kit - 868/916 MHz with MoteWorks Enterprise User License
WSN-PRO-MWE2400CA	MICAz Professional Kit 2.4 GHz with MoteWorks Enterprise User License
WSN-PRO-MWE2400CA	MICA2 Professional Kit - 433 MHz with MoteWorks Enterprise User License

Document Part Number 6020-0062-04_Rev A

*FCC/CE certified for 2.4 GHz. Certification pending for 868/900 MHz and 433 MHz.

Crossbow

Network Architecture



Sensor Node

a. Processor/Radio Board:
MICA modules to enable the low-power wireless sensor networks measurement system. Available in 868/916 MHz or 2.4 GHz.

b. Sensor Board:
MTS400 multi sensor board including temperature, humidity, barometric pressure and ambient light sensing capabilities.

Data Acquisition Board:
MDA320 is a high performance data acquisition board with up to 8 channels of 16-bit ADC analog input.

Base Station

a. Processor/Radio Board:
MICA module functioning as a base station when connected to the USB PC interface.

b. USB PC Interface Board:
MIB520 Gateway provides a USB Interface for data communications.

USB Programming Board:
MIB520 provides a USB interface for data communications.

Monitoring Software

MoteView Client:
Monitoring Software for historical and real-time charting. Provides topology map, data export capability, mote programming and a command interface to sensor networks.

Kit Contents
6 Sensor Nodes (SN 2040/SN 9040)
1 Base Station (BU 2400/BU 900)
1 Data Acquisition Board (MDA320)
1 USB Programming Board (MIB520)
1 WSN Kit CD

Document Part Number: 6020-0062-05 Rev A

Crossbow

Sensor Node

FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

- Battery-operated Wireless Sensor Node for Temperature, Acceleration, Humidity, Barometric Pressure and Ambient Light Monitoring
- Plug-and-Play Add-on for Crossbow WSN kits
- Over-the-air-programming capabilities (OTAP)
- Programmable Processor/radio board with Pre-installed Networking Software for Self-forming, Self-healing mesh Networks
- Support for Different ISM frequency Bands:
  - 2.4 GHz, IEEE802.15.4
  - 868/916 MHz
- FCC and CE Certified*
- Packaged for indoor use

Applications

- Wireless Sensor Network Evaluation and Development
- Indoor Environmental Monitoring
- Asset Management (shock, temperature, humidity)
- Regulatory Compliance

WSN-KIT ADD-ON

Sensor Node

Crossbow's sensor nodes provide proven wireless technology and a comprehensive sensor suite in a fully integrated, battery-operated unit with indoor packaging. The integrated sensor board uses energy-efficient digital sensors for extended battery life and performance including a dual-axis accelerometer, barometric pressure, ambient light, and relative humidity and temperature sensors.

The nodes integrate a processor/radio board and antenna that are powered by two AA batteries. The SN24040 node provides a direct sequence spread spectrum radio (DSSS) supporting the 2.4 GHz global ISM band The SN9040 node includes a frequency shift key radio (FSK) supporting the 868/916 MHz frequency band.

The sensor nodes come preprogrammed and configured with Crossbow's reliable, ad-hoc, low-power mesh networking software (XMesh). This provides plug-and-play network scalability for Crossbow s wireless sensor network Starter and Professional Kits

The MoteView application for Windows-based PCs provides an intuitive graphical user interface to visualize the sensor data received from the sensor node and manage the wireless sensor network. MoteView is available for free download from Crossbow's web site.

Advanced Users

The sensor nodes processor/radio boards are fully programmable and supported by Crossbow's MoteWorks™ software platform. MoteWorks enables the development of custom sensor applications that are optimized for low-power, battery operated, ad-hoc mesh networks.

Over-the-air-programming (OTAP) allows the sensor nodes to be updated with new firmware and applications without having to open the package or connect a programming cable. Over-the-air-programming provides for low-cost maintenance during deployment especially for sensor nodes that are placed in remote locations.

* FCC/CE certified for 2.4 GHz. Certification pending for 868/916 MHz.

Document Part Number: 6020-0121-01 Rev A

Specifications	SN24040CA	SN9040CA	Remarks
Dual-Axis Accelerometer			
Range	+/- 2g		Analog Devices ADXL202JE
Resolution	2mg at 60Hz		
Non-linearity	0.2% of full scale		
Barometric Pressure Sensor			
Range	300-1100 mbar		Intersema MS5534AM
Resolution	0.1 mbar		
Accuracy	+/- 1.5% at 25 °C		
Ambient Light Sensor			
Spectral Responsivity	400-1000 nm		TAOS TSL2550D
Relative Humidity & Temperature Sensor			
Humidity Range	0-100% RH		Sensirion SHT11
Humidity Resolution	0.03% RH		
Absolute RH Accuracy	+/- 3.5% RH		
Temperature Range	-20 °C to +71 °C		
Temperature Resolution	0.01 °C		
Temperature Accuracy	+/- 0.5C @ 25 °C		
RF Transceiver			
Frequency Band	2.4 GHz	868/916 MHz	ISM bands
Indoor Range	30m	60m	Line of sight
Data Rate	250 kbps	38.4 kbps	
RF Power	+0dBm (max)	+5dBm (max)	Programmable
Receive Sensitivity	-94 dBm	-98 dBm	Programmable
Processor Performance			
Program Flash Memory	128K bytes		
Measurement (Serial) Flash	512K bytes		>100 000 Measurements
EEPROM	4K bytes		
Electomechanical			
Size	63mm x 38mm x 43mm		Excluding antenna
Weight	91 grams		
Batteries	2x AA		
Antenna	¼ wave dipole		
System			
Power	2.7 - 3.3V		
Operating Temperature Range	-10 °C to + 60 °C		

WSN-Professional Kit

WSN-Starter Kit

Development Kits

Crossbow's Starter and Professional Kits for Mote development provide an easy way to get first-hand experience and develop real-world wireless sensor networks. These kits provide all the components needed for rapidly deploying wireless sensor networks with sensor nodes and gateways pre-configured with Crossbow's XMesh software.

Ordering Information

Model	Description
SN24040CA	2.4 GHz, packaged wireless sensor node
SN9040CA	868/916 MHz, packaged wireless sensor node

Document Part Number: 6020-0121-01 Rev A

* FCC/CE certified for 2.4 GHz. Certification pending for 868/916 MHz.

Crossbow

Base Station

FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

- Base Station for Wireless Sensor Networks with Pre-installed Mesh Networking Software
- PC Connection through USB Interface
- Powered via USB Bus
- Support for Different ISM Frequency Bands
  - 2.4 GHz, IEEE802.15.4
  - 868/916 MHz
- FCC and CE Certified*
- Packaged for indoor use

Applications

- Wireless Sensor Network Evaluation and Development
- Indoor Environmental Monitoring
- Asset Management
- Regulatory Compliance

WSN-KIT ADD ON

Base Station

Crossbow's base station offers proven wireless technology in a fully integrated package to serve as a connection between a wireless sensor network and PC. The base station integrates a processor/radio board, antenna and USB interface board which is preprogrammed with Crossbow's reliable, ad-hoc, low-power mesh networking software (XMesh) for communication with Crossbow's wireless sensor nodes (SN24040 or SN9040)

The BU2400 node provides a direct sequence spread spectrum radio (DSSS) supporting a wireless sensor network operating in the 2.4 GHz global ISM band. The BU900 node includes a frequency shift key radio (FSK) supporting wireless sensor networks operating in the 868/916 MHz frequency band.

The USB interface is used for data transfer between the base station and the MoteView application running on a Windows-based PC. MoteView provides an intuitive graphical user interface to visualize the sensor data received from the sensor nodes and manage the wireless sensor network MoteView is available for free download from Crossbow's web site.

* FCC/CE certified for 2.4 GHz. Certification pending for 868/916 MHz

Specifications	BU2400CA	BU900CA	Remarks
RF Transceiver			
Frequency Band	2.4 GHz	868/916 MHz	ISM bands
Indoor Range	30m	60m	Line of sight
Data Rate	250 kbps	38.4 kbps	
RF Power	+0dBm (max)	+5dBm (max)	Programmable
Receive Sensitivity	-94 dBm	-98 dBm	Programmable
Processor Performance			
Program Flash Memory	128K bytes		
Measurement (Serial) Flash	512K bytes		
EEPROM	4K bytes		
Electromechanical			
Size	104mm x 64mm x 40mm		Excluding antenna
Weight	114 grams		
Power Supply	USB bus		
Antenna	¼ wave dipole		
Operating Temperature Range	-20 C to + 70 °C		

Ordering Information

Model	Description
BU2400CA	2.4 GHz packaged wireless sensor network base station
BU900CA	868/916 MHz, packaged wireless sensor network base station

Document Part Number: 6020-0121-01 Rev A

MICAz

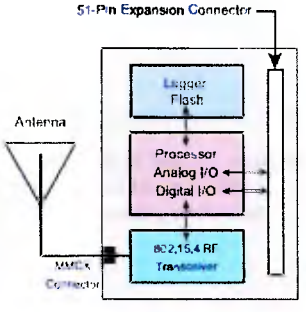
WIRELESS MEASUREMENT SYSTEM

- 2.4 GHz IEEE 802.15.4, Tiny Wireless Measurement System
- Designed Specifically for Deeply Embedded Sensor Networks
- 250 kbps, High Data Rate Radio
- Wireless Communications with Every Node as Router Capability
- Expansion Connector for Light, Temperature, RH, Barometric Pressure, Acceleration/Seismic, Acoustic, Magnetic and other Crossbow Sensor Boards

Applications

- Indoor Building Monitoring and Security
- Acoustic, Video, Vibration and Other High Speed Sensor Data
- Large Scale Sensor Networks (1000+ Points)

ZigBee Alliance



MPR2400 Block Diagram

MICAz

The MICAz is a 2.4 GHz Mote module used for enabling low-power, wireless sensor networks.

Product features include:

- IEEE 802.15.4 compliant RF transceiver
- 2.4 to 2.48 GHz, a globally compatible ISM band
- Direct sequence spread spectrum radio which is resistant to RF interference and provides inherent data security
- 250 kbps data rate
- Supported by MoteWorks™ wireless sensor network platform for reliable, ad-hoc mesh networking
- Plug and play with Crossbow's sensor boards, data acquisition boards, gateways, and software

MoteWorks™ enables the development of custom sensor applications and is specifically optimized for low-power, battery-operated networks. MoteWorks is based on the open-source TinyOS operating system and provides reliable, ad-hoc mesh networking, over-the-air-programming capabilities, cross development tools, server middleware for enterprise network integration and client user interface for analysis and a configuration.

Processor & Radio Platform (MPR2400™ A)

The MPR2400 is based on the Atmel ATmega128L. The ATmega128L is a low-power microcontroller which runs MoteWorks from its internal flash memory. A single processor board (MPR2400) can be configured to run your sensor application/ processing and the network/radio communications stack simultaneously. The 51-pin expansion connector supports Analog Inputs, Digital I/O, I2C, SPI and UART interfaces. These interfaces make it easy to connect to a wide variety of external peripherals. The MICAz (MPR2400) IEEE 802.15.4 radio offers both high speed (250 kbps) and hardware security (AES-128).

Sensor Boards

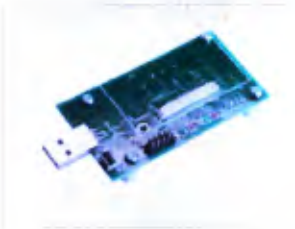
Crossbow offers a variety of sensor and data acquisition boards for the MICAz Mote. All of these boards connect to the MICAz via the standard 51-pin expansion connector. Custom sensor and data acquisition boards are also available. Please contact Crossbow for additional information.

Document Part Number: 6020-0060-04 Rev A

Crossbow

Processor/Radio Board	MPR2400CA	Remarks
Processor Performance		
Program Flash Memory	128K bytes	
Measurement (Serial) Flash	512K bytes	> 100,000 Measurements
Configuration EEPROM	4K bytes	
Serial Communications	UART	0-3V transmission levels
Analog to Digital Converter	10 bit ADC	8 channel 0-3V input
Other Interfaces	Digital I/O,I2C,SPI	
Current Draw	8 mA	Active mode
	< 15 µA	Sleep mode
RF Transceiver		
Frequency band*	2400 MHz to 2483.5 MHz	ISM band, programmable in 1 MHz steps
Transmit (TX) data rate	250 kbps	
RF power	-24 dBm to 0 dBm	
Receive Sensitivity	-90 dBm (min), -94 dBm (typ)	
Adjacent channel rejection	47 dB	+ 5 MHz channel spacing
	38 dB	- 5 MHz channel spacing
Outdoor Range	75 m to 100 m	1/2 wave dipole antenna, LOS
Indoor Range	20 m to 30 m	1/2 wave dipole antenna
Current Draw	19.7 mA	Receive mode
	11 mA	TX, -10 dBm
	14 mA	TX, -5 dBm
	17.4 mA	TX, 0 dBm
	20 µA	Idle mode, voltage regulator on
	1 µA	Sleep mode, voltage regulator off
Electromechanical		
Battery	2X AA batteries	Attached pack
External Power	2.7 V - 3.3 V	Molex connector provided
User Interface	3 LEDs	Red, green and yellow
Size (in)	2.25 x 1.25 x 0.25	Excluding battery pack
(mm)	58 x 32 x 7	Excluding battery pack
Weight (oz)	0.7	Excluding batteries
(grams)	18	Excluding batteries
Expansion Connector	51-pin	All major I/O signals

Notes
*5 MHz steps for compliance with IEEE 802.15.4/D18-2003.
Specifications subject to change without notice



MIB520CB Mote Interface Board

Base Stations

A base station allows the aggregation of sensor network data onto a PC or other computer platform. Any MICAz Mote can function as a base station when it is connected to a standard PC interface or gateway board. The MIB510 or MIB520 provides a serial/USB interface for both programming and data communications. Crossbow also offers a stand-alone gateway solution, the MIB600 for TCP/IP-based Ethernet networks.

Ordering Information

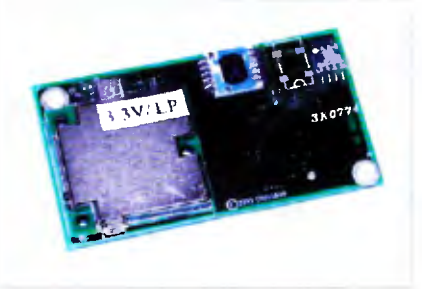
Model	Description
MPR2400CA	2.4 GHz MICAz Processor/Radio Board
WSN-START2400CA	2.4 GHz MICAz Starter Kit
WSN-PRO2400CA	2.4 GHz MICAz Professional Kit

Document Part Number: 6020-0060-04 Rev A

Crossbow

MTS420/400

ENVIRONMENTAL SENSOR BOARD



- Compatible with MICAz/MICA2 Processor/ Radio Boards
- Onboard Temperature & Humidity, Barometric Pressure and Ambient Light Sensors
- Dual-Axis Accelerometer
- 2K EEPROM for user configuration data
- Optional GPS Module

Applications

- Agricultural Monitoring
- Art Preservation
- Environmental Monitoring
- Sensor Location Mapping*
  (*GPS Equipped)

MTS400CA

MTS420/400CA

Developed in conjunction with UC Berkeley and Intel Research Labs, the MTS400CA and MTS420CA offer five basic environmental sensing parameters and an optional GPS module (MTS420CA).

These sensor boards utilize the latest generation of IC-based surface mount sensors. These energy-efficient digital devices in turn provide extended battery life and performance wherever low maintenance field-deployed sensor nodes are required.

These versatile sensor boards are intended for a wide variety of applications ranging from a simple wireless weather station to a full mesh network of environmental monitoring nodes. Applicable industries include Agricultural, Industrial, Forestry, HVAC and more.

Specifications

Dual-axis Accelerometer
- Analog Devices ADXL202JE
- Acceleration range, resolution: ±2 g, 2 mg at 60 Hz
- Nonlinearity: 0.2% of full scale
- Zero g bias level: 2.0 mg/°C from 25°C

Barometric Pressure Sensor
- Intersema MS5534AM
- Pressure range; resolution: 300-1100 mbar; 0.1 mbar
- Accuracy: ± 1.5% at 25°C
- Operating temp. range: -10°C to +60°C

Ambient Light Sensor
- TAOS TSL2550D
- Spectral responsivity: 400-1000 nm, similar to human eye

Relative Humidity & Temperature Sensor
- Sensirion SHT11
- Humidity range; resolution: 0-100% RH; 0.03% RH
- Absolute RH accuracy: ± 3.5% RH
- Temp. range; resolution: -40°C to 123.8°C; 0.01°C
- Temp. accuracy: ± 0.5°C @ 25°C

Gps Module (MTS420CA only)
- Leadtek GPS-9546
- SiRFstar ile/LP chipset
- Tracking channels: 12
- L1 frequency: 1575.42 MHz C/A code
- Position accuracy: 10 m, 2D
- Reacquisition time: 0.1 sec. (typ.), (<30 sec max. blockage)

Ordering Information

Model	Description
MTS400CA	MICA2 Weather Sensor Board with Light, Temperature, Humidity, Barometric Pressure and Seismic
MTS420CA	MICA2 Weather Sensor Board Light, Temperature, Humidity, Barometric Pressure, Seismic and GPS

Document Part Number: 6020-0053-02 Rev A

Crossbow

MIB520

USB INTERFACE BOARD

- Base Station for Wireless Sensor Networks
- USB Port Programming for IRIS/MICAz/MICA2 Hardware Platforms
- Supports JTAG code debugging
- USB Bus Power

Applications

- USB Interface
- Testbed Deployments
- In-System Programming

MIB520CB with attached Mote

MIB520CB

The MIB520CB provides USB connectivity to the IRIS and MICA family of Motes for communication and in-system programming. Any IRIS/MICAz/MICA2 node can function as a base station when mated to the MIB520CB USB interface board. In addition to data transfer, the MIB520CB also provides a USB programming interface

The MIB520CB offers two separate ports one dedicated to in-system Mote programming and a second for data communication over USB The MIB520CB has an on-board processor that programs Mote Processor Radio Boards USB Bus power eliminates the need for an external power source

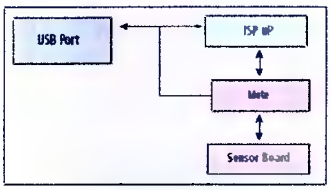
Specifications

USB Interface
- Baud Rate: 57 6 K
- Male to Female USB cable (included with unit)

Mote Interface
- Connectors
  - 51-pin
- Indicators
  - Mote LED s: Red Green Yellow

Programming Interface
- Indicators
  - LEDs - Power Ok (Green) Programming in Progress (Red)
- Switch to reset the programming processor and Mote.

Jtag Interface
- Connector: 10-pin male header POWER
- USB Bus powered



MIB520CB Block Diagram

Ordering Information

Model	Description
MIB520CB	USB PC Interface Board

Document Part Number 6020 0091-03 Rev A

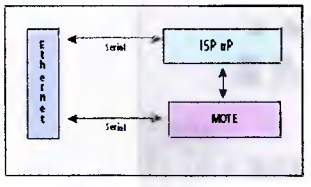
MIB600

ETHERNET INTERFACE BOARD

- Base Station/Ethernet Gateway for Wireless Sensor Networks
- Mote Network Testbed
- Remote In-System Programming for IRIS/MICAzMICA2 Processor/Radio Boards
- Full TCP/IP Protocol
- Power Over Ethernet (POE) Ready

Applications

- Ethernet Network Interface
- Testbed Deployments
- In-System Programming
- Network Connectivity via TCP/IP



MIB600 Block Diagram

MIB600

The MIB600 provides Ethernet (10/100 Base-T) connectivity to the IRIS/MICAz/MICA2 family of motes for communication and in-system programming. The MIB600 allows remote access to sensor network data via TCP/IP. The MIB600 serial server connects directly to a 10 Base-T LAN like any other network device. The MIB600 can bridge "wired" and "wireless" segments of a network. The MIB600 is also an effective conduit for sensor data.

The MIB600 offers two separate ports: One dedicated to in-system Mote programming and a second for routine data communication over the LAN. The built-in Power Over Ethernet (POE) feature eliminates the need for an external power source, simplifying installation and maintenance.

Specifications

Ethernet Network Interface

- RJ-45
- 100 Base
- IEEE 802.3 / IEEE 802.3af POE mid-span PSE compatible
- ARP, UDP/IP, TCP/IP, Telnet, DHCP, BOOTP, TFTP, Auto IP, and HTTP
- Indicators: 10 Base-T & 100 Base-TX

LAN Interface

- Internal web server, serial login, telnet login
- Security: password protection, locking features

Mote Interface

- Connector: 51-pin expansion
- Interface: UART
- 9.6-115.2 k baud
- Mote LEDs - red, green, yellow, power OK
- Management: dedicated TCP/IP port for mote UART

In-system Programming

- Protocol: UISP
- ISP active LED
- Dedicated TCP/IP port for InSystem programming
- Remote Mote RESET

Physical And Environmental

- Size: (L x W x H)
  4.63" x 2.29" x 1"
  11.76cm x 5.82cm x 2.54cm
- IEEE 802.3af POE 5V/082
- Shipped with external power supply

Ordering Information

Model	Description
MIB600	Ethernet PC Interface Board

Document Part Number: 6020-0055-04 Rev A

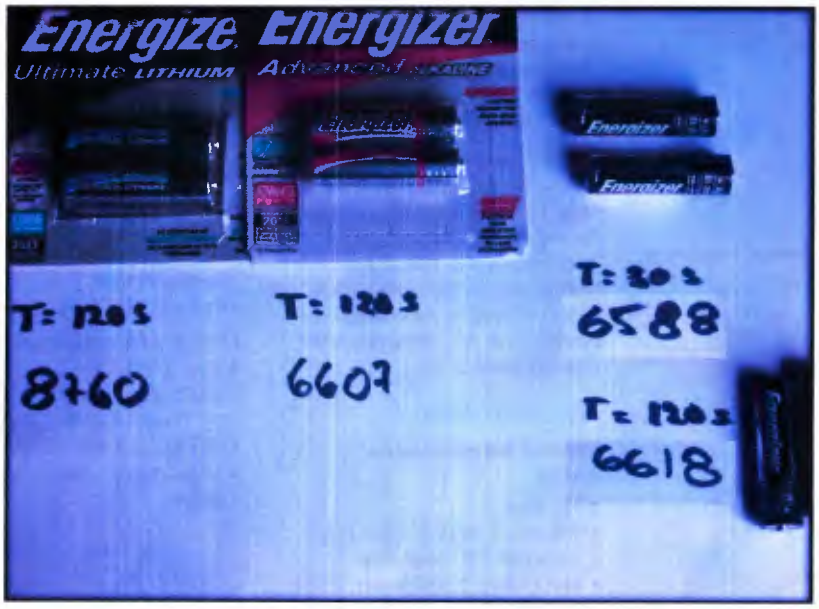
Anexo B. Rendimiento de baterías de Litio vs. Alcalinas en condiciones de frío

Objetivos:

- Comparar el performance de las baterías de litio en relación a las baterías alcaninas bajo condiciones de temperaturas inferiores a -10 C.
- Realizar pruebas a distintas tasas de muestreo con la finalidad de evaluar el impacto por separado de las variables de la temperatura del ambiente y la frecuencia a la cual se muestrea.

Parámetros:

- Se utilizó el siguiente conjunto de baterías:



Prueba de Litio vs Alcaninas:

Nodo 8760

Baterías: ENERGIZER ULTIMATE LITHIUM (litio)

Tasa de muestreo: 120 seg.

Nodo 6607

Baterías: ENERGIZER ADVANCED ALKALINE

Se eligieron estas baterías para la prueba ya que eran lo "mejor" en materia de baterías alcaninas.

Tasa de muestreo: 120seg

Prueba de distintas tasas de muestreo:

Nodo 6618

Baterías: ENERGIZER alcaninas comunes.

Se eligió este tipo de baterías ya que son las que peor se desempeñan a bajas temperatura, lo que resaltaría la influencia de la tasa de muestreo en la tarea de ahorro de energía.

Tasa de muestreo: 120seg

Nodo 6588

Baterías: ENERGIZER alcaninas comunes.

Tasa de muestreo: 30seg

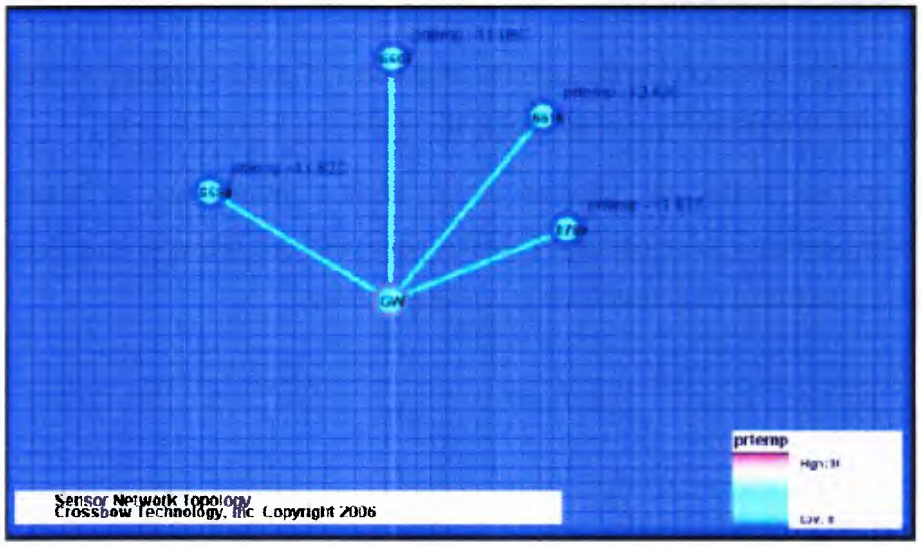
Ubicación de la prueba:

Los nodos fueron colocados en un congelador el cual se comprobó mediante un termómetro de mercurio que el promedio de su temperatura es de -11C.

Todos los nodos se ubicaron en el mismo sitio como se muestra a continuación, logrando así condiciones iguales para todos los sensores en aspectos de temperatura y facilidad de comunicación con el *Gateway*.

El *Gateway* se ubicó a 3 metros del congelador con línea directa de vista, igualando así las condiciones de comunicación de todos los nodos.

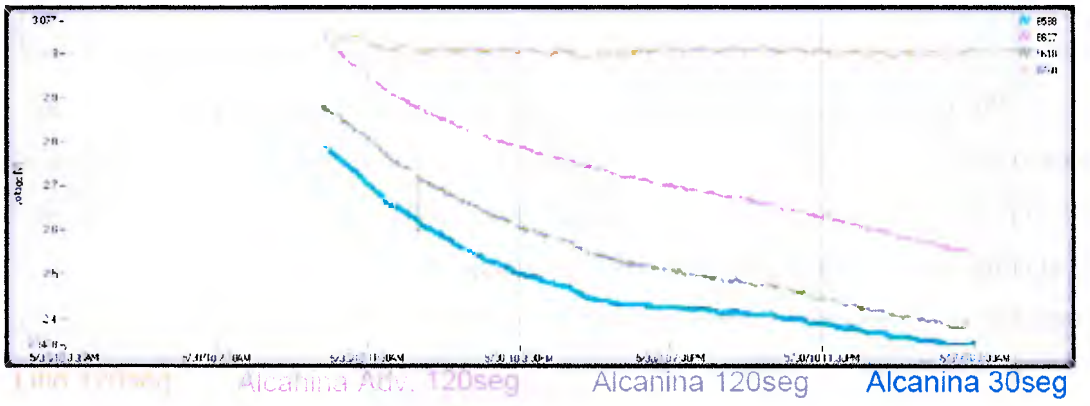
Con respecto a la topología, se tuvo una red tipo estrella, lo que quiere decir que todos los nodos se conectaron directamente con el *Gateway* sin hacer saltos intermedios.



Resultados Obtenidos:

La prueba tuvo una duración de 18 horas aproximadamente, durante la cual no hubo apertura del congelador.

A continuación observamos el comportamiento del voltaje con respecto al tiempo de las diferentes configuraciones a lo largo de toda la prueba.

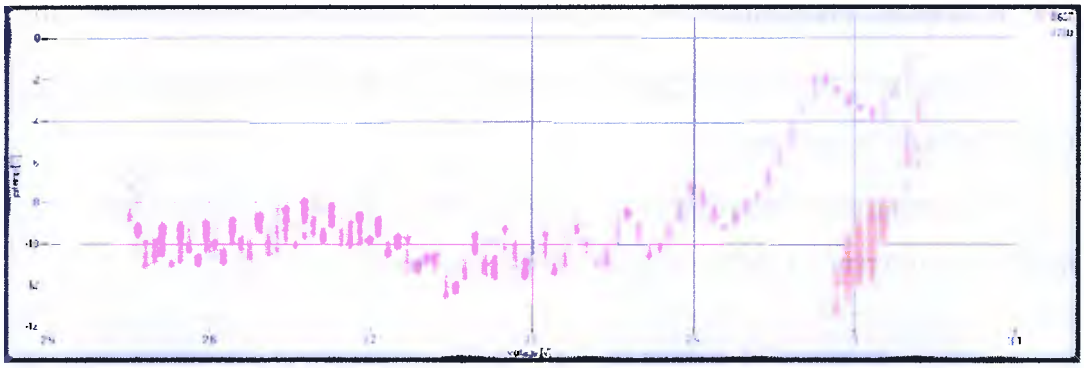


A primera vista es evidente la superioridad de las baterías de litio a temperaturas bajo cero, manteniéndose estable luego de un corto período de adaptación.

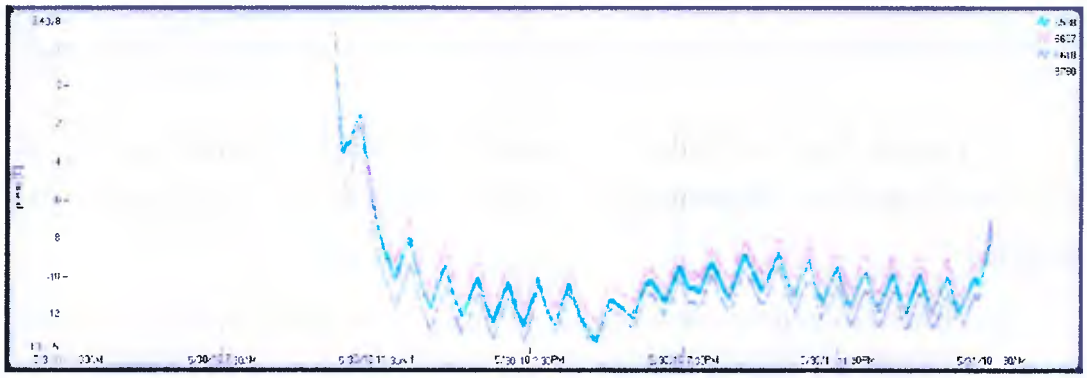
Las baterías alcaninas en contraste no llegan a estabilizarse, y a -10°C (10 grados por encima del nivel en el cual se desea que operen) luego de 18 horas se acercan peligrosamente al límite de operación el cual se ubica en 2.160v. De haberse realizado la prueba a -20°C la curva de voltaje en las baterías alcaninas hubiese decaído de forma mucho más acelerada, dejando de funcionar en un plazo mucho más corto.

Cabe destacar que estas curvas nos reflejan el consumo en las mismas, las baterías poseen la misma carga, y al ser llevadas a temperatura ambiente vuelven a valores normales.

Observamos en la siguiente grafica el comportamiento del voltaje aportado por las baterías en relación a la temperatura a la cual se encuentran las mismas.



Por parte de las baterías alcalinas se puede apreciar como su aporte de voltaje decayó durante toda la prueba. Por otra parte las baterías de litio se estabilizaron a 3V, con una oscilación de ± .02 V producto de los ciclos de temperatura que ocurren en el congelador los cuales se observan a continuación.

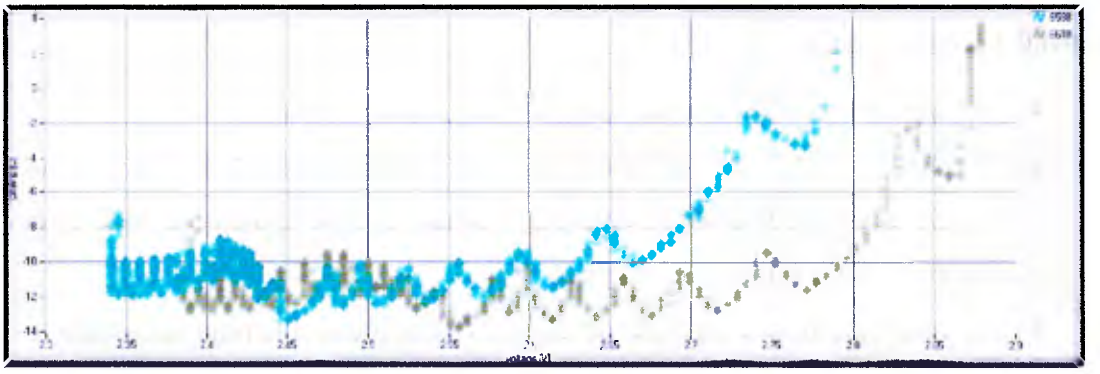


Se podría esperar un comportamiento similar en las unidades de transporte, las cuales también operan con ciclos de encendido y apagado de las unidades de enfriamiento para ahorrar energía y evitar que se congele el equipo.

En cuanto a las tasas de muestreo no se logró establecer la incidencia de este parámetro en el ahorro de energía debido a dos razones fundamentales:

- Las baterías alcaninas no estabilizaron su voltaje en el tiempo de duración de la prueba por lo que hacer una comparación desde un punto de vista de consumo fue imposible.

- El tiempo de duración de la prueba no fue suficiente para reflejar un consumo significativo en las baterías, ya que los costos de comunicación con el *Gateway* son relativamente bajos y la tasa de muestreo es baja.



Conclusiones y Recomendaciones:

Se concluyó que el uso de baterías alcaninas en temperaturas inferiores a 0 grados debe ser descartado, se recomienda a su vez el uso de baterías de litio las cuales solo presentaron un declive de 0.1V es su periodo de adaptación y se mantuvieron estables a lo largo de toda la prueba.

Se recomienda la realización de una prueba de estrés a temperaturas de -20°C en un período largo de tiempo para evaluar su factibilidad de uso en las cavas, ya que para su utilización en las unidades de transporte cumple satisfactoriamente los requerimientos.

Finalmente se observó que la tasa de muestreo no influye de ninguna forma en la etapa de adaptación de las baterías ya que esta no está relacionada al consumo.

Anexo C. Descripción de mensajes TINYOS

Cuando se recibe en una estación base un paquete, se necesita saber el contenido de la información que lleva el mensaje. Varios puntos son importantes para entender estos mensajes:

- Un paquete TINYOS tiene una longitud máxima de 255 bytes.
- El paquete crudo está contenido entre un carácter especial de sincronismo (0x7E), el cual indica dónde empieza y dónde termina el mensaje. Este es el primer y último carácter del paquete.
- Los mensajes tienen un byte de escape (0x7D). este mensaje es necesario siempre que tenga que aparecer el byte reservado 0x7E dentro del mensaje. En este caso, el byte dado pasará a estar formado por dos bytes; el primero es el byte de escape y el segundo será un XOR del byte original con el valor 0x20. Por ejemplo, si tuviera que aparecer el byte 0x7D en el mensaje, lo que realmente aparecerá será 0x7D 0x5E.
- En una máquina XP, múltiples bytes son encadenados en el mismo mensaje. Por ejemplo, los dos bytes del campo de la dirección UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmiter*) (0x007E) aparecerá como 7E 00 en la cadena de bytes.

C.1. Estructura general del mensaje

1 BYTE	1 BYTE	N-3 BYTES	1 BYTE

Tamaño (Byte)	Campo	Descripción
1	sync_byte	Inicio de mensaje (siempre 0x7E)
1	type	Tipo del mensaje activo
N-3	payload data	Datos útiles del mensaje
1	sync_byte	Fin de mensaje (siempre 0x7E)

Tabla 9: Campos de la estructura general del mensaje

(Fuente: Elaboración propia)

Los tipos de mensajes que se pueden tener son:

- P_PACKET_NO_ACK (0x42): Paquete que no requiere ACK.
- P_PACKET_ACK (0x41): Paquete que requiere ACK. Incluye un prefijo. El receptor debe enviar un paquete de respuesta del tipo P_ACK conteniendo el prefijo enviado.
- P_ACK (0x40): Es la respuesta del tipo de paquete P_PACKET_ACK. Debe incluir el prefijo en su contenido.
- P_UNKNOWN (0xFF): Tipo de paquete desconocido.

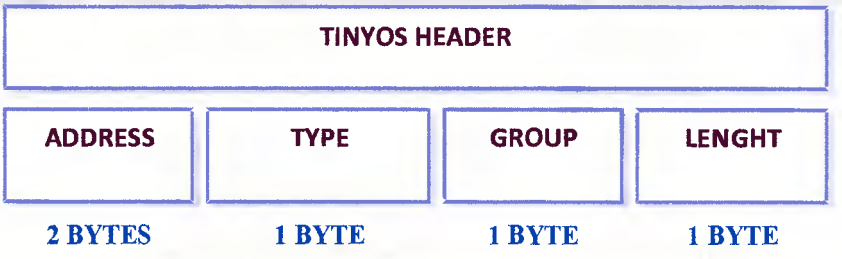
C.1.1 Datos útiles

Los datos útiles se componen de la siguiente manera:

Figura 30: Estructura de los datos útiles del mensaje

(Fuente: Elaboración propia)

C.1.1.1. Cabecera TINYOS



Tamaño (Byte)	Campo	Descripción
2	addr	Dirección de destino del salto
1	type	Tipo del mensaje activo
1	group	ID del grupo del mensaje activo
1	lenght	Longitud del mensaje entero

Tabla 10: Campos de la cabecera TINYOS del mensaje

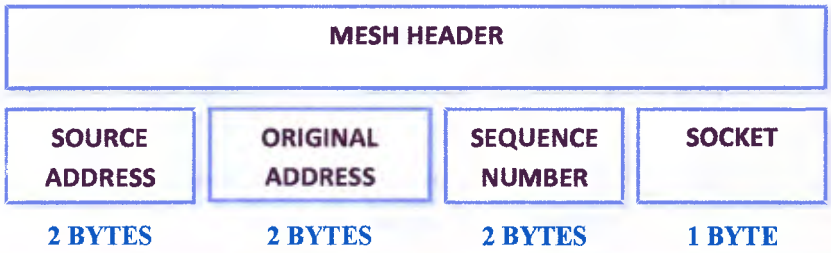
(Fuente: Elaboración propia)

Las direcciones de destino pueden ser de tres tipos:

- TOS_BCAST_ADDR: es la dirección de broadcast (0xFFFF) donde el mensaje es para todos los nodos.
- TOS_UART_ADDR: es la dirección UART (0x007E) y el mensaje va desde un nodo al puerto serie del *Gateway*.
- TOS_LOCAL_ADDRESS: es la dirección del nodo, es un ID único del nodo que recibe el mensaje.

C.1 1.2 Cabecera de la topología en malla

Los paquetes enviados dentro de la malla tienen una cabecera como la siguiente. Si la topología es en estrella y el mensaje tiene un solo salto, esta parte no se utiliza.



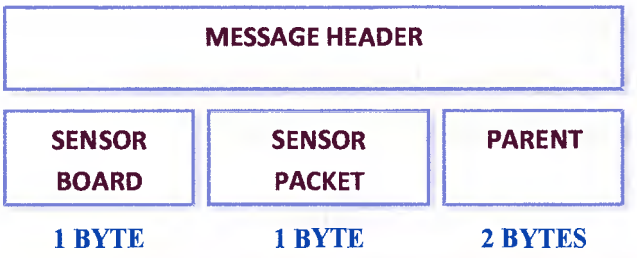
Tamaño (Byte)	Campo	Descripción
2	sourceaddr	Dirección de la fuente del mensaje
2	originaladdr	ID del nodo que envía el mensaje original
2	seqno	Número de secuencia estimado por el enlace
1	socket	ID de la aplicación

Tabla 11: Campos de la cabecera TINYOS del mensaje

(Fuente: Elaboración propia)

C.1.1.3 Cabecera básica del mensaje

Cada mensaje tiene una cabecera básica con información que identifica al nodo emisor, así como también la placa de sensores. Cada tarjeta de sensores disponible para las plataformas desarrolladas por la compañía CROSSBOW, dispone de un número de identificación único.



Tamaño (Byte)	Campo	Descripción
1	idsensorboard	Identificación de la tarjeta de sensores
1	idsensorpacket	ID del nodo emisor del mensaje original
2	parent	ID de la aplicación

Tabla 12: Campos de la cabecera básica del mensaje

(Fuente: Elaboración propia)

Modelo	ID (hex)	ID (Dec)	Sensores incorporados
MTS310	0x84	132	Acelerómetro (2 ejes), zumbador, fotoresistor, micrófono acústico, magnetómetro (2 ejes) y termistor.
MTS400	0x85	133	Acelerómetro (2 ejes), presión barométrica, luz, humedad relativa y temperatura.
MTS420	0x86	134	Acelerómetro (2 ejes), presión barométrica, luz, humedad relativa, temperatura y módulo GPS.
MDA100	0x91	140	Fotoresistor, termistor y entradas externas para ADC de 10 bits.
MDA300	0x81	129	Entradas externas para ADC de 12 bits, humedad relativa y temperatura.

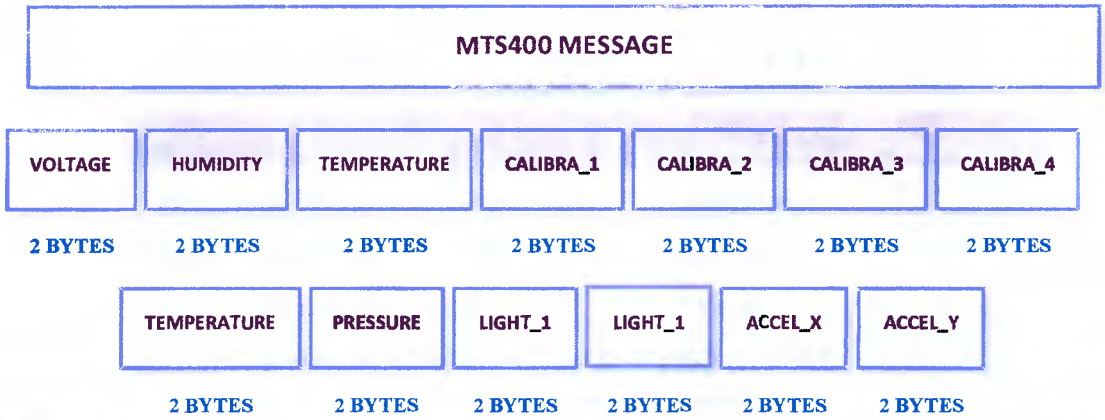
Tabla 13: Número de identificación de algunas tarjetas de sensores CROSSBOW

(Fuente: Elaboración propia)

C.1.1.4. **Mensaje MTS400**

En este campo se envía la data recolectada por las tarjetas de sensores de manera cruda y la estructura del mensaje depende directamente de la tarjeta de sensores que se utilice.

La tarjeta de sensores MTS400 tiene una variedad de sensores meteorológicos. Estas modalidades incluyen temperatura, humedad, presión barométrica, luz y aceleración en dos ejes. La estructura del paquete es la siguiente:



Tamaño (Byte)	Campo	Descripción
2	voltaje	Lectura de la batería
2	humidity	Lectura de la humedad
2	temp	Lectura de la temperatura
2	cal_word1	Parte 1 utilizada para calibrar la presión
2	cal_word2	Parte 2 utilizada para calibrar la presión
2	cal_word3	Parte 3 utilizada para calibrar la presión
2	cal_word4	Parte 4 utilizada para calibrar la presión
2	intersematemp	Lectura de temperatura del sensor intersema
2	intersemapressure	Lectura de presión barométrica del sensor intersema
2	taosch0	Parte 1 de la lectura de la intensidad de la luz
2	taosch1	Parte 2 de la lectura de la intensidad de la luz
2	accel_x	Lectura de la aceleración en el eje X
2	accel_y	Lectura de la aceleración en el eje Y

Tabla 14: Campos de la estructura del mensaje de la tarjeta de sensores MTS400

(Fuente: Elaboración propia)

C.1.1.5. **CRC**

Al final del paquete se envía un CRC que calcula la correcta emisión y recepción del mensaje. El CRC son dos bytes que se calculan haciendo un XOR del byte actual con un acumulador de CRC.

Anexo D. Fórmulas de conversión de medidas

Sensirion SHT11 humidity/temperature sensor

- Humidity data is 12 bit:

  Linear calc (no temp correction)

  fRH = -4.0 + 0.0405 * data -0.0000028 * data^2 'RH linear

  With temperature correction:

  fRH = (fTemp - 25) * (0.01 + 0.00008 * data) + fRH 'RH true

- Temperature data is 14 bit

  Temp(degC) = -38.4 + 0.0098 * data

Intersema MS5534A barometric pressure/temperature sensor

- 6 cal coefficients (C1..C6) are extracted from 4, 16 bit, words from sensor
- Temperature measurement:

  UT1=8*C5+20224

  dT=data-UT1

  Temp=(degC x10)=200+dT(C6+50)/1024

- Pressure measurement:

  OFF=C2*4 + ((C4-512)*dT)/1024

  SENS=C1+(C3*dT)/1024 + 24576

  X=(SENS*(PressureData-7168))/16384 - OFF

  Press(mbar)= X/32+250

Taos- tsl2250 light sensor

Two ADC channels:

ADC Count Value (ACNTx) = INT(16.5*[CV-1]) +S*CV

where CV = 2^^C

C = (data & 0x7) >> 4

S = data & 0xF

Light level (lux) = ACNT0*0.46*(e^^-3.13*R)

R = ACNT1/ACNT0

ADXL202E Accelerometer

At 3.0 supply this sensor's sensitivty is ~167mv/g

0 g is at ~1.5V or ~VCC/2 - this varies alot.

For an accurate calibration measure each axis at +/- 1 g and

compute the center point (0 g level) as 1/2 of difference.

Note: this app doesn't measure the battery voltage, it assumes 3.2 volts.

To getter better accuracy measure the battery voltage as this effects the full scale of the Atmega128 ADC.

bits/mv = 1024/(1000*VBATT)

bits/g = 1024/(1000*VBATT)(bits/mv) * 167(mv/g)

= 171/VBATT (bits/g)

C = 0.171/VBATT (bits/mg)

Accel(mg) ~ (ADC DATA - 512) /C

Anexo E. Monitor de temperatura utilizado

TempTale 4

SENSITECH

Programa para el registro de temperatura en los productos perecederos

Monitores de ambiente TempTale 4 2K Impresora Portátil TripStrip- Interface Plus- TempTale Manager Desktop

Transportar un producto de una manera eficiente, es una tarea complicada que incluye varias manipulaciones y una coordinación precisa entre varias personas.
Cuando dichos productos son perecederos el proceso se vuelve más complejo. El buen control y gestión de la cadena del frío reduce pérdidas y asegura la calidad del producto.
Los registros del monitor TempTale 4 le permite registrar y archivar los datos sobre el transporte de sus productos sensibles a la temperatura y guardarlos según las normativas HACCP.
También, le permite tomar decisiones de inmediato de aceptación o rechazo. Sin prestar atención a la comodidad (los productos frescos o mariscos helados, productos cárnicos,...) y mejorando la efectividad de la gestión del control de su cadena de frío, asegurará la integridad, frescura y calidad de todas sus mercancías perecederas.

La promesa de Sensitech

Sensitech se compromete a ofrecer unos productos excelentes a sus clientes, que poseen el certificado ISO 9001 2000; nuestros productos son testados con los Standard NIST y, nuestra organización está para ayudarle a analizar la calidad del control de su cadena de frío.

TempTale 4 (TT4)

Nuestros probados monitores de temperatura y humedad de precisión le permiten tomar datos y el seguimiento de sus embarques sensibles a la temperatura. Estos monitores le permiten tomar decisiones rápidas de aceptación o de rechazo y obtener una visión realista de los pasos críticos de su cadena de frío. No importa que sus productos sean frutas, frescos o vacunas, le ayudaremos a mejorar el proceso de gestión de su cadena de frío y asegurar la integridad, frescura y eficacia de sus productos sensibles a la temperatura.

Características

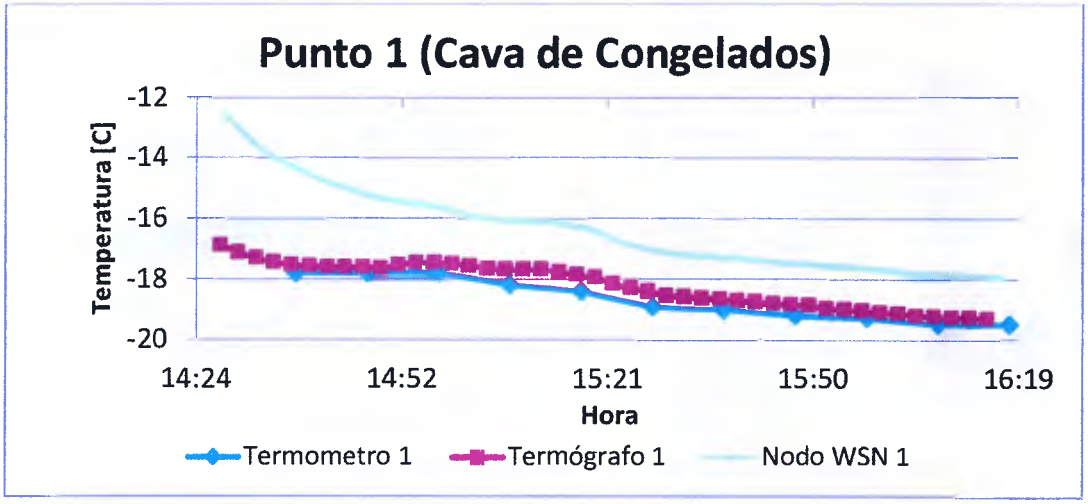
Rango de medida y temperatura	[illegible]
Duración de la batería	1 año funcionando. Batería de Litio 3.0
Rango de precisión y temperatura	±1.1°C de [illegible] a 14°C ±[illegible]°C de 22°C a 18°C ±[illegible]°C de 18°C a 50°C ±[illegible]°C de 0°C a 122°F ±[illegible]°C de 50°C a [illegible] ±[illegible]°C de 122°F a [illegible]
Capacidad de almacenamiento de datos	1.900 puntos de lectura [illegible]
Función de alarma	Límites altos y bajos programables La alarma se activa cuando excede de [illegible]
Opciones programables LCD	lectura actual de la temperatura en °F o °C
Retardo de arranque	de 0 seg. A un número de 194 días
Envolvente resistente al agua NEMA 6.	
Opciones de arranque	pulsador manual u opción automática
Dimensiones	8 cm x 5.1 cm x 1.7 cm (3.6" L x 2" W x 0.67" H)
Intervalo de medida	desde 10 seg. hasta un número de [illegible] horas
Resolución de temperatura	0.1° en todo el rango de temperatura

Sensitech dispone de un sistema de gestión de calidad certificado según ISO 9001 2000.
Todos los monitores TempTale están disponibles en versiones de un solo uso y multiuso. Los monitores TempTale pueden ser pre-programados para facilitar las lecturas de temperatura y humedad actuales.

Nuestro monitor de temperatura TempTale 4 dispone de alarmas ajustables para adaptarse a la más amplia variedad de condiciones de almacenamiento y tránsito.

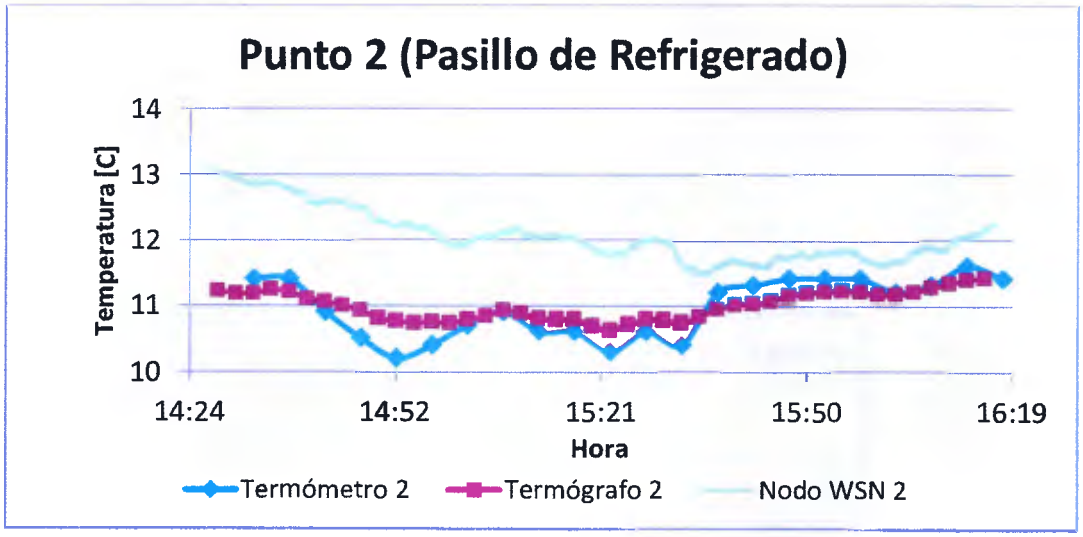
Apéndice A. Gráficas de comparación de instrumentos de medición de temperatura

Las 6 gráficas mostradas en este apartado se refieren a la comparación del conjunto de elementos desplegado en cada uno de los 6 puntos de control descritos en la Figura 7 del Capítulo IV



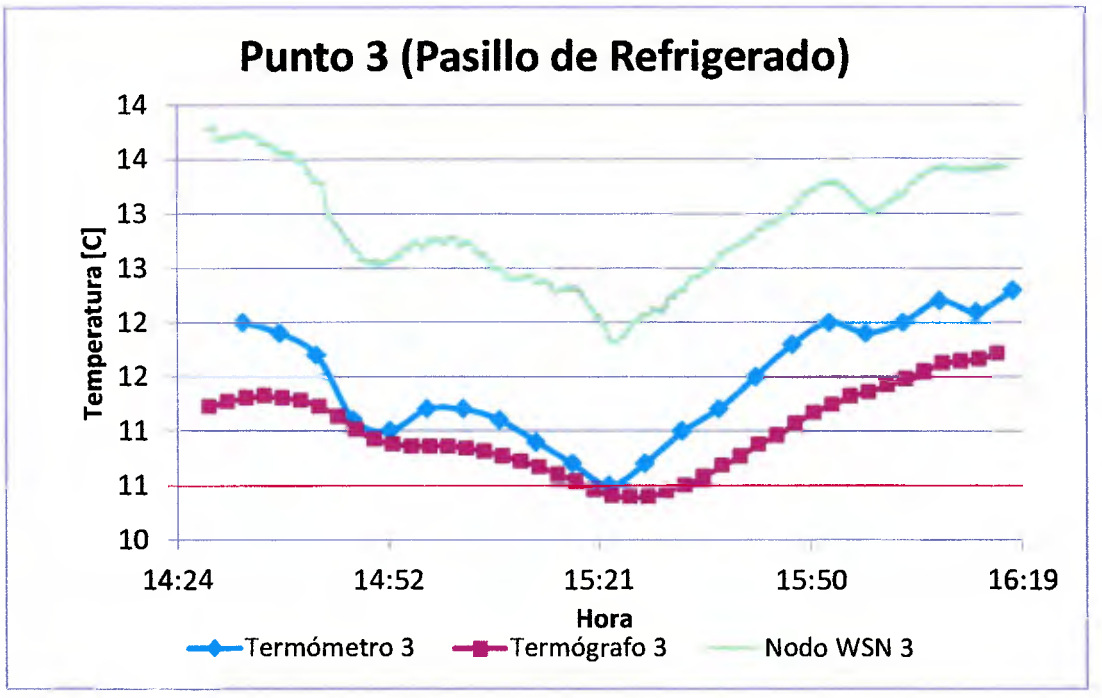
Gráfica 1: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 1

(Fuente: Elaboración propia)



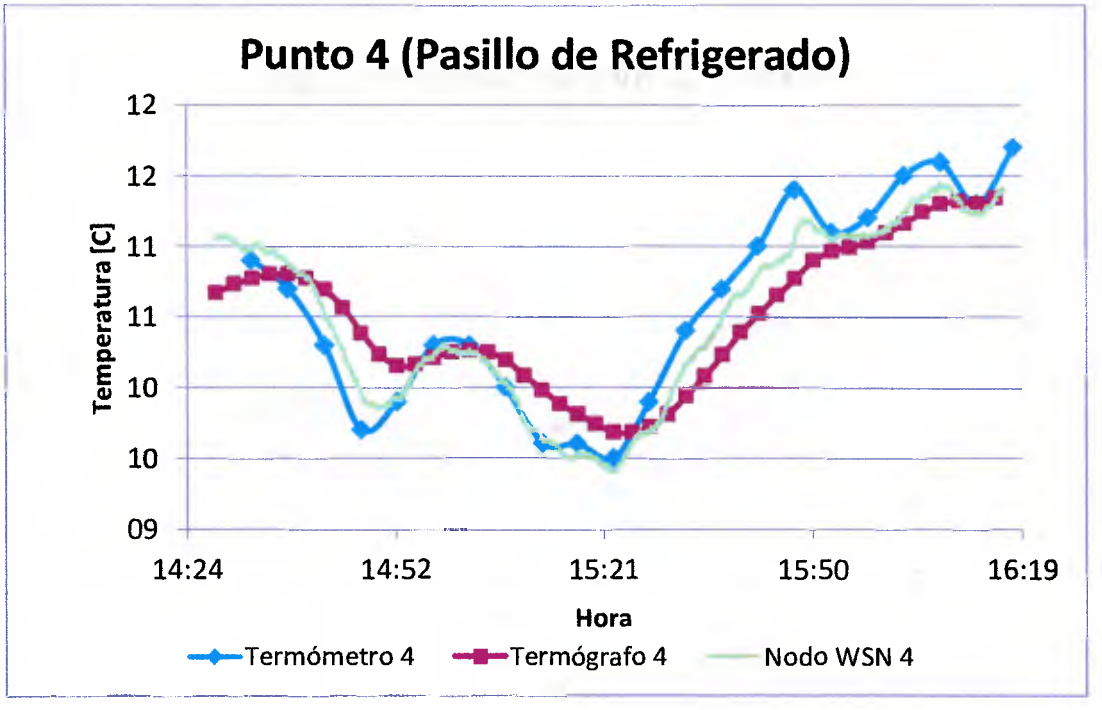
Gráfica 2: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 2

(Fuente: Elaboración propia)



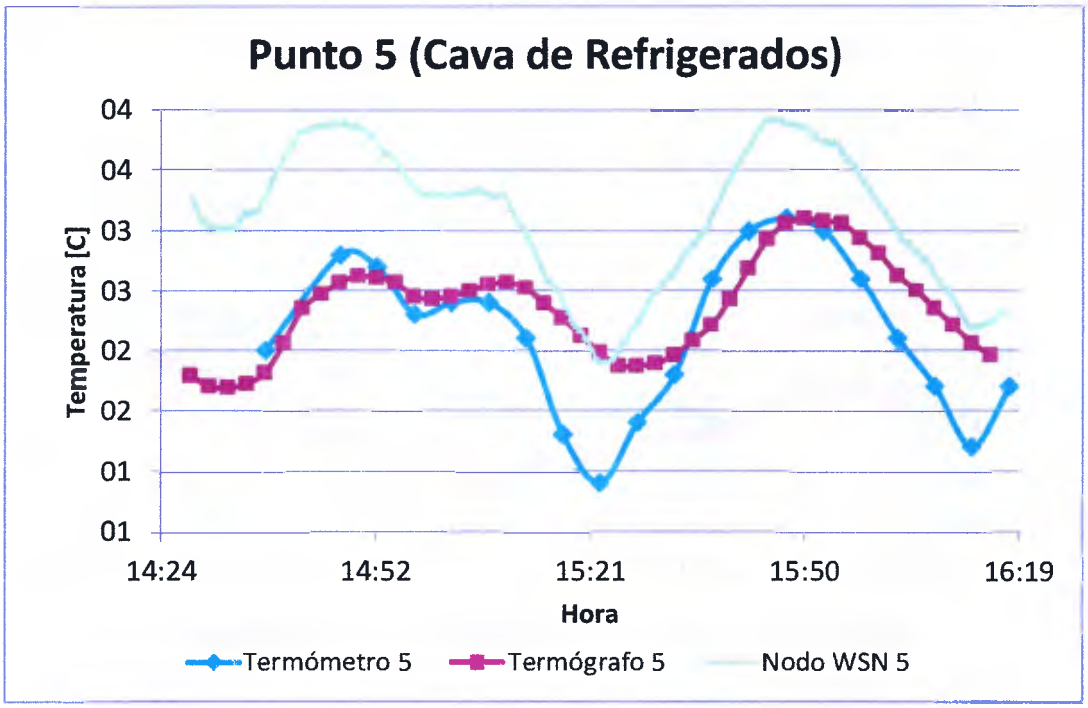
Gráfica 3: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 3

(Fuente: Elaboración propia)



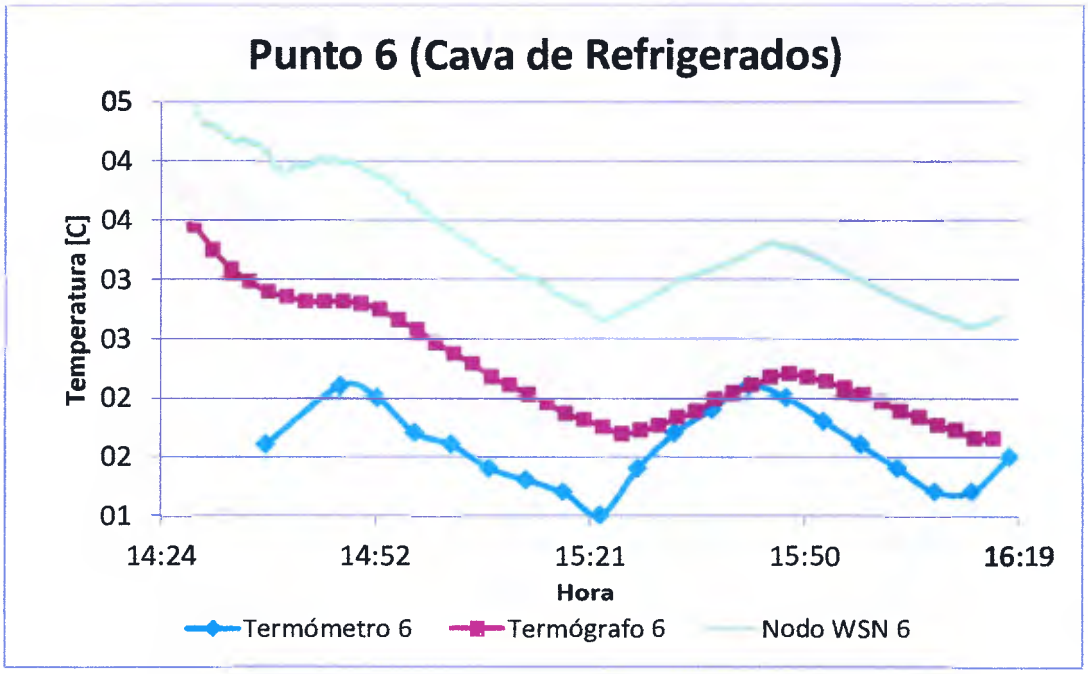
Gráfica 4: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 4

(Fuente: Elaboración propia)



Gráfica 5: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 5

(Fuente: Elaboración propia)



Gráfica 6: Comparación de instrumentos ubicados en el punto de control N° 6

(Fuente: Elaboración propia)

Apéndice B. Plan de implementación de la solución propuesta

El siguiente manual pretende dar una orientación en la implementación de la solución propuesta presentando los principales requerimientos y pasos a seguir desde el punto de vista del área de las telecomunicaciones.

B.1. Conexión

Se debe disponer de una Red de Área Local y puntos de conexión ETHERNET para la conexión del *Gateway*, de preferencia cercano al área donde se desplegarán los nodos WSN.

B.2. Estudio del gradiente de temperatura

Se deben planificar pruebas que permitan comprender el comportamiento de la temperatura a lo largo de las zonas de estudio. Para ello se recomienda contar con la asesoría de un estadista que ayude en el diseño de estas pruebas, así como en la manipulación e interpretación de los datos obtenidos.

Como orientación para la realización de estas pruebas, se sugiere seguir los siguientes pasos:

- Dividir la cava estudiada en cuadriculas de no más de 5 metros
- Las intersecciones de la grilla serán los puntos de medición, donde se ubicarán los dispositivos seleccionados para tal prueba.
- Para definir el tiempo de duración de las pruebas, se sugiere que exceda una semana laboral, con el fin de obtener datos de diferentes jornadas laborales y de descanso.
- Una vez obtenida la data, se deben eliminar datos atípicos.
- Se toman los valores promedio por cada punto de medición para elaborar un gráfico de superficie.
- Identificar las diferentes zonas de temperatura en el gráfico, así como las zonas con valores cercanos a los límites o fuera de los rangos aceptados.

B.3. **Site survey**

Los dispositivos WSN operan en la banda de 2.4GHz, por lo que se requiere de un estudio de Radiofrecuencia que permita la escogencia de un canal óptimo para la red, evitando interferencias.

B.4. **Configuración del *Gateway* ETHERNET**

El *Gateway* ETHERNET interconecta la Red Inalámbrica de Sensores con la Red de Área Local. A éste se le asigna una dirección IP a través del servidor DHCP. Para esto se debe contar con el apoyo del departamento de redes o informática de la empresa, de modo que le sea asignada al *Gateway* una dirección IP fija, que será utilizada por el servidor para la adquisición de los datos de la red de sensores.

B.5. **Definición de parámetros de interés**

Se deben definir los parámetros que se desean monitorear con la red de sensores, así como los rangos de operación aceptados por los estándares de calidad manejados por la empresa.

B.6. **Diseño de red**

A partir del estudio de temperatura realizado se seleccionan los puntos para la ubicación de los nodos WSN en base a las zonas críticas cuyos valores requieren ser monitoreados. Con esto se realiza la propuesta del diseño de la red inalámbrica.

B.7. **Diseño de las cajas de intemperie**

Dado que los dispositivos vienen descubiertos, se requiere diseñar una caja de intemperie que los proteja de las condiciones a las que serán expuestos, protegiéndolos de golpes, polvo y humedad entre otros.

Se debe considerar que estos requieren de agujeros que permitan el paso del aire y una ventana transparente permitiendo a los sensores una lectura correcta de los parámetros medidos.

B.8. **Pruebas preliminares**

Con el diseño de la red propuesto, se procede a la realización de pruebas de funcionamiento que permitan validar la comunicación de los nodos WSN y el *Gateway*. En esta fase, se realizaran los ajustes correspondientes, estudiando la posibilidad de disminuir la potencia de transmisión en algunos nodos o la inclusión de nodos enrutadores, que sirvan de puente de retransmisión para nodos que se encuentren alejados del resto de la red, perdiendo paquetes de datos.

Apéndice C. Manual de mantenimiento de la Red Inalámbrica de Sensores

Todo sistema requiere de un mantenimiento periódico que permita conservar el buen estado y funcionamiento general del mismo. En tal sentido, este manual presenta algunas recomendaciones básicas para ser tomadas en consideración.

- Verificar el buen estado de los dispositivos desplegados. Su ubicación estratégica los debe mantener alejados de las vías de circulación y del área operativa de los montacargas previniendo peligros como golpes o derrames de líquidos.
- Se debe realizar el cambio de las baterías oportunamente a fin de mantener el monitoreo continuo y el correcto funcionamiento correcto de la red, evitando fallas en la comunicación y perdida de datos que pudieran ser vitales ante algún evento. De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, el nivel mínimo de voltaje para la operación optima de los dispositivos WSN es de 2,30V, por lo que el sistema de monitoreo deberá advertir la necesidad de sustitución de las baterías de alimentación.
- Se recomienda calibrar los equipos con cierta periodicidad para certificar los valores de los diferentes parámetros de interés que estos miden, asegurando que con el paso del tiempo y el uso en condiciones de baja temperatura estos se mantienen en buen funcionamiento. De ser necesaria una calibración, esta debe hacerse a nivel del *software* de procesamiento, almacenamiento y visualización de la data, modificando la fórmula de conversión de la medida indicada.

Apéndice D. Selección de equipos para plan de implementación

La aplicación de este proyecto en su fase piloto, requiere de una cantidad de dispositivos. El presente informe pretende listar los elementos que serán adquiridos para tal fin (ver Tabla 15).

Componente	Modelo	Descripción	Cantidad	URL (Datasheets)
Mote IRIS (nodo WSN)	XM2110CA	Unidad de radio de 2.4 GHz	12	http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/IRIS_Datasheet.pdf
Tarjeta de sensores	MTS400CA	Tarjeta para el monitoreo ambiental con sensores de temperatura, humedad, luz, presión barométrica y acelerómetros.	11	http://www.instrumentation.it/main/pdf/CROSSBOW/MTS400-420_Datasheet.pdf
Gateway	MIB600	Tarjeta de interfaz ETHERNET - PC.	1	http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MIB600CA_Datasheet.pdf

Tabla 15: Materiales y equipos a utilizar

(Fuente: Elaboración propia)

A continuación se procede a describir los aspectos técnicos que ayudaron a determinar la elección de los dispositivos que se piensan utiliza.

D.1. Elementos CROSSBOW

En el campo de la investigación de redes inalámbricas de sensores, la compañía CROSSBOW tiene una larga trayectoria y actualmente se encuentra comercializando la tercera generación de nodos, la cual corresponde a la serie de dispositivos MPR400 (MICA2), MPR2400 (MICAZ), M2110 (IRIS), MPR500

(MICA2DOT). Al ser ya una tercera generación, estos dispositivos ofrecen una gran garantía a prueba de errores, por lo que la mayoría de investigaciones y desarrollos se encuentran inclinadas a su uso. Otro aspecto que potenció el uso de dichas plataformas es el sistema operativo, por permitir trasladar aplicaciones de una plataforma a otra sin necesidad de mayores cambios, lo cual representa una gran ventaja, puesto a que ya la universidad cuenta con un kit de estos dispositivos.

D.1.1. *Gateway* ETHERNET MIB600

Este dispositivo se utilizará como interfaz para la interconexión de la red de sensores con la computadora que servirá como estación base para analizar toda la información disponible. El hecho de poseer una interfaz de comunicación para red LAN, puede ayudar a gestionar los datos de manera remota, por medio del acceso al sistema a través de Internet. Adicionalmente, esta tarjeta puede ser utilizada como programador de los nodos WSN, siendo compatible con la unidad de radio que se desea utilizar (IRIS M2110). Para que pueda funcionar este dispositivo, se requiere de una fuente de alimentación de 5V (o en su defecto de un conector PoE de 3.3V) para energizar toda la tarjeta.

Figura 31: *Gateway* ETHERNET Modelo MIB600
(Fuente: Elaboración propia)

D.1.2. *Mote* IRIS M2110

En vista de los requerimientos y de las dimensiones de los almacenes de la empresa, la solución a implementar requiere la utilización de la plataforma de desarrollo IRIS M2110 que trabaja en la banda ISM de 2.4 GHz y funciona bajo los estándares de la IEEE 802.15.4 y ZIGBEE. La cantidad de dispositivos a utilizar

queda determinada por las unidades que se utilizaran únicamente como receptor-transmisor de la información para salvar la distancia en la cual estará ubicado el *Gateway*, la cual queda expuesta a múltiples obstáculos que se presentan en el camino de la información. Adicionalmente se tomaron en cuenta las unidades que se les incorporarán las tarjetas de sensores, las cuales servirán como nodos sensores. El diseño de red propuesta estima la utilización de siete (7) nodos sensores para la cava de congelados y cuatro (4) nodos sensores para la cava de refrigerados; adicionalmente se estima un *mote* que pueda servir como repetidores en el caso tal que se decida cambiar el punto de acceso de la red a otro punto de red, lo que en total sumaría doce (12) nodos de este modelo.

Figura 32: Unidad de RF. *Mote* IRIS, modelo XM2110CA
(Fuente: Elaboración propia)

D.1.3. Tarjeta de sensores

Las tarjetas de expansión son las que ofrecen la capacidad de sensado a los *motes*. En la gestión de la cadena de frío es necesario monitorear todos los factores que pueden influir en el flujo continuo de temperatura. De la gama de productos con la que cuenta la compañía CROSSBOW, se escogió la tarjeta de sensores MTS400CA que incluye la mayor cantidad de sensores que se asocian a la aplicación que se desea desarrollar y soportan las condiciones de almacenamiento requeridas.

La familia de tarjetas de sensores MTS ó *Multi-Sensor Board* por sus siglas en inglés, están diseñadas para trabajar con los nodos MICA, MICA2, MICAZ, IRIS M2110 y MICA2DOT, por lo que la compatibilidad con todos estos modelos es total.

Estas tarjetas cuentan con un número limitado de sensores que vienen incorporados a ellas y que por lo general son típicos para aplicaciones estándar.

La tarjeta **MTS400CA** contiene sensores de luz, temperatura, humedad relativa, acelerómetro de dos ejes y presión barométrica. De los sensores que contiene la tarjeta no se utilizarán el acelerómetro y el sensor de presión barométrica, pero todos los demás sensores serán utilizados en el sistema que se piensa desarrollar. La principal característica de esta tarjeta es que opera en rangos de temperatura entre -40°C y 123,8°C. Cada unidad de radio o *mote* necesita de una tarjeta de este estilo para que pueda funcionar como unidad de medición, por lo cual la cantidad estimada a utilizar está relacionada con los once (11) nodos a utilizar en todo el almacén refrigerado con esta función.

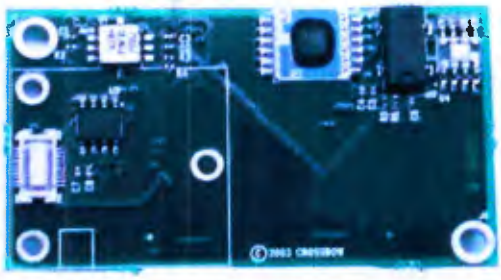


Figura 33: Tarjeta de sensores Modelo MTS400CA

(Fuente: Elaboración propia)

D.2. Costo de equipos para la implementación

Componente	Modelo	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Unitario (BsF)	Total (USD)	Total (BsF)
Mote IRIS (Radio)	XM2110CA	12	102	438,6	1224	5263,2
Tarjeta de sensores	MTS400CA	11	222	954,6	2442	10500,6
Gateway	MIB600	1	344	1479,2	344	1479,2
			Total		4010	17243

Tabla 16: Precios de los equipos a utilizar en la implementación

(Fuente: Elaboración propia)

Apéndice E. Resultados del gradiente de temperatura

E.1. Mediciones en cava de congelado

E.1 1 Primera toma de mediciones

	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8	Temp 9	Temp 10	Temp 11	Temp 12	Temp 13	Temp 14	Temp 15
Max. Temp.	-15,00	-16,00	-16,00	-16,30	-17,60	-16,40	-16,50	-17,90	-18,80	-19,10	-19 10	-18,10	-18,20	-17,50	-16,60
Min. Tem	-20 10	-20,10	-20 40	-19,70	-21,30	-21,00	-20,50	-21,40	-22,10	-22,10	-22,20	-21,40	-21,60	-21,80	-20,70
Temp. Promedio	-17 89	-18 52	-18,46	-18,18	-19,48	-19,42	-19,13	-19 85	-20 52	-20 66	-20 78	-19 95	-19,97	-20 04	-19,07
Desviación Est.	0,9848	0,7967	0,8144	0,728	0,7024	0,7713	0,8221	0,6654	0,6722	0,63762	0,65976	0,66494	0,6746	0,85868	0,77296
Moda	-17 40	-18 40	-18,10	-18 10	-19,10	-19 40	-19 20	-19 90	-20 20	-20,80	-20 80	-20,10	-20 10	-20 30	-18,80

Tabla 17: Primera toma en cava de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

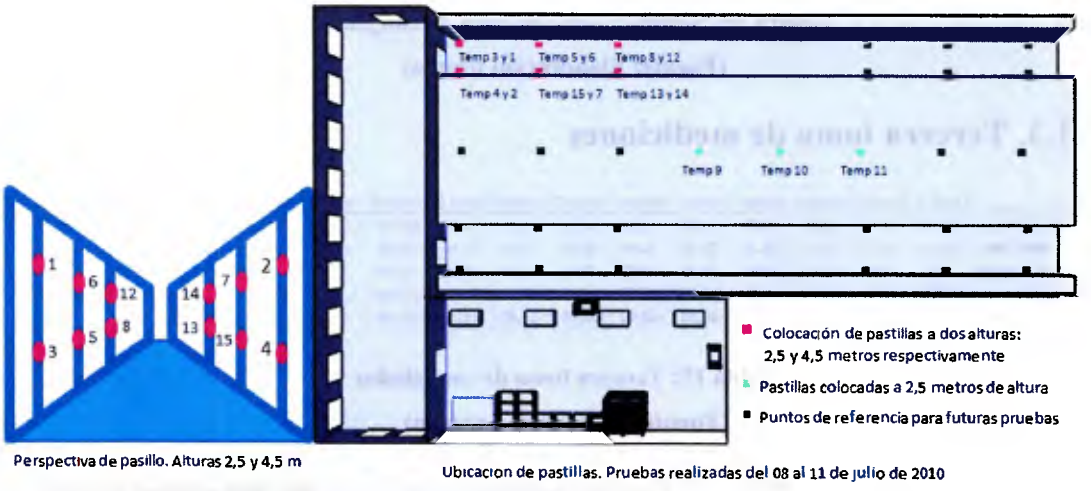


Figura 34: Primera toma en cava de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

E.1.2. Segunda toma de mediciones

	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8	Temp 9	Temp 10	Temp 11	Temp 12	Temp 13	Temp 14	Temp 15
Max Temp.	-14,70	-16 00	-16,00	-14 90	-16,40	-16,10	-15,10	-15,90	-16,30	-16,20	-17,10	-16 40	-16,60	-16,70	-16 10
Min. Tem.	-19 40	-20,10	-20 40	-19,80	-20 50	-20,20	-19 80	-20 30	-21,30	-20,70	-21 20	-20 20	-21,20	-21 10	-20 60
Temp. Promedio	-17,59	-18 52	-18,46	-17,56	-18,83	-18,27	-17,79	-18,61	-19,38	-18 80	-19,39	-18,78	-19 37	-19,23	-18 52
Desviación Est	0,9452	0,7967	0,8144	1,0212	0,9138	0,8591	1,0451	0,9433	0,974	1,01258	0,79193	0,76977	0,95576	0 86416	0,9739
Moda	-18 70	-18 40	-18,10	-17,40	-18,70	-18 20	-17,40	-18 70	-19 60	-18 90	-19 40	-18,90	-19 40	-19,40	-18 70

Tabla 18: Segunda toma en cava de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

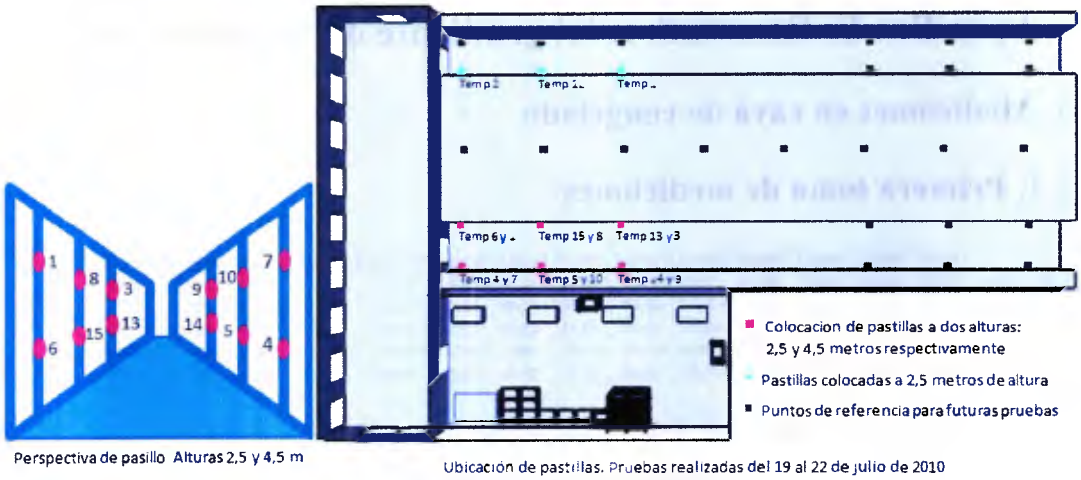


Figura 35: Segunda toma en cava de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

E.1.3. Tercera toma de mediciones

	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8	Temp 9	Temp 10	Temp 11	Temp 12	Temp 13	Temp 14	Temp 15
Max. Temp.	-16,20	-15 40	-16,10	-10,90	-14 90	-15 20	-16 10	-15 40	-14,70	-14,30	-14 50	-15 10	-15,80	-15,30	-16,20
Min Tem.	-21 40	-21,30	-21,70	-21,30	-21,40	-21,40	-21,30	-21,60	-21,60	-21,70	-21 40	-21,50	-21,60	-21,10	-21,50
Temp Promedio	-19 00	-18 98	-19 43	-18,44	-19,09	-18 98	-19 06	-19,16	-18 81	-18,96	-18 87	-18,98	-19 27	-18 84	-19,34
Desviación Est.	1,0759	1,1804	1,1038	1,895	1,2037	1,1358	1,052	1,0955	1,235	1,27156	1,22669	1,19662	1,17295	1,09192	1,0117
Moda	-19 10	-19,30	-19 20	-18,60	-18 80	-18,40	-18,90	-19,30	-18,30	-19,40	-19 30	-18,90	-19 20	-19,20	-19,40

Tabla 19: Tercera toma de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

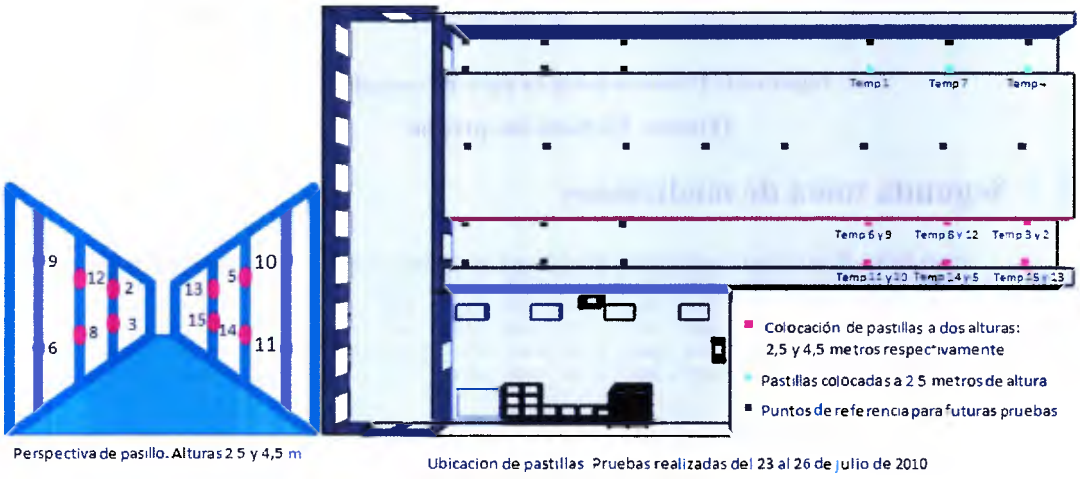


Figura 36: Tercera toma de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

E.1.4. **Cuarta toma de mediciones**

	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8	Temp 9	Temp 10	Temp 11	Temp 12	Temp 13	Temp 14	Temp 15
Max. Temp.	-14,70	-13,40	-13,60	-10,30	-15,70	-15,80	-12,90	-14,90	-15,30	-11,60	-14,20	-12,60	-14,80	-14,30	-15,70
Min. Tem.	-20,60	-21,10	-21,50	-20,70	-21,40	-21,10	-20,70	-20,90	-20,80	-20,90	-21,10	-20,90	-21,20	-21,00	-21,10
Temp. Promedio	-17,99	-18,22	-18,99	-18,22	-19,27	-19,08	-18,28	-18,93	-18,82	-18,50	-19,01	-18,93	-18,50	-18,68	-19,07
Desviación Est.	1,1551	1,3337	1,3355	1,5965	1,0542	0,9991	1,222	1,0293	1,0059	1,27007	1,07651	1,05071	1,18216	1,13437	1,04031
Moda	-17,70	-17 70	-19,70	-18 90	-20,10	-18,70	-17,70	-18,80	-18,80	-18,20	-19,40	-19 20	-17,70	-19,20	-18,90

Tabla 20: Cuarta toma de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

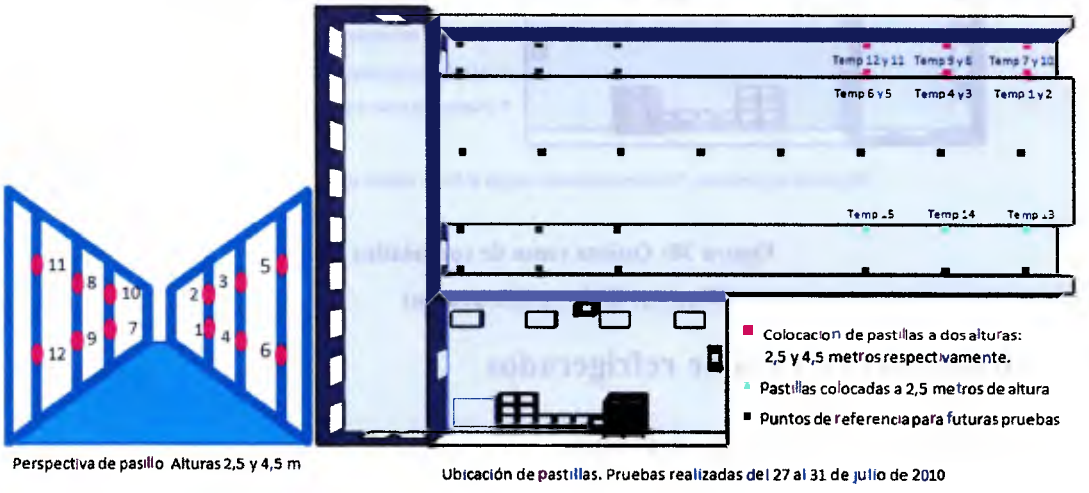


Figura 37: Cuarta toma de congelados

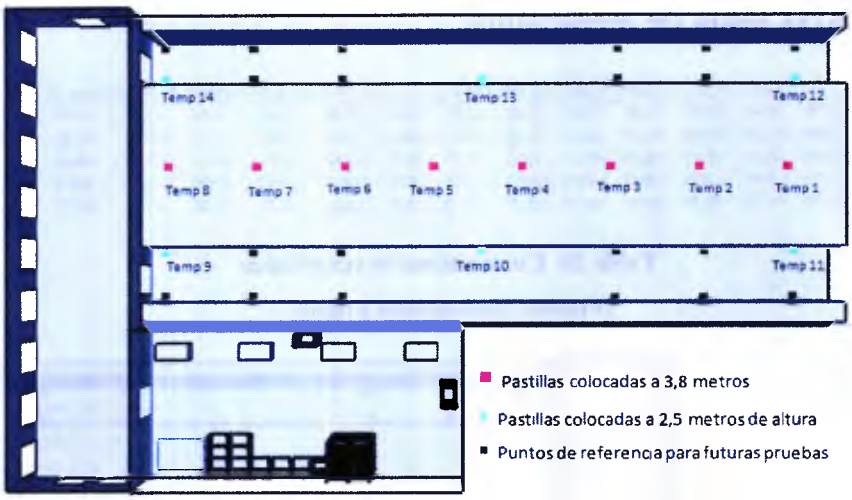
(Fuente: Elaboración propia)

E.1.5. **Quinta toma de mediciones**

	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8	Temp 9	Temp 10	Temp 11	Temp 12	Temp 13	Temp 14	Temp 15
Max. Temp.	-13,70	-14,20	-15,10		-16,90	-14,00	-16,40	-16,10	-16,20	-16,60	-14,10	-14,20	-16,30	-15,80	
Min. Tem.	-22,40	-22,50	-22,60		-22,30	-21,80	-20,80	-20,20	-19,90	-21,70	-22,80	-22,60	-22,30	-19,90	
Temp. Promedio	-19 68	-19,83	-20,04		-19,89	-19,69	-19,21	-18,71	-18,46	-19,60	-20,13	-19,95	-19,83	-18,54	
Desviación Est.	1,6648	1,5039	1,3489		0,9496	1,0552	0,8388	0,7371	0,7027	1,03388	1,69238	1,58173	1,00719	0,76384	
Moda	-19 80	-19,40	-19,70		-20,10	-20,10	-19,70	-19,30	-18,30	-20,10	-20,30	-20 10	-19,70	-18,70	

Tabla 21: Quinta toma de congelados

(Fuente: Elaboración propia)



Ubicacion de pastillas. Pruebas realizadas del 03 al 06 de agosto de 2010

Figura 38: Quinta toma de congelados

(Fuente: Elaboración propia)

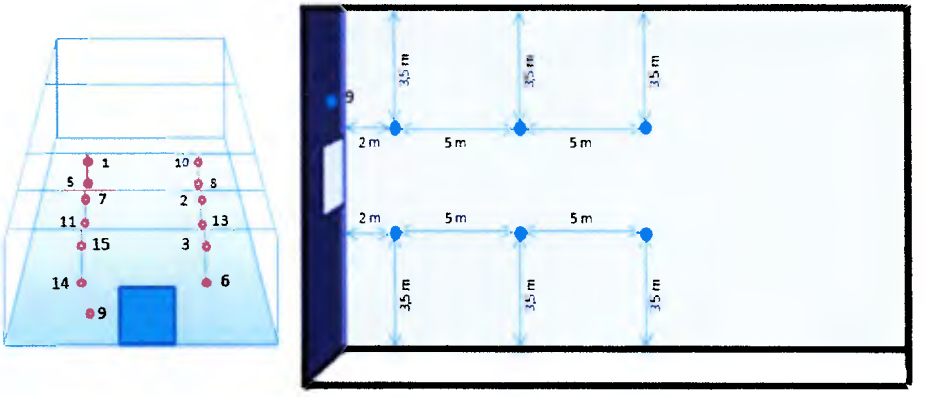
E.1 Mediciones en cava de refrigerados

E.1 1. Primera toma de mediciones

	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8	Temp 9	Temp 10	Temp 11	Temp 12	Temp 13	Temp 14	Temp 15
Max. Temp	2,40	3,40	3,90	2,40	3,40	2,70	2,40		2,40	3,90	5,70
Mín Tem	-0 30	-0,30	-0,30	-0,10	0,60	-0,30	-0,10		-0,10	0,00	-1 70
Temp Promedio	1,08	1,03	1,53	1,29	1,50	1,05	1,25		1,29	1,23	0,39
Desviación Est	0,495	0,6427	0,6398	0,461	0,4442	0,53237	0,47632		0,46801	0,65488	1,21232
Moda	0,60	1,70	0,80	0,90	1,30	0,90	1,80		1,80	1,90	-0,80

Tabla 22: Primera toma de refrigerados

(Fuente: Elaboración propia)



Ubicacion de pastillas. Pruebas realizadas del 10 al 13 de agosto de 2010

Figura 39: Primera toma de refrigerados

(Fuente: Elaboración propia)

E.1.2. Segunda toma de mediciones

	Temp 5	Temp 6	Temp 7	Temp 8	Temp 9	Temp 10	Temp 11	Temp 12	Temp 13	Temp 14	Temp 15
Max. Temp.	3,10	2,80	2,40	2,60	2,30	3,20	3,20	2,70	2,60	2,70	
Mín. Tem	0,60	0,40	0,70	0,80	0,90	0,90	0,90	1,50	1,10	0,10	
Temp. Promedio	1,28	1,15	1,47	1,39	1,52	1,92	1,92	2,19	1,83	1,23	
Desviación Est.	0,3763	0,3683	0,3061	0,2769	0,2379	0,2749	0,2749	0,18536	0,25537	0,45286	
Moda	1,40	0,90	1,20	1,60	1,30	1,80	1,80	2,10	1,60	0,90	

Tabla 23: Segunda toma de refrigerados

(Fuente: Elaboración propia)

Ubicacion de pastillas. Pruebas realizadas del 13 al 15 de agosto de 2010

Figura 40: Segunda toma de refrigerados

(Fuente: Elaboración propia)