

# UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



## POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

DESARROLLO DE UNA RED DE NODOS INTELIGENTES  
PARA LA COMUNICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA DE  
UN SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SOLAR CON  
TECNOLOGÍA DE TORRE CENTRAL

# T E S I S

PRESENTADA POR

**RAMÓN VICENTE ARMAS FLORES**

Desarrollada para cumplir con uno de los  
requerimientos parciales para obtener  
el grado de Maestro en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS  
DR. VICTOR HUGO BENITEZ BALTAZAR

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

SEPTIEMBRE 2015

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# RESUMEN

Los sistemas de transformación de energía solar en potencia eléctrica han emergido en las últimas décadas como una fuente viable de energía limpia y renovable. La tecnología de planta de torre central solar es un buen ejemplo de este tipo de sistemas, la cual consiste en varios espejos móviles, llamados helióstatos, que reflejan la radiación del Sol hacia un mismo punto, localizado en la cima de una torre al centro del campo de helióstatos, para su recolección o transformación en otro tipo de energía.

La Plataforma Solar de Hermosillo (PSH) es una instalación en la que se cuenta con un número creciente de helióstatos, con propósitos de investigación. Para continuar con el crecimiento y la mejora de este campo de pruebas, se propone en este trabajo la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica basado en nodos inteligentes, que presente una alternativa para la comunicación y el control de los seguidores del campo.

Las redes inalámbricas se componen de nodos que transmiten la información de un punto a otro, pero normalmente se limitan simplemente a la transmisión de información. Los nodos inteligentes no se limitan a la transmisión de datos, sino que también pueden realizar otras acciones, por lo que pueden adaptarse a las condiciones y limitaciones del campo de helióstatos, logrando así un sistema de comunicación efectivo.

Se propone una metodología experimental mediante la cual se logre el diseño, implementación y validación de un sistema de comunicación inalámbrica basado en nodos inteligentes. Asimismo se describen los pasos llevados a cabo durante la implementación de esta metodología. Tomando en cuenta las características y limitaciones del campo de pruebas, se optó por usar tecnología inalámbrica ZigBee, junto con microcontroladores en el ambiente de desarrollo Arduino para el desarrollo de los nodos de comunicación.

Tras la implementación de los nodos en los helióstatos, se llevaron a cabo pruebas para la validación de la comunicación, para poder determinar la viabilidad del uso de las tecnologías propuestas. Los resultados de las pruebas fueron siempre positivos, superando las expectativas que se tenían sobre su funcionamiento dentro del campo de seguidores. Por lo tanto se logró validar la viabilidad y la eficiencia del sistema de comunicación inalámbrica, para ser implementado en la PSH, permitiendo la comunicación y control de los helióstatos.

# ABSTRACT

The systems used for transforming solar energy into electrical power have emerged in recent decades as a viable source of clean and renewable energy. Solar power tower technology is a good example of this type of system, which consists of several mobile mirrors, called heliostats, which reflect the sun's radiation to a single point, located on the top of a tower at the center of heliostat's field, for its collection or transformation into another type of energy.

Plataforma Solar de Hermosillo (PSH) is a facility which counts with a growing number of heliostats, for research purposes. To continue the growth and improvement of this field test, this thesis proposes the implementation of a wireless communication system based on intelligent nodes that can provide an alternative for the communication and control of the heliostats.

Wireless networks consist of nodes that transmit information from one point to another, but usually simply limited to the transmission of information. Intelligent nodes are not limited to the transmission of data, but can also perform other actions, so they can adapt to the conditions and limitations of the heliostat field, thus achieving an effective communication system.

An experimental methodology is proposed, which allows the design, implementation and validation of a wireless communication system, based on intelligent nodes. The steps taken during the implementation of this methodology are described here, taking into account the characteristics and limitations of the heliostats field, ZigBee wireless technology along with Arduino microcontrollers, were chosen for the development of the communication nodes.

After the implementation of the nodes in the heliostats, tests were conducted to validate the communication, and to determine the feasibility of using the proposed technologies. The test results were always positive, exceeding the expectations held for its operation in the field. Therefore it was possible to validate the feasibility

and efficiency of the wireless communication system, to be implemented in PSH, allowing communication and control of the heliostats.

# DEDICATORIAS

A Dios por permitirme llegar hasta el final de este proyecto.

A mis padres por su apoyo siempre incondicional que me ha permitido llegar hasta donde estoy.

A mis amigos por siempre poder contar con ellos para alentarme a salir adelante.

# **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por brindarme la fuerza para siempre seguir adelante.

A mis padres ya que todo lo que soy y todo lo que tengo es gracias a ellos.

A mi director de tesis por su invaluable ayuda durante la realización de este proyecto, por su guía y su paciencia.

A todo el personal de la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH) por compartir su conocimiento y por su apoyo en la realización de este proyecto.

Al grupo de profesores del posgrado por compartirme sus conocimientos y experiencias.

A la Universidad de Sonora y al Posgrado en Ingeniería por las oportunidades e incentivos que me brindaron.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Fortalecimiento de la Calidad en Instituciones Educativas (PROFOCIE) por su sustento económico que permitió la realización de este posgrado.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	iii
DEDICATORIAS.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Presentación.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	4
1.3. Objetivo general.....	4
1.4. Objetivos específicos.....	4
1.5. Hipótesis.....	5
1.6. Alcances y delimitaciones.....	5
1.7. Justificación.....	5
2. MARCO DE REFERENCIA.....	7
2.1. Energía Solar.....	7
2.1.1. Radiación Solar.....	7
2.1.2. Sistemas de Concentración Solar.....	8
2.1.3. Concentradores de cilindro solar parabólico.....	9
2.1.4. Concentradores de disco parabólico.....	10
2.1.5. Torre de concentración solar.....	11
2.1.6. Planta Solar de Hermosillo (PSH).....	13
2.2. Redes Inalámbricas de Sensores (WSN).....	15
2.2.1. Comunicación inalámbrica.....	15
2.2.2. Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN).....	18
2.2.3. Bluetooth.....	19
2.2.4. USB Inalámbrico.....	20

2.2.5.	ZigBee .....	21
2.2.6.	Interferencias en redes inalámbricas .....	25
2.2.7.	Sensores .....	26
2.2.8.	Especificaciones de los Sensores.....	27
2.2.9.	Sensores Inteligentes .....	28
2.2.10.	Funcionamiento de Redes Inalámbricas de Sensores (WSN) .....	30
2.2.11.	Arquitecturas de Redes .....	33
2.2.12.	Comunicación en una WSN.....	34
2.2.13.	Sistemas Embebidos.....	36
2.3.	Estado del Arte .....	37
3.	METODOLOGÍA.....	41
3.1.	Fase 1: Análisis de los Requerimientos de la PSH.....	42
3.2.	Fase 2: Revisión y Evaluación de Tecnologías disponibles.....	44
3.3.	Fase 3: Diseño de Nodos.....	45
3.4.	Fase 4: Pruebas Preliminares .....	46
3.5.	Fase 5: Instrumentación de Sensores .....	47
3.6.	Fase 6: Pruebas Finales .....	48
4.	IMPLEMENTACIÓN .....	49
4.1.	Fase 1: Análisis de los Requerimientos de la PSH.....	49
4.1.1.	Atenuación de la Señal .....	49
4.1.2.	Redes Inalámbricas Existentes.....	52
4.1.3.	Elementos de Interferencia con Señales de Radio .....	53
4.1.4.	Topología .....	54
4.2.	Fase 2: Revisión y Evaluación de Tecnologías Disponibles .....	55
4.3.	Fase 3: Diseño de Nodos.....	56
4.3.1.	Arduino UNO .....	56
4.3.2.	Módulo XBee S2.....	57
4.3.3.	Arduino XBee Shield.....	58
4.3.4.	Integración de elementos .....	59
4.4.	Fase 4: Pruebas Preliminares .....	60

4.4.1.	Primera Prueba .....	63
4.4.2.	Segunda Prueba.....	67
4.4.3.	Tercera Prueba.....	74
4.5.	Fase 5: Instrumentación de Sensores .....	78
4.6.	Fase 6: Pruebas Finales .....	79
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	89
6.	REFERENCIAS.....	91

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Componentes principales de un sistema de concentración solar (Krothapalli y Greska, 2012). .....	9
Figura 2.2. Concentrador de cilindro parabólico en California (Mills, 2004). .....	10
Figura 2.3. Esquema de un colector de disco parabólico (Kalogirou, 2004). .....	11
Figura 2.4. Esquema de un sistema de concentración de torre central solar (Kalogirou, 2004). .....	12
Figura 2.5. Esquema básico de funcionamiento y fotografía aérea de la planta de torre central PS10 en el sur de España (Krothapalli y Greska, 2012). .....	13
Figura 2.6. Planta Solar de Hermosillo (Iriarte-Cornejo, 2013). .....	14
Figura 2.7. Diferentes efectos que sufren a las ondas de radio. ....	16
Figura 2.8. Ley del cuadrado inverso (Faludi, 2011). .....	17
Figura 2.9. Red personal de comunicación en Bluetooth (Cowley, 2013). ....	20
Figura 2.10. Anchos de banda del protocolo ZigBee (Ondřej, et al., 2006). ....	22
Figura 2.11. Topologías en redes inalámbricas ZigBee (Ondřej, et al., 2006). ....	24
Figura 2.12. Proceso de adquisición de datos y actuación (Dargie y Poellabauer, 2010). .....	27
Figura 2.13. Sistema general de un sensor (Frank, 2013). ....	29
Figura 2.14. Modelo de un sensor inteligente (Frank, 2013). ....	29
Figura 2.15. Redes Inalámbricas de Sensores (Dargie y Poellabauer, 2010). ....	31
Figura 2.16. Protocolos en la comunicación de una red (Peterson y Davie, 2012). .....	34
Figura 2.17. Sistema de comunicación inalámbrica para seguidores solares (Pfahl, et al., 2013). .....	39
Figura 3.1. Metodología. ....	42
Figura 3.2. Análisis de requerimientos de la PSH. ....	43
Figura 3.3. Revisión y evaluación de tecnologías disponibles. ....	45
Figura 3.4. Diseño de nodos. ....	46
Figura 3.5. Pruebas preliminares. ....	47

Figura 4.1. Distribución de helióstatos en la PSH (modificado de Iriarte-Cornejo, 2013).	50
Figura 4.2. Distancias entre helióstatos.	51
Figura 4.3. Esquema de comunicación en la PSH (Iriarte-Cornejo, 2013).	53
Figura 4.4. Placa de Arduino UNO.	57
Figura 4.5. Módulo XBee S2.	58
Figura 4.6. Arduino XBee Shield.	59
Figura 4.7. Nodo para pruebas preliminares.	60
Figura 4.8. Software X-CTU.	62
Figura 4.9. Software Arduino.	62
Figura 4.10. Ubicación de los nodos para primera prueba.	63
Figura 4.11. Mediciones en el software X-CTU.	64
Figura 4.12. Mediciones del Porcentaje de envíos entre Radios.	65
Figura 4.13. Mediciones de RSSI entre Radios.	66
Figura 4.14. Ubicación de los nodos para segunda prueba.	67
Figura 4.15. Conexión física para segunda prueba (nodo motor).	68
Figura 4.16. Diagrama simplificado de conexión para segunda prueba (nodo motor).	69
Figura 4.17. Algoritmos para segunda prueba (nodo motor).	70
Figura 4.18. Algoritmo para segunda prueba (nodo señal digital).	71
Figura 4.19. Algoritmo para segunda prueba (nodo señal analógica).	71
Figura 4.20. Conexión física para segunda prueba (nodo señal analógica).	72
Figura 4.21. Diagrama simplificado de conexión para segunda prueba (nodo señal analógica).	72
Figura 4.22. Porcentaje de envíos segunda prueba (señal generada por microcontrolador).	73
Figura 4.23. Porcentaje de envíos segunda prueba (señal generada por potenciómetro).	74
Figura 4.24. Ubicación de los nodos para tercera prueba.	75
Figura 4.25. Algoritmo para tercera prueba (nodo medio).	76
Figura 4.26. Porcentaje de envíos tercera prueba.	77

Figura 4.27. Distribución de nodos para prueba final. ....	80
Figura 4.28. Conexión física para prueba final (nodo señales).....	80
Figura 4.29. Diagrama simplificado de conexión para prueba final (nodo señales). .....	81
Figura 4.30. Algoritmo para prueba final (nodo señales). ....	81
Figura 4.31. Algoritmo para prueba final (nodo medio).....	83
Figura 4.32. Conexión física para prueba final (nodos motor). ....	83
Figura 4.33. Diagrama simplificado de conexión para prueba final (nodos motor).84	
Figura 4.34. Algoritmo para prueba final (nodos motor). ....	84
Figura 4.35. Movimiento de los motores en base a la señal de control. ....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Resultados de primera prueba en porcentaje de envíos (%E) e intensidad de señal (RSSI). .....	87
Tabla 4.2 Resultados de la segunda y tercera prueba. ....	87
Tabla 4.3 Comportamiento de la señal de control en prueba finales. ....	88

# 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los sistemas de energía solar han emergido como una fuente viable de energía limpia y renovable, por lo que su uso en aplicaciones domésticas e industriales es cada vez mayor. La función de estos sistemas, consiste en recolectar la energía proveniente del Sol y transformarla en otro tipo de energía, como puede ser eléctrica o térmica (Chia-Yen, et al., 2009).

Un ejemplo de sistema de transformación de energía solar a térmica, es la tecnología de planta de torre central solar, la cual consiste en varios espejos móviles, llamados helióstatos, que reflejan la radiación del Sol directamente hacia un solo punto, localizado en la cima de una torre que se encuentra al centro del campo de helióstatos. En este punto, componentes dentro de la torre, convierten la energía solar en térmica y posteriormente en electricidad (García-Sobrinós, et al., 2007).

En un sistema de torre central solar, para que los helióstatos puedan reflejar la radiación del Sol hacia el mismo punto de la torre en todo momento, es necesaria la implementación de un complejo sistema de control que permita la operación y el monitoreo de los motores con que se mueve cada helióstato (Chong y Tan, 2011). Para lograr esto, se utilizan sensores y controladores que regulan el movimiento de los seguidores y se comunican con una computadora central que los controla.

La transmisión de la información que se requiere entre los sensores y controladores que permiten el funcionamiento de los helióstatos, es un aspecto muy importante que debe tomarse en cuenta al implementar este tipo de tecnología. Pueden considerarse diferentes opciones para establecer la comunicación necesaria para la transferencia de datos, como puede ser la implementación de redes inalámbricas, ya que estas se han desarrollado ampliamente en los últimos años, debido a sus beneficios y características únicas, como son su capacidad para auto-configurarse, su bajo costo, fácil implementación y enrutamiento multi-saltos, por mencionar algunos (Kamal y

Hamid, 2013). La función de estas redes consiste en obtener y distribuir información de sensores en tiempo real, procesarla en tareas colaborativas y propagar señales de control en base a los datos obtenidos y el funcionamiento del sistema (Lim, 2010).

Una red de sensores inalámbrica se compone de varios nodos de sensores, que perciben lo que ocurre en su ambiente, midiendo factores como presión, temperatura, sonido, etcétera; y generan lecturas que son enviadas por rutas de comunicación a un nodo específico, para su recolección (Karl y Willig, 2005). La posición de los nodos, o topología de la red, puede ser establecida para obtener la óptima comunicación, tal como mencionan Cuomo, et al. (2013).

Spencer, et al. (2004) establecen que los sensores inteligentes tienen cuatro características importantes: unidad central de procesamiento integrada, pequeño tamaño, comunicación inalámbrica y bajo costo. Este tipo de sensores pueden intercomunicarse para formar una red inalámbrica, las cuales se usan cada vez más.

En los trabajos de Sachenko, et al., (1999) y Yen Joe, et al., (2006) se maneja el término de nodos inteligentes de manera similar, definiéndolos básicamente como nodos que cuentan con características o capacidades que no se limitan a la obtención de datos y su transmisión, sino que también pueden realizar tareas de procesamiento.

## **1.1. Presentación**

Debido a la abundancia de radiación solar que se tiene en la región, la Universidad de Sonora, junto con otras instituciones, llevaron a cabo un proyecto donde se construyó la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH, antes conocida como Campo de Pruebas de Helióstatos) (LACYQS, 2011), con el fin de llevar a cabo estudios para aprovechar la radiación solar, mejorando los métodos de recolección y conversión de la energía solar. Esta plataforma consiste en un campo donde se cuenta con un número creciente de helióstatos desarrollados por la misma

Universidad y otras instituciones de investigación, así como una torre central para generación de energía y realización de pruebas experimentales.

Todo el sistema de seguidores solares se controla de manera general desde una Unidad Central de Control (UCC). La UCC solo obtiene cierta información sobre el funcionamiento de los helióstatos y controla el estado en que estos se encuentran. La comunicación entre los helióstatos y la UCC, se lleva a cabo por medio de tecnología Ethernet, y se limita solamente a la comunicación de la UCC con cada seguidor de manera individual, es decir, no existe comunicación entre helióstatos, lo cual permitiría una comunicación más robusta y confiable, y también la obtención de una mayor cantidad de información, sobre el funcionamiento de los helióstatos.

Actualmente los helióstatos en la PSH carecen de los sensores e instrumentación necesaria para analizar o determinar su desempeño considerando las condiciones de operación en que se encuentran. Esto representa un problema para el desempeño del campo de heliostatos, debido a que no se miden las variables bajo las que operan estos, y que pueden afectar al funcionamiento de los mismos, como pueden ser la temperatura, velocidad del viento, humedad, entre otras variables. Al carecer de información sobre estos factores, el desarrollo de estudios, experimentos y el funcionamiento de las unidades, se ven comprometidos, debido a que estas variables pueden interferir en el movimiento y la integridad de los helióstatos, afectando su desempeño y dificultando así el desarrollo de pruebas y de nuevas tecnologías solares.

Para solucionar lo anterior se pretende instalar en las unidades la instrumentación requerida, sin embargo no es posible llevar esto a cabo con el sistema de comunicación que se tiene actualmente en la plataforma, debido a que la transmisión de información por medio de Ethernet no sería suficiente, a causa de la gran cantidad de datos y el alto número de nodos de comunicación que se tendrían una vez instalado el instrumental en los helióstatos. Para poder efectuar la instrumentación de los helióstatos, es necesario el diseño de un sistema de

comunicación inalámbrica, de bajo costo, que pueda transmitir información de manera eficiente, y que pueda ser implementado en la plataforma, tomando en cuenta todos los factores que pueden interferir con la comunicación en este entorno, como son: factores ambientales, interferencias y ruido eléctrico, interferencias por los materiales, etcétera.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Actualmente en la PSH no es posible la medición y el análisis de varios factores que pueden afectar el funcionamiento de los helióstatos, debido a que se carece de la instrumentación requerida. No es posible instalar dicha instrumentación, a causa de las limitaciones que presenta el sistema de comunicación de la PSH actualmente basado en Ethernet, ya que su instalación es complicada y tardada, la configuración de los controladores es difícil y los costos son elevados, considerando el reducido presupuesto con que se cuenta, por lo que es necesario el buscar otras alternativas de comunicación de los procesos. En este trabajo de tesis se propone el diseño de un nuevo sistema de comunicación, que utilice tecnología inalámbrica, el cual sea capaz de soportar la cantidad de información que se requiere transmitir y que pueda ser implementado en el campo de helióstatos, sin verse afectado por los diversos factores que pueden interferir con la transferencia de datos.

## **1.3. Objetivo general**

Desarrollar e implementar un sistema de comunicación inalámbrica, basado en nodos inteligentes, para la transmisión eficiente de información que permita el control de al menos dos helióstatos en un sistema de seguimiento solar.

## **1.4. Objetivos específicos**

- Diseñar un sistema de comunicación que se ajuste a las necesidades y limitaciones del campo de pruebas.
- Implementar el sistema de comunicación en el campo de helióstatos.

- Validar la eficiencia de la comunicación entre sensores mediante pruebas en el sistema, y realizar ajustes de ser necesario.

## **1.5. Hipótesis**

Es posible implementar un sistema de comunicación, a base de nodos inteligentes, en un sistema de seguimiento solar, que permita una transferencia de información efectiva.

## **1.6. Alcances y delimitaciones**

El proyecto se enfocará en el diseño de nodos inalámbricos para establecimiento de comunicación entre la unidad central de control y al menos dos helióstatos. Intentar conectar varios seguidores, queda fuera de la propuesta debido a la complejidad del problema y a que no se cuenta con la experiencia práctica de ello. Otra limitación del problema se plantea en la calidad de la comunicación entre los helióstatos, para lo cual se requiere hacer pruebas de campo.

## **1.7. Justificación**

La implementación en la PSH de un sistema de comunicación inalámbrica a base de nodos inteligentes, permitirá la instrumentación requerida en los seguidores para la valoración y el análisis de su funcionamiento bajo diferentes condiciones. Con esto será posible la obtención de una mayor cantidad y variedad de datos, con lo que se podrán considerar nuevas variables para la optimización del funcionamiento de los seguidores y del desarrollo de pruebas experimentales.

Otras ventajas que se obtendrán de la instrumentación de los helióstatos de la PSH son:

- Mayor facilidad y reducción de costos al instalar nuevas unidades en el campo
- Mayor robustez en la comunicación
- Disminución de costos de mantenimiento

- De ser posible, sustituir los controladores Compact RIO que se utilizan actualmente, por otros de mucho menor costo y complejidad

Se pretende que la metodología y diseño que sean resultado de este proyecto, se desarrollen posteriormente en una empresa nacional dedicada al desarrollo de tecnología termosolar.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

En este capítulo se analizarán las bases teóricas sobre las que se desarrolla el presente trabajo de investigación, con la intención de definir un marco previo con todos los conceptos necesarios para la comprensión y el análisis de los capítulos posteriores. Se inicia con una descripción de los diferentes métodos existentes para la recolección de energía solar y su importancia, dando énfasis a la tecnología de torre central. Posteriormente se analizan las bases teóricas para el funcionamiento de los sistemas de comunicación inalámbricos, sus características y los diferentes tipos de tecnologías disponibles para este tipo de aplicaciones. Finalmente se cierra el capítulo con algunos trabajos previos en los que se han aplicado tecnologías de comunicación inalámbrica para el funcionamiento de campos solares.

### **2.1. Energía Solar**

Para resolver los problemas resultantes de la quema de combustibles fósiles como fuente principal de energía a nivel mundial, se han considerado varias opciones que puedan suministrar la energía necesaria, a través de métodos que no dañen el ambiente, como son las energías renovables. Entre estas diferentes fuentes de energía renovable, la recolección eficiente de energía proveniente de los rayos del Sol es considerada la más prometedora (Mojiri, et al., 2013). La importancia de contrarrestar los problemas de la quema de hidrocarburos, se debe al incremento que esto causa en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, así como a la reducción de estos mismos recursos no renovables, causando el aumento de su precio.

#### **2.1.1. Radiación Solar**

Radiación solar es el término común que se utiliza para referirse a la radiación electromagnética emitida por el Sol. Prácticamente toda la energía que recibe el planeta es proveniente del Sol, en forma de radiación solar (McArthur y Oliver,

2005). Esta entrada de energía es responsable de las corrientes de vientos y océanos, la generación de oxígeno por fotosíntesis y de la vida en general.

Ginley, et al. (2008), resaltan el gran potencial que puede tener la radiación solar como fuente de energía, ya que la tierra recibe alrededor de 162,000 TW de radiación proveniente del sol, mientras que el promedio de consumo de energía a nivel mundial, no llega a rebasar los 20 TW. Puede verse fácilmente que es solo una pequeña fracción de la energía disponible, la que sería necesario recolectar, para satisfacer la demanda mundial.

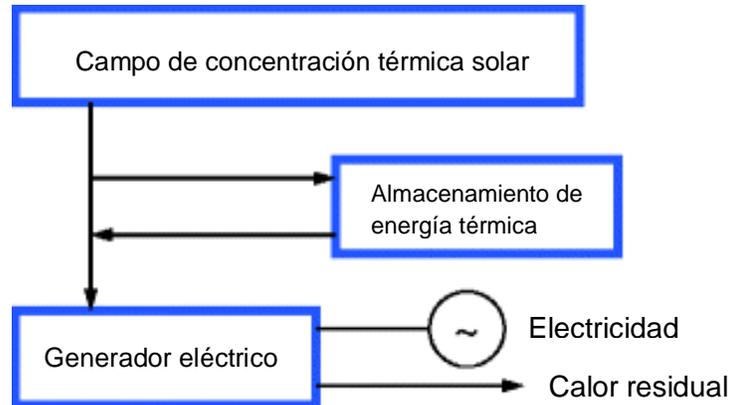
En el estado de Sonora, se tiene una excelente calidad de recurso solar, ya que se cuenta con los niveles de radiación del Sol más grandes del país. En menos del 1% de su territorio, se recibe la suficiente cantidad de energía solar para satisfacer la demanda energética nacional (Arancibia-Bulnes, et al., 2014). Debido a esto y a la baja cantidad de precipitación que se tiene en el estado, Sonora es ideal para la implementación de concentradores de energía solar.

### **2.1.2. Sistemas de Concentración Solar**

Con la finalidad de capturar la energía solar y transformarla en energía útil, actualmente se han desarrollado dos métodos principales que han sido comercializados: sistemas fotovoltaicos y sistemas foto-térmicos (Mojiri, et al., 2013). En los sistemas foto-térmicos o termo-solares, los colectores transforman la radiación solar en energía térmica utilizable, mientras que en los sistemas fotovoltaicos, las celdas fotovoltaicas o celdas solares, pueden generar energía eléctrica directamente de la luz del Sol.

Los sistemas termo-solares son un método de recolección de energía solar, en los cuales se convierte la radiación proveniente del Sol en energía térmica. Dicha energía puede ser utilizada directamente, o puede ser transformada en otra diferente, como energía eléctrica o química (Weinstein, et al., 2014). Aunque la energía se genera solamente durante el día, es posible recolectar y almacenar energía térmica adicional, generalmente en un medio de cambio de fase como sal

fundida (Krothapalli y Greska, 2012). Este calor puede ser utilizado durante la noche para generar energía. Este sistema se muestra de manera simplificada en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Componentes principales de un sistema de concentración solar (Krothapalli y Greska, 2012).

La quema de combustible para producir calor, es generalmente el primer paso en la producción de energía. Crabtree y Lewis (2007) puntualizan que la premisa de los sistemas termo-solares, es que el calor proveniente del Sol reemplace el generado por la combustión; reduciendo el uso de combustibles fósiles y los daños sobre el ambiente.

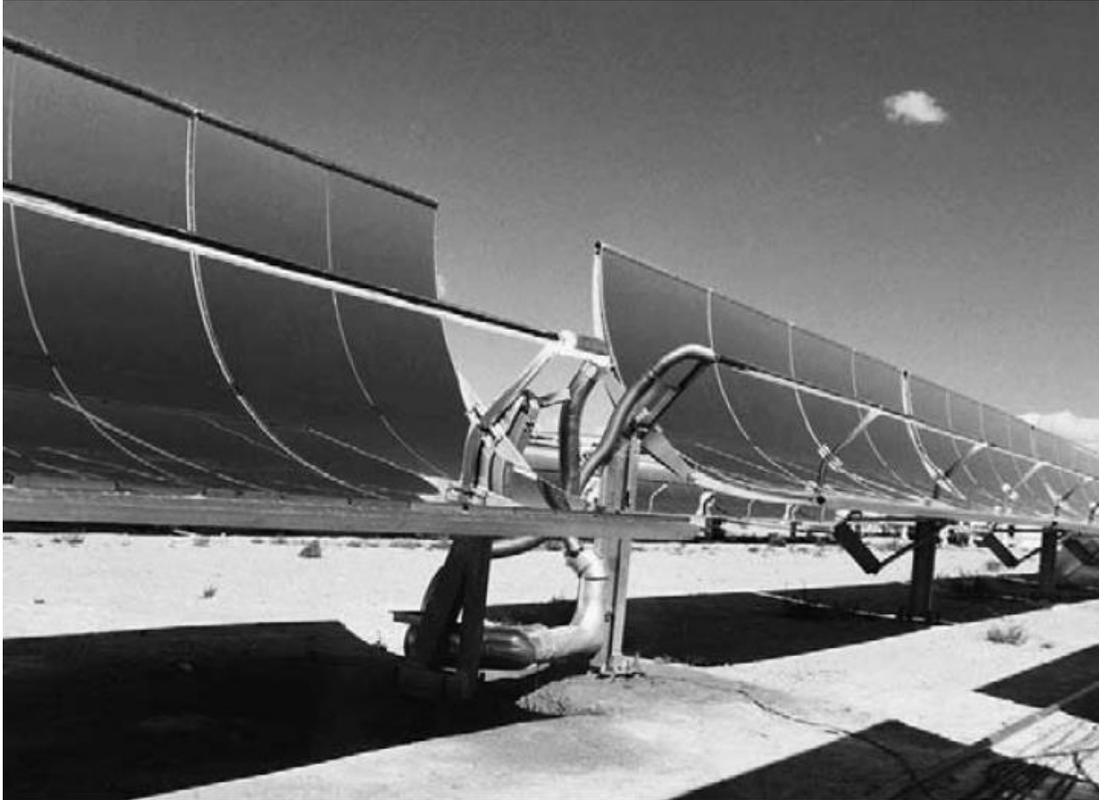
La energía termo-solar es probablemente la que tiene el mayor potencial de entre todas las tecnologías renovables, sin embargo se ha retrasado su aplicación y desarrollo, debido a la resistencia del mercado a plantas de gran tamaño, y a muy poco o ningún apoyo político y financiero en programas de incentivos (Mills, 2004).

Existen varias formas de concentradores solares que se utilizan actualmente, los cuales tienen diferentes capacidades y limitaciones. A continuación se mencionan algunos de ellos.

### 2.1.3. Concentradores de cilindro solar parabólico

Esta tecnología utiliza reflectores curvados alrededor de un eje, con forma parabólica lineal (figura 2.2), por lo cual tiene la propiedad de recolectar rayos

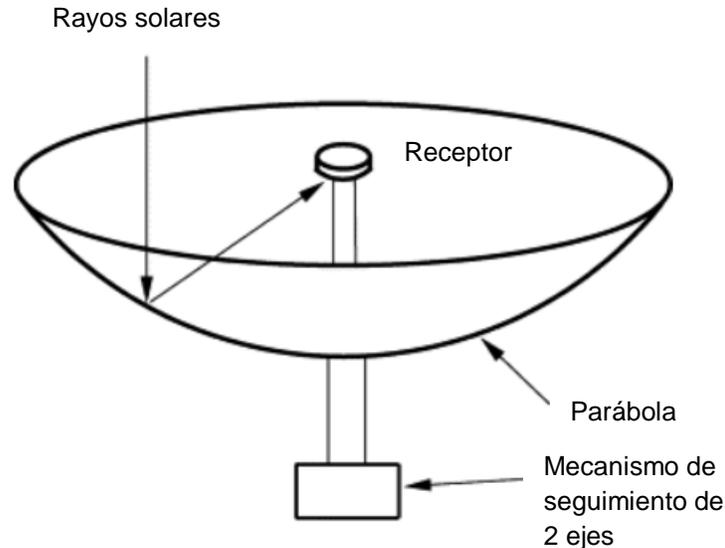
solares paralelos a lo largo de una sola línea y después concentrarlos en un largo tubo receptor para calentar un fluido (Mills, 2004). Estos concentradores pueden producir temperaturas de 400°C (Crabtree y Lewis, 2007).



*Figura 2.2. Concentrador de cilindro parabólico en California (Mills, 2004).*

#### **2.1.4. Concentradores de disco parabólico**

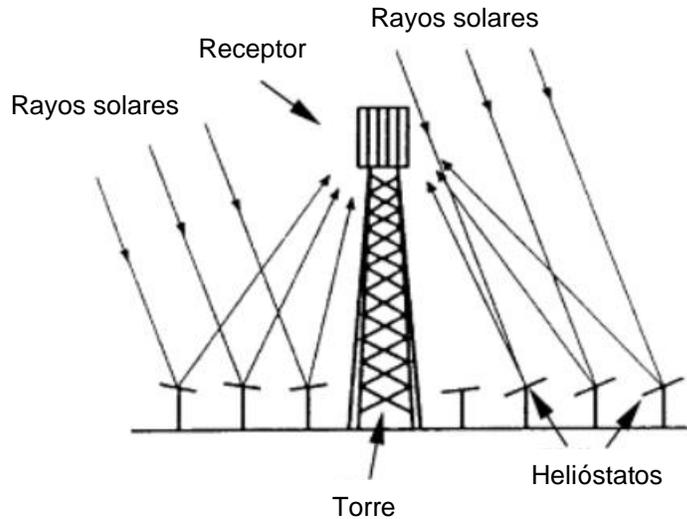
Estos dispositivos constan de un disco parabólico que hace la función de concentrador, mediante el cual se refleja la luz solar a un punto focal en el que se encuentra un receptor solar cilíndrico (figura 2.3). El receptor recolecta la energía térmica y la transfiere para su uso, transformación o almacenamiento (Tao, et al., 2013). En este tipo de concentradores se pueden alcanzar temperaturas mayores a los 650°C (Crabtree y Lewis, 2007).



**Figura 2.3.** Esquema de un colector de disco parabólico (Kalogirou, 2004).

### 2.1.5. Torre de concentración solar

La tecnología de concentración solar de torre central o también conocida como colector de campo de helióstatos, o simplemente campo de helióstatos, es un tipo de concentrador basado en el seguimiento del Sol para la recolección de energía térmica. La tecnología de torre central se utiliza cuando se tienen altos niveles de radiación solar. Por medio de un conjunto de espejos móviles, llamados helióstatos, que siguen el movimiento del Sol, se pueden reflejar los rayos solares hacia un punto común para su recolección (Kalogirou, 2004). Este punto se encuentra en la parte más alta de una torre, colocada al centro del campo de helióstatos, donde pueden recolectarse grandes cantidades de energía térmica para su posterior uso o transformación (figura 2.4).



**Figura 2.4.** Esquema de un sistema de concentración de torre central solar (Kalogirou, 2004).

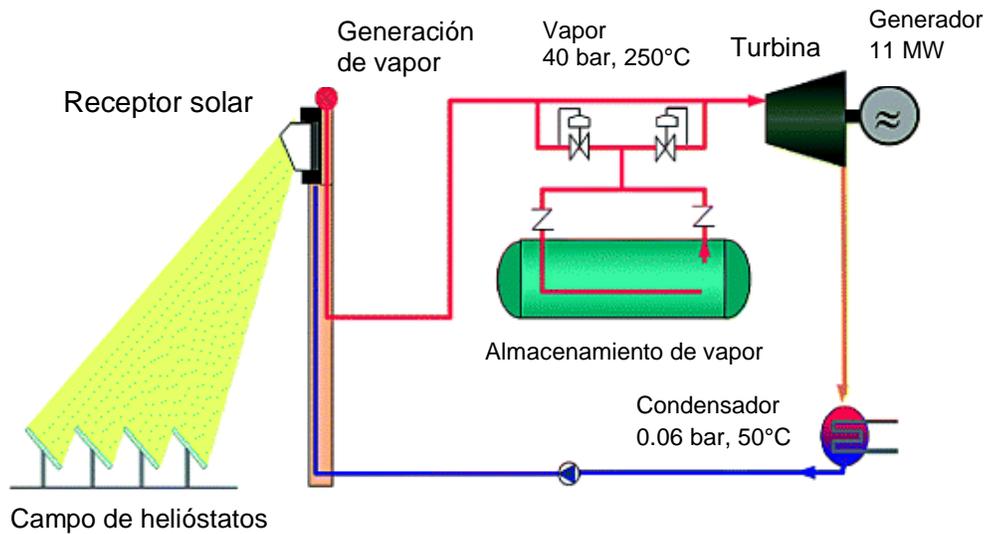
Esta tecnología de concentración solar tiene varias ventajas (Kalogirou, 2004):

- La energía solar se recolecta de manera óptica en un solo punto, minimizando los requerimientos de transporte termoeléctrico.
- Pueden alcanzarse temperaturas  $1500^{\circ}\text{C}$  o más, por lo que son altamente eficientes en cuanto a recolección de energía y en su conversión a energía eléctrica. También puede utilizarse esta concentración térmica para otros fines, como pruebas de materiales a grandes temperaturas.
- Puede almacenarse la energía térmica para posterior uso.
- Suelen ser muy grandes, produciendo generalmente más de 10 MW.

Debido a las altas temperaturas que pueden manejarse en las torres de concentración solar, esta tecnología es una de las más atractivas para la conversión de energía proveniente del Sol (Crabtree y Lewis, 2007). La tecnología de torre central es el segundo tipo de tecnología de concentración solar más utilizado, después de los concentradores de disco parabólico, sin embargo la temperatura máxima que se puede obtener en estos últimos es considerablemente menor (Nishith, et al., 2014).

Un buen ejemplo de este tipo de tecnología implementada actualmente, es la planta de concentración solar conocida como PS10, la cual se encuentra en

Sevilla, España (figura 2.5). El objetivo principal de este proyecto fue el diseño, construcción y operación de una torre de concentración solar, con una base comercial y producción de electricidad conectada a la red. Esta planta tiene una potencia de 11 MW y funciona con 624 heliostatos.



**Figura 2.5.** Esquema básico de funcionamiento y fotografía aérea de la planta de torre central PS10 en el sur de España (Krothapalli y Greska, 2012).

### 2.1.6. Planta Solar de Hermosillo (PSH)

El Laboratorio nacional de infraestructura en sistemas de Concentración solar Y Química Solar (LACYQS) está constituido por varios grupos de investigación cuyo propósito es el avance en el desarrollo de tecnologías de concentración solar y química solar en México (LACYQS, 2011). Gracias a este grupo se han construido

tres instalaciones de sistemas solares, una de estas instalaciones es la PSH (figura 2.6), previamente conocida como Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH).



**Figura 2.6.** Planta Solar de Hermosillo (Iriarte-Cornejo, 2013).

La PSH es una infraestructura que permite la evaluación de heliostatos aplicados a plantas solares de generación de energía de torre central. Sus principales objetivos son (Iriarte-Cornejo, 2013):

- Impulsar la formación de una red nacional de investigadores que trabajen en el desarrollo de la tecnología de concentración solar
- Formar recursos humanos de alto nivel en el área de concentración solar y química solar
- Avanzar en el desarrollo de las tecnologías solares, generando conocimiento científico y tecnológico

Dentro de la tecnología de torre central solar, los heliostatos son el elemento más importante a tomar en cuenta, ya que normalmente representan alrededor del 40%

del costo total de la planta de concentración (Pfahl, et al., 2013), además de que de estos depende la correcta obtención de la radiación del Sol y la eficiencia con que esta se utiliza. Debido a lo anterior, muchas de los trabajos realizados en este tipo de tecnologías se enfocan en lograr una reducción de costos tanto en la producción de helióstatos, como en su instalación y operación.

Hasta ahora, las plantas de torre central utilizan sistemas de comunicación y conexiones a base de cables para monitorear y controlar los helióstatos instalados en el campo. Este tipo de conexiones presentan varias desventajas importantes, como son los altos costos en la instalación de cableado (incluyendo la excavación de las zanjas necesarias y protección contra roedores y otros factores) y la necesidad de dispositivos contra rayos para proteger el sistema, entre otros. Todos estos costos en que se incurre, pueden evitarse con la implementación de tecnologías inalámbricas que sustituyan a las tecnologías implementadas actualmente (Kubisch, et al., 2011).

## **2.2. Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)**

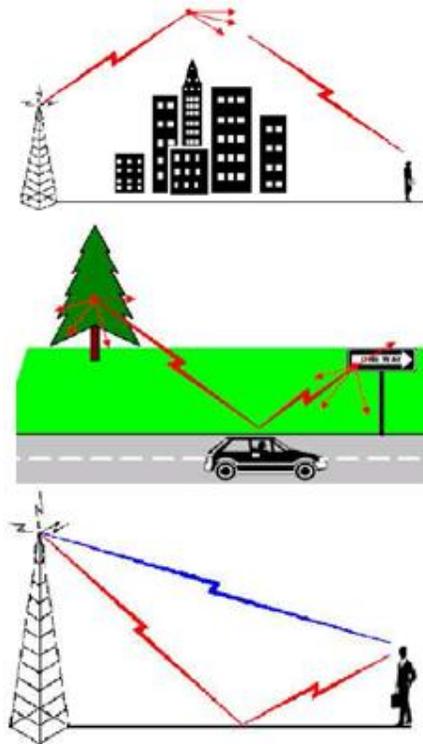
A continuación se describen algunos conceptos básicos para una mejor comprensión del funcionamiento de las WSN. Primeramente las bases de la comunicación inalámbrica, después los fundamentos principales de los sensores y finalmente la manera en que implementan ambas tecnologías en forma de redes.

### **2.2.1. Comunicación inalámbrica**

El área de las tecnologías de comunicación inalámbrica ha evolucionado rápidamente en los últimos años. Actualmente la comunicación por este tipo de medios se encuentra presente en casi todo el mundo, y forma parte de la vida diaria. Nichols y Lekkas (2003) definen la comunicación inalámbrica como el proceso de comunicar información a distancia mediante un soporte electromagnético, atravesando el espacio libre en lugar de utilizar cables tradicionales u otros conductos físicos. Los mensajes inalámbricos se desplazan a

través del espacio libre en determinadas asignaciones del espectro electromagnético.

Al propagarse las ondas de radio por las que se transmite la información en las tecnologías inalámbricas, estas se ven afectadas por los mismos fenómenos que las ondas de luz, como son la reflexión, difracción, absorción y dispersión (figura 2.7). Estos efectos pueden causar atenuaciones, retrasos e incluso la pérdida completa de la señal (Johansson y Jänti, 2010).

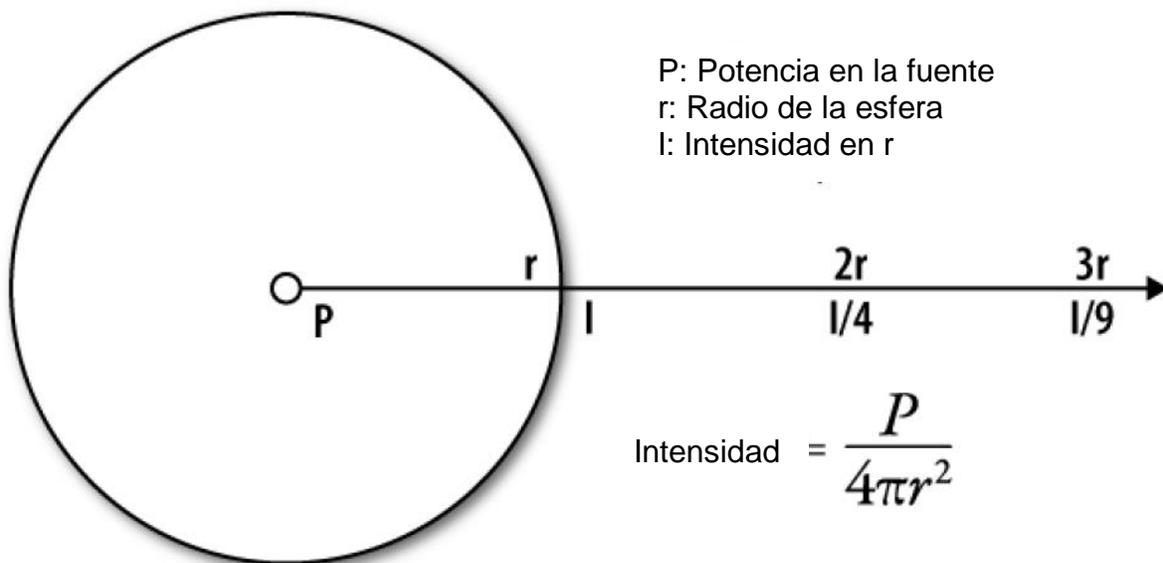


**Figura 2.7.** Diferentes efectos que sufren a las ondas de radio.

Otro efecto importante que sufren las ondas de radio es la atenuación debido a la distancia de propagación de la señal, lo cual puede representarse por medio de la ley del cuadrado inverso. En física, la ley del cuadrado inverso es la que declara que, una magnitud o fuerza física es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia con respecto a la fuente de dicha magnitud. Esta ley se aplica a todas las ondas electromagnéticas, y por lo tanto, a las comunicaciones inalámbricas (Khaja Muhaiyadeen, et al., 2011). La ley del cuadrado inverso puede representarse por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (2.1)$$

Otra forma de entender esta ley, es relacionarla con el sonido. Un sonido entre más lejos se origine, más difícil es de escuchar, debido a que la fuerza de la señal se va dispersando y debilitando conforme viaja. En las señales de radiofrecuencia ocurre lo mismo. Cada vez que se dobla la distancia, se requiere cuatro veces más potencia para tener la misma intensidad de la señal (figura 2.8), por lo que para que las señales de radio viajen largas distancias se requieren enormes cantidades de potencia (Faludi, 2011).



**Figura 2.8.** Ley del cuadrado inverso (Faludi, 2011).

El espectro radioeléctrico por el que se transmiten las señales inalámbricas es un recurso escaso, por lo que se debe tratar de optimizar su uso de manera que pueda ser utilizado lo más posible, con un número mínimo de interferencias (Ramos-Pascual, 2007). Para este fin, además de lograr interconectar los diferentes tipos de dispositivos inalámbricos que existen, se establecen estándares o normas de comunicación, que permiten una transmisión efectiva y organizada de información. A continuación se describen algunos de los estándares de comunicación más utilizados tanto en la industria como en aplicaciones domésticas.

### **2.2.2. Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN)**

Las WLAN son uno de los tipos de redes inalámbricas que más se desarrollan actualmente, por lo cual es importante mencionarlas. Una WLAN es un sistema de transmisión de datos diseñado para asegurar una conexión que no dependa de la ubicación de los elementos finales, utilizando conexiones inalámbricas. Las WLAN proporcionan las mismas características que las redes LAN basadas en tecnología Ethernet, pero sin el impedimento que presenta el cableado. Pueden utilizarse para sustituir o extender redes LAN. El funcionamiento de estas redes se define por medio de la familia de estándares IEEE 802.11; principalmente por la subfamilia IEEE 802.11b. Las tecnologías que utilizan este tipo de redes, transmiten datos en la frecuencia de 2.4 GHz, con un ancho de banda de hasta 11 Megabits por segundo (Kühner, 2009).

Algunas ventajas de las WLAN son:

- Ofrecen una mayor libertad de movimiento a los usuarios y dispositivos, a comparación de las redes LAN
- Es mucho más fácil y rápido expandirlas
- Su instalación es más sencilla, rápida y económica
- Mayor flexibilidad

Estas redes también conllevan algunas desventajas como:

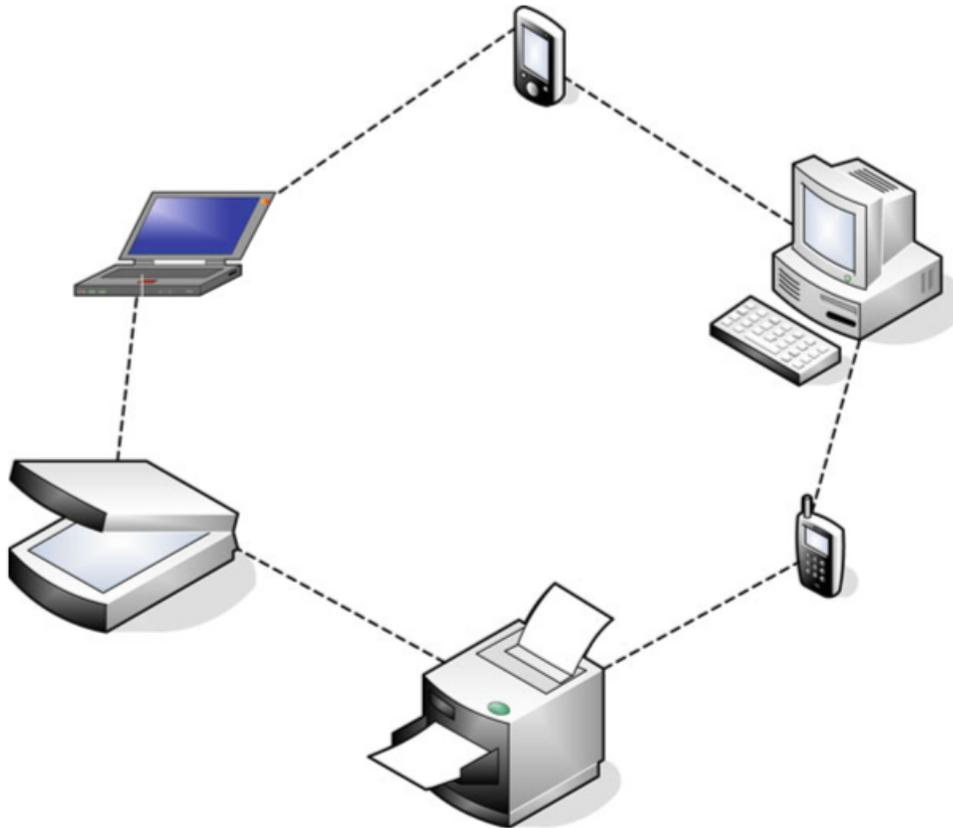
- Problemas de seguridad en la red
- Las tasas de transferencia de datos tienden a ser más bajas que en las tecnologías LAN
- Aunque son fáciles de instalar, no son necesariamente confiables al largo plazo
- Para mejorar la confiabilidad, es necesario realizar pruebas e investigaciones previas a la instalación de la red

Z-Wave es un ejemplo de WLAN, enfocado principalmente al control residencial y la automatización. Está diseñado para una baja tasa de transferencia de datos, bajo costo y bajo consumo de energía. La tasa de transferencia en Z-Wave es alrededor de 10 Kilobits por segundo, mientras que su rango de cobertura puede llegar a los 70 metros en exteriores (Kühner, 2009).

### **2.2.3. Bluetooth**

Las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN) permiten la comunicación entre dispositivos que pertenecen a un mismo dueño, para lo cual manejan distancias cortas, alrededor de los 10 metros o menos (Cowley, 2013). Entre los dispositivos que se conectan por medio de este tipo de redes se encuentran los celulares, laptops, impresoras, televisiones, entre otros. El estándar de comunicación PAN más importante es el Bluetooth.

Bluetooth utiliza microondas para comunicarse, basándose en el estándar IEEE 802.15.1. (Kühner, 2009). La transmisión se realiza en la frecuencia de banda ISM (2.4 GHz), al igual que muchos otros tipos de redes inalámbricas. La banda de uso Industrial, Científico y Médico (ISM) de 2.4 GHz es ampliamente usada por diferentes tecnologías inalámbricas para propósitos de investigación y desarrollo de sistemas de comunicación en diferentes áreas (Hannan y Arshad, 2013). Este estándar transmite a niveles muy bajos de potencia para evitar interferencia con otras señales. Los dispositivos de Bluetooth se conectan y organizan automáticamente para crear una red personal mediante la que se comunican (figura 2.9).



*Figura 2.9. Red personal de comunicación en Bluetooth (Cowley, 2013).*

#### **2.2.4. USB Inalámbrico**

Otro tipo de comunicación en PAN es la tecnología de USB inalámbrico (WUSB) basada en ultra banda ancha (UWB). UWB transmite pulsos muy cortos de energía que se propagan por muchas frecuencias de manera simultánea. La finalidad de WUSB es proporcionar un reemplazo inalámbrico para la tecnología USB convencional (Cowley, 2013). Tiene las siguientes características:

- Necesita muy bajos niveles de potencia
- Trabaja bien dentro de edificios
- Puede manejar flujos de datos de varios cientos de megabits por segundo
- Maneja rangos cortos, menores a los 100 metros

### 2.2.5. ZigBee

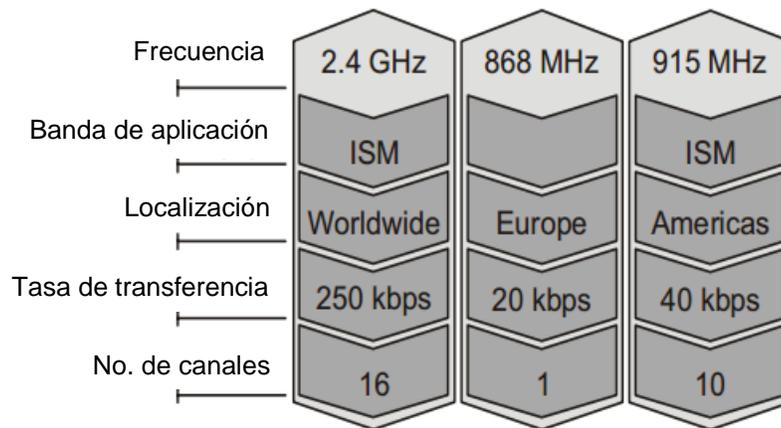
ZigBee es una de las tecnologías inalámbricas más implementadas en la actualidad. Es una tecnología de comunicación diseñada en base al estándar IEEE 802.15.4., con la finalidad de ser utilizada en el control inalámbrico y redes de sensores. Esta tecnología fue definida por la Alianza ZigBee, la cual se compone de diversas compañías como Phillips, Siemens, Samsung, entre otras. El nombre ZigBee proviene del movimiento en zigzag que hacen las abejas al comunicarse con otras en la colmena (Kühner, 2009).

ZigBee es uno de los estándares más utilizados de baja potencia, baja tasa de transferencia, bajo costo y corto tiempo de retraso en la comunicación (Ramya, et al., 2011). Algunas de las ventajas que presenta son:

- Confiable y auto-reparable
- Puede manejar un gran número de nodos
- Es fácil de implementar
- Larga vida útil de la batería
- Seguridad robusta
- Bajo costo
- Se utiliza a nivel mundial
- Estándar de comunicación abierto, sin necesidad de pagar licencias costosas
- Firmware actualizable remotamente
- Baja potencia (puede funcionar con baterías durante años)
- Bajo mantenimiento (se organiza de manera automática)

La potencia que requiere ZigBee para funcionar es muy pequeña. En la mayoría de los casos utiliza 1 mW (o menos). Sin embargo esto es suficiente para proveer un rango de hasta 150 metros en espacio abierto, lo cual se logra por la técnica llamada Espectro Esparcido de Secuencia Directa (DSSS). ZigBee trabaja en las bandas de 868 MHz (Europa), 915 MHz (Norteamérica y Australia) y 2.4 GHz

(mundialmente disponible) con tasas de transferencia de hasta 20 kbps, 40 kbps y 250 kbps respectivamente. Debido a que estos anchos de banda son diferentes a las bandas de las redes inalámbricas comunes actuales (Wi-Fi, Bluetooth, USB inalámbrico, etc), no ocurrirán interferencias mutuas entre estas tecnologías (Ramya, et al., 2011). En la figura 2.10 se muestran los diferentes anchos de banda en que funciona ZigBee, así como algunas de sus especificaciones (Ondřej, et al., 2006).



**Figura 2.10.** Anchos de banda del protocolo ZigBee (Ondřej, et al., 2006).

ZigBee distingue entre dos tipos básicos de dispositivos que pueden existir en una red que utiliza esta tecnología (Cuomo, et al., 2013):

- Dispositivos de Función Completa (FFD): como su nombre lo indica, los FFD implementan el rango completo de funciones de acuerdo al estándar. Pueden comunicarse libremente con otros dispositivos, por lo que pueden llevar a cabo funciones de coordinado o de router.
- Dispositivos de Función Reducida (RFD): tienen un rango reducido de funciones, solo lo necesario para comunicarse con un FFD. Es el tipo de dispositivo más simple y de menor costo energético.

Además de los dos tipos básicos de dispositivos, en una red ZigBee también se identifican tres roles que pueden tomar los diferentes dispositivos dentro de la red, y que determinan las tareas que realizan (Farahani, 2011):

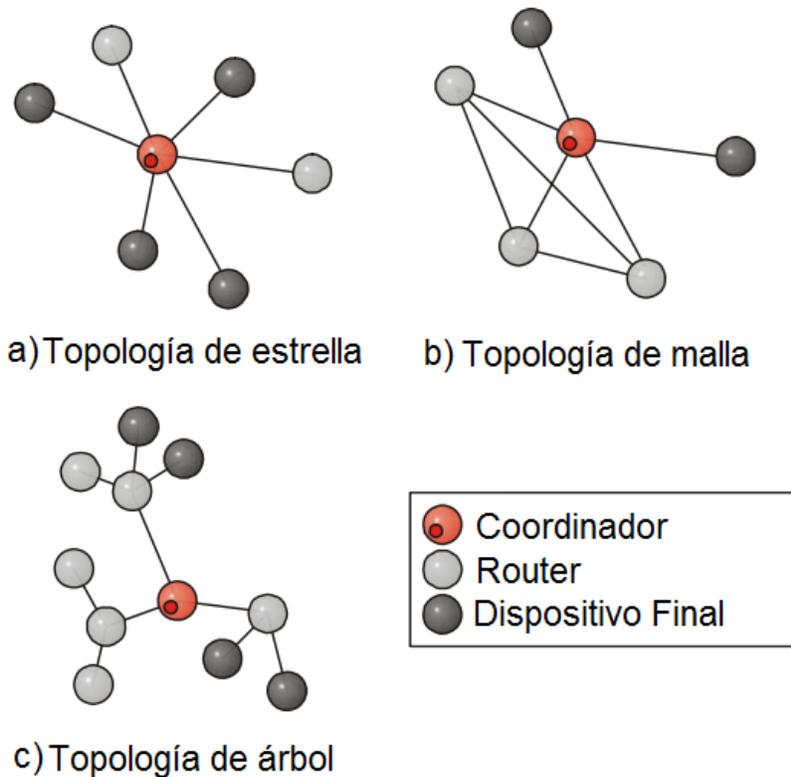
- **Coordinador:** como su nombre lo indica, es el encargado de coordinar la red, por lo que en cada red ZigBee solo puede haber un coordinador. Es responsable de inicializar la red y seleccionar los parámetros de la misma, como son el canal de radiofrecuencia, identificador único de la red, entre otros. También puede almacenar información sobre la red, como llaves de seguridad.
- **Router:** es un dispositivo que puede actuar como coordinador. Funciona como nodo intermedio, adquiriendo y pasando información de otros dispositivos. Un router puede conectarse a una red ya existente, aceptar conexiones de otros dispositivos y pueden utilizarse para extender una red ZigBee.
- **Dispositivos finales:** son los que tienen la menor memoria y menores capacidades y características de procesamiento. Normalmente se encargan de recolectar información de sensores e interruptores. Tienen la suficiente funcionalidad para comunicarse con los dispositivos que los controlan (coordinador o routers), pero no pueden pasar información de otros dispositivos finales.

Existen varias topologías que pueden utilizarse en ZigBee, y que pueden ser implementadas en la red. La topología de la red define la manera en que se conectarán los diferentes dispositivos, y por lo tanto, la manera en que se transmitirá la información de un punto a otro. Algunas de estas topologías se describen a continuación (Ondřej, et al., 2006):

- **Topología de estrella:** es una topología de un solo salto, construida solo con el coordinador en el centro, rodeado de dispositivos finales. Todos los dispositivos se comunican solamente con el coordinador (figura 2.11a)
- **Topología de malla:** en esta red, los routers pueden comunicarse sin la ayuda del coordinador, formando una estructura confiable con la capacidad de auto-repararse. El enrutamiento en forma de malla es una de las principales características de la tecnología ZigBee. La topología en malla

permite una configuración de red flexible y provee redundancia en las rutas disponibles (figura 2.11b).

- Topología de árbol: esta es una topología de múltiples estrellas con un nodo central que es el coordinador de la red. Es una de las topologías que menos se utiliza (figura 2.11c).



**Figura 2.11.** Topologías en redes inalámbricas ZigBee (Ondřej, et al., 2006).

Cuando los rangos de transmisión de los radios de todos los nodos son suficientemente amplios y pueden transmitir su información al coordinador directamente, puede utilizarse la topología de estrella. Sin embargo las redes inalámbricas normalmente abarcan grandes áreas geográficas y la energía utilizada para la transmisión debe ser la mínima, para poder aumentar el tiempo útil de la batería; por lo tanto, la comunicación multi-saltos es el caso más común para redes inalámbricas.

El rendimiento de ZigBee es bajo; la tasa de transferencia de datos es alrededor de 250 kbps, por lo que los sistemas que utilizan este tipo de tecnología

inalámbrica, son útiles para aplicaciones en las que se requieren bajas tasas de transferencia. Algunas de sus aplicaciones son: domótica, lectura automática de distancias, sistemas de servicios públicos residenciales y comerciales, automatización de edificios (edificios inteligentes), cuidado de la salud personal, monitoreo del estado físico, monitoreo de pacientes, control de funciones dentro de vehículos, etcétera (Ramya, et al., 2011).

### **2.2.6. Interferencias en redes inalámbricas**

Como se mencionó anteriormente, las señales transmitidas por vías inalámbricas se ven afectadas por diversos factores ambientales, que varían dependiendo del entorno en que se implementen, lo que puede causar retrasos, interrupciones o pérdida de la señal. La mayoría de las tecnologías de WPAN utilizan el estándar IEEE 802.15.4, y por lo tanto funcionan en la frecuencia ISM de 2.4 GHz, la cual es también utilizada por dispositivos de WLAN que implementan el estándar IEEE 802.11b. Debido a esto puede esperarse que se presente alguna interferencia como resultado de la implementación de estas tecnologías en un mismo ambiente (Soo-Young, et al., 2007).

Howitt y Gutierrez (2003) analizan el impacto que se presenta a causa de la coexistencia de redes que utilizan los dos estándares antes mencionados. En base a su método propuesto, estos autores llegan a la conclusión de que una red con el estándar IEEE 802.15.4 normalmente tendrá un mínimo o ningún impacto en el desempeño de una del estándar IEEE 802.11b, a menos que el nodo de la red se encuentre muy cerca de un clúster de nodos de la otra red con un muy alto nivel de actividad.

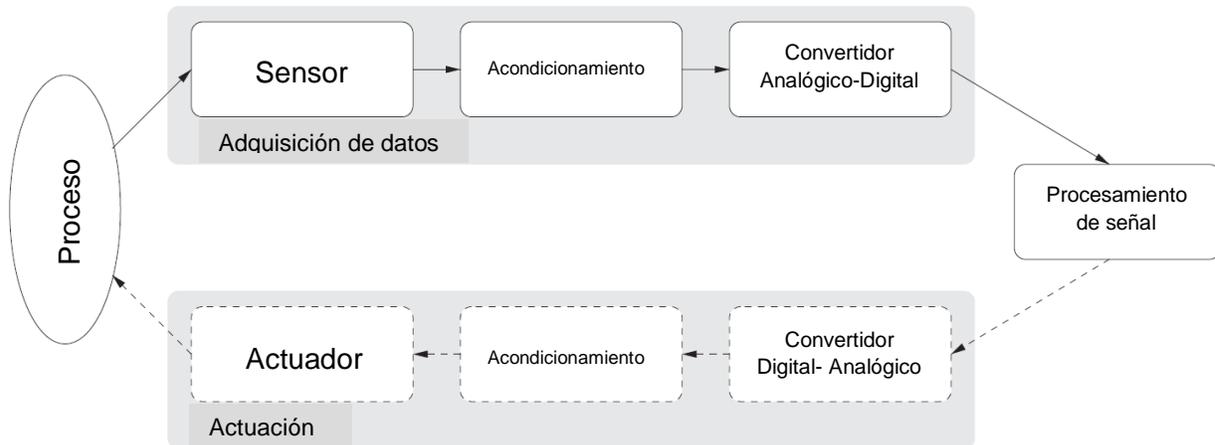
Por otra parte, en el trabajo realizado por Soo-Young, et al. (2007) se lleva a cabo un análisis similar sobre la interacción entre tecnologías de los dos estándares, mediante el cual determinan que se puede presentar cierta interferencia entre ellos. Se determinan también algunos criterios para la existencia entre ambos estándares, los cuales se pueden utilizar en el diseño e implementación de este tipo de redes. De acuerdo a estos criterios y al tipo de aplicación en que se

implementen las tecnologías inalámbricas, puede tener mayor relevancia la interferencia que se pueda presentar, o también puede llegar a ser lo suficientemente pequeña para ser despreciable y no afectar el desempeño de ninguna de las redes.

### **2.2.7. Sensores**

Los sensores unen el mundo físico con el mundo digital, al capturar y revelar fenómenos del mundo real y convertirlos en una forma que pueda ser procesada, almacenada y utilizada para tomar acciones posteriores. Al integrar los sensores con otros dispositivos, máquinas y ambientes, se pueden obtener grandes beneficios gracias a los procesos de detección que llevan a cabo. La detección es una técnica utilizada para obtener información de un objeto o proceso físico, incluyendo la ocurrencia de eventos (por ejemplo, cambios de estado como la caída de temperatura o de presión). Un sensor es un objeto que realiza este tipo de tareas de detección (Dargie y Poellabauer, 2010).

Otro término comúnmente utilizado es “transductor”, el cual se refiere a un dispositivo que convierte energía de una forma a otra. Un sensor entonces, es un tipo de transductor que convierte energía en el mundo físico, en energía que pueda ser pasada a un sistema computacional o controlador. En la figura 2.12 se muestran los pasos que comúnmente se realizan en un proceso de detección o adquisición de datos por medio de sensores. En este proceso, se utiliza la información obtenida por los sensores para tomar decisiones y llevar a cabo acciones correctivas que lleven al sistema o proceso a las condiciones de funcionamiento deseadas, todo esto por medio de la transformación de energía y el procesamiento de señales.



**Figura 2.12.** Proceso de adquisición de datos y actuación (Dargie y Poellabauer, 2010).

### 2.2.8. Especificaciones de los Sensores

En la ingeniería y en la ciencia, los sensores juegan un papel crítico, al proporcionar medidas para la retroalimentación y el control de procesos. Las especificaciones de los sensores cuantifican la habilidad de un sensor para proveer medidas de variables físicas (Bernstein, 2001). Un sensor es en realidad un sistema dinámico, por lo que se analiza como tal cuando la entrada del sensor es una señal que depende del tiempo. Por otro lado, existen aplicaciones que involucran sensores que son constantes por largos periodos de tiempo, en cuyo caso se analiza como un sistema estático. A continuación se describen las especificaciones y aspectos que se toman en cuenta en la implementación de sensores:

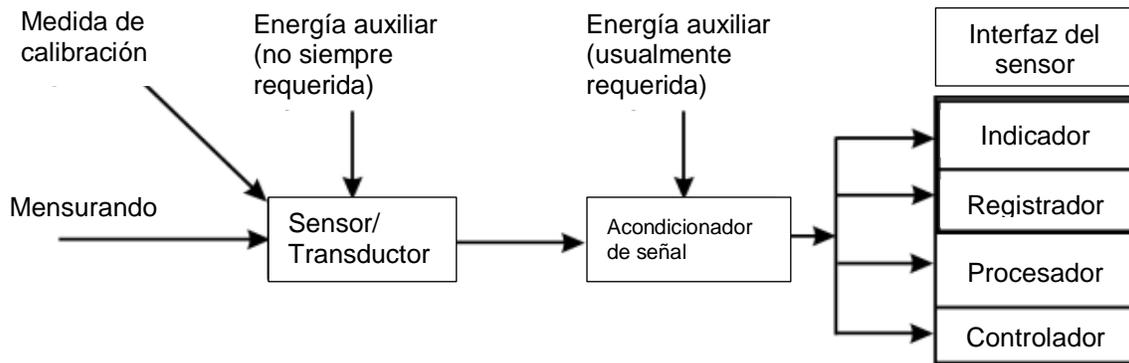
- **Desvío:** es el cambio en la curva de respuesta estática en el tiempo. Este cambio puede deberse a condiciones ambientales de corto plazo, como cambios en temperatura o humedad, o puede ser causa de efectos de largo plazo, como desgaste, fatiga u oxidación
- **Precisión:** la precisión en un sensor se determina por el ruido que puede manejar, es decir, si un sensor tiene buena precisión si el nivel de ruido es relativamente bajo a la magnitud medida. El ruido se puede presentar debido a perturbaciones externas, o puede ser inherente al sistema del sensor mismo

- **Repetitividad:** se determina en base a la histéresis de la curva de respuesta del sensor. Un sensor tiene buena repetitividad si la histéresis es baja. La histéresis ocurre cuando la variable de entrada cambia de un valor dado y después regresa al mismo, resultando la segunda medición diferente de la primera
- **Cuantización:** es la discretización de la señal de salida. La mayoría de los sensores proveen una salida analógica, la cual debe convertirse posteriormente en una señal digital, dividiendo la señal analógica en pequeñas partes. Esta transformación conlleva un error en la salida que se obtiene de la señal del sensor
- **Resolución:** es la mínima variación perceptible del sensor. Puede ser la resolución a la señal de entrada del sensor o a la salida. La resolución determina la capacidad de diferenciar entre mediciones cercanas
- **Rango:** el rango de funcionamiento del sensor es determinado por el valor más bajo y el valor más alto que puede distinguirse, ya sea a la entrada o a la salida del sensor
- **Sensibilidad:** es un aspecto importante en el desempeño de un sensor, el cual depende de la cantidad en que cambia la salida del sensor debido a un cambio en la señal de entrada. La proporción entre estas cantidades determina la sensibilidad
- **Calibración:** es el proceso mediante el cual se determina una aproximación a la curva de respuesta estática de un sensor. Utilizando la señal de salida del sensor se obtiene un estimado de la señal de entrada que está recibiendo. En este proceso, la diferencia entre el valor real y el valor obtenido se conoce como error de calibración.

### **2.2.9. Sensores Inteligentes**

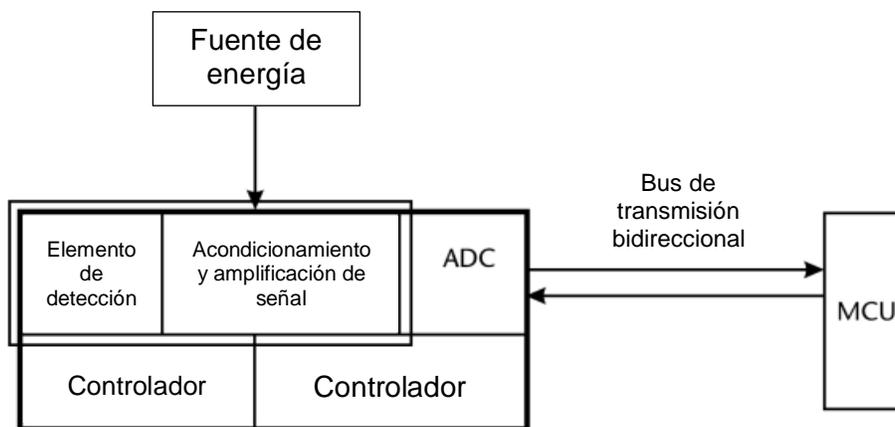
Para dar una mejor explicación de lo que son los sensores inteligentes, Spencer, et al. (2004) comienzan por la definición de un sensor convencional. En general, un sensor es un dispositivo designado para adquirir información de un objeto y transformarla en una señal eléctrica. Un sensor tradicional puede generalmente

dividirse en tres partes básicas (figura 2.13): el elemento de detección (resistencia, capacitor, transistor); el procesamiento y acondicionamiento de señales (amplificaciones, compensaciones, filtrados); y la interfaz del sensor (cables o conexiones para comunicarse con otros dispositivos electrónicos).



**Figura 2.13.** Sistema general de un sensor (Frank, 2013).

La diferencia esencial entre un sensor inteligente y un sensor convencional, son sus capacidades de inteligencia, es decir, el microprocesador integrado con que cuentan este tipo de sensores (figura 2.14). Este microprocesador se utiliza para procesamiento digital, conversiones analógico-digitales, cálculos, funciones de interfaz, entre otras tareas (Kirianaki, et al., 2002).



**Figura 2.14.** Modelo de un sensor inteligente (Frank, 2013).

Otros avances tecnológicos han logrado cambios y mejoras en varias características de los sensores inteligentes, como son los sistemas microelectromecánicos (MEMS), que son cada vez más pequeños; y las tecnologías

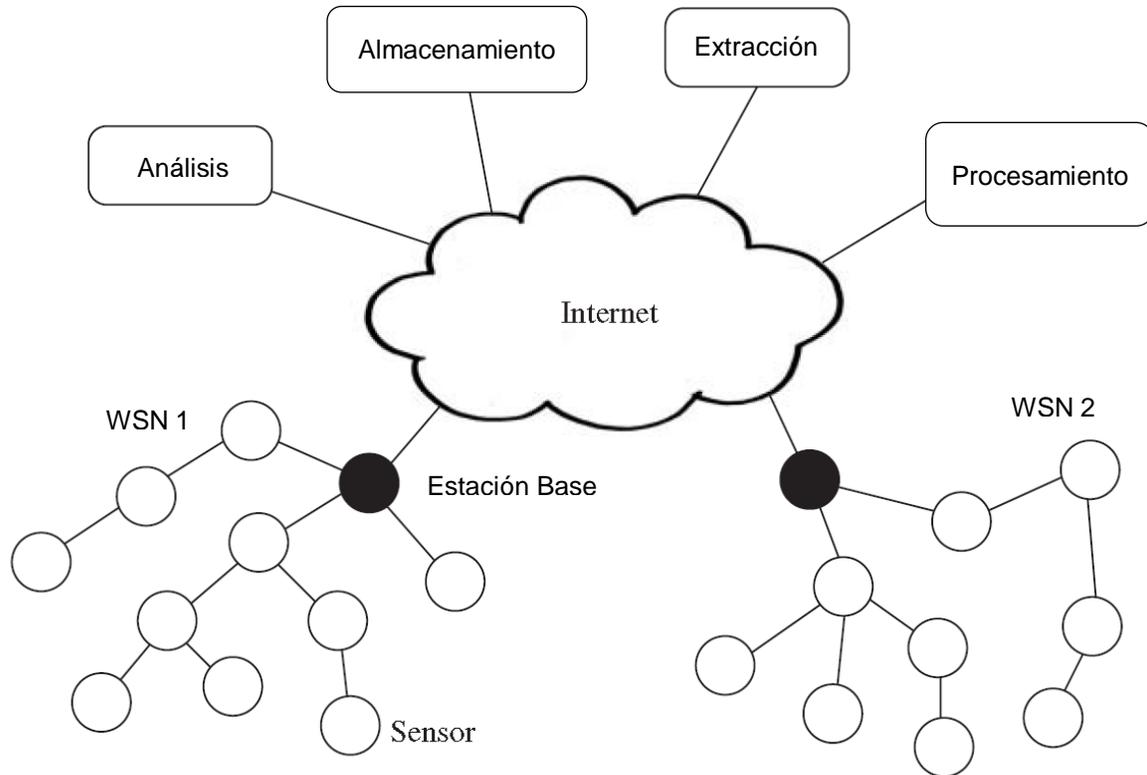
inalámbricas, que permiten una mejor comunicación entre dispositivos electrónicos. Por lo tanto, se define un sensor inteligente como un sensor que cuenta con cuatro características:

- Unidad central de procesamiento integrada
- Pequeño tamaño
- Comunicación inalámbrica
- Bajo costo

Debido a que cuentan con una comunicación por medio de tecnología inalámbrica, los sensores inteligentes pueden ser unidos unos con otros, formando lo que se conoce como redes de sensores inteligentes, de tal manera que se logre la detección o adquisición de datos a gran escala de espacios físicos cada vez más grandes. Estas aplicaciones de recolección de información existen en una amplia gama de dominios de investigación. Algunos ejemplos son: monitoreo de ambientes y hábitats, aplicaciones de rastreo, viajes o transportes, administración de inventarios y cadenas de suministros, monitoreo estructural de edificios y otras estructuras, etcétera (Elnahrawy y Nath, 2004). A continuación se describirá más ampliamente el funcionamiento de este tipo de redes de sensores.

### **2.2.10. Funcionamiento de Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)**

Cuando varios sensores monitorean un ambiente físico grande de manera cooperativa, utilizando comunicación inalámbrica, se crea una Red Inalámbrica de Sensores (WSN) (Dargie y Poellabauer, 2010). Los diferentes nodos dentro de la red se comunican entre ellos, pero también se comunican con una Estación Base (BS) por medio de sus radios inalámbricos, lo que les permite diseminar los datos detectados y así poder procesar la información, visualizarla, analizarla y almacenarla. En la figura 2.15 se muestra el esquema de dos WSN diferentes, que monitorean ambientes físicos separados, pero que a su vez se encuentran conectadas entre sí por medio de internet.



**Figura 2.15.** Redes Inalámbricas de Sensores (Dargie y Poellabauer, 2010).

Las investigaciones en el área de las WSN han tenido gran atención en los últimos años, esto debido a los beneficios y las características únicas que presentan como su capacidad de auto-configurarse, bajo costo, facilidad para su implementación y su capacidad de detección distribuida, por mencionar algunas. Una WSN está compuesta de una gran cantidad de sensores, los cuales se encuentran desplegados dentro o muy cerca del fenómeno o área a observar (Akyildiz, et al., 2002).

Las capacidades de los nodos en las WSN pueden variar ampliamente. Un nodo de sensor simple puede ser utilizado para monitorear un solo fenómeno físico, mientras que otros dispositivos más complejos pueden combinar diferentes técnicas de detección (acústicas, ópticas, magnéticas, etc.). También pueden diferir en cuanto a sus capacidades de comunicación, por ejemplo, el uso de diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica como frecuencias de radio, infrarrojas o ultrasonido, con las cuales varían las tasas de transferencia de datos y la potencia de la señal.

Otras diferencias que pueden presentarse entre los nodos usados en las WSN, son la cantidad y complejidad de las tareas que deben llevar a cabo. Mientras que los nodos de sensores más sencillos normalmente se limitan a la recolección y transmisión de información del ambiente que observan, otros dispositivos más potentes pueden también desarrollar funciones de procesamiento y agregación de la información obtenida. Tales dispositivos normalmente asumen responsabilidades adicionales dentro de la WSN, además de que también pueden tener acceso a tecnologías adicionales de apoyo para mejorar el funcionamiento de la red. Un ejemplo de esto pudiera ser el uso de tecnología GPS para una medición más exacta de las posiciones entre los nodos o en el ambiente observado (Dargie y Poellabauer, 2010).

En muchos casos, la información obtenida por los nodos de la red es utilizada para llevar a cabo posteriormente acciones correctivas que permitan el control de un proceso o ambiente. Estas redes de sensores inteligentes donde se emula el comportamiento cíclico de percepción-razonamiento-acción son útiles para una gran cantidad de aplicaciones. Lo que hacen es recolectar y diseminar información de los sensores en tiempo real, procesar la información a través de tareas colaborativas entre los diferentes sensores, y propagar señales de control a los actuadores correspondientes para controlar el comportamiento de los sistemas físicos.

Las redes de sensores inteligentes pueden consistir de grandes cantidades de fuentes de información altamente móviles, además de actuadores y usuarios que pueden encontrarse dispersos en áreas amplias, por lo cual las redes deben ser capaces de organizarse de manera automática para poder adaptarse rápidamente a cambios dinámicos en la distribución y configuración de los nodos de sensores (Lim, 2010)

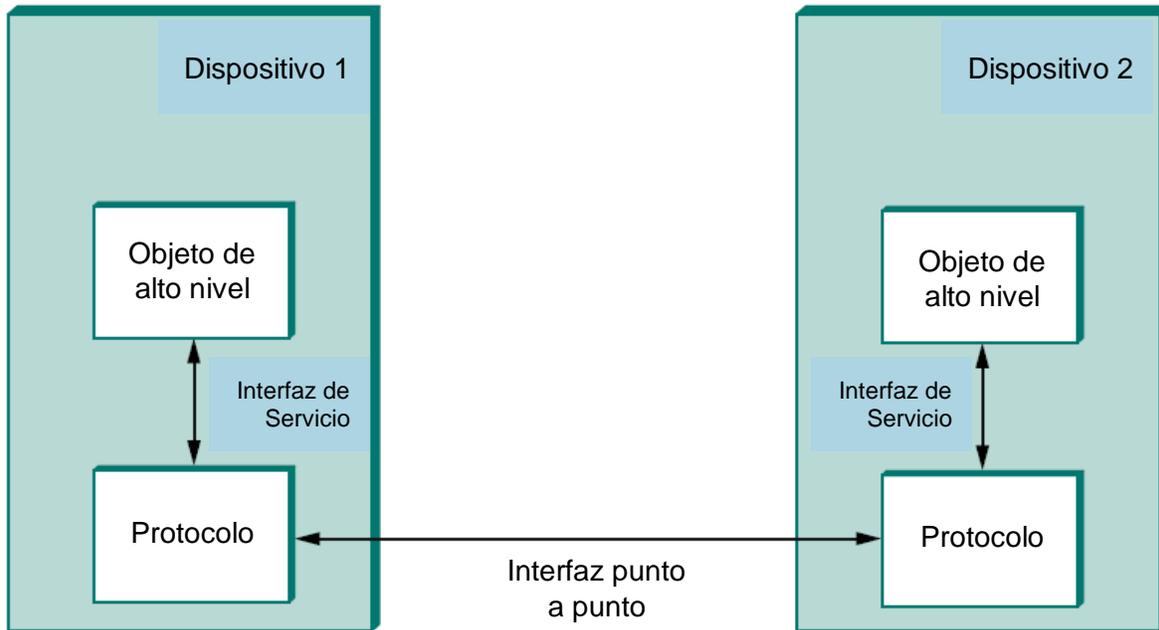
### **2.2.11. Arquitecturas de Redes**

Debido a la complejidad que presenta el proceso de diseño de una nueva red, se han desarrollado guías generales, usualmente llamadas arquitecturas de red, para ayudar en el diseño y la implementación de redes. Para el desarrollo de estas arquitecturas se utilizó lo que se conoce como estratificación (layering), cuya idea básica es que se comienza con los servicios que se pueden obtener del hardware subyacente, y después se le agrega una secuencia de capas, cada una de las cuales va proporcionando un servicio de mayor nivel, es decir, un servicio más abstracto. Los servicios que se proveen a niveles más altos, se implementan en términos de los niveles más bajos (Peterson y Davie, 2012).

La estratificación provee dos características ventajosas:

1. Descompone el problema de construir una red en componentes más sencillos y manejables. En vez de implementar una sola pieza de software que haga todo lo que se requiere, se implementan diferentes capas, de las cuales cada una resuelve un problema
2. Provee un diseño más modular. Si se requiere modificar o agregar alguna característica o servicio, solo se requerirá modificar la funcionalidad en una capa, reutilizando las funciones de las demás capas

Los objetos abstractos que componen las capas de un sistema de red son llamados protocolos. Un protocolo provee un servicio de comunicación que los objetos de niveles más altos utilizan para intercambiar mensajes. Este servicio de comunicación es definido por el protocolo y exportado localmente (interfaz de servicio), junto con un conjunto de reglas que controlan los mensajes que el protocolo intercambia con su contraparte en la máquina a la que se dirige (interfaz punto a punto), para así poder implementar el servicio (figura 2.16)



**Figura 2.16.** *Protocolos en la comunicación de una red (Peterson y Davie, 2012).*

### 2.2.12. Comunicación en una WSN

La familia de estándares IEEE 802.11 ha sido la más comúnmente utilizada en tecnologías de redes inalámbricas para sistemas móviles. Se implementó frecuentemente en las primeras redes de sensores inalámbricas, y puede aún encontrarse en redes actuales que tienen altas demandas de ancho de banda. Sin embargo las grandes cantidades de energía que requieren las redes basadas en estos estándares, los hacen inadecuados para redes de sensores de baja potencia (Dargie y Poellabauer, 2010).

Debido a lo anterior se han desarrollado una serie de protocolos que mejor satisfacen las necesidades de las redes para bajo consumo de energía y bajas tasas de transferencia de información. El principal de estos protocolos es el IEEE 802.15.4 diseñado específicamente para comunicaciones de corto alcance en redes de sensores de baja potencia, y es aplicada por la mayoría de los nodos de sensores académicos y comerciales (Gutierrez, et al., 2001).

A pesar de que las WSN comparten muchas similitudes con otros sistemas distribuidos, presentan una variedad única de retos y limitaciones. Estas

limitaciones impactan directamente en el diseño de las WSN, por lo que los protocolos y algoritmos utilizados en su implementación difieren de los de otros sistemas distribuidos (Dargie y Poellabauer, 2010) (García-Hernández, et al., 2007). Algunos de estos retos y limitaciones son:

- **Energía:** es quizá la limitación más asociada con las WSN. Debido a las características de este tipo de redes, normalmente se alimentan a base de baterías, las cuales deben ser reemplazadas o recargadas cuando se agotan. Incluso para algunos nodos ninguna de estas opciones es viable, por lo que simplemente se desechan una vez que se termina su fuente de energía
- **Autoadministrables:** por la naturaleza de muchas de las aplicaciones de WSN, estas deben operar en áreas remotas y ambientes inhóspitos, sin ninguna infraestructura de apoyo o la posibilidad de mantenimiento o reparaciones. Por lo tanto, las WSN deben ser capaces de administrarse y configurarse a sí mismas, operando y colaborando con otros nodos, y adaptándose a fallas y cambios en el ambiente
- **Administración descentralizada:** las limitaciones de energía y de grandes distancias presentes en las WSN hacen inviable el uso de algoritmos centralizados (ejecutados en la Estación Base) para implementar soluciones en la administración de la red, tales como el ruteo o la administración de la topología. En vez de eso, los nodos deben colaborar con sus vecinos para realizar decisiones localizadas, es decir, sin un conocimiento global de la red. Como consecuencia de todo esto, los resultados de los algoritmos descentralizados (o distribuidos) no serán óptimos, pero pueden ser más energéticamente eficientes que las soluciones centralizadas
- **Restricciones de diseño:** la principal meta en el diseño de sensores inalámbricos es crear dispositivos cada vez más pequeños, baratos y efectivos. Debido a la necesidad de ejecutar aplicaciones con bajos niveles de consumo de energía, los nodos de una WSN llegan a tener capacidades

de procesamiento y almacenaje muy limitadas. Esto presenta varias restricciones al momento de diseñar la red, como puede ser la incapacidad de integrar otros componentes que podrían ayudar en el desempeño de la red, como receptores de GPS.

- Seguridad: debido a sus limitaciones de procesamiento, memoria y energía, susceptibilidad a ataques físicos, y el uso de comunicación inalámbrica, la seguridad es un reto en este tipo de redes. La implementación de WSN requiere una cuidadosa toma de decisiones y compensaciones o intercambios entre diferentes medidas de seguridad. Dependiendo de la aplicación, una red de sensores debe cumplir con cierta calidad de servicio, así como otras características importantes como robustez o restricciones de tiempo real; si se toma la decisión de dirigir más atención o recursos a aspectos de seguridad en la red, normalmente esto afecta a las demás características mencionadas de manera negativa, es decir que, la seguridad en una WSN viene a cambio de la disminución de otras características de la red o de un mayor costo.

### **2.2.13. Sistemas Embebidos**

Un sistema embebido es un dispositivo computacional de propósito específico, diseñado para llevar a cabo funciones exclusivas. Estos sistemas consisten principalmente de hardware y software. Cada sistema embebido se conforma de componentes de hardware respaldados por una Unidad Central de Procesamiento (CPU). El software interno es el que controla todo el sistema embebido. Los sistemas embebidos pueden encontrarse fácilmente en muchos aspectos de la vida diaria, por lo que es uno de los mercados de mayor crecimiento (Qian, et al., 2009). En este trabajo de investigación, se analizan algunos sistemas embebidos con la finalidad de utilizarlos como parte del sistema de comunicación inalámbrica:

- Microprocesador: Es un chip CPU independiente que no cuenta con memoria integrada o puertos de entrada y salida (I/O), aunque estos se le pueden agregar posteriormente. Un microprocesador es un circuito

integrado de propósito general y que puede ser integrado en otros dispositivos electrónicos.

- **Microcontrolador:** Un microcontrolador es un chip integrado que cuenta con memoria propia, puertos I/O, temporizadores y otros componentes. La mayoría de los sistemas embebidos se construyen a base de microcontroladores, debido a que todos los componentes se encuentran integrados en un solo chip. Existe una gran variedad de microcontroladores disponibles.
- **DSP:** Los procesadores digitales de señal (DSP) son microprocesadores de propósito especial que han sido optimizados para procesar señales en tiempo real. Se utilizan en una gran variedad de productos de consumo general como celulares, módems, sistemas de audio, etc. La señal de entrada de estos sistemas es analógica, la cual es digitalizada dentro del DSP para su procesamiento, el cual se basa en el programa interno del DSP y es convertido posteriormente a una señal analógica de salida (Rajaraman, 1999).

### **2.3. Estado del Arte**

Un buen ejemplo de trabajo de investigación en el que se propone el diseño de un nodo especial para su aplicación en una WSN, es el realizado por Yongxin, et al. (2012). Aquí los autores proponen un diseño integrado en el cual utilizan tecnologías de comunicación inalámbrica, sensores y sistemas embebidos, con la finalidad de elaborar un nodo que pueda utilizarse para medir humedad y temperatura. Esto para facilitar tareas de control de la red, recolección de datos, administración de dispositivos, entre otras. Este tipo de procedimiento de diseño de nodos para comunicación puede ser utilizado para muchos otros contextos o diferentes tipos de problemáticas, como es el caso de la comunicación en un sistema de seguimiento solar.

Un trabajo en el que se implementa una red de comunicación con tecnología inalámbrica en un sistema de energía solar, es el que se llevó a cabo por

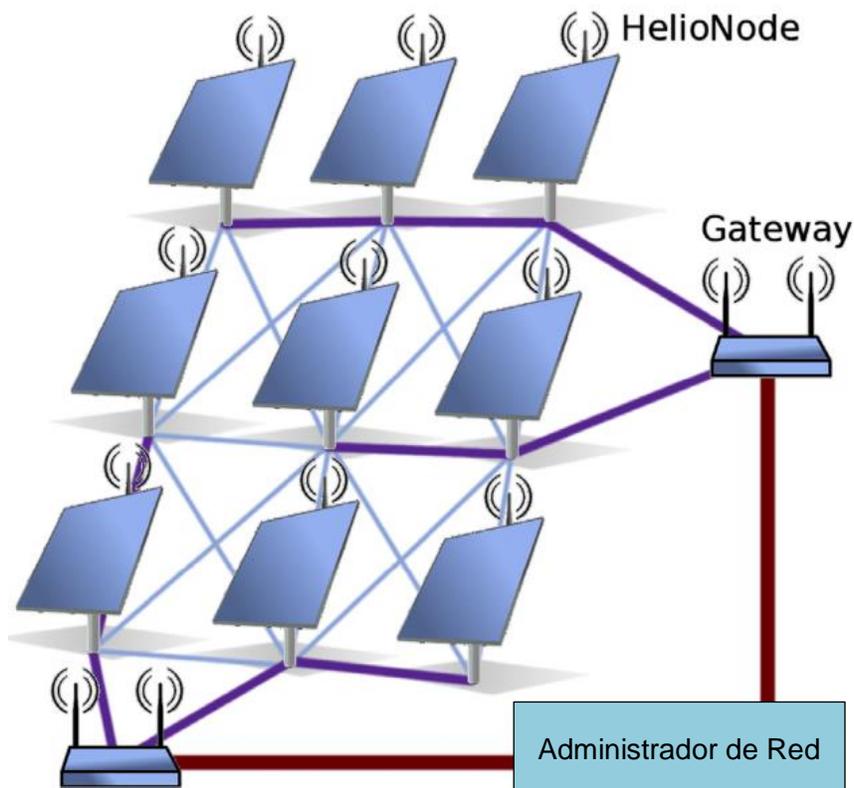
Papageorgas, et al. (2013), en el cual se diseñó una metodología para monitorear el funcionamiento de varios paneles fotovoltaicos, utilizando una red de sensores inalámbrica para la comunicación, control y supervisión del sistema. Para el diseño de dicha metodología, se utilizó un sistema de comunicación que combina tecnologías inalámbricas y otras a base de cables. Esto debido a que se agruparon los diferentes paneles fotovoltaicos en grupos, comunicándose a través de cables. Se utilizó posteriormente tecnología ZigBee para intercomunicar los diferentes grupos entre sí, para poder obtener información y a la vez realizar tareas de control en los dispositivos.

En este trabajo se pueden apreciar las bondades de la implementación de redes inalámbricas en la comunicación. Los mismos autores mencionan que se utilizó la tecnología ZigBee para las comunicaciones de corto alcance debido a su bajo costo, madurez y amplio uso en el área de las WSN. Sin embargo es distinto a lo que sería el diseño de una metodología para el control y monitoreo de helióstatos, ya que en estos últimos se deben tomar en cuenta factores, variables, funcionamiento e información, diferentes a los que se requiere considerar para paneles fotovoltaicos.

En el trabajo realizado por Pfahl, et al. (2013) se presenta una propuesta para el diseño de seguidores solares, enfocada en la optimización de recursos. Para esto se implementan materiales y dispositivos que reducen los costos de producción de los helióstatos y que a la vez son más ligeros y eficientes para el funcionamiento de los seguidores.

Otro aspecto en el que se enfocan los autores para la reducción de recursos necesarios, es en lo que corresponde a la energía necesaria para la comunicación y funcionamiento de los seguidores solares, para lo cual proponen un sistema de comunicación dedicado, enfocado en el diseño de nodos con tecnología inalámbrica para la transmisión de información, (figura 2.17). El sistema que proponen fue diseñado para la comunicación de los helióstatos, sin embargo, al no utilizar tecnologías estandarizadas como pueden ser ZigBee u otros dispositivos

dedicados para este tipo de comunicación, pueden presentarse problemas al momento de intentar agregar otras tecnologías al sistema o al querer interconectar este sistema con otros. El uso de tecnologías de comunicación inalámbrica disponibles comercialmente, como ZigBee u otras tecnologías usadas en el ámbito académico, es muy viable en el diseño de WSN, por lo que presentarían una buena opción en el diseño de una red de este tipo para la comunicación de un campo de seguidores solares.



**Figura 2.17.** Sistema de comunicación inalámbrica para seguidores solares (Pfahl, et al., 2013).

Otro trabajo similar en el que se desarrolla un sistema de comunicación inalámbrica para seguidores solares, es presentado por Kubisch, et al. (2011). Este trabajo se enfoca en determinar la viabilidad de la implementación de una red inalámbrica como sistema de control para un campo de heliostatos, eliminando así la necesidad de cableado. Esto como parte de un proyecto llamado HELIOMESH.

Los autores en este trabajo desarrollaron el sistema de comunicación inalámbrica, utilizando diferentes componentes para adaptarse a sus necesidades y que

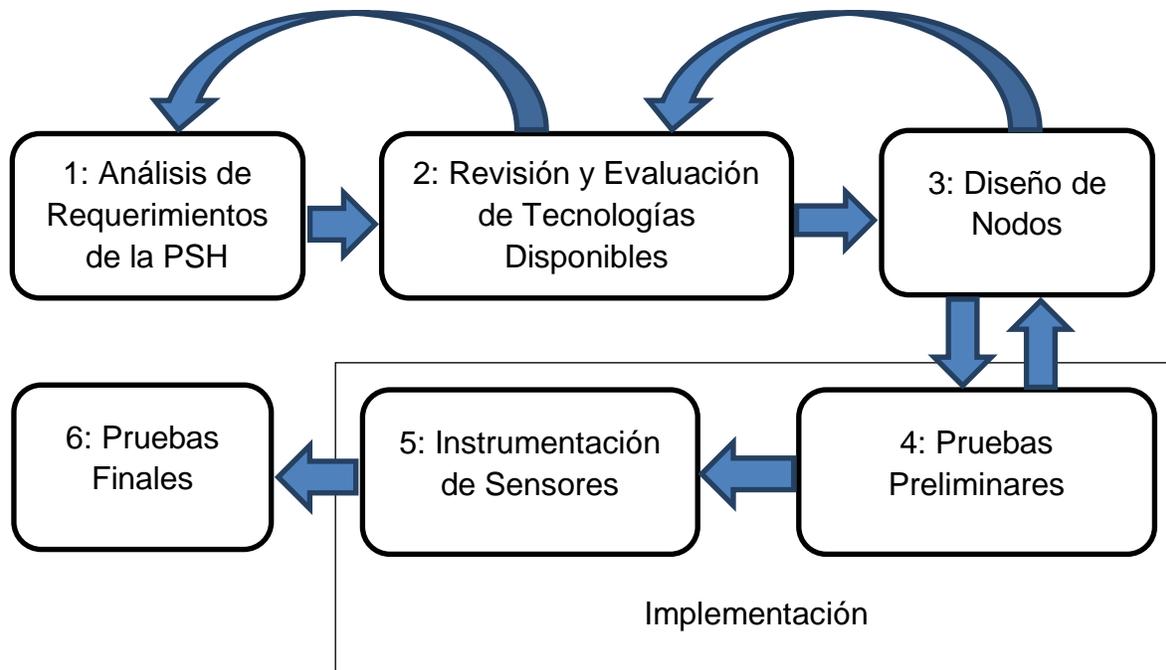
permitieran un funcionamiento efectivo del sistema. Al igual que en el trabajo mencionado anteriormente, esto presenta la desventaja de que el sistema no está apoyado por una tecnología estandarizada de comunicación inalámbrica, como las que se han presentado, lo cual reduce la capacidad de replicar el trabajo para proyectos futuros.

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestran los pasos a seguir para el desarrollo de la presente investigación, con la finalidad de mostrar la metodología propuesta para la solución del problema planteado y la realización de los objetivos del proyecto.

El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo, ya que el éxito del proyecto se llevará a cabo por medio de mediciones en la eficiencia de transferencia de información, una vez implementado el sistema. Esta también es una investigación de tipo exploratoria y experimental. Es exploratoria debido a que el tema del proyecto no ha sido abordado con suficiente detalle en una aplicación de esta naturaleza. Es experimental porque se realizarán pruebas en las que se mida el efecto de algunas características del campo, pero solamente por medio de pre-experimentos, es decir, que no se contará con grupos de control ni otros requerimientos que son necesarios para realizar experimentos puros. Como mencionan Hernández-Sampieri, et al., (2010) los diseños pre-experimentales son útiles para estudios exploratorios, como lo es el presente trabajo.

La figura 3.1 muestra un diagrama con las diferentes fases en que se divide la metodología del trabajo y la secuencia en que se llevarán a cabo. Aunque principalmente la metodología es secuencial, puede ser necesario regresar a fases anteriores, dependiendo de los resultados que se obtengan a lo largo del trabajo. La metodología a seguir se divide en siete etapas o fases principales, las cuales se describen a continuación.



*Figura 3.1. Metodología.*

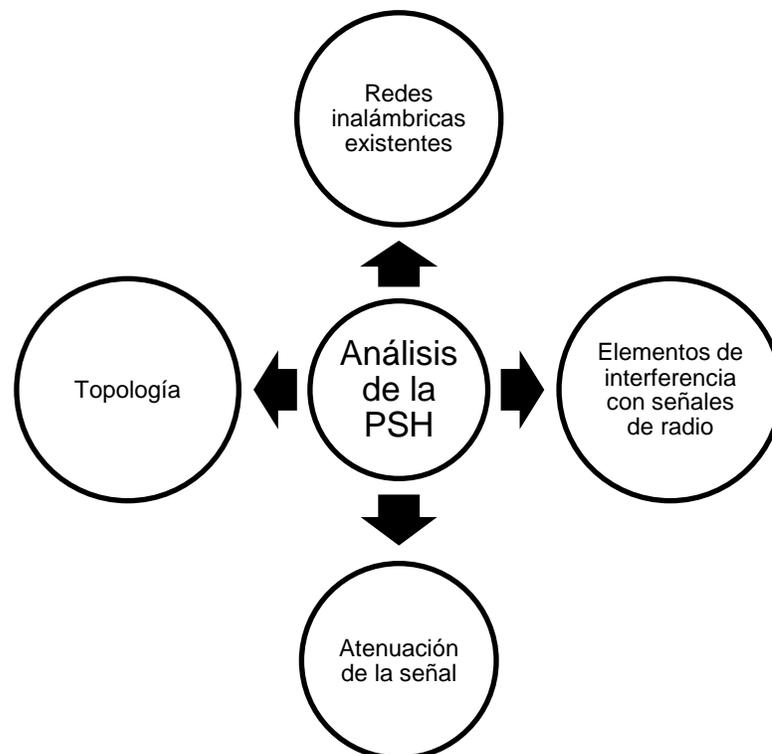
### 3.1. Fase 1: Análisis de los Requerimientos de la PSH

La primera fase del proyecto consiste en una definición de la situación actual de la PSH y de las características bajo las que operan los helióstatos, y que por lo tanto son bajo las que debe operar el sistema de comunicación que se pretende implementar. Para llevar a cabo esta etapa, se realizarán visitas frecuentes a la PSH, para revisar las instalaciones y encontrar los factores, condiciones o elementos que puedan tener algún efecto sobre el funcionamiento del sistema de comunicación inalámbrico. La base para esta revisión será lo planteado en el marco de referencia del segundo capítulo de este trabajo.

En la figura 3.2 se muestran los principales elementos que se revisarán en esta fase:

- Redes inalámbricas existentes: al instalar una nueva red de comunicación inalámbrica en la PSH, pueden presentarse problemas de interferencia entre esta nueva red y otras que ya estén presentes en el campo, como puede ser la de comunicación Wi-Fi.

- Elementos de interferencia con señales de radio: prácticamente cualquier objeto que se interponga en el camino de una señal de radio, puede tener un efecto en la misma, como absorber la señal, bloquearla o reflejarla. En este aspecto los helióstatos pueden presentar un obstáculo para la señal inalámbrica, debido al espejo y el metal de su estructura, los cuales pueden llegar a afectar la señal en gran medida.
- Atenuación de la señal: la señal inalámbrica transmitida por un radio va perdiendo intensidad a medida que se aleja de la fuente. Para evitar que esto llegue a ser un problema, es necesario tomar en cuenta la ubicación de los heliostatos en el campo, las distancias entre ellos y también su distancia con respecto a la UCC
- Topología: la topología que tendrá el sistema de comunicación, se refiere a la manera en que se colocarán los nodos y de qué manera se comunicarán entre sí. Esto dependerá en gran parte de la forma en que se encuentran distribuidos los seguidores en el campo



**Figura 3.2.** Análisis de requerimientos de la PSH.

## **3.2. Fase 2: Revisión y Evaluación de Tecnologías disponibles**

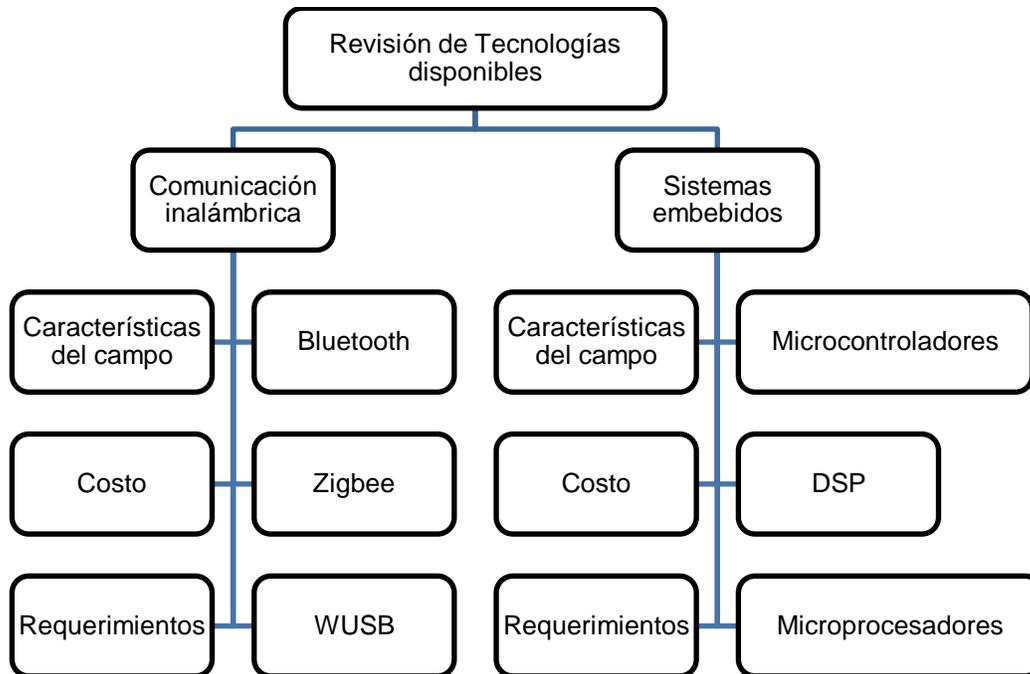
En esta fase se debe realizar un análisis de las diferentes opciones que se tienen en cuanto a tecnologías, que puedan implementarse como solución al problema presentado.

Como se muestra en la figura 3.3, se analizarán las tecnologías para comunicación inalámbrica, y también las de sistemas embebidos, las cuales se integrarán para formar los nodos que se utilizarán en el sistema de comunicación.

La base de este análisis será lo revisado en el marco de referencia. Una vez identificadas las tecnologías disponibles se debe determinar cuáles pueden utilizarse, tomando en cuenta las características y limitaciones de la PSH que se determinaron en la fase anterior y bajo las cuales deberá funcionar el sistema de comunicación.

Además de las características del campo, también deben tomarse en cuenta otros factores, como son los costos de las tecnologías, debido a la limitación de recursos económicos que se tienen.

Es importante también considerar los conocimientos y habilidades que se puedan requerir para la implementación de las tecnologías, ya que si no se cuenta con estas habilidades no se podrá hacer un buen uso de las herramientas tecnológicas seleccionadas. De ser necesario puede requerirse volver a la fase anterior para identificar otros factores que no se detectaron antes.

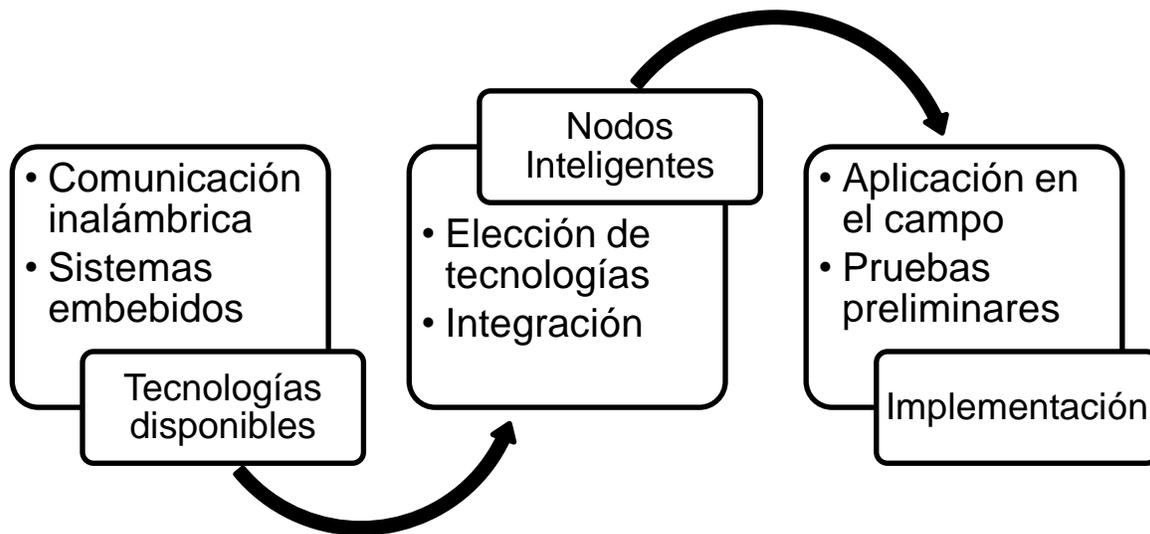


*Figura 3.3. Revisión y evaluación de tecnologías disponibles.*

### 3.3. Fase 3: Diseño de Nodos

Una vez determinadas las tecnologías que sea factible implementar en la PSH, el siguiente paso es el diseño y elaboración de los nodos del sistema de comunicación, en base a los elementos seleccionados, con la finalidad de realizar pruebas preliminares que permitan identificar la eficiencia de las tecnologías que se eligieron.

La elaboración de los nodos consistirá en la integración de estas tecnologías, creando un sistema de comunicación inalámbrica sencillo, que sea lo más cercano posible a lo que sería el sistema final a implementar en el campo (figura 3.4). El diseño de este sistema de comunicación completará el primer objetivo específico que se planteó al inicio del proyecto.



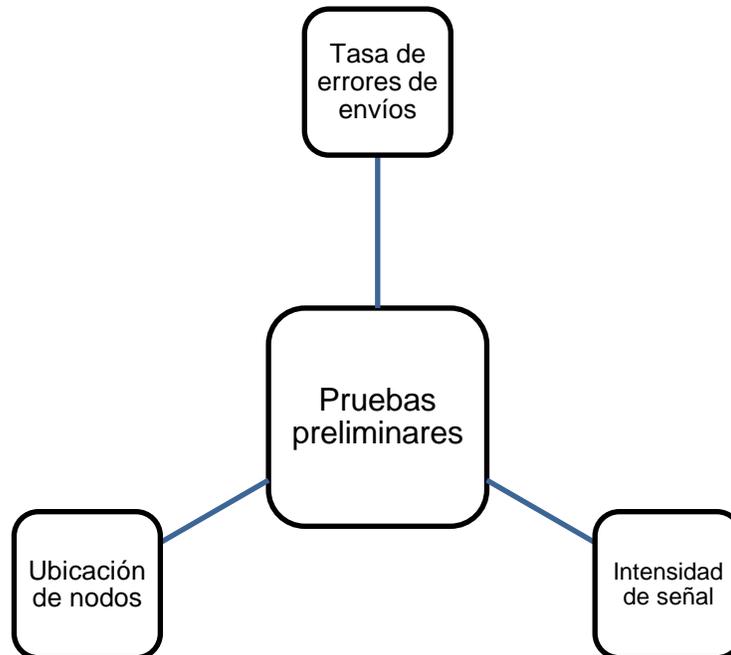
*Figura 3.4. Diseño de nodos.*

### 3.4. Fase 4: Pruebas Preliminares

En la cuarta etapa se implementarán los nodos elaborados en la fase anterior, llevando a cabo pruebas en la PSH en las cuales se realicen transferencias de información entre helióstatos y la UCC. Las pruebas se enfocarán en la medición de la tasa de errores en los envíos de información, la intensidad de la señal y la ubicación de los nodos de la red (figura 3.5). La tasa de errores se refiere a la cantidad de paquetes de información que no se transmiten de manera satisfactoria; la intensidad de la señal es la potencia que esta tiene en un punto dado, lo cual depende de la distancia que recorre; la ubicación de los nodos de la red, se analizará para determinar la posición donde la transferencia de datos entre radios sea la mejor.

Se medirá la efectividad con que se transfieren los datos en las pruebas realizadas y en base a los resultados se pasará a la siguiente fase o, de ser necesario, se regresará al diseño de los nodos, a la selección de otras tecnologías o a la identificación de los requerimientos del campo que podrían causar malos

resultados en las pruebas; repitiendo después todas las fases necesarias hasta tener un prototipo que funcione de manera efectiva.



*Figura 3.5. Pruebas preliminares.*

### **3.5. Fase 5: Instrumentación de Sensores**

Si los resultados en las pruebas preliminares son positivos, el siguiente paso es la instrumentación de sensores en la PSH, es decir, equipar los seguidores en los que se implementará el sistema de comunicación con sensores que permitan medir las condiciones en que funcionan los helióstatos. La información obtenida por los sensores servirá para realizar pruebas con el sistema de comunicación que permitan determinar la efectividad final del sistema propuesto. La cantidad y el tipo de sensores que se implementarán dependerán de los recursos económicos con que se cuente, de los materiales y equipos disponibles, y del tiempo restante para la culminación del proyecto. Solo se instalarán los sensores que sean necesarios para poder realizar pruebas de transferencia de información en la PSH y que permitan validar el sistema propuesto. La realización de las fases 5 y 6 completará el segundo objetivo específico del proyecto.

### **3.6. Fase 6: Pruebas Finales**

Finalmente, cuando se tengan instalados los sensores, se implementará el sistema de comunicación, basado en los nodos inalámbricos antes diseñados, realizando cualquier ajuste necesario para adaptarlos a la instrumentación de los helióstatos. Después se procederá a realizar las pruebas finales que determinen si el sistema propuesto es efectivo, si logra los objetivos planteados y si resuelve el problema que se formuló al inicio del proyecto. Los resultados obtenidos de estas pruebas determinarán que tan viable es la propuesta de solución para ser implementada en la PSH o si es necesario realizar ajustes en la propuesta para poder dar el proyecto por terminado. Para determinar su efectividad, se realizarán pruebas en las que se transmita información de los sensores instalados en los helióstatos, midiendo la tasa de errores que se produzca y la fuerza y calidad de la señal que se tenga. Una vez realizadas las pruebas con éxito, se logrará el último objetivo específico, y a su vez el objetivo general del proyecto.

## **4. IMPLEMENTACIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología propuesta, describiendo el procedimiento que se siguió y los diferentes pasos llevados a cabo, con el fin de solucionar el problema planteado.

### **4.1. Fase 1: Análisis de los Requerimientos de la PSH**

El objetivo de esta fase de la metodología es la identificación de las principales características y limitaciones que se tienen en la PSH, y que deben tomarse en cuenta para el desarrollo y la implementación de un sistema de comunicación basado en nodos inteligentes. Para lograr esto, se realizaron varias visitas al campo de helióstatos, en las cuales se analizaron los factores definidos en el capítulo anterior, así como todas las condiciones bajo las que se encuentra el campo de helióstatos.

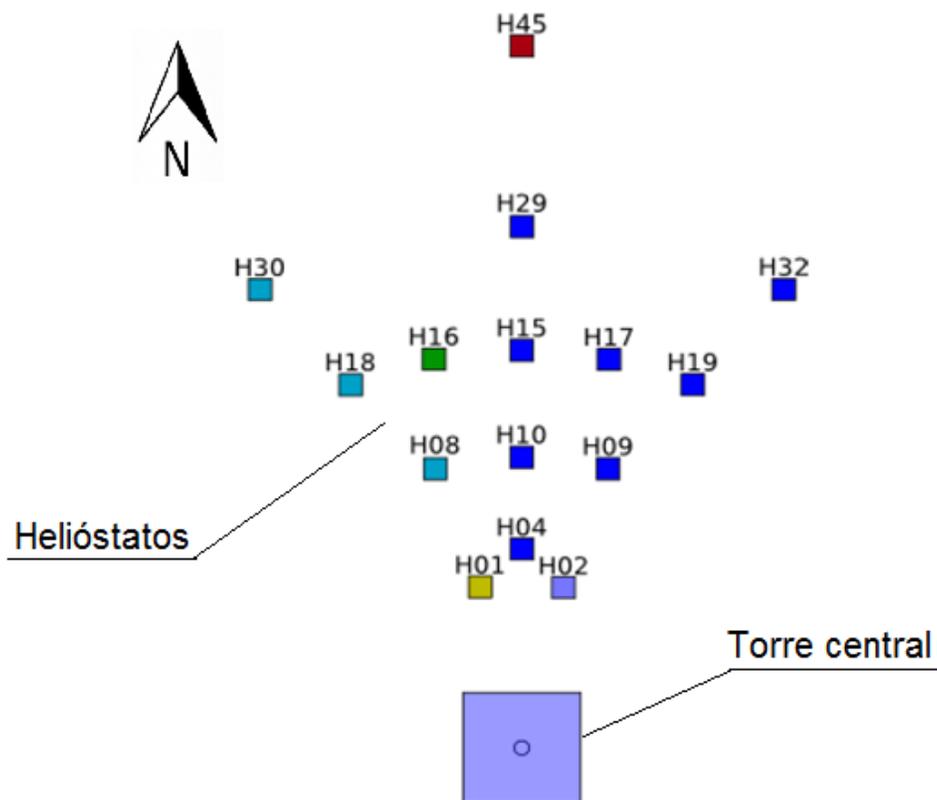
La PSH se encuentra en la periferia de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, en terrenos de la Universidad de Sonora. Esta región es ideal para la implementación de un sistema de recolección solar, debido a que cuenta con altos índices de radiación solar por día. Sin embargo, la ubicación del campo de helióstatos en un área abierta desértica como esta, trae consigo algunos factores que deben tomarse en cuenta para la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica, ya que pueden llegar a afectar el desempeño de los componentes electrónicos.

#### **4.1.1. Atenuación de la Señal**

Uno de los principales factores que se tomará en cuenta en la selección de la tecnología apropiada para la comunicación inalámbrica, es la distancia que debe recorrer la señal entre los diferentes dispositivos de la red. En la figura 4.1 se muestra un diagrama que representa la distribución de los helióstatos en el campo, así como la enumeración que sirve para identificarlos.

Se pretende establecer comunicación inalámbrica entre los heliostatos H10, H04 y el cuarto de control. El H10 se encuentra aproximadamente a 50 metros al norte del blanco lambertiano, y el H04 a 34 metros. El blanco lambertiano es una superficie de reflexión que se ubica en la cara norte de la torre central, y que se utiliza para observar el desempeño de los heliostatos y obtener su caracterización.

En la figura 4.2 se muestran las distancias (en metros) entre los heliostatos que se estarán operando, la torre central y el cuarto de control. Las medidas en esta figura son respecto al blanco lambertiano de la torre. Los heliostatos H04, H10 y H15 se encuentran alineados con el blanco lambertiano.



**Figura 4.1.** Distribución de heliostatos en la PSH (modificado de Iriarte-Cornejo, 2013).

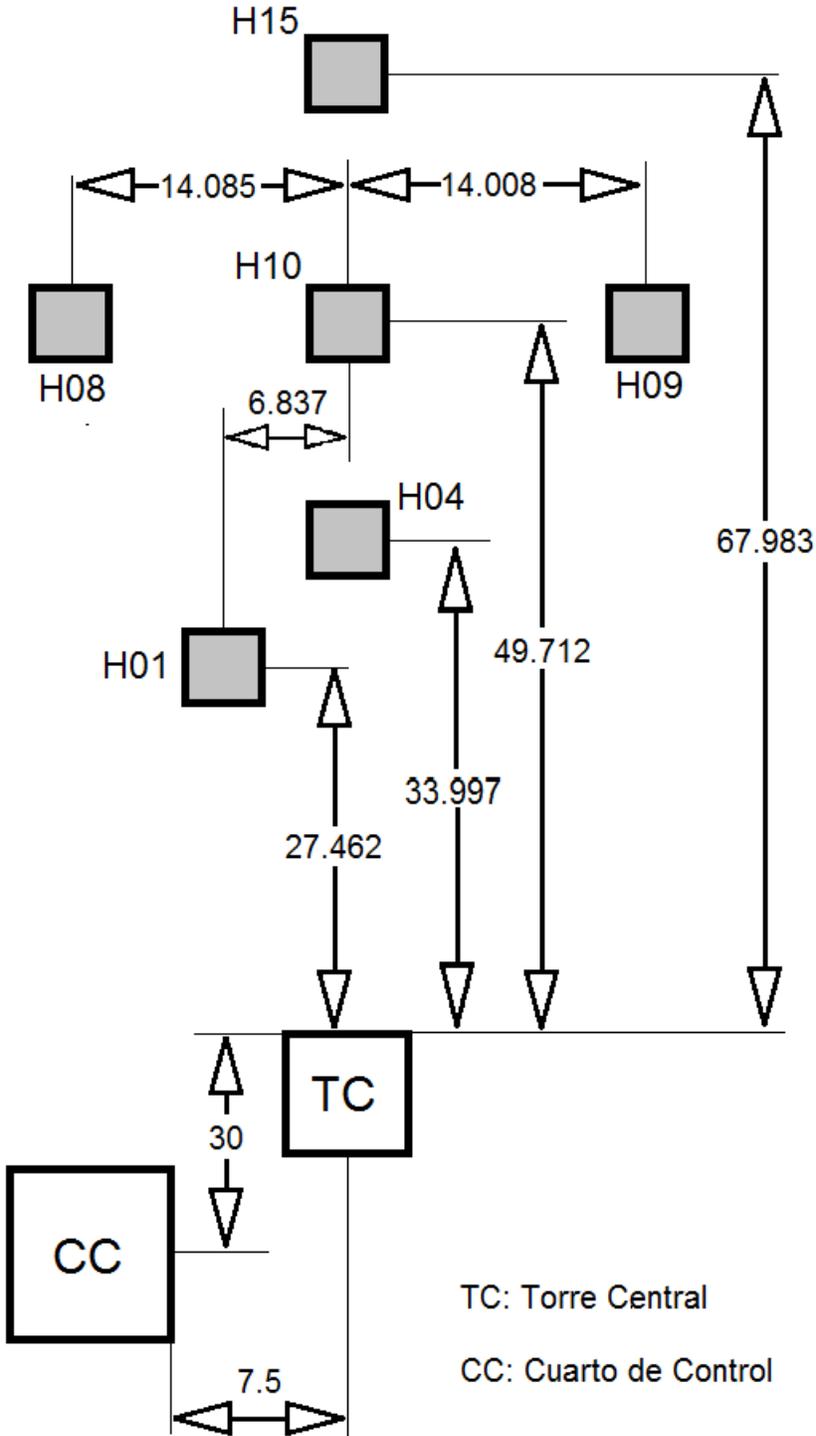


Figura 4.2. Distancias entre helióstatos.

### **4.1.2. Redes Inalámbricas Existentes**

La comunicación por medio de vías inalámbricas se lleva a cabo a través de señales electromagnéticas, en diferentes frecuencias. Por lo que es importante identificar las redes inalámbricas que existen en un área, antes de implementar una nueva (Soo-Young, et al., 2007).

En el caso de la PSH, la red inalámbrica que más se utiliza es la de Wi-Fi, la cual se usa en el cuarto de control, principalmente como acceso a internet. En la PSH, también se cuenta con un helióstato (H01) instrumentado con comunicación Wi-Fi para su control, sin embargo esta característica no se encuentra en funcionamiento (figura 4.3). De la misma forma, otros tres seguidores del campo (H08, H18 y H30) tienen instalados motores que pueden controlarse por medio de ZigBee, pero no han podido ser utilizados de manera adecuada debido a fallas de comunicación, por lo que tampoco se manejan por este tipo de tecnología.

Otro tipo de comunicación inalámbrica que se utiliza en la PSH, es por medio de walkie-talkies, para la comunicación entre personas que se encuentran en el cuarto de control, y personas que se encuentran en los helióstatos. Sin embargo este tipo de transmisiones inalámbricas no presentan un obstáculo para otras redes de comunicación, debido a que trabajan en base a frecuencias muy diferentes.



prestarse atención a la interferencia que pueden causar los seguidores a la señal de radio, ya que estos están contruidos en base a estructuras metálicas y arreglos de espejos de diferentes áreas, algunos hasta de 36 m<sup>2</sup>, los cuales pueden reflejar u obstruir en gran medida el paso de las señales electromagnéticas. También debe tomarse en cuenta que, al momento de que los helióstatos se encuentren en operación, estarán en constante movimiento, por lo que la interferencia que causen a las señales inalámbricas puede variar considerablemente.

El sistema de comunicación inalámbrica de este proyecto, no se debe limitar al área donde se encuentran los helióstatos, sino que también debe abarcar el cuarto de control. A causa de esto se deben considerar otros elementos que son propensos a interferir con la señal de radio del sistema, los cuales son: la torre de concentración solar y el cuarto de control mismo.

La torre donde se concentra la radiación solar, está hecha en su mayoría de metal, por lo que también representa una posible amenaza a la transferencia de señales inalámbricas. De la misma forma, si se pretende transferir señales de radiofrecuencia al interior del cuarto de control, debe tenerse en consideración la obstrucción que representan los muros y la estructura en general.

#### **4.1.4. Topología**

Para la implementación de una red inalámbrica en la PSH, una topología de árbol puede ser efectiva para la colocación de los nodos, esto debido a la forma en que se ubican los seguidores, expandiéndose cada vez más entre mayor sea su distancia con respecto a la torre. Sin embargo, como se mencionó en las limitaciones de este proyecto, la comunicación se limitará a solamente dos helióstatos y la unidad central de control. Esto a causa de las limitaciones que se tienen en cuanto a recursos económicos y al tiempo disponible para la culminación del trabajo de investigación.

Aunque la cantidad de nodos a utilizar, así como la distancia entre ellos dependerá en gran medida de la tecnología que se seleccione, no se requerirá de una topología de red muy compleja, debido a que solo se pretende comunicar tres puntos del campo, entre los cuales no hay mucha interferencia, ya que serán los helióstatos más cercanos al cuarto de control.

## **4.2. Fase 2: Revisión y Evaluación de Tecnologías**

### **Disponibles**

En el segundo capítulo de este trabajo, se describen algunas de las tecnologías de redes de comunicación inalámbrica que más se utilizan en la actualidad. En base a esta revisión de tecnologías, y a las características del campo de helióstatos analizadas anteriormente, fue posible elegir tecnologías que puedan ser implementadas en un prototipo de sistema de comunicación, y que sirva para la solución del problema planteado.

La tecnología de comunicación inalámbrica ZigBee fue la que se eligió para el desarrollo del proyecto. Como se mencionó previamente, esta tecnología es ampliamente utilizada a nivel mundial en redes inalámbricas. Se eligió debido a que proporciona varias ventajas, como son su bajo costo, facilidad de implementación y robustez en la comunicación, además de que puede alcanzar rangos de transmisión de hasta 150 metros en espacio abierto, lo cual es suficiente para la cobertura de las distancias que se manejarán en el campo. El rango de transmisión varía entre los diferentes modelos de antenas que ofrece ZigBee, pudiendo algunos de ellos llegar hasta varios cientos de metros.

En lo que respecta a la interferencia de las redes inalámbricas existentes en la PSH con una red nueva, ZigBee es una buena opción para el desarrollo del proyecto. La red inalámbrica con mayor presencia en la PSH es la de comunicación WI-Fi, sin embargo, como se menciona en el marco teórico, la interferencia entre ZigBee y WI-Fi es prácticamente nula, siempre y cuando no se encuentren demasiado cerca una de otra. Tomando en cuenta la distancia a la que

se encontrarían las diferentes redes, puede esperarse que no se presente ningún tipo de interferencia entre ellas.

Una de las principales características de la tecnología ZigBee, es su robustez. Sin embargo, debido a los materiales de los que se componen los helióstatos, fue necesario realizar pruebas preliminares que ayudaran a determinar si la comunicación era lo suficientemente efectiva. Si la interferencia causada por los seguidores resultaba ser demasiada, se consideraría la opción de agregar nodos adicionales en la red, que mejoraran la comunicación, o de ser necesario, la elección de un tipo de tecnología inalámbrica diferente. Estas pruebas se describen más adelante.

La tecnología que se eligió para implementar junto con ZigBee, es por medio de microcontroladores basados en la plataforma Arduino. Esto porque existe una amplia variedad de dispositivos electrónicos que facilitan y permiten la integración de estas dos tecnologías y que son de fácil acceso, además de que las características y capacidades de procesamiento de estos microcontroladores, pueden satisfacer los requerimientos que se tomarán en cuenta en el campo.

### **4.3. Fase 3: Diseño de Nodos**

En base a las tecnologías seleccionadas para implementar en el campo, y tomando en cuenta las limitaciones de recursos que se tenían para el desarrollo de este proyecto, se seleccionaron los siguientes elementos para la elaboración de los nodos de comunicación:

#### **4.3.1. Arduino UNO**

El microcontrolador que se utilizó es el ATmega328. Arduino UNO es una placa electrónica que funciona en base a este microcontrolador y que permite su uso de una manera sencilla, ya que contiene todos los periféricos y elementos necesarios para que pueda ser utilizado de manera rápida. Cuenta con 14 entradas digitales o pines de entrada/salida (de los cuales 6 sirven como PWM), 6 entradas

analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera de ICSP (In Circuit Serial Programming método de programación directamente AVR), y un botón de reset (figura 4.4). Puede ser alimentado de un adaptador AC-DC, una batería o de una computadora utilizando un cable USB



**Figura 4.4.** Placa de Arduino UNO.

El ATmega328 tiene 32 MB (con 0,5 KB utilizados para el gestor de arranque). También dispone de 2 KB de SRAM y 1 KB de memoria EEPROM.

El Arduino tiene una serie de facilidades para comunicarse con una computadora, otro Arduino, u otros microcontroladores. La placa puede ser programada bajo el entorno de programación Arduino. El ATmega328 viene pre-quemado con un gestor de arranque que le permite cargar nuevo código a la placa sin el uso de un programador de hardware externo.

#### **4.3.2. Módulo XBee S2**

Este es el módulo XBee XB24-Z7WIT004, producido por *Digi International* (figura 4.5). Este radio pertenece a la segunda serie de ZigBee, la cual consta de un mejor hardware que la primera serie, y está diseñada para redes inalámbricas más amplias, mejorando la potencia de salida y el protocolo de datos respecto a versiones anteriores. Estos módulos permiten una comunicación muy simple y

confiable entre microcontroladores, computadoras y cualquier dispositivo con un puerto serie. La comunicación puede realizarse punto a punto, o a múltiples puntos a la vez.



**Figura 4.5.** Módulo XBee S2.

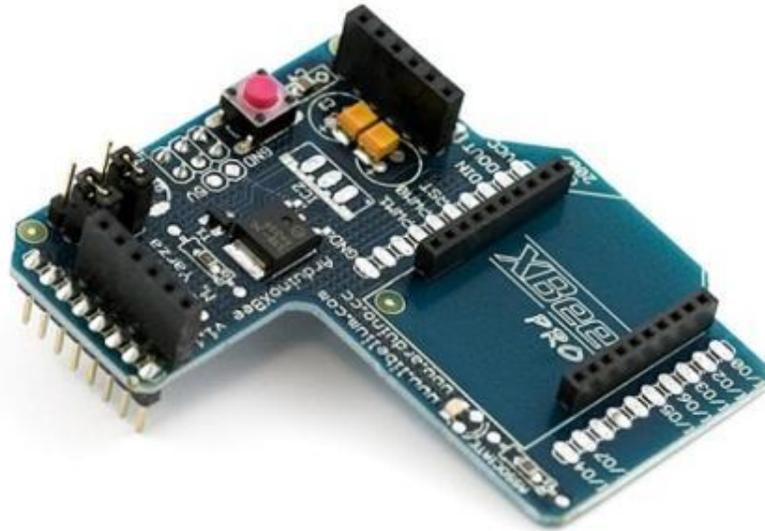
A continuación se muestran algunas de las características técnicas del XBee S2:

- 3.3V @ 40mA.
- 250kbps máxima velocidad de datos.
- Salida de 2mW (+3 dBm).
- 400 pies (120m) Alcance.
- Antena integrada.
- 6 de 10-bit ADC pines de entrada.
- 8 pines IO digitales.
- 128-bit de encriptación.
- Configuración local o por aire
- AT o conjunto de API de comandos

### 4.3.3. Arduino XBee Shield

El XBee shield para Arduino permite comunicar al entorno Arduino de forma inalámbrica usando ZigBee (figura 4.6). Este dispositivo permite una fácil integración del Arduino UNO con el XBee S2, ya que puede ser usado como

reemplazo del puerto serie/USB que se requiere para la configuración del radio ZigBee. También consta de conectores hembra que permiten utilizar las diferentes salidas disponibles en el Arduino UNO, lo que permite un mejor uso del microcontrolador.



*Figura 4.6. Arduino XBee Shield.*

#### **4.3.4. Integración de elementos**

Utilizando las tecnologías descritas se obtuvo un prototipo de los nodos para la comunicación inalámbrica que se pretende utilizar en el campo (figura 4.7). Estos permitirán la adquisición y el procesamiento de información gracias al Arduino UNO, así como la transferencia de estos datos por vía inalámbrica utilizando la tecnología ZigBee. De esta manera se llevarán a cabo pruebas preliminares en el campo de helióstatos, que permitan determinar qué tan viable es el uso de ZigBee en este entorno.



**Figura 4.7.** *Nodo para pruebas preliminares.*

Una de las principales razones por las que se eligió implementar estos dispositivos, debido a su facilidad de acceso, ya que eso permite crear un prototipo de manera rápida, y facilitaría la transición a otro tipo de tecnología en caso de que estas no sean viables y deba optarse por otra diferente.

#### **4.4. Fase 4: Pruebas Preliminares**

Para la realización de esta fase, se utilizaron los nodos descritos en la fase anterior, en los que se integraron las tecnologías seleccionadas, y se llevaron al campo de helióstatos para determinar la viabilidad de su implementación. Además de los dispositivos, también se utilizaron paquetes computacionales para su configuración y programación.

El software que se utilizó para configurar los radios XBee fue X-CTU (Digi, 2014), el cual permite especificar el funcionamiento que tendrán los nodos de la red inalámbrica, y también sirve para realizar mediciones de intensidad de señal y tasa de errores, al momento de enviar información entre radios (figura 4.8).

La configuración de los radios de una red ZigBee puede ser AT o API. En modo AT es más sencillo realizar la configuración de los radios, sin embargo es más limitada, pudiendo solamente enviar información a un solo nodo, el cual se define al momento de configurar el radio, lo cual implica que no puede cambiarse el destinatario de la señal que se envía. En modo AT, la única manera de que un

radio mande información a varios radios a la vez es si se configura para que envíe mensajes broadcast, el cual se manda a todos los radios dentro de la red, sin embargo esto requiere una gran cantidad de transferencia de información y puede afectar notablemente el desempeño de la comunicación.

Si los requerimientos de comunicación en la red no son muy altos, se puede utilizar el modo AT en los radios para facilitar su uso, sin embargo para aplicaciones más complejas es conveniente el modo API. La configuración de los radios en modo API es más compleja, ya que se requiere definir una mayor cantidad de parámetros que en modo AT, pero esto permite un mayor control y una mayor versatilidad de la red al momento de comunicarse los radios unos con otros, ya que es posible enviar información a diferentes nodos de la red desde un mismo radio sin necesidad de reconfigurarlo manualmente.

Existe una gran cantidad de parámetros que se pueden configurar en un radio Xbee, sin embargo solo fue necesaria la configuración de unos cuantos de ellos para lograr la comunicación en los nodos de la red. Los parámetros modificados en este proyecto, fueron:

- PAN ID: Relacionado al identificador de la red.
- Tasa de baudios: es el número de unidades de señal por segundo, es decir, la velocidad de transmisión entre radios.
- Dirección de destino: determina el radio específico al que se transmitirán los datos.
- Canal de transmisión: es una parte de la banda de frecuencia por la que se comunican los radios, todos los radios deben transmitir en el mismo canal para poder comunicarse.

El software Arduino se utiliza para programar el microcontrolador del Arduino UNO (figura 4.9). Este software permite una programación rápida y sencilla del microcontrolador de cualquier placa Arduino, desde cualquier computadora.

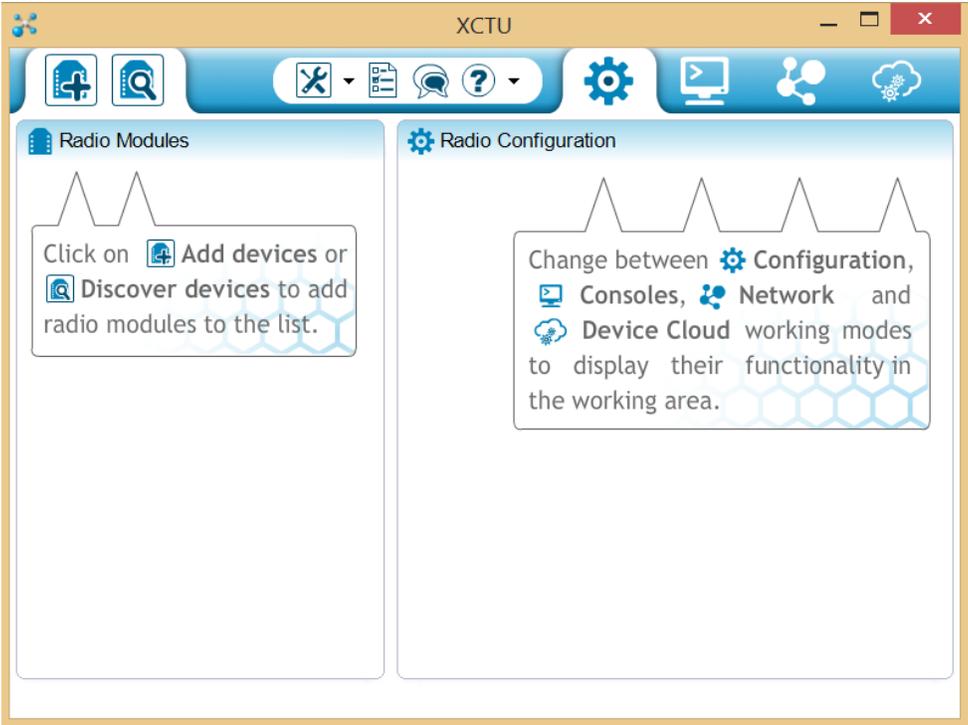


Figura 4.8. Software X-CTU.

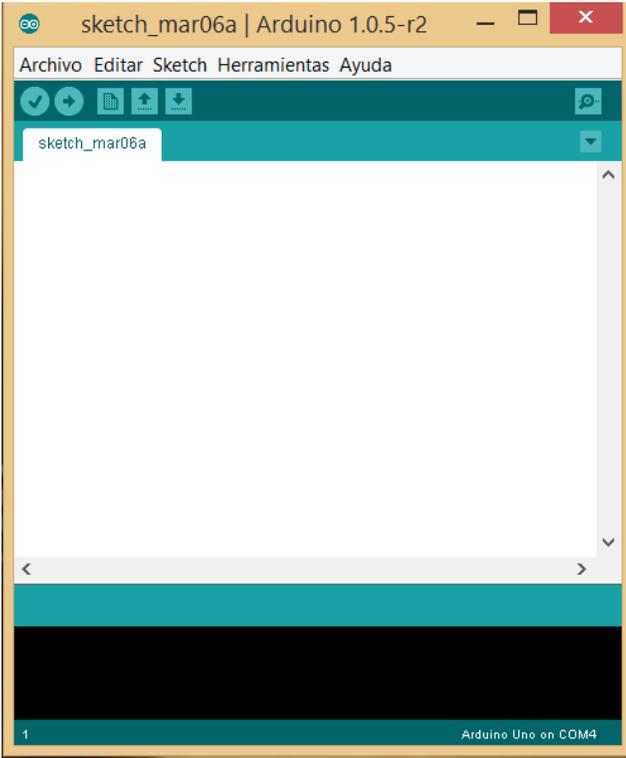
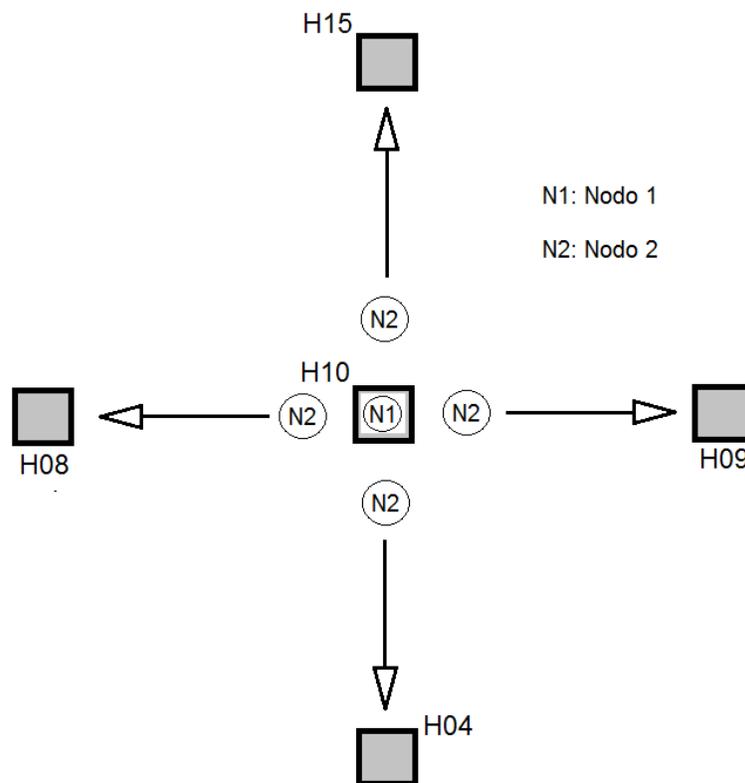


Figura 4.9. Software Arduino.

#### 4.4.1. Primera Prueba

Se decidió primeramente realizar una prueba sencilla en la que se hiciera una transmisión entre dos nodos, colocando uno de ellos en el helióstato H10 y el otro a una distancia cada vez mayor, en las 4 direcciones cardinales (figura 4.10). Esto para poder determinar que la comunicación con tecnología ZigBee fuera lo suficientemente eficiente en el campo, tomando en cuenta la interferencia que representan los helióstatos para la señal electromagnética.



**Figura 4.10.** Ubicación de los nodos para primera prueba.

El nodo colocado en el helióstato se configuró como coordinador de la red, mientras que el otro nodo se configuró como router. La prueba se realizó con los nodos tanto en modo API como en modo AT, para poder medir la intensidad de la señal y la tasa de errores en la comunicación.

Para esta prueba se utilizaron solamente los radios XBee, sin los microcontroladores, ya que el objetivo era solo analizar la comunicación y no el

procesamiento de datos. Debido a esto el software que se usó fue X-CTU, para realizar las mediciones de intensidad de señal, por medio del Indicador de Fuerza de Señal Recibida (RSSI), así como el porcentaje de envíos. Como se muestra en la figura 4.11, el programa X-CTU permitió enviar paquetes de datos entre nodos, proporcionando una gráfica en la que se muestran los valores que se van obteniendo en cuanto a la RSSI y al porcentaje de paquetes que fueron enviados exitosamente.



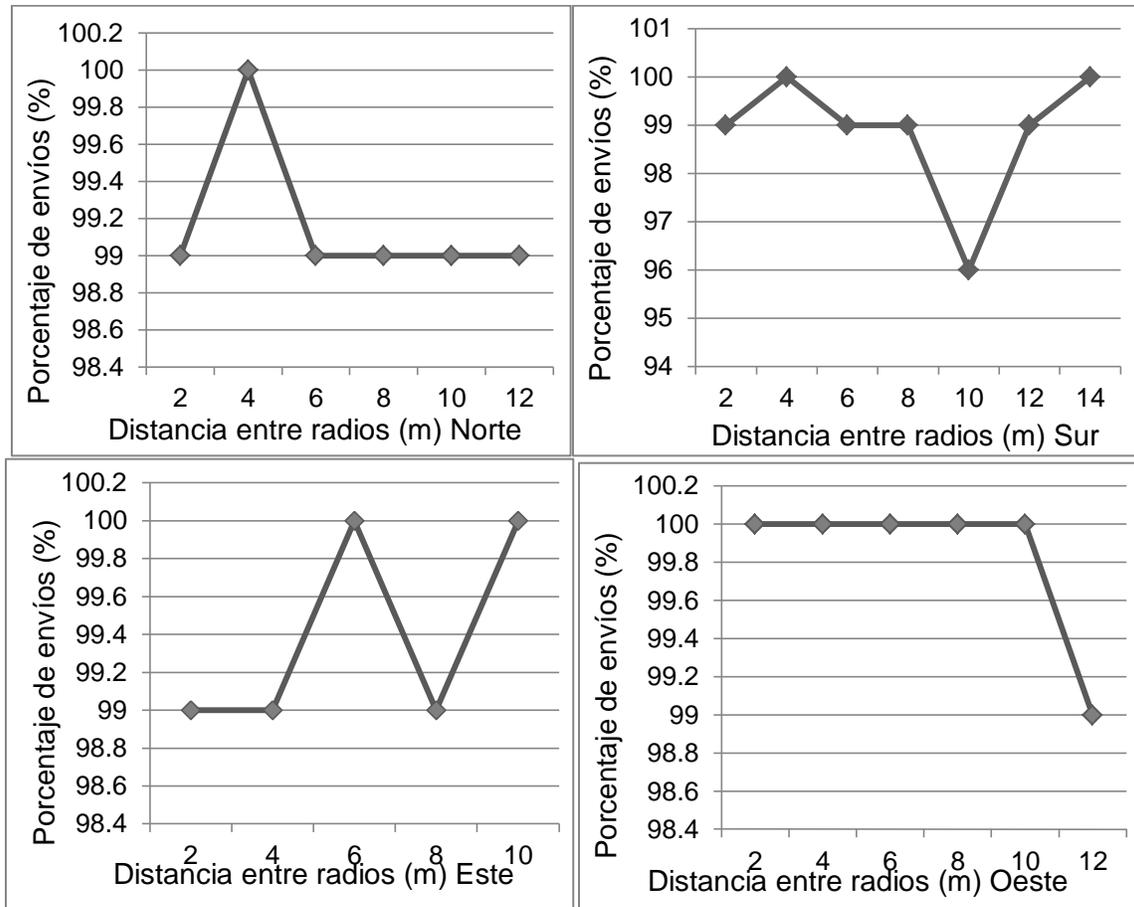
**Figura 4.11.** Mediciones en el software X-CTU.

Se enviaron 100 paquetes entre radios, colocando uno de ellos hacia el norte, sur, este y oeste del heliostato, donde se colocó el primer nodo, y aumentando la distancia 2 metros cada vez, para poder analizar la forma en que varía la señal conforme se incrementa la distancia que debe recorrer.

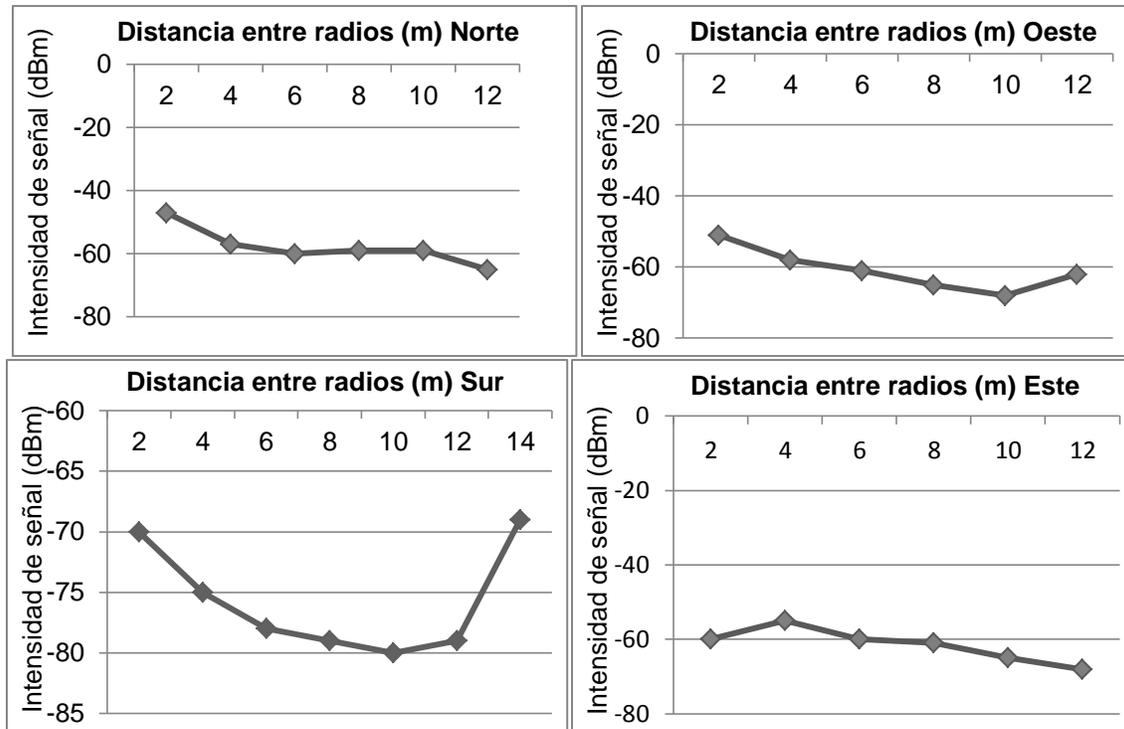
Como se mencionó anteriormente, el movimiento de los heliostatos al estar en funcionamiento puede afectar el grado de interferencia que tienen sobre la señal

de radio, por lo que para esta prueba se colocó el helióstato H10 en la posición más baja posible, con el espejo en posición vertical, lo cual representaría la mayor obstrucción para la comunicación inalámbrica.

Se tomaron los datos y estos se muestran resumidos en las gráficas de las figuras 4.12 y 4.13.



**Figura 4.12.** Mediciones del Porcentaje de envíos entre Radios.



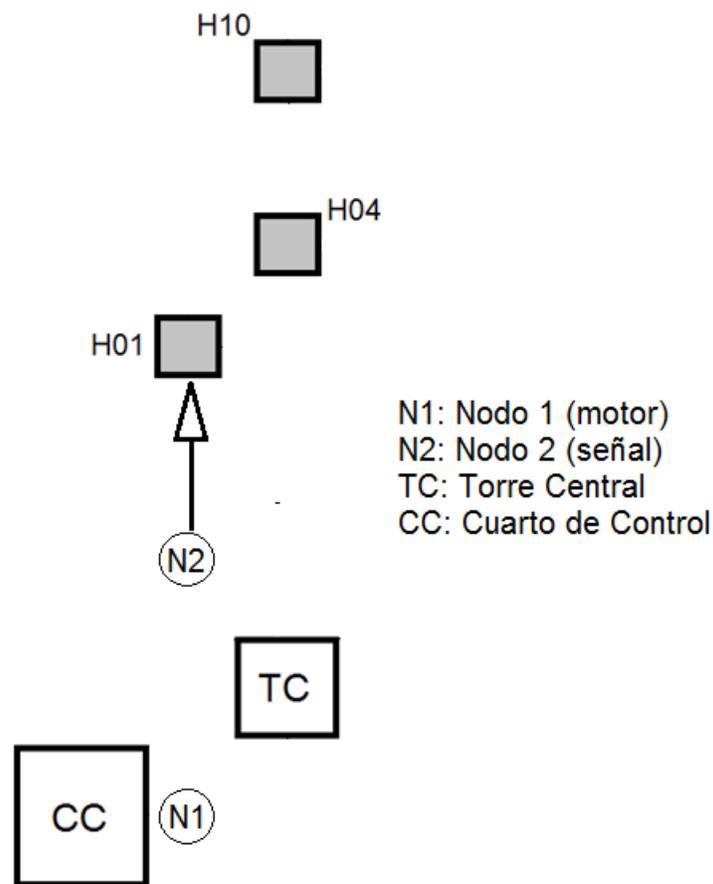
**Figura 4.13.** Mediciones de RSSI entre Radios.

Se puede ver en la figura 4.12, que los porcentajes de envío de datos siempre se mantuvieron muy cerca del 100%. Esto indica que los paquetes que no se recibieron correctamente, ya sea debido a la distancia o a la interferencia que sufre la señal, fueron mínimos.

En cuanto a la RSSI, se puede apreciar que los valores se encontraban por encima de los -80 dBm. En una red inalámbrica, el rango típico de potencia que se tiene es entre -50 y -80 dBm, por lo que podemos determinar que la comunicación entre los nodos se efectuó con valores aceptables de intensidad de señal. Como se observa en la gráfica, los valores más bajos que se obtuvieron fueron en dirección al sur. Esto se debe a la obstrucción del espejo del helióstato, que se encuentra apuntando hacia la torre central y que se colocó en posición vertical. Sin embargo podemos determinar que, aún con esta interferencia, la implementación de las tecnologías seleccionadas es viable, ya que se obtuvieron buenos resultados en las mediciones al transferir los datos.

#### 4.4.2. Segunda Prueba

Para la segunda prueba se añadió el microcontrolador a los nodos, con la finalidad de probar el envío de datos de este dispositivo a través de ZigBee. Se realizó una prueba similar a la anterior, transmitiendo información entre dos radios y alejándolos cada vez más. Esta vez se colocó uno de los nodos fuera del cuarto de control, mientras que el otro fue el que se movía, alejándolo del primero en dirección norte, hacia el helióstato H10 (figura 4.14); esto debido a que el objetivo final es lograr comunicación entre el cuarto de control y los helióstatos H04 y H10.

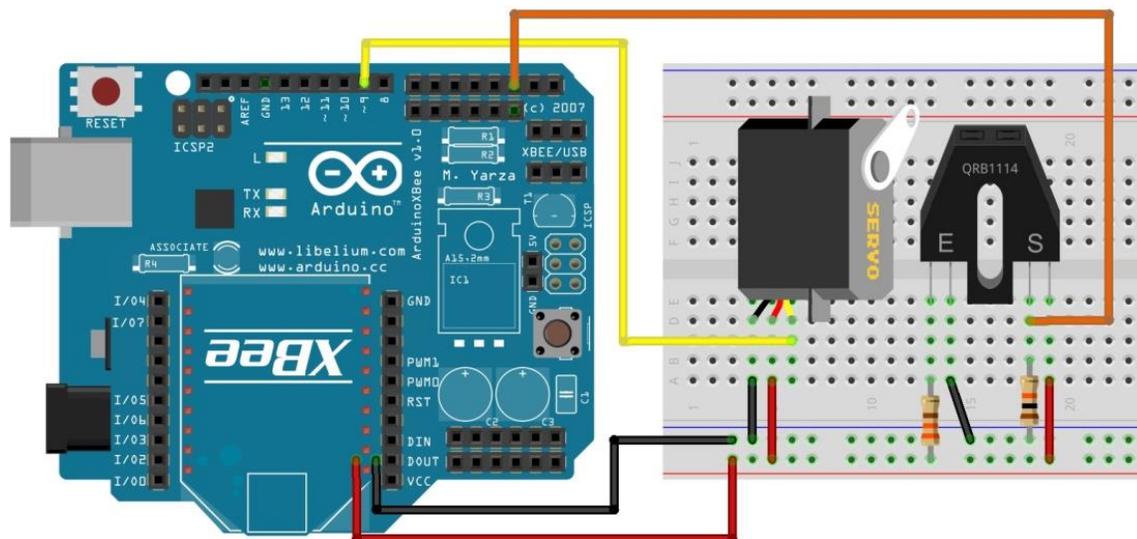


**Figura 4.14.** Ubicación de los nodos para segunda prueba.

Para esta prueba se configuró el radio fuera del cuarto de control como coordinador y el otro como router, ambos en modo AT, ya que solamente se requería que se comunicaran entre sí.

Uno de los factores que se deseaba analizar en esta prueba, es el ruido que puede surgir en la comunicación inalámbrica entre los nodos. Para esto se añadió a la prueba un servomotor sencillo, el cual se alimentó de la salida de 5 Volts del Arduino UNO, y que se controló por una salida PWM del mismo Arduino. De esta manera, al enviar una señal de control desde un radio, el servomotor en el segundo radio realiza el movimiento respectivo de acuerdo a la señal recibida, sin embargo, si se tuviera ruido en la señal inalámbrica, el motor realizaría movimientos errados o imprecisos, lo cual permitiría determinar si el ruido en la señal es un factor que pueda afectar en el desempeño de la red de comunicación.

Para realizar lo anterior, se implementó un circuito en el que el movimiento del servomotor fuera detectado por un sensor óptico (figuras 4.15 y 4.16), el cual a su vez mandara la información a una computadora, para poder después detectar cualquier falla o variación en el movimiento que se espera que realice el motor.



**Figura 4.15.** Conexión física para segunda prueba (nodo motor).

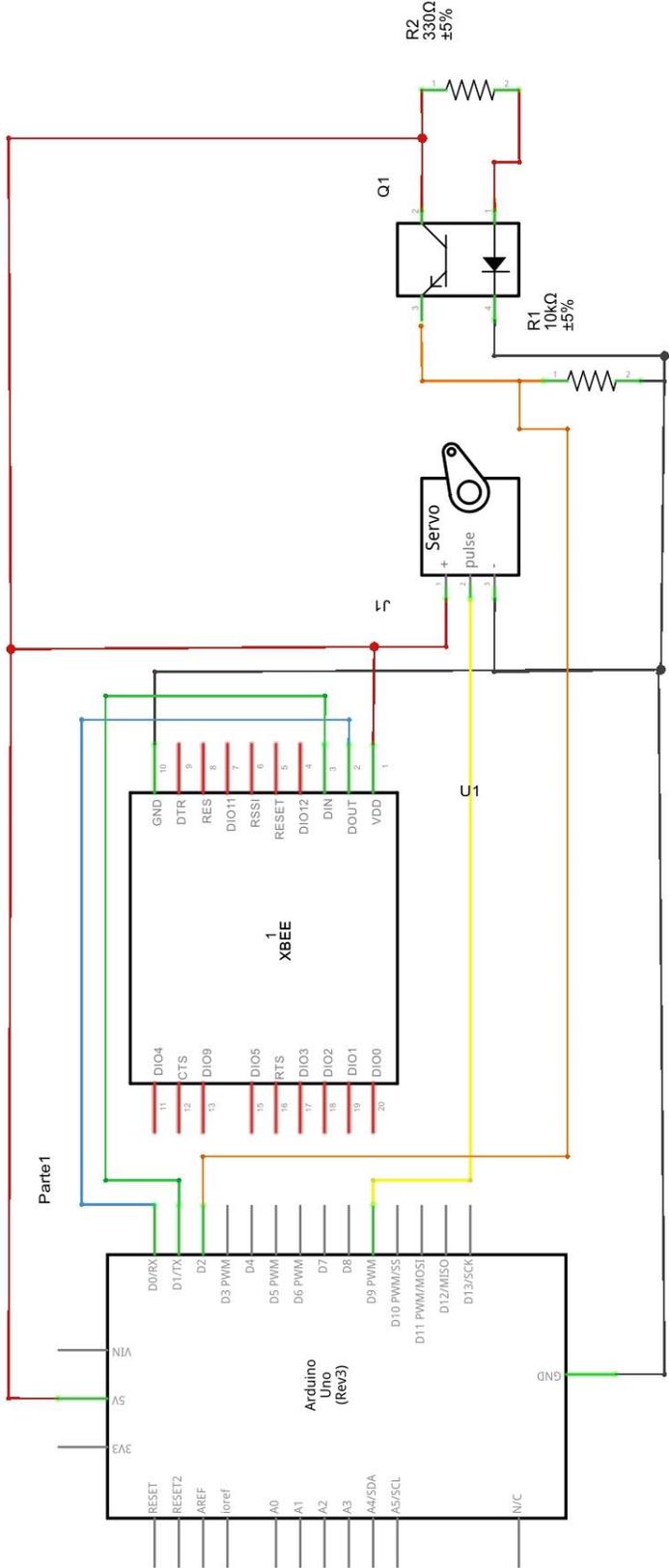
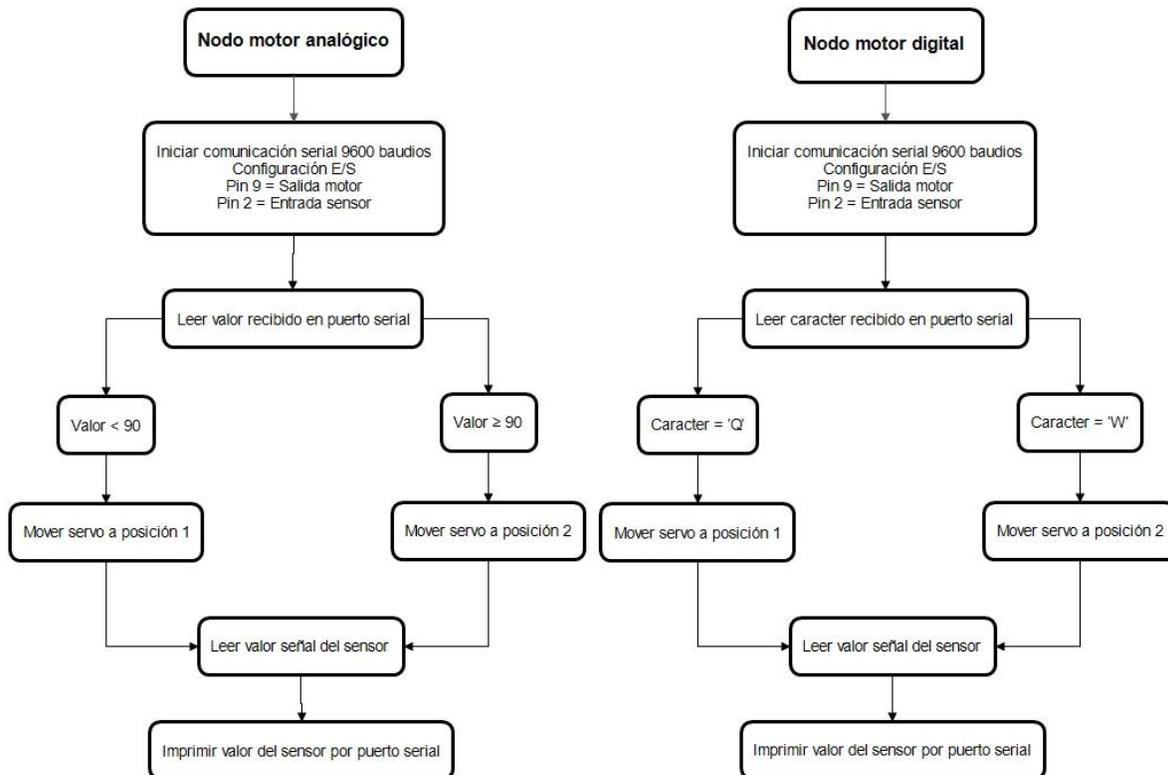


Figura 4.16. Diagrama simplificado de conexión para segunda prueba (nodo motor).

En la figura 4.17 se muestran los algoritmos simplificados de los programas usados en el microcontrolador para el control del motor, tanto en el caso de la señal analógica como la digital. El servo se mueve en dos posiciones, a base de la señal recibida del otro nodo. El sensor detecta la posición del servo y la manda por el monitor serial a la computadora.



**Figura 4.17.** Algoritmos para segunda prueba (nodo motor).

El nodo con el servomotor y el sensor se colocó fuera del cuarto de control, el cual se encuentra a una distancia de aproximadamente 30 metros al sur y 7.5 metros al oeste del blanco lambertiano. La señal para el movimiento del motor se envió del segundo nodo. Esta señal se generó de dos formas distintas, primero siendo generada directamente por el microcontrolador, y posteriormente generándose en base a la variación creada por un potenciómetro usado como sensor de posición, lo cual permitiría considerar el comportamiento de la comunicación con una señal generada tanto de manera digital como analógica. En las siguientes figuras se muestran los algoritmos de los programas utilizados para la generación de la señal y los diagramas de conexiones en el nodo.

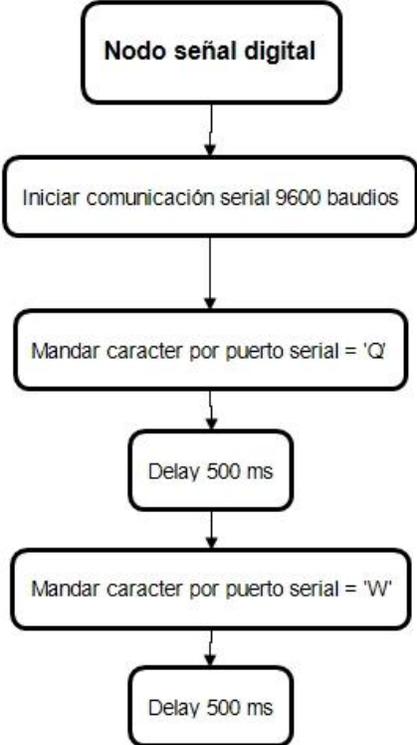


Figura 4.18. Algoritmo para segunda prueba (nodo señal digital).

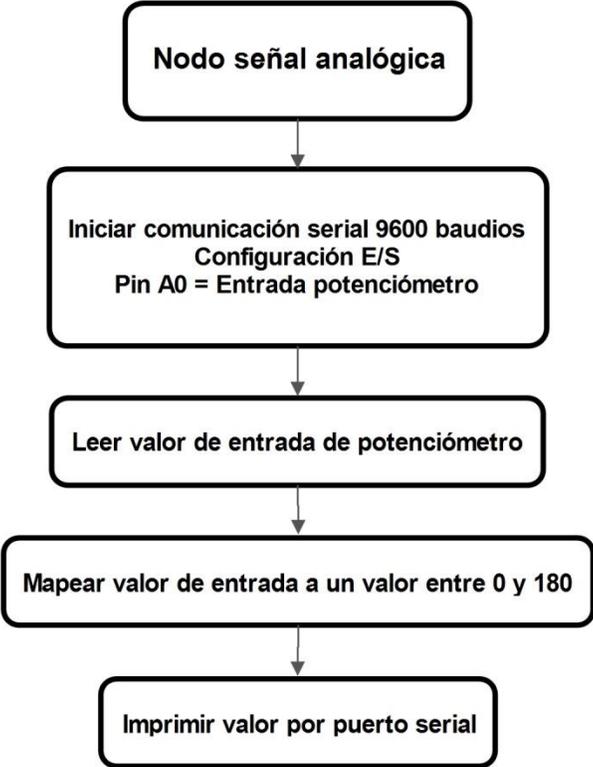
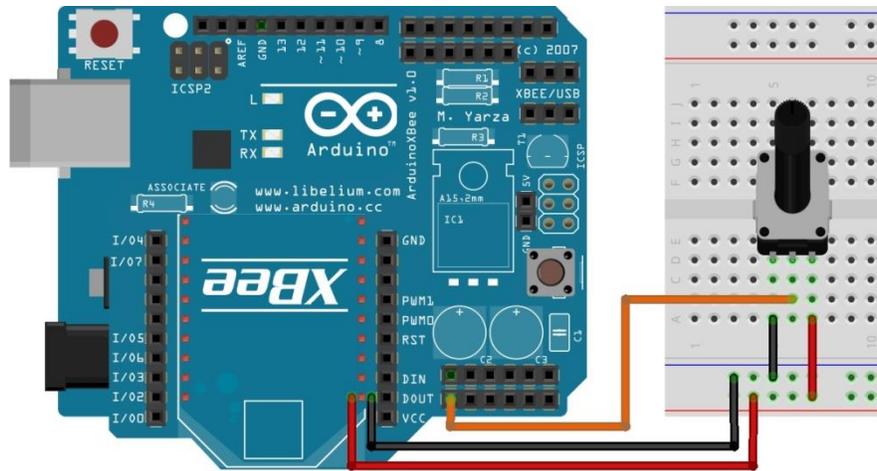
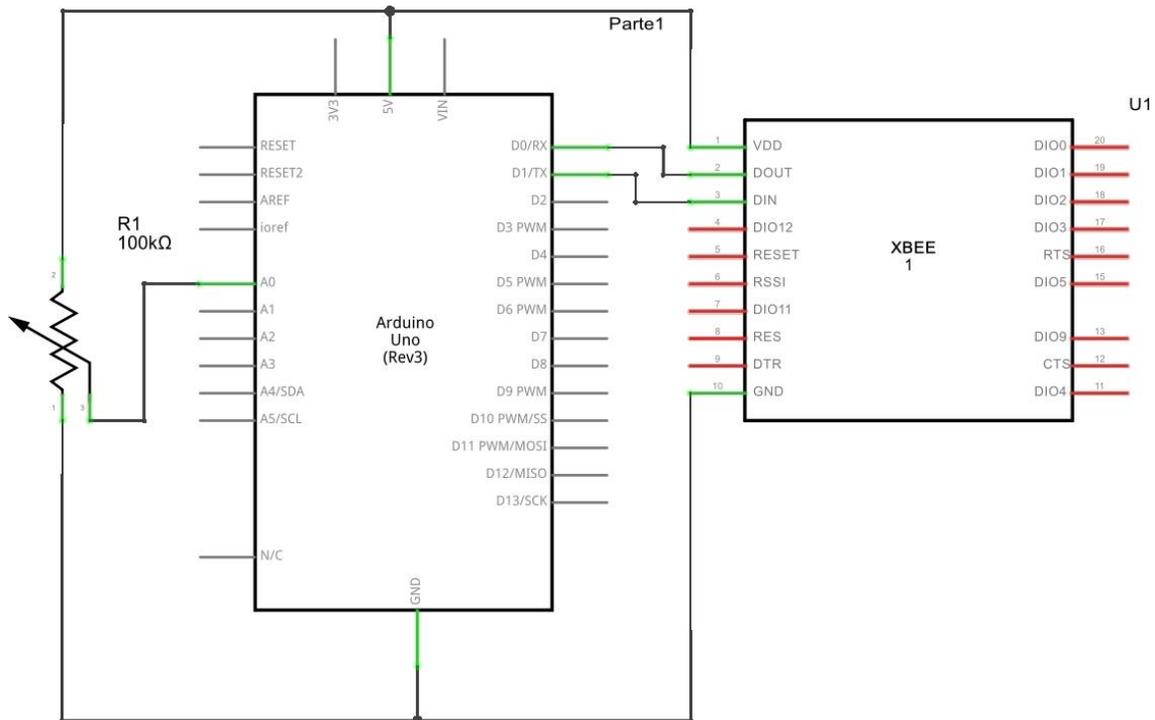


Figura 4.19. Algoritmo para segunda prueba (nodo señal analógica).



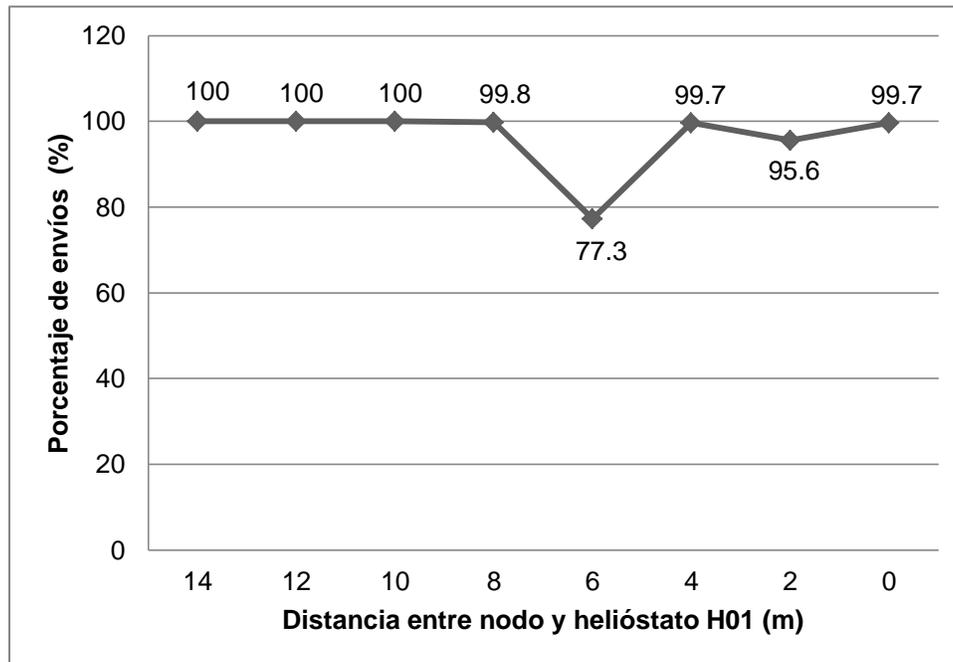
**Figura 4.20.** Conexión física para segunda prueba (nodo señal analógica).



**Figura 4.21.** Diagrama simplificado de conexión para segunda prueba (nodo señal analógica).

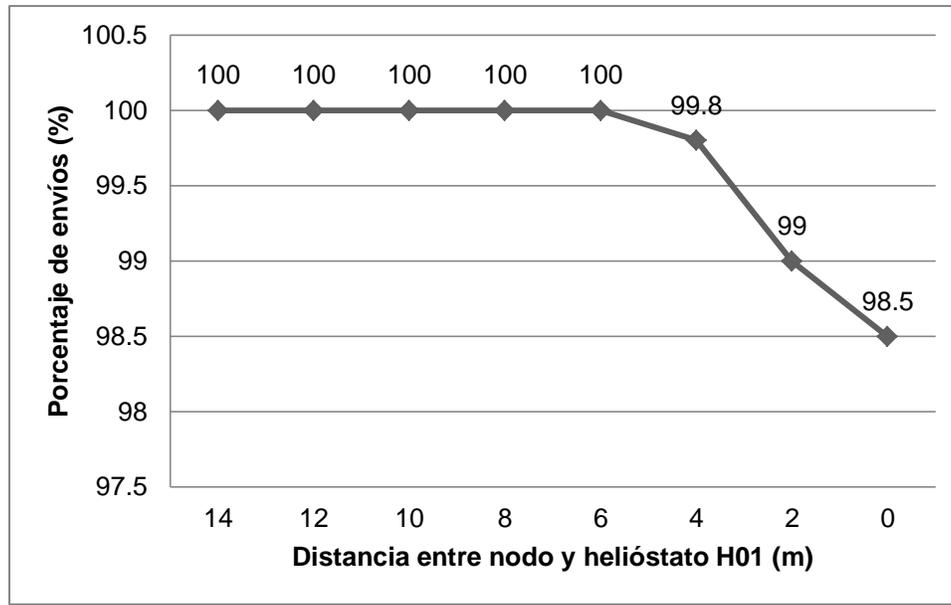
Como se mencionó, el segundo nodo fue colocándose a una distancia creciente en dirección norte, hacia el nodo H10, desde donde se enviaron las señales de control de manera continua. Los resultados que se obtuvieron, mostraron que la comunicación no falló en ningún momento, hasta llegar a una distancia de 8 metros al sur del helióstato H01 (figura 4.22), es decir, que hasta antes de este

punto, todos los datos enviados al primer nodo fueron recibidos de manera efectiva. A partir de ese punto en adelante, algunos de los datos comenzaron a perderse, debido a la distancia y a la interferencia que presentan el heliostato H01 y la torre solar.



**Figura 4.22.** Porcentaje de envíos segunda prueba (señal generada por microcontrolador).

En la gráfica se muestra el porcentaje de envíos exitosos de datos entre nodos. En cada una de las posiciones se enviaron 1000 datos para el movimiento del servomotor. Se puede apreciar que a una distancia mayor de 8 metros del heliostato, no se perdió ningún dato, es decir que los 1000 datos fueron recibidos. De los 8 metros en adelante, se comenzaron a presentar datos que no fueron transmitidos efectivamente. En el caso de la prueba en los 6 y 2 metros se presentó una cantidad de fallas considerablemente mayor, lo cual se debió a interferencia provocada por personas y equipos que se encontraban entre los dos nodos, trabajando en otros proyectos de la PSH, al momento de llevar a cabo estas pruebas.

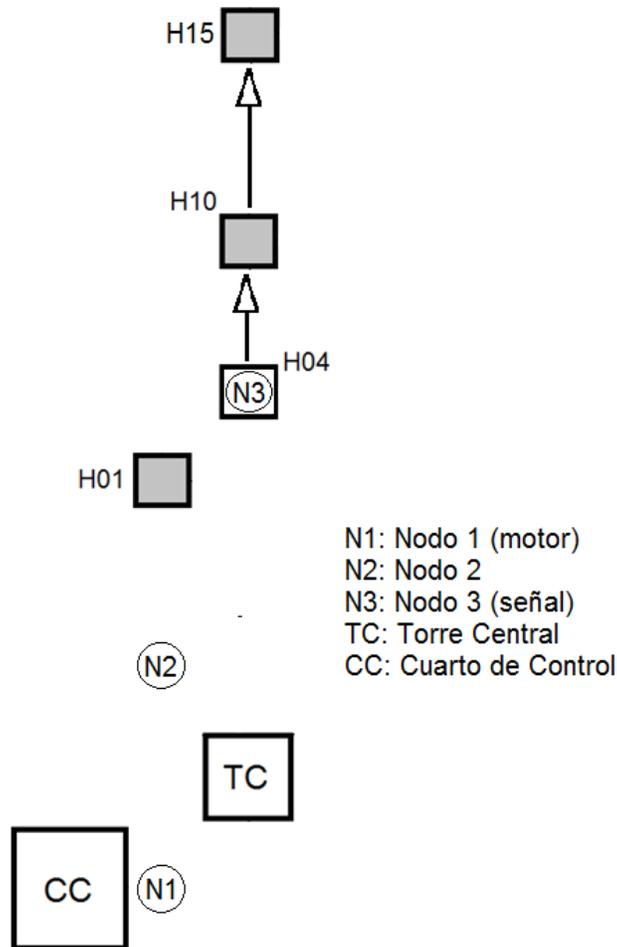


**Figura 4.23.** Porcentaje de envíos segunda prueba (señal generada por potenciómetro).

Como se mencionó, se realizó esta prueba con señales basadas en datos tanto analógicos como digitales. En la figura 4.23 se muestran los resultados de la prueba al mandar los datos analógicos. Al igual que con los datos de la prueba digital, no se presentó ninguna falla en la comunicación hasta después de cierta distancia entre los nodos. En este caso, algunas señales enviadas no fueron recibidas cuando el nodo se colocó a una distancia menor de 6 metros del heliostato H01, sin embargo fue una cantidad mínima de datos la que falló al enviarse.

#### 4.4.3. Tercera Prueba

El siguiente paso en las pruebas para la determinación de la efectividad de los nodos, consistió en agregar un nodo más a la comunicación, con la finalidad de aumentar la distancia de transmisión del sistema. Esta tercera prueba fue similar a la anterior, controlando un servomotor con una señal generada desde otro nodo, con la única diferencia siendo la adición de un nuevo nodo, colocado al norte de los otros dos (figura 4.24).



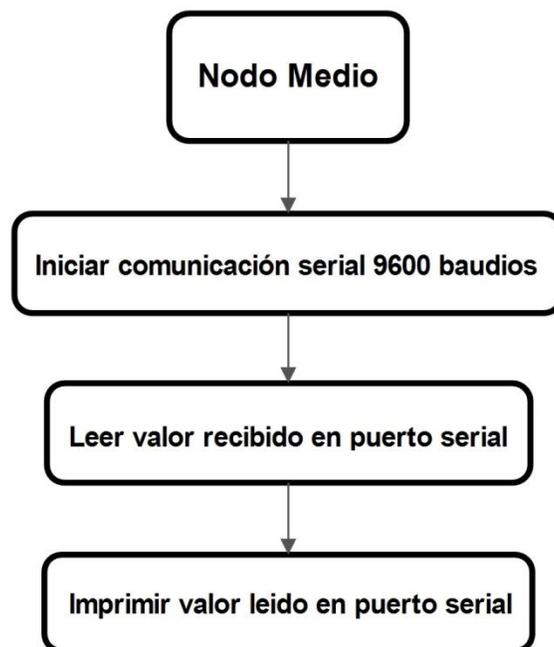
**Figura 4.24.** Ubicación de los nodos para tercera prueba.

El radio que se configuró como coordinador para esta prueba fue nuevamente el que se colocó fuera del cuarto de control. Los otros dos radios se configuraron como routers, esto para que pudieran mantenerse como dispositivos de función completa (FFD) y evitar problemas al momento de la comunicación, por lo cual también se volvieron a configurar en modo AT, el cual aún fue suficiente para llevar a cabo esta prueba.

Al igual que antes, el nodo con el circuito del servomotor y sensor se colocó fuera del cuarto de control. El siguiente nodo fue colocado a una distancia de 8 metros al sur del helióstato H01, basándose en los resultados obtenidos en la prueba anterior, ya que hasta este punto la comunicación entre dos nodos fue efectiva. El tercer nodo, el cual se utilizó para la generación de la señal de control, fue

moviéndose nuevamente en dirección norte, iniciando en el helióstato H04 y terminando cerca del H15.

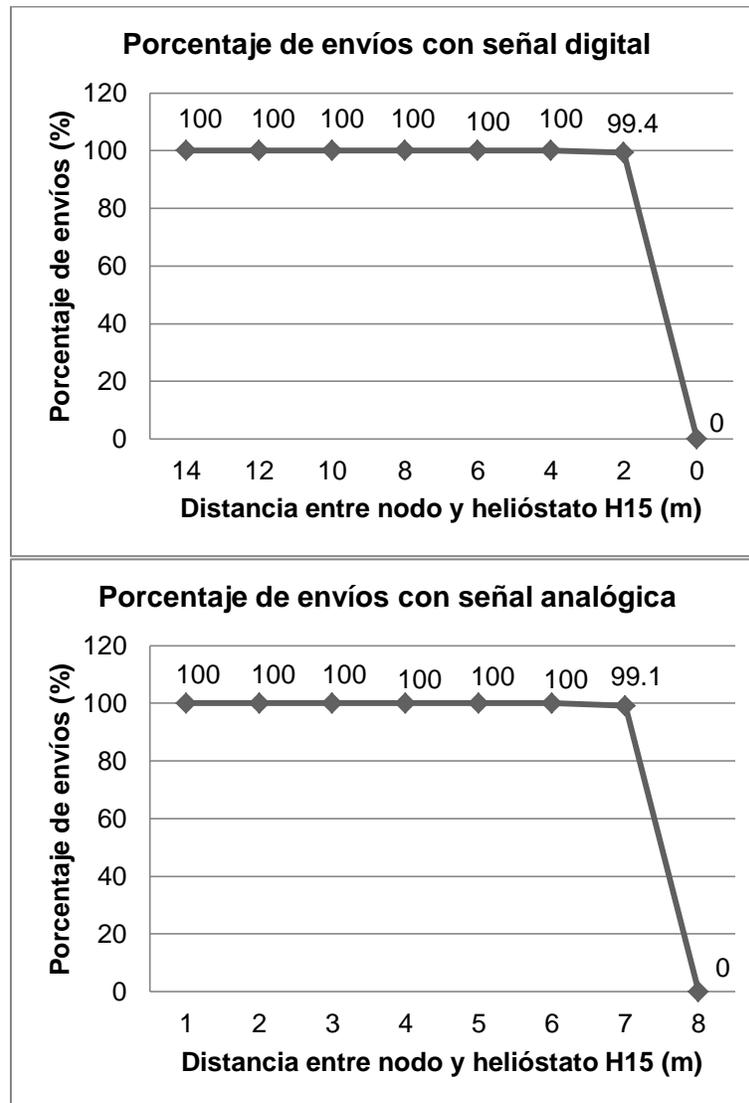
Las conexiones físicas y los programas usados en el nodo del motor y el de la señal, fueron los mismos utilizados en la segunda prueba, tanto para señal digital como analógica, ya que sirvieron de igual manera para esta prueba. En el caso del nodo 2, la conexión física consistió simplemente del nodo integrado con el microcontrolador y la antena ZigBee. La figura 4.25 muestra el algoritmo usado en este nodo, cuya función consistía simplemente en leer la señal del tercer nodo y reenviarla al nodo del motor.



**Figura 4.25.** Algoritmo para tercera prueba (nodo medio).

Agregando un tercer nodo al sistema, pudo notarse un gran incremento en la distancia en la que se tiene una comunicación efectiva entre el nodo generador de señal y el que controla el motor, ya que esta comunicación no presentó ninguna falla hasta estar a dos metros al sur del helióstato H15, es decir, varios metros al norte del H10. Como se ve en la figura 4.26, al colocar el nodo que manda la señal justo en el helióstato H15, se pierde por completo la comunicación entre este y los demás nodos. Esto se debe a que en este punto es necesario tomar en cuenta la

gran interferencia que presentan el espejo y la estructura del seguidor H15, lo cual sumado a la obstrucción de los demás seguidores impide que se transfiera la señal. El hecho de que en este punto no se tenga comunicación no afecta en este proyecto, ya que el helióstato más alejado que se pretende comunicar es el H10, en el cual se tiene una excelente comunicación entre los tres nodos.



**Figura 4.26.** Porcentaje de envíos tercera prueba.

Los resultados obtenidos muestran que es viable la implementación de los nodos diseñados, para el establecimiento de comunicación en el campo de seguidores solares, ya que la transferencia de datos no presentó fallas entre la UCC y los

helióstatos seleccionados para este proyecto. Por lo tanto puede continuarse con la siguiente fase de la metodología propuesta.

## **4.5. Fase 5: Instrumentación de Sensores**

Basados en la metodología, antes de pasar a realizar las pruebas finales al sistema de comunicación propuesto, es necesario seleccionar e implementar en el campo algún tipo de sensores, los cuales permitan verificar si efectivamente es viable usar la comunicación inalámbrica para obtener información de los seguidores en el campo, que permita mejorar el desempeño de la PSH.

En la fase anterior de la implementación, las pruebas preliminares que se realizaron al sistema de comunicación mostraron resultados muy favorables. La interferencia en la comunicación de los nodos causada por los helióstatos, fue mucho menor de lo que se esperaba. Esto permitió que se obtuvieran valores altos en cuanto a intensidad de señal y tasa de envío de datos. Estos resultados apoyan la hipótesis de que es posible implementar el sistema de comunicación inalámbrico en la PSH, basado en los nodos diseñados.

Para la siguiente fase de la metodología, se tenía contemplada la posibilidad de implementar algunos sensores en los seguidores, desde los cuales enviar datos hacia el cuarto de control, y al mismo tiempo enviar señales de control desde el cuarto, que permitieran manipular los helióstatos. Sin embargo esto no fue posible ya que no se pudo interferir con las conexiones ya establecidas para la comunicación y control de los seguidores. Esto debido a que se encontraban en uso para otros proyectos, por lo que no se podía prescindir de ellos, además de que se corría el riesgo de causar alguna falla en el sistema para el control de los helióstatos.

Debido a lo anterior, se optó por probar la transferencia de datos de una manera más sencilla, pero que permitiera igualmente determinar si se tiene un flujo de información suficiente en el sistema de comunicación. Para esto se utilizaron servomotores y sensores para la prueba final, los cuales representan los motores

y sensores de los helióstatos. Esto permitió probar la transferencia de información de la misma manera que si se hubieran instrumentado directamente los seguidores.

En la siguiente fase se describen los nodos y componentes utilizados, así como la manera en que se llevó a cabo la prueba.

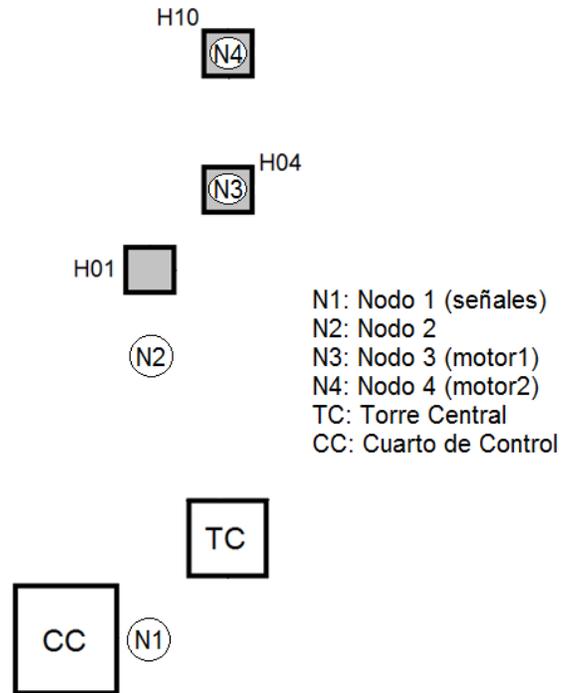
#### **4.6. Fase 6: Pruebas Finales**

Al realizar las pruebas preliminares al sistema de comunicación propuesto, se logró establecer comunicación inalámbrica entre nodos desde el cuarto de control hasta el helióstato H10, lo cual apoya la viabilidad de la implementación de este sistema. Como se mencionó anteriormente, se pretendía lograr establecer comunicación entre el cuarto de control y los helióstatos H04 y H10, por lo que esto se estableció como el objetivo de esta última prueba.

La figura 4.27 muestra la distribución de los nodos que se utilizó para la prueba final. El primer nodo, colocado fuera del cuarto de control, fue el que se utilizó para generar las señales de control para los motores en los otros nodos. Al igual que en la última prueba preliminar, se colocó un segundo nodo a 8 metros del helióstato H01, cuya función es reenviar la señal del primer nodo a los nodos 3 y 4. Los dos últimos nodos se colocaron en los seguidores H04 y H10 respectivamente, los cuales servirían para controlar la posición de un servomotor, detectar dicha posición y enviar la información de regreso al primer nodo.

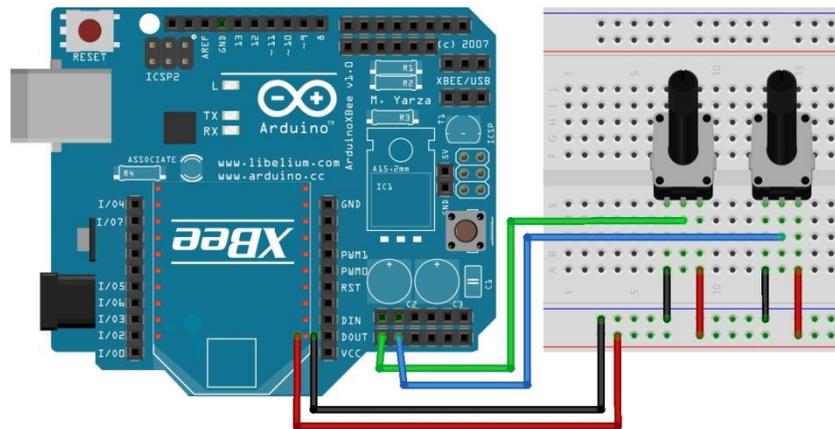
Debido a que en esta prueba se requería de retroalimentación, fue necesario configurar los radios en modo API, para que pudieran comunicarse con más de un nodo a la vez. El coordinador de la red fue el nodo fuera del cuarto de control, mientras que los demás se configuraron como routers. Los requerimientos de esta prueba también hicieron que fuera necesario que el programa cargado a los microcontroladores fuera bastante más complejo, ya que desde este programa se realizó no solo el procesamiento de los datos, sino también el direccionamiento de

la transmisión de información, es decir, hacia que nodo se enviarían los datos dependiendo de su origen.



**Figura 4.27.** Distribución de nodos para prueba final.

La conexión física del primer nodo se muestra en las figuras 4.28 y 4.29, mientras que en la figura 4.30 se presenta el algoritmo del programa utilizado en este mismo nodo.



**Figura 4.28.** Conexión física para prueba final (nodo señales).

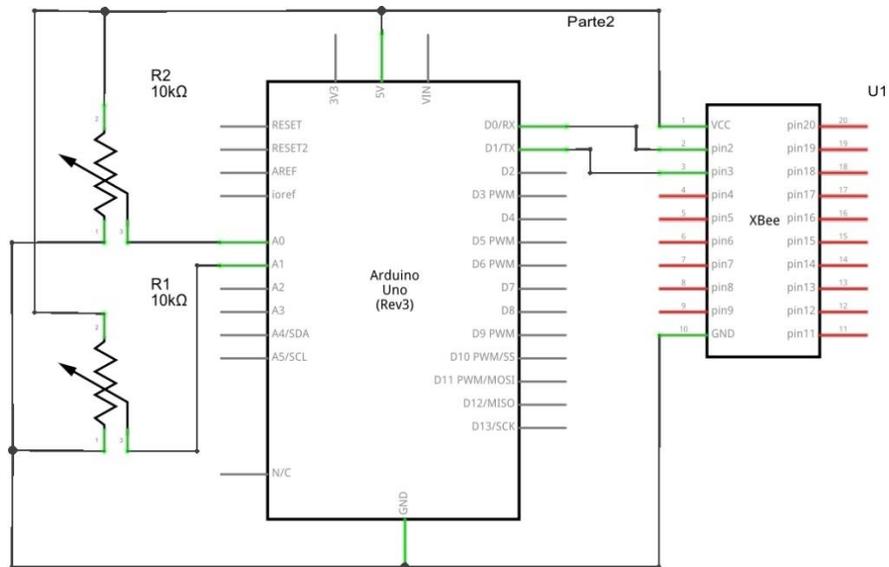


Figura 4.29. Diagrama simplificado de conexión para prueba final (nodo señales).

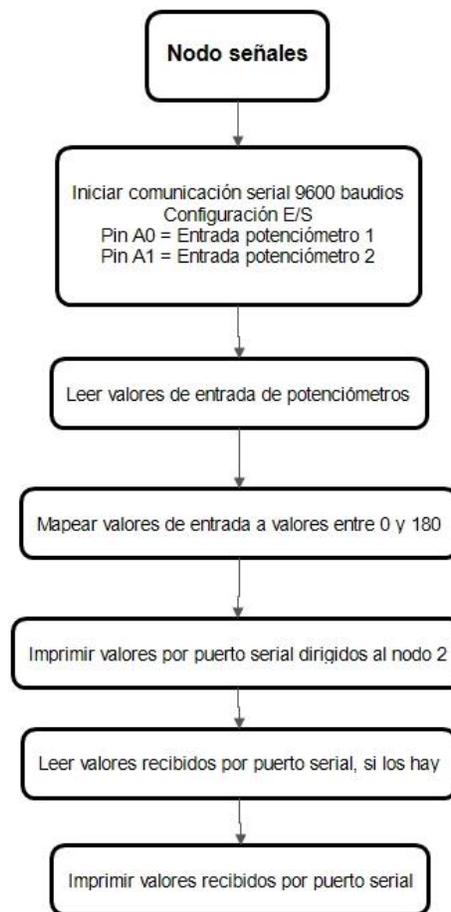


Figura 4.30. Algoritmo para prueba final (nodo señales).

Desde el nodo colocado fuera del cuarto de control se enviaron las señales para el movimiento de los servomotores en los nodos puestos en los helióstatos, por medio de un par de potenciómetros, uno para cada motor.

A diferencia de las pruebas anteriores realizadas, en esta se estableció comunicación en ambas direcciones, es decir, que no simplemente se envió la señal a los motores para su movimiento, sino que además se midió el movimiento de los mismos y se mandó esta información de regreso al primer nodo. De esta manera se pudo corroborar si los servomotores se movían de acuerdo a la señal de control, además de que sirvió para validar la capacidad de transferencia de datos en el sistema de comunicación.

El segundo nodo consistió solamente del microcontrolador y la antena ZigBee integrados, debido a que su función fue la retransmisión de las señales enviadas entre los nodos en los helióstatos y en el cuarto de control. En la figura 4.31 se muestra el algoritmo del programa implementado en este nodo, mediante el cual se recibía la señal proveniente del primer nodo y se enviaba a los últimos dos. De la misma forma, este nodo recibía y reenviaba también la retroalimentación de los nodos de los motores, mediante la cual se enviaba la información de la posición de los servos hacia el primer nodo.

Para poder detectar y medir la posición de los servos mientras son controlados, se les acopló a cada uno un potenciómetro de tal manera que al girar el motor el potenciómetro girara de la misma forma, para poder utilizarlo como sensor de posición angular de los motores, en base a la variación de la señal del potenciómetro. Las conexiones físicas de estos nodos se muestran en las figuras 4.32 y 4.33, y el algoritmo utilizado para estos nodos está en la figura 4.34.

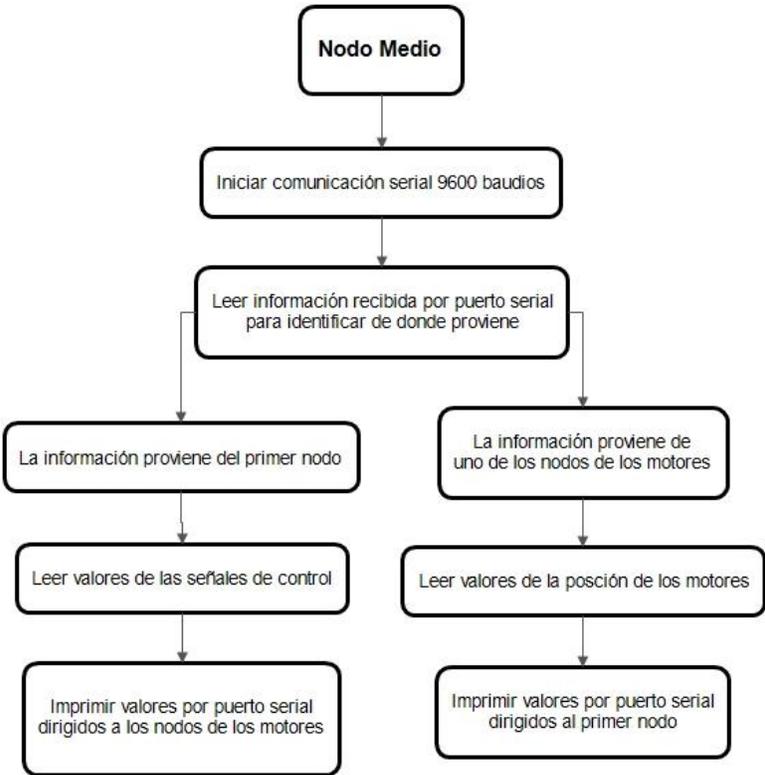


Figura 4.31. Algoritmo para prueba final (nodo medio).

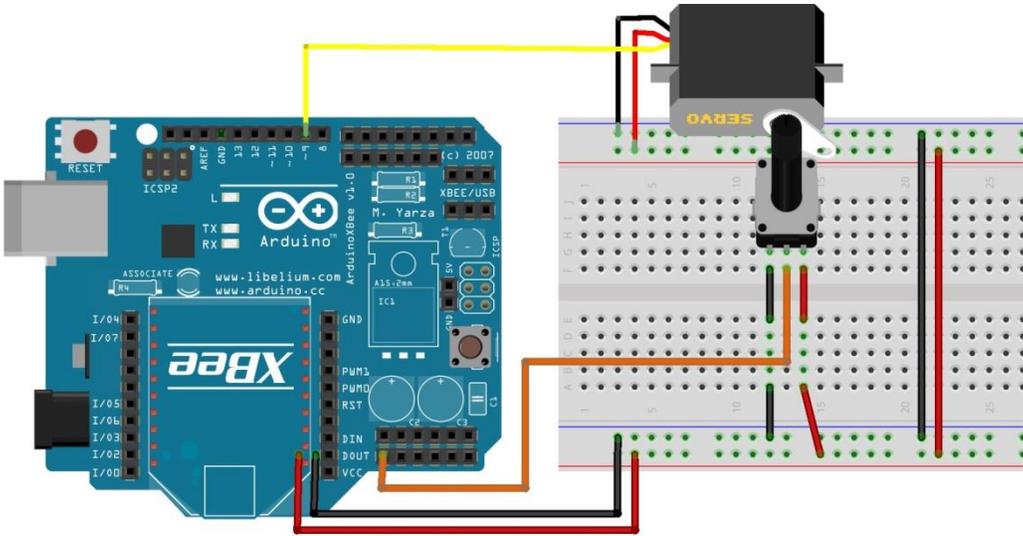


Figura 4.32. Conexión física para prueba final (nodos motor).

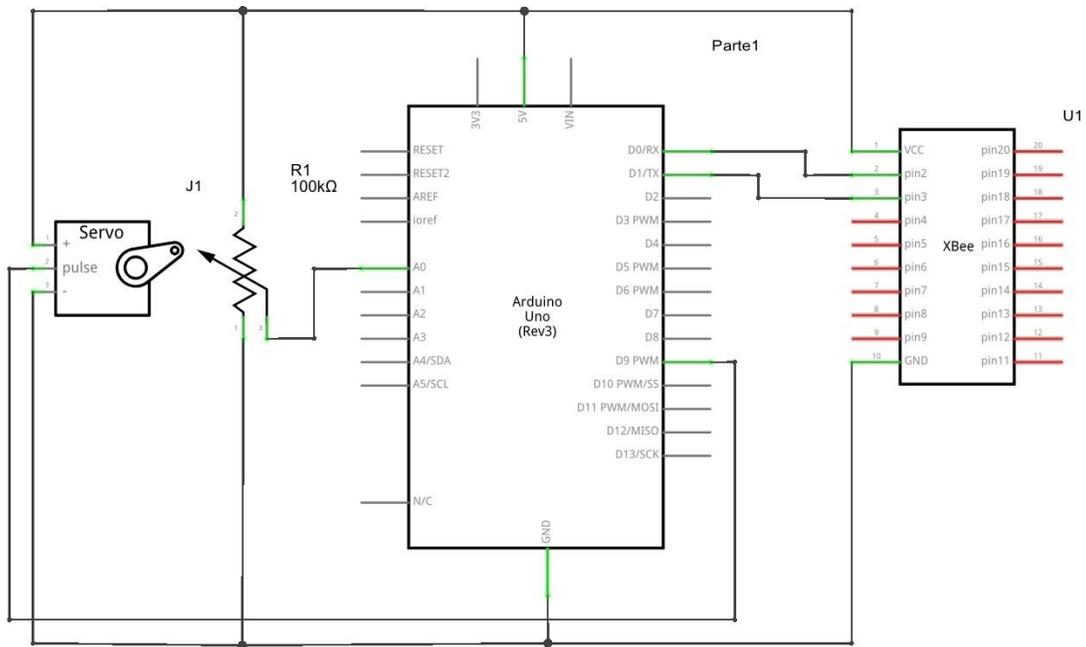


Figura 4.33. Diagrama simplificado de conexión para prueba final (nodos motor).

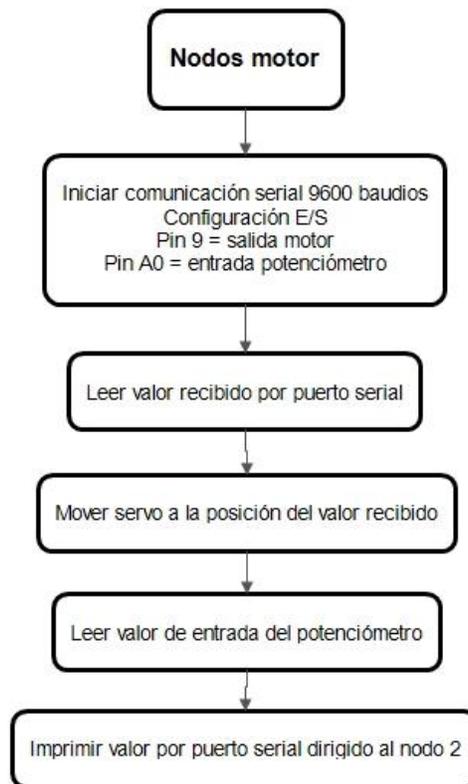


Figura 4.34. Algoritmo para prueba final (nodos motor).

La prueba final se llevó a cabo de acuerdo a la distribución y configuración de los nodos que se acaba de describir. De esta manera se logró controlar los motores en los helióstatos H04 y H10 desde el cuarto de control, además de obtener retroalimentación de la posición de los motores al mismo tiempo que eran controlados, para poder verificar la eficiencia de la comunicación. Los resultados obtenidos en esta prueba se pueden ver representados en la figura 4.35. Estas gráficas muestran los datos que se obtuvieron del primer nodo, para poder ver la manera en que varió el movimiento de cada motor, comparándolo con la señal de control que se envió desde el primer nodo.

Se puede ver fácilmente en las gráficas que los motores se movieron de la manera esperada, de acuerdo a la señal de control que se les enviaba. Esto gracias a que, como se vio en las pruebas preliminares, no se pierden datos en la comunicación entre nodos colocados como se hizo en esta prueba.

Se puede ver que se tiene un desfase entre los datos de la señal y de la posición. La causa de esto es la forma en que se programaron los nodos en el sistema. Los datos de la gráfica son los que se obtuvieron del primer nodo, el cual se programó para leer el valor de retroalimentación de los motores justo después de haber enviado el valor de la posición a la que se desea que se muevan, es decir que se lee el valor de la posición anterior, no de la nueva, ya que esta señal no ha llegado al motor aún. La otra razón de desfase entre las señales, es el tiempo que se tarda el motor en moverse a la posición deseada después de haber recibido la señal de control, por lo que el valor que se obtiene de la posición del motor puede ser un poco diferente.

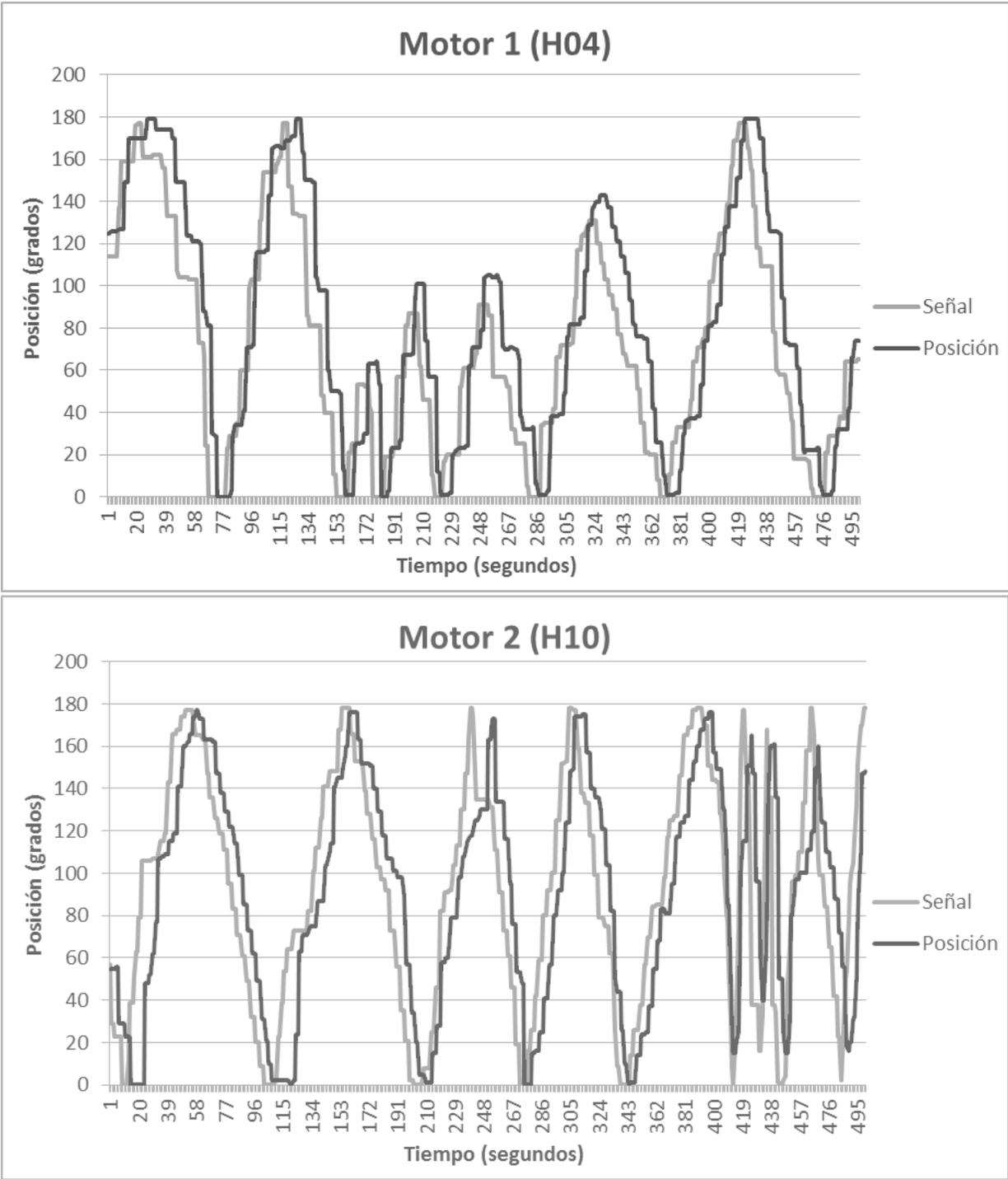


Figura 4.35. Movimiento de los motores en base a la señal de control.

Prueba 1				
Dist. ÷ Radios	Norte	Sur	Este	Oeste
	%E RSSI	%E RSSI	%E RSSI	%E RSSI
2	99% -47	99% -70	99% -60	100% -51
4	100% -57	100% -75	99% -55	100% -58
6	99% -60	99% -78	100% -60	100% -61
8	99% -59	99% -79	99% -61	100% -65
10	99% -59	96% -80	100% -65	100% -68
12	99% -65	99% -79	100% -68	99% -62

**Tabla 4.1** Resultados de primera prueba en porcentaje de envíos (%E) e intensidad de señal (RSSI).

Prueba 2		
Dist. ÷ nodo y H01	% Envíos	
	Digital	Analógica
14	100%	100%
12	100%	100%
10	100%	100%
8	99.80%	100%
6	77.30%	100%
4	99.70%	99.80%
2	95.60%	99%
0	99.70%	98.50%

Prueba 3		
Dist. ÷ nodo y H15	% Envíos	
	Digital	Analógica
14	100%	100%
12	100%	100%
10	100%	100%
8	100%	100%
6	100%	100%
4	100%	100%
2	99.40%	99.10%
0	0%	0%

**Tabla 4.2** Resultados de la segunda y tercera prueba.

<b>Resultados de señal de control</b>		
	<b>Motor 1</b>	<b>Motor 2</b>
<b>Frecuencia de medición</b>	2 Hz	2 Hz
<b>Cantidad de datos</b>	500	500
<b>Tiempo promedio</b>	2.5 s	2.4 s
<b>Desfase promedio</b>	13.18°	16.1°

**Tabla 4.3** Comportamiento de la señal de control en prueba finales.

En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se muestra un resumen de los resultados de las diferentes pruebas realizadas. En estos resultados se puede ver que el funcionamiento del sistema de comunicación siempre mantuvo una alta eficiencia, con valores cerca del 100% en el envío de datos. También se muestra en la tabla 4.3 un promedio del desfase en la distancia angular entre la señal y la posición, así como del desfase del tiempo que le tomaba al motor llegar a la posición deseada, que se obtuvieron en la última prueba. Se requiere más investigación para determinar las implicaciones en el sistema de control de este desfase.

Estos resultados son satisfactorios para el proyecto, ya que se puede ver que es posible controlar el movimiento de motores ubicados en los helióstatos desde el cuarto de control, por medio de comunicación inalámbrica. Todo esto cumpliendo con los requerimientos del funcionamiento de los seguidores, ya que no requieren una gran velocidad de movimiento y la transferencia de información del sistema es suficiente para implementarse en el campo, para el control y comunicación de los helióstatos.

## **5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

Este trabajo de tesis se llevó a cabo en la PSH, con la finalidad de que esta pueda seguir mejorando y creciendo, para continuar con investigaciones y proyectos que impulsen el desarrollo de nuevas tecnologías solares y de recursos humanos capacitados.

Se hizo la propuesta de implementar en la PSH un sistema de comunicación inalámbrica que pueda ser usado en el campo, y que mejore el funcionamiento y el desempeño de los helióstatos. Para esto se planteó como objetivo general el desarrollo y la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica basado en nodos inteligentes, que permitieran la transferencia de información y el control de los helióstatos. El uso de nodos inteligente se propuso debido a que estos son los que pueden cumplir con las capacidades de comunicación y control que se pretendía implementar en el campo.

Para lograr el objetivo general, se establecieron como objetivos específicos el desarrollo, la implementación y la validación del sistema de comunicación propuesto. Asimismo en base al objetivo general se propuso como hipótesis que es posible la aplicación de un sistema de comunicación inalámbrico que sirva para los objetivos y propósitos planeados.

Con la finalidad de lograr los objetivos de este proyecto, se presentó una metodología a seguir, mediante la que fuera posible el desarrollo de nodos inteligentes que permitieran establecer comunicación inalámbrica, tomando en cuenta las características y limitaciones del campo, y que permitiera también implementar este sistema de comunicación en los seguidores, para poder posteriormente realizar pruebas que validen la eficiencia del funcionamiento del sistema propuesto.

Siguiendo la metodología planteada, se optó por el uso de tecnología de comunicación ZigBee junto con microcontroladores, para el diseño de los nodos inteligentes. Desde la realización de la primera prueba de estas tecnologías en el campo, se obtuvieron resultados que fueron mucho mejor de lo esperado, siendo capaces de transferir datos con una mejor intensidad y efectividad de lo que se tenía previsto. Gracias a esto se facilitó la implementación de los nodos en el campo y la realización de las demás pruebas, obteniendo siempre resultados favorables que apoyaban la propuesta de la implementación de las tecnologías seleccionadas.

Para el final del proyecto, una vez implementada la metodología propuesta, se lograron los objetivos planteados al inicio de este trabajo, ya que se diseñó, implementó y validó un sistema de comunicación inalámbrica que cumpliera con los requerimientos del campo de helióstatos, validando también así la hipótesis planteada. Por lo tanto se puede concluir que el sistema de comunicación basado en las tecnologías seleccionadas, puede ser implementado en la PSH para la comunicación y el control de los seguidores solares.

El desarrollo de este trabajo de tesis, abre la puerta para futuras investigaciones y proyectos que pudieran ser llevados a cabo en la PSH, con el fin de aplicar y expandir lo planteado en este trabajo. Un trabajo de investigación futuro puede ser el de tomar la misma metodología propuesta en este documento, y aplicarla a los demás seguidores del campo, realizando cualquier cambio que pudiera ser requerido tomando en cuenta la cantidad de helióstatos y las distancias entre ellos. Asimismo puede aplicarse esta metodología en otros campos de seguidores solares, adaptándola a las características específicas de cada uno.

## 6. REFERENCIAS

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., 2002. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38, pp.393-422

Arancibia-Bulnes, C. A., Peón-Anaya, R., Riveros-Rosas, D., Quiñones, J. J., Cabanillasokokok, R. E., Estrada, C. A., 2014. Beam Solar Irradiation Assessment for Sonora, Mexico. *Energy Procedia*, 49, pp.2290-2296

Bernstein, D. S., 2001. Sensor performance specifications. *Control Systems*, 21(4), pp.9-18

Chia-Yen, L., Po-Cheng, C., Che-Ming, C. y Chiu-Feng, L., 2009. Sun tracking systems: a review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 9(5), pp.3875–90.

Chong, K. K., Tan, M. H., 2011. Range of motion study for two different sun-tracking methods in the application of heliostat field. *Solar Energy*, 85, pp.1837-1850

Cowley, J., 2013. Wireless Networks. En: *Communications and Networking*. Londres: Springer London, pp.187-199

Crabtree, G. W., Lewis, N.S., 2007. Solar energy conversion. *Physics Today*, 60(3), pp.37-42

Cuomo, F., Abbagnale, A. y Cipollone, E., 2013. Cross-layer network formation for energy-efficient IEEE 802.15.4/ZigBee Wireless Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*, 11(2), pp.672–686.

Dargie, W., Poellabauer, C., 2010. Motivation for a Network of Wireless Sensor Nodes. En: Shen, X., Pan, Y., ed. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks, Theory and Practice*. Reino Unido: Wiley, pp.3-15

- Digi, 2014. *X-CTU Software*. [Online] Disponible en: <<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>> [Consultado el 22 de agosto 2014]
- Elnahrawy, E., Nath, B., 2004. Context-Aware Sensors. En: H. Karl, A. Willig, A. Wolisz, ed. *Wireless Sensor Networks*. Alemania: Springer, pp.77-93
- Faludi, R., 2011. *Building Wireless Sensor Networks*. USA: O'Reilly
- Farahani, S., 2011. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes
- Frank, R., 2013. *Understanding Smart Sensors*. 3ra ed. Artech House
- García-Hernández, C. F., Ibarguengoytia-González, P. H., García-Hernández, J., Pérez-Díaz, J. A., 2007. Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 7(3), pp.264-273
- García-Sobrinós, G., Salvador-Villa, I. y Serradilla-Echarri, J., 2007. Tower of power. *Civil Engineering (08857024)*, 77(October), pp.42–50.
- Ginley, D., Green, M. A., Collins, R., 2008. Solar Energy Conversion Toward 1 Terawatt. *MRS Bulletin*, 33(4), pp.355-364
- Gutierrez, J. A., Naeve, M., Callaway, E., Bourgeois, M., Mitter, V., Heile, B., 2001. IEEE 802.15.4: A developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks. *IEEE Network*, 15(5), pp.12–19
- Hannan, A., Arshad, K., 2013. An Experimental Study of Interference in Smart Buildings. En: *1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*. 12-14 de Febrero 2013

Her-Terng, Y. y Chieh-Li, C., 2011. Fuzzy sliding mode controller design for maximum power point tracking control of a solar energy system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 34(5), pp.557–565.

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., Baptista-Lucio, P., 2010. *Metodología de la Investigación*. 5ta ed. México: McGraw-Hill

Howitt, I., Gutierrez, J. A., 2003. IEEE 802.15.4 Low Rate –Wireless Personal Area Network Coexistence Issues. *Wireless Communications and Networking*, 3, pp.1481-1486

Iriarte-Cornejo, C., 2013. *Automatización de Sistema de Control para Campo de Helióstatos*. MC. Instituto Tecnológico de Chihuahua

Johansson, M., Jänti, R., 2010. Wireless Networking for Control: Technologies and Models. En: Bemporad, A., Heemels, M., Johansson, M., ed. 2010. *Networked Control Systems*. LNCIS 406, pp.31-74

Kalogirou, S. A., 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), pp.231-295

Kamal, A.R.M. y Hamid, M.A., 2013. Reliable data approximation in wireless sensor network. *Ad Hoc Networks*, 11(8), pp.2470–2483.

Karl, H. y Willig, A., 2005. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. Hoboken NJ: Wiley.

Khaja Muhaiyadeen, A., Hari Narayanan, R., Shelton Paul Infant, C., Rajesh, G., 2011. Inverse Square Law Based Solution for Data Aggregation Routing Using Survival Analysis in Wireless Sensor Networks. *Advances in Networks and Communications*, 132, pp.573-583

Kirianaki, N. V., Yurish, S. Y., Shpak, N.O., Deynega, V. P., 2002. Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensors. *Measurement Science and Technology*, 13(9)

Krothapalli, A., Greska, B., 2012. Solar Concentrators. En: Chen, W. Y., Seiner, J., Suzuki, T., Lackner, M., ed. *Handbook of Climate Change Mitigation*. Springer US, pp.1263-1294

Kubisch, S., Randt, M., Buck, R., Pfahl, A., Unterschütz, S., 2011. Wireless Heliostat and Control System for Large Self-Powered Heliostat Fields. *Conferencia SolarPACES*. Granada, España, Septiembre 2011, pp.20-23

Kühner, J., 2009. Wireless Communication. En: *Expert .NET Micro Framework*. Apress, pp.203-208

LACYQS, 2011. Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH). [Online] Disponible en: <http://lacyqs.cie.unam.mx/es/index.php/instalaciones/campo-de-pruebas-de-heliostatos>

Lim, A., 2010. Smart Sensor Networks. En: V. Cutsuridis, A. Hussain y J.G. Taylor, eds. *Perception-action cycle models, architectures and hardware*. Londres : Springer, pp.675-609

McArthur, L.J., Oliver, J., 2005. Solar Radiation. En: *Encyclopedia of World Climatology*. Springer Netherlands, pp.667-673

Mills, D., 2004. Advances in solar thermal electricity technology. *Solar Energy*, 76(1-3), pp.19-31

Mojiri, A., Taylor, R., Thomsen, E., Rosengarten, G., 2013. Spectral Beam Splitting for Efficient Conversion of Solar Energy - A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, pp.654-663

Nichols, R. K., Lekkas, P. C., 2003. *Seguridad para comunicaciones inalámbricas*. México: McGraw Hill

Nishith, B. D., Shireesh, B. K., Santanu B., 2014. Optimization of design radiation for concentrating solar thermal power plants without storage. *Solar Energy*, 107, pp.98-112

Ondřej, S., Zdeněk, B., Petr, F., Ondřej, H., 2006. ZigBee Technology and Device Design. En: International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies. 23-29 de Abril 2006, IEEE

Papageorgas, P., Piromalis, D., Antonakoglou, K., Vokas, G., Tseles, D., Arvanitis, K.G., 2013. Smart Solar Panels: In-situ Monitoring of Photovoltaic Panels based on Wired and Wireless Sensor Networks. *Energy Procedia*, 36, pp.535–545

Peterson, L. L., Davie, B. S., 2012. *Computer Networks*. USA: Elsevier

Pfahl, A., Randt, M., Holze, C., Unterschütz, S., 2013. Autonomous light-weight heliostat with rim drives. *Solar Energy*, 92, pp.230-240

Qian, K., Haring, D., Cao, L., 2009. *Embedded Software Development with C*. USA: Springer US

Rajaraman, V., 1999. Digital Signal Processors. *Resonance*, 4(6), pp.57-66

Ramos-Pascual, F., 2007. *Radiocomunicaciones*. Barcelona: Marcombo

Ramya, C. M., Shanmugaraj, M., Prabakaran, R., 2011. Study on ZigBee technology. En: *3rd International Conference on Electronics Computer Technology (ICECT)*. Kanyakumari, India, 8-10 de abril 2011. IEEE

Sachenko, A., Kochan, V., Turchenko, V., Tymchyshyn, V., Vasylykiv, N., 1999. Intelligent Nodes for Distributed Sensor Network. En: IEEE, *Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Venecia, 1999

Soo-Young, S., Hong-Seong P., Wook-Hyun K., 2007. Mutual interference analysis of IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b. *Computer Networks*, 51(12), pp.3338-3353

Spencer, B. F., Ruiz-Sandoval, M. E., Kurata, N., 2004. Smart sensing technology: opportunities and challenges. *Structural Control and Health Monitoring*, 11, pp.349-368

Tao, Y. B., He, Y. L., Cui, F. Q., Lin, C. H., 2013. Numerical study on coupling phase change heat transfer performance of solar dish collector. *Solar Energy*, 90, pp.84-93

Weinstein, L., Kraemer, D., McEnaney, K., Chen, G., 2014. Optical cavity for improved performance of solar receivers in solar-thermal systems. *Solar Energy*, 108, pp.69-79

Yen Joe, Y., Khuen Ho, W., Wee Lim, K., Qiang Ding, Z., Bing Zhang, J., Voon Ling, K., Romagnoli, J., 2006. Clustering Intelligent Sensor Nodes for Distributed Fault Detection & Diagnosis. En: IEEE, *International Conference on Industrial Informatics*. Singapore, 16-18 de agosto 2006

Yongxin, L., Zhaoxia W., Junqi Z., Zhenda S., 2012. A wireless sensor network node design based on ZigBee protocol. En: *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence*. Xiamen, 3-5 de marzo 2012