

Propuesta para la implementación de una red inalámbrica de sensores inteligentes para un sistema de concentración solar con tecnología de torre central

Victor H. Benitez

Dpto. Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora
Hermosillo, Sonora, México

Jesús Pacheco-Ramírez

Dpto. Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora
Hermosillo, Sonora, México

Ramón V. Armas-Flores

Dpto. Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora
Hermosillo, Sonora, México

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 heliostatos, que reflejan la radiación del Sol hacia un mismo punto, localizado en la cima de una torre al centro del campo de heliostatos, 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 heliostatos, con propósitos de investigación, y que carece de una instrumentación apropiada. 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. Tras la implementación de nodos en los heliostatos, se llevaron a cabo pruebas para la validación de la comunicación, para poder determinar la viabilidad del uso de las tecnologías propuestas. Los resultados permitieron validar la viabilidad y la eficiencia del sistema de comunicación inalámbrica, para ser implementado en la PSH, permitiendo la comunicación y control de los heliostatos.

Palabras claves: Energía solar, heliostatos, comunicación inalámbrica, redes de sensores y sensores inteligentes.

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 [1].

Un ejemplo de este tipo de sistemas es la tecnología de torre central solar, cuyo funcionamiento está basado en un conjunto de dispositivos llamados heliostatos, los cuales siguen la trayectoria del Sol [2].

Debido a la creciente importancia de este tipo de tecnologías, se propone en este trabajo una metodología para el desarrollo, implementación y validación de un sistema de comunicación en un campo de pruebas de heliostatos, dedicado al desarrollo de nuevas tecnologías solares. Un sistema de comunicación basado en sensores inteligentes, podría permitir un mejor avance en las investigaciones del campo, de manera más rápida y efectiva.

A continuación se describen algunos conceptos de lo que son la tecnología de torre central solar, las redes inalámbricas de sensores y algunos trabajos de investigación anteriores relacionados a la temática. En la sección tres se describe el entorno donde se pretende implementar la presente propuesta y se describe el problema de manera más detallada. Posteriormente se describe la solución propuesta en la sección cuatro. La sección cinco describe la implementación de la metodología propuesta, cuyos resultados se presentan en la sección seis. Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo en la sección siete.

2. MARCO TEÓRICO Y TRABAJO PREVIO

Tecnología de Torre Central 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 [3]. 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 [4]. 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 [5]. Este calor puede ser utilizado durante la noche para generar energía.

Un buen 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 heliostatos,

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 heliostatos (Figura 1). En este punto, componentes dentro de la torre, convierten la energía solar en térmica y posteriormente en electricidad [2].

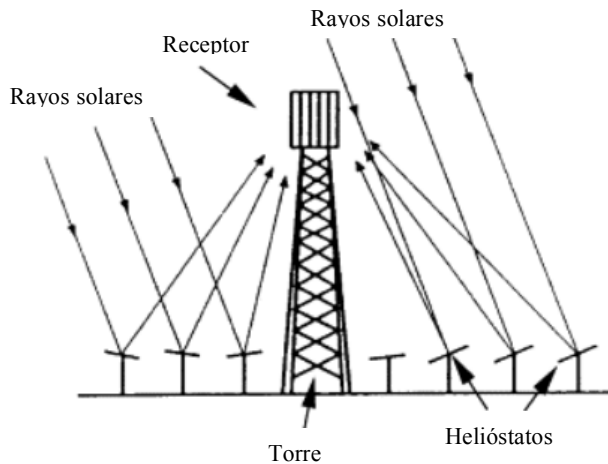


Figura 1. Esquema de un sistema de concentración de torre central solar [7]

En un Sistema de Torre Central Solar, para que los heliostatos puedan reflejar la radiación del Sol hacia el mismo punto de la torre en todo momento, es necesario que estos se muevan de acuerdo al movimiento del Sol. Para lograrlo, se utilizan sensores y controladores que regulan el movimiento de los seguidores y se comunican con una computadora central que los controla. Tal como mencionan Her-Terng y Chieh-Li [6], pueden encontrarse varios estudios en la literatura donde se intenta resolver el problema del seguimiento solar desde diferentes aproximaciones o puntos de vista, para lograr la máxima obtención de energía del sistema. Sin embargo, todos estos trabajos se enfocan solamente al control individual de los seguidores solares.

Redes Inalámbricas de Sensores

Una Red Inalámbrica de Sensores (WSN, por sus siglas en inglés) se crea cuando varios sensores monitorean un ambiente físico grande de manera cooperativa, utilizando comunicación inalámbrica, [8]. 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 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. La posición de los nodos, o topología de la red, puede ser establecida para obtener la óptima comunicación, tal como mencionan Cuomo, Abbagnale y Cipollone [9].

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 [10].

Spencer, Ruiz-Sandoval y Kurata [11] establecen que los sensores inteligentes tienen cuatro características importantes: unidad central de procesamiento integrada, pequeño tamaño, comunicación inalámbrica y bajo costo.

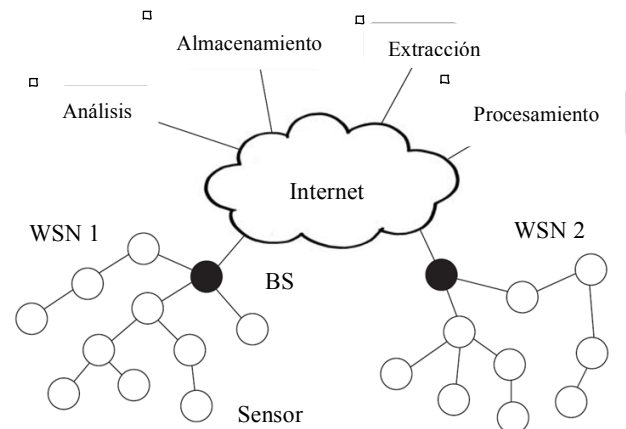


Figura 2. Redes Inalámbricas de Sensores [8]

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 [12]. Las redes de sensores inteligentes son útiles para una amplia variedad de aplicaciones, como pueden ser: industriales, militares, médicas, domóticas, etc.

Trabajo Previo

Un trabajo en el que se implementa una red de comunicación en un sistema de energía solar, es el que se llevó a cabo por Papageorgas, et al. [13], 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. En este trabajo se pueden apreciar las bondades de la implementación de redes inalámbricas en la comunicación, sin embargo es distinto a lo que sería el diseño de una metodología para el control y monitoreo de heliostatos, 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. [14] 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 heliostatos 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, el cual utiliza tecnología inalámbrica para la transmisión de información.

3. ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

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) [15], ubicada en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México. Esta plataforma consiste en un campo donde se cuenta con un número creciente de heliostatos desarrollados por la misma universidad y otras instituciones de investigación, así como una torre central para generación de energía y realización de pruebas experimentales (Figura 3).



Figura 3. Planta Solar de Hermosillo [16]

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 [16]:

- 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

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 heliostatos y controla el estado en que estos se encuentran. La comunicación entre los heliostatos 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 heliostatos.

Actualmente los heliostatos 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, y se dificulta el desarrollo de nuevas tecnologías.

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 heliostatos. Adicionalmente, la arquitectura e instalación de la red en la PSH, hace costoso y prácticamente imposible incorporar sensores a las unidades. Para poder efectuar la instrumentación de los heliostatos, se propone el diseño de un sistema de comunicación inalámbrica, de bajo costo, que pueda transmitir información de manera eficiente sobre las condiciones de operación de los heliostatos, 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.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Con la finalidad de que los heliostatos en la PSH puedan contar con la instrumentación que se requiere, se propuso el desarrollo y la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica, utilizando sensores inteligentes, para la transmisión eficiente de información que permita un control efectivo del sistema de concentración solar. A continuación se describe la metodología propuesta para la realización de este proyecto. La Figura 4 muestra un diagrama con las diferentes fases en que se divide la metodología del trabajo y la secuencia en que se llevaron a cabo.

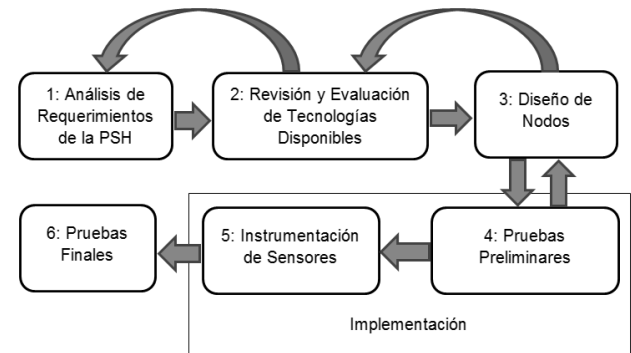


Figura 4. Metodología propuesta

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 heliostatos, y que por lo tanto son bajo las que debe operar el sistema de comunicación que se pretende implementar. En esta etapa se revisan las instalaciones para encontrar los factores, condiciones o elementos que puedan tener algún efecto sobre el funcionamiento del sistema de comunicación inalámbrico. La base para esta revisión es lo planteado en el marco de referencia, es decir, se buscan los factores de la PSH que puedan ser relevantes o afectar de alguna manera las señales de radio del sistema de comunicación (Figura 5).

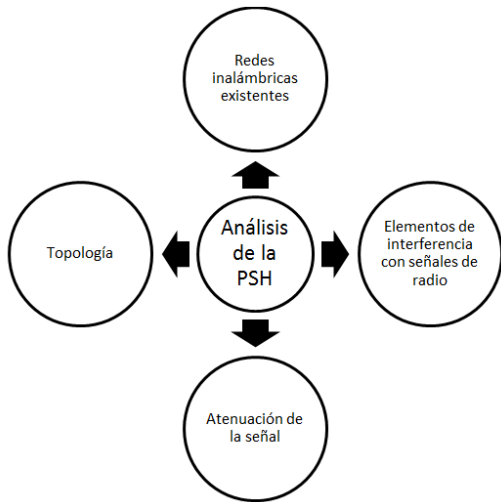


Figura 5. Análisis de la PSH

Fase 2: Revisión y Evaluación de Tecnologías Disponibles

El objetivo de esta fase es el análisis de las diferentes opciones que se tienen en cuanto a tecnologías, que puedan implementarse como solución al problema presentado. Esto incluye las tecnologías para comunicación inalámbrica, y también las de sistemas embebidos, las cuales se integrarán para formar el sistema de comunicación. La base de este análisis es 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, otros factores que se deben tomar en cuenta son la disponibilidad de las tecnologías económicamente y en cuanto a conocimientos y habilidades requeridos para su aplicación. De ser necesario puede requerirse volver a la fase anterior para identificar otros factores que no se detectaron antes (Figura 6).

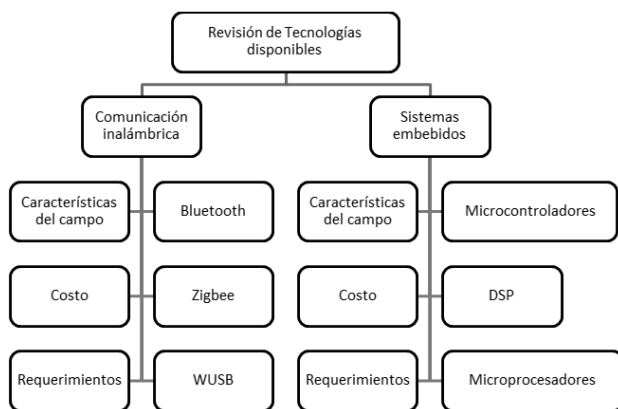


Figura 6. Revisión y evaluación de tecnologías disponibles

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, el cual utilice estas tecnologías y que sea fácil de instalar en el campo de heliostatos, con la finalidad de realizar pruebas preliminares que permitan identificar la eficiencia de las tecnologías que se eligieron (Figura 7).

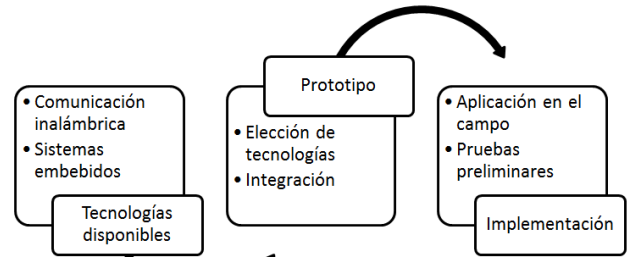


Figura 7. Diseño de nodos

Fase 4: Pruebas Preliminares

En la cuarta etapa se implementa el sistema de comunicación propuesto en la fase anterior, llevando a cabo pruebas en la PSH en las cuales se realicen transferencias de información entre heliostatos y la UCC. Las pruebas se enfocan 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. Se mide la efectividad con que se transfieren los datos en las pruebas realizadas y en base a los resultados se pasa a la siguiente fase o, de ser necesario, se regresará al diseño de un nuevo prototipo, 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.

Fase 5: Instrumentación de Sensores

Como se mencionó anteriormente, actualmente los heliostatos no cuentan con instrumentación que permita realizar mediciones, por lo que es necesaria la implementación de sensores que permitan medir las condiciones en que funcionan los seguidores. 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.

Fase 6: Pruebas Finales

Finalmente, cuando se tengan instalados los sensores, se implementa el sistema de comunicación propuesto. Después se procede a realizar las pruebas finales que permitan validar la efectividad del sistema, el logro de los objetivos planteados y determinar si se resuelve el problema formulado 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 realizan pruebas en las que se transmite información de los sensores instalados en los heliostatos, midiendo la tasa de errores que se produzca y la fuerza y calidad de la señal que se tenga.

5. IMPLEMENTACIÓN

Al inicio de la implementación se realizaron varias visitas al campo de heliostatos, en las cuales se analizaron los factores definidos en la metodología.

Atenuación de la Señal.

Uno de los principales factores a tomar 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. El objetivo fue establecer comunicación inalámbrica entre los heliostatos H10, H04 y el cuarto de control, siendo el heliostato más alejado el H10 a una distancia aproximada de 80 metros (Figura 8).

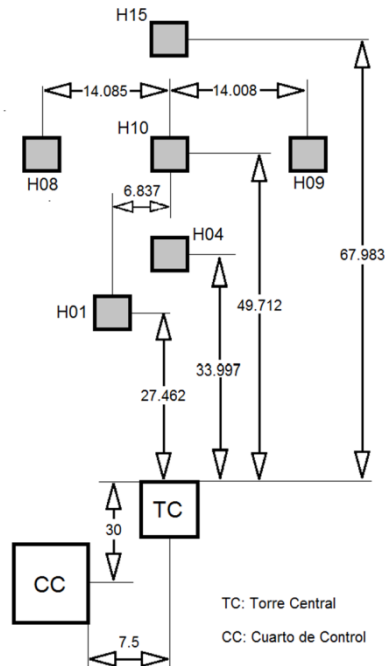


Figura 8. Distribución y distancias entre heliostatos en la PSH

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 [17]. En el caso de la PSH, la red inalámbrica que más se utiliza es la de Wi-Fi, además de otras que no presentan significancia en el estudio.

Elementos de Interferencia con Señales de Radio

Al igual que en cualquier campo de heliostatos, los seguidores de la PSH están instalados en un área abierta, libre de cualquier obstáculo, a excepción de los heliostatos mismos. Para instalar una red de comunicación en este campo, debe 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 m², los cuales pueden reflejar u obstruir en gran medida el paso de las señales electromagnéticas. Convirtiéndolos en los principales obstáculos que pueden afectar el sistema de comunicación.

Revisión y Evaluación de Tecnologías Disponibles

Tomando en cuenta las características del campo, los factores que pueden afectar la comunicación, y los recursos con que se cuenta para el proyecto, se optó por el uso de un prototipo del sistema que utilice tecnología ZigBee para la comunicación inalámbrica, junto con microcontroladores basados en la plataforma Arduino, para el procesamiento y el control de la información. Se eligieron estas tecnologías debido a su accesibilidad económica, a su facilidad de aplicación y sus características y especificaciones en cuanto a funcionamiento,

las cuales se considera que deben ser suficientes para desarrollar un sistema de comunicación efectivo en la PSH.

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:

- Arduino UNO: es una placa electrónica que funciona en base al microcontrolador ATmega328, que permite su uso de una manera sencilla, ya que contiene todos los periféricos y elementos necesarios para ser utilizado de manera rápida.
- Módulo XBee S2: radio que pertenece a la segunda serie de ZigBee 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.
- Arduino XBee Shield: 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.

Utilizando las tecnologías descritas se obtuvo un prototipo de los nodos para la comunicación inalámbrica que se pretende utilizar en el campo (Figura 9).



Figura 9. Nodo para pruebas preliminares

Pruebas Preliminares

Utilizando prototipos que utilizan las tecnologías mencionadas, se realizaron pruebas en la PSH para evaluar su desempeño. El software que se utilizó para configurar los radios XBee fue XCTU [18], que permite especificar el funcionamiento de 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 10). El software Arduino se utiliza para programar el microcontrolador del Arduino UNO. Este software permite una programación rápida y sencilla del microcontrolador de cualquier placa Arduino, desde cualquier computadora.

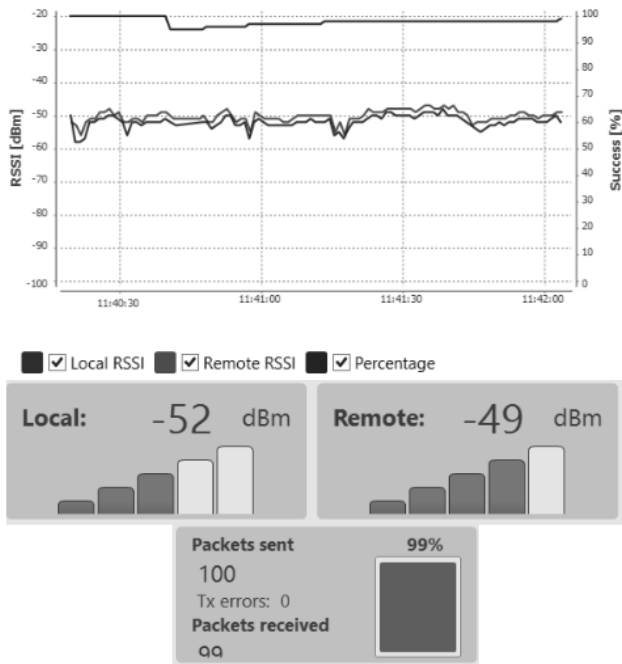


Figura 10. Software X-CTU

En la primera prueba realizada se enviaron 100 paquetes de datos entre dos nodos inalámbricos, colocados a una distancia cada vez mayor. El primer nodo se colocó en el heliostato H10 y el segundo se colocó en cuatro diferentes posiciones con respecto al primero (norte, sur, este y oeste) alejándolo cada vez más (Figura 11), midiendo el porcentaje de paquetes enviados correctamente y la intensidad de la señal inalámbrica.

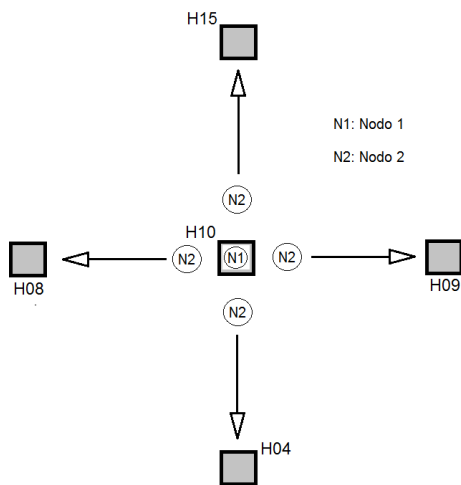


Figura 11. Ubicación de los nodos para primera prueba

Esta prueba se llevó a cabo utilizando solamente los radios, es decir, sin incluir los microcontroladores en los nodos, esto con la finalidad de probar la viabilidad de utilizar tecnología de comunicación ZigBee en el campo de heliostatos.

En la segunda y tercera prueba se añadió el microcontrolador a los nodos, con el objetivo de lograr controlar un servomotor en uno de los nodos desde otro nodo, por medio de una señal PWM. El nodo desde el cual se controló el servomotor se colocó fuera del cuarto de control en ambas pruebas.

En la segunda prueba se colocó el nodo con el servomotor a una distancia creciente hacia el heliostato H01 (Figura 12). En la tercera prueba se colocaron dos nodos de la misma forma, pero se utilizó un tercer nodo, ubicándolo a una distancia cada vez mayor del cuarto de control, comenzando desde el heliostato H04 (Figura 13)

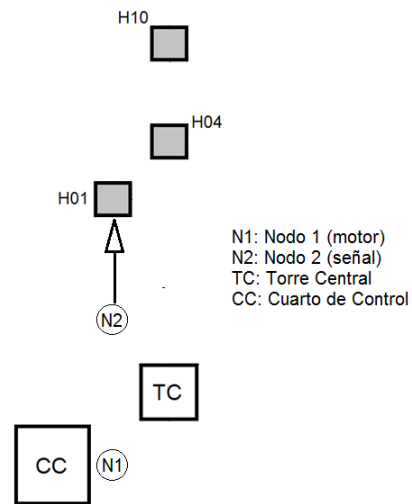


Figura 12. Ubicación de los nodos para segunda prueba

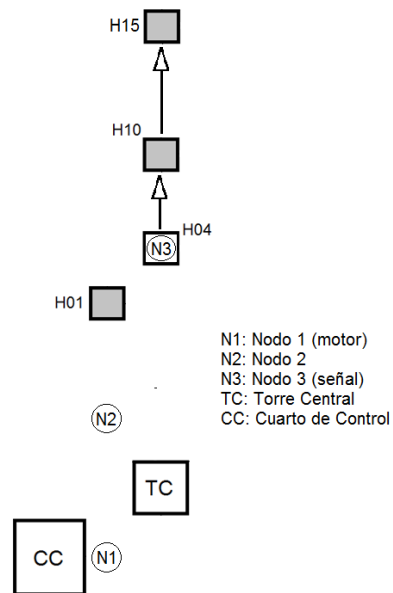


Figura 13. Ubicación de los nodos para tercera prueba

Se utilizó un sensor en los servomotores para determinar si el movimiento del motor correspondía a la señal enviada desde el cuarto de control, para determinar la efectividad del flujo de información en el sistema propuesto.

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

Instrumentación

Los resultados anteriormente expuestos apoyan la hipótesis de la implementación del sistema de comunicación inalámbrico en la PSH. Se contemplaba implementar sensores en los seguidores, sin embargo fue necesario adaptar la metodología. Esto debido a las conexiones ya establecidas en los seguidores y a que se encontraban en uso, por lo que no se podía prescindir de ellos.

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. Se utilizaron servomotores y sensores para la prueba final, los cuales representan los motores y sensores de los heliostatos.

Prueba Final

Debido a que las pruebas preliminares realizadas apoyaron la efectividad del sistema propuesto, se procedió a realizar la prueba final en la que se controlaran dos motores en diferentes puntos, al mismo tiempo que se recibía información de los mismos.

Se colocaron motores en los heliostatos H04 y H10 controlados por nodos, que eran controlados desde el cuarto de control. El nodo en el cuarto de control obtenía retroalimentación sobre la posición de los motores. En la Figura 14 se muestra la forma en que se colocaron los nodos y motores para esta prueba.

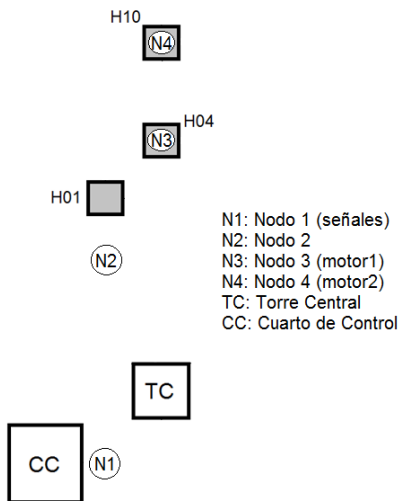


Figura 14. Ubicación de los nodos para prueba final

Se logró controlar los motores en los heliostatos 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 15. 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.

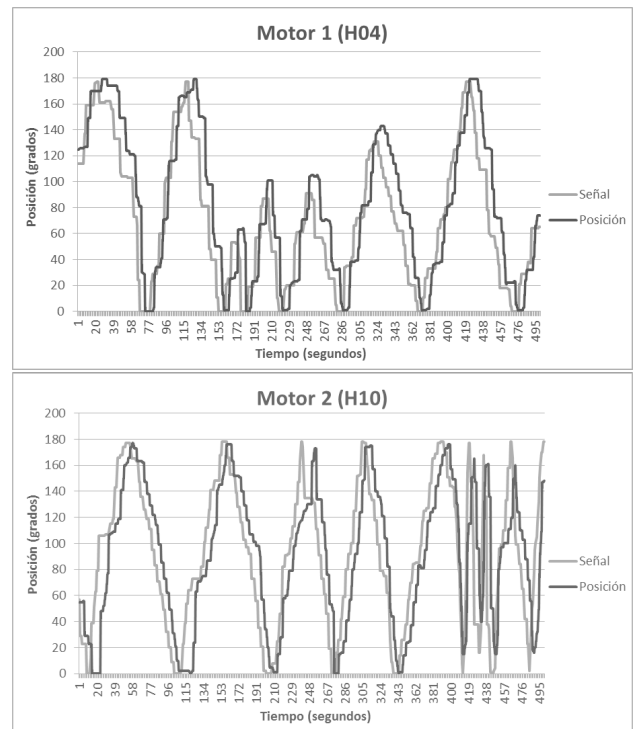


Figura 15. Movimiento de motores en base a señal de control en prueba final

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.

6. RESULTADOS

En las tablas 1, 2 y 3 se muestra un resumen de los resultados de las diferentes pruebas realizadas. También se muestra en la tabla 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

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 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 2. Resultados segunda y tercera prueba

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

Tabla 3. Comportamiento de la señal de control en prueba final

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.

Implementando este sistema de comunicación en el campo de helióstatos, se espera 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 por medio de una red de sensores inteligentes 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

7. CONCLUSIONES

La tecnología de planta de torre central solar es una de las tecnologías solares que se encuentran en desarrollo y que tienen cada vez más importancia como fuentes de energía limpia y renovable. En Hermosillo se creó la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), la cual se dedica a la investigación en el campo de la energía solar. 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 de este campo. Desde la realización de la primera prueba, 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. Una vez implementada la metodología propuesta, se lograron los objetivos planteados al inicio de este trabajo. Se diseñó, implementó y validó un sistema de comunicación inalámbrica que cumpliera con los requerimientos del campo de helióstatos. 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

8. REFERENCIAS

- [1] Lee, C.-Y., Chou, P.-C., Chiang, C.-M. and Lin, C.-F., 2009. Sun tracking systems: a review. *Sensors* (Basel, Switzerland), 9(5), pp.3875–90.
- [2] García-Sobrinos, G., Salvador-Villa, I. and Serradilla-Echarri, J., 2007. Tower of power. *Civil Engineering* (08857024), 77(October), pp.42–50.
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Her-Teng, Y. and 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.
- [7] Kalogirou, S. A., 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), pp.231-295
- [8] 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
- [9] Cuomo, F., Abbagnale, A. and 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.
- [10] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., 2002. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38, pp.393-422
- [11] Spencer, B., Ruiz-Sandoval, M. and Kurata, N., 2004. Smart sensing technology: opportunities and challenges. *Structural Control and Health Monitoring*, 11(4), pp.349 – 368.
- [12] Lim, A., 2010. Smart Sensor Networks. In: V. Cutsuridis, A. Hussain and J.G. Taylor, eds., *Perception-action cycle models, architectures and hardware*. New York ;;London :: Springer.
- [13] Papageorgas, P., Piromalis, D., Antonakoglou, K., Vokas, G., Tseles, D. and 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.
- [14] Pfahl, A., Randt, M., Holze, C., Unterschütz, S., 2013. Autonomous light-weight heliostat with rim drives. *Solar Energy*, 92, pp.230-240
- [15] 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>
- [16] Iriarte-Cornejo, C., 2013. Automatización de Sistema de Control para Campo de Helióstatos. MC. Instituto Tecnológico de Chihuahua
- [17] 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
- [18] Digi, 2014. X-CTU Software. [Online] Disponible en: <http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352> [Consultado el 22 de agosto 2014]