

Proyecto final: diseño, simulación y prueba en campo de antena tipo yagi - Grupo 12

Jorge Santiago Camargo Guerrero*, Gabriel Felipe Ostos Iguavita†, Juan Alejandro Gualteros Fonseca‡
y Sebastian Jaramillo Verdugo§

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá
Bogotá D.C., Colombia

Email: *jocamargog@unal.edu.co, †gostos@unal.edu.co, ‡jgualterosf@unal.edu.co, §sejaramillov@unal.edu.co

Resumen—This work presents the development of a low-cost agrometeorological monitoring system designed and tested as part of an undergraduate engineering project. The system measures environmental parameters such as ambient temperature, relative humidity, and soil moisture using DHT11 and capacitive sensors. Data is transmitted via the SX1278 LoRa module operating at 433 MHz. Custom Yagi antennas were designed, simulated, and fabricated to meet the signal range requirement, achieving stable communication over 1.2 km in field tests. The hardware was integrated with Arduino boards, and the performance was validated through real-time data reception. The results demonstrate the effectiveness of the proposed system for reliable and energy-efficient remote monitoring in agricultural applications.

I. DISEÑO Y SIMULACIONES

Para evaluar el mejor diseño que pudiera cumplir con las metas esperadas como lo es transmisión a 1 Km y una impedancia cercana a los 50Ω se seleccionaron 2 tipos de antenas a evaluar, la primera opción era antena tipo Yagi, la segunda era una antena monopolo de un cuarto de longitud de onda.



Figura 1: Antena Yagi

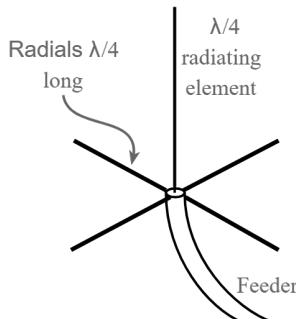


Figura 2: Monopolio $\lambda/4$

Estas dos antenas tienen características muy diferentes, aunque con la antena monopolo se podía asegurar una impedancia de 50Ω su ganancia es de tan solo 2.1 dBi, por lo cual para asegurar el requisito de distancia se optó por la yagi que tiene ganancias en el rango de 7 a 13 dBi.

I-A. Diseño Yagi

Una antena Yagi-Uda, comúnmente conocida como antena Yagi, está compuesta por varios elementos alineados en un eje común: un reflector, un dipolo (o elemento activo) y uno o más directores. El dipolo es el elemento central y activo de la antena, encargado de transmitir o recibir la señal de radiofrecuencia. Detrás del dipolo se ubica el reflector, cuya función es reflejar las ondas hacia adelante, incrementando la directividad y reduciendo la radiación hacia atrás. Delante del dipolo se colocan los directores, que son elementos pasivos ligeramente más cortos que el dipolo e incrementan la ganancia al enfocar la radiación en una sola dirección. Por ejemplo, con 1 director se puede obtener una ganancia aproximada de 7dBi, mientras que con 5 directores puede alcanzarse hasta 10dBi. El incremento en ganancia disminuye con cada nuevo director, siendo típico un aumento de 0.5 a 1dB por elemento adicional.

Los cálculos de las distancias de los elementos de la antena y del espaciado de ellos se basó en múltiples artículos y el libro del curso referenciado al final de este informe.

I-B. Simulaciones

Se realizó la simulación de una antena yagi con 5 directores, para ver las características físicas y de transmisión como afectaban en el desempeño, con esto se denotó que la distancia entre el reflector y el dipolo influye en el valor de la impedancia, que el calibre del cobre influye en el ancho de banda y que la cantidad de directores aumentaría la ganancia de la antena en el ángulo 0 grados, ya que es bastante directiva. La simulación arrojó los siguientes resultados:

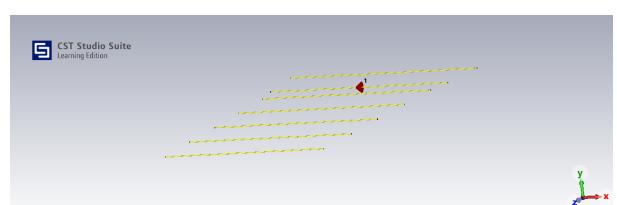


Figura 3: Antena Yagi propuesta

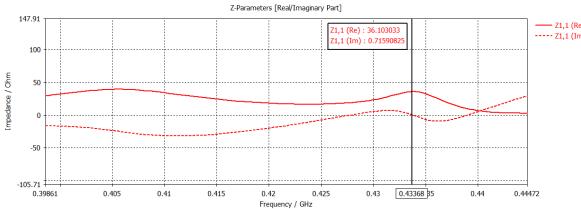


Figura 4: Valor de Impedancia vs Frecuencia

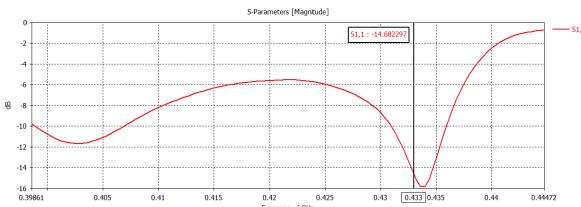


Figura 5: S11 Normalizado

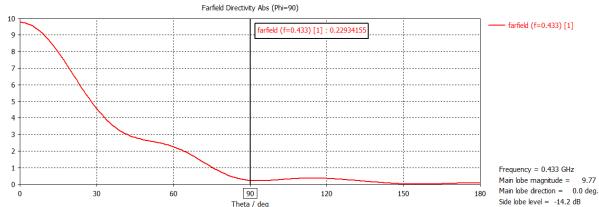


Figura 6: Directividad vs frecuencia

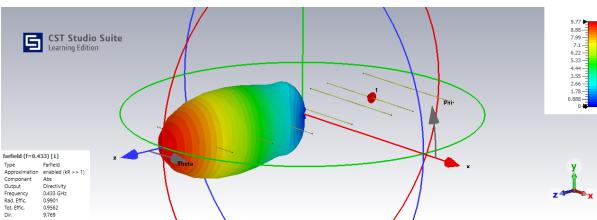


Figura 7: Directividad en 3D

Con estas gráficas se puede determinar que la impedancia donde resuena la antena es de 36 Ohms, además que su directividad es de 9.77, si no se consideran perdidas se mantendría esta; sin embargo, en aplicación en físico se debe considerar limitaciones, también el ancho de banda en S11 es bastante considerable aunque no este centrado en la frecuencia de diseño es suficiente para su funcionamiento y el ángulo de su lóbulo máximo está en 0, como el diseño de la antena lo prevé.

II. CONSTRUCCIÓN

Como se mencionó anteriormente para nuestro proyecto se eligió elaborar antenas tipo Yagi-Uda, conformada por 7 elementos, el dipolo mediante el cual se realiza la alimentación, un reflector y 5 directores.

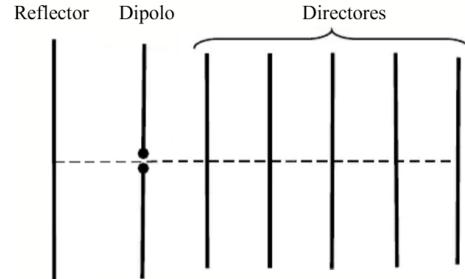


Figura 8: Estructura antena Yagi-Uda

En la siguiente tabla se observan las distancias entre elementos y las longitudes requeridas para nuestro diseño realizado para una frecuencia de 433 MHz.

Elemento	Longitud(cm)	Espaciado entre elementos(cm)
Reflector	34.64	12.47
Dipolo	33.02	6.24
Director 1	31.87	12.47
Director 2	30.02	12.47
Director 3	29.79	12.47
Director 4	29.09	12.47
Director 5	29.09	12.47

A partir de estas medidas se construyó la antena, usando como eje de máxima radiación o 'Boom' se usó un palo de balsas cuadrado de 3cm de lado y 1m de largo, por otra parte para los elementos se usó alambre de cobre esmaltado calibre 14, con 1.64mm de diámetro, pegándolos al eje con silicona. Para la conexión del dipolo se realizó la soldadura del conector SMA.

En la siguiente imagen se observa la configuración final de las antenas elaboradas.



Figura 9: Antenas construidas

Para su soporte se construyeron bases con palos de balsas de 2cm de lado, sujetándolas a las antenas con amarraderas de plástico a los extremos de cada una. De igual manera para ubicar la protoboard con el LoRa y el Arduino se construyeron bases de cartón pegadas al palo vertical de las bases.



Figura 10: Antenas construidas con bases

III. SISTEMA DE COMUNICACIÓN

En la implementación se utilizaron dos módulos LoRa RA-02 para la transmisión y recepción, incorporados con las mediciones de dos tipos de sensores, por un lado el DHT11 que permite la lectura de temperatura y humedad relativa, mientras que el sensor de humedad capacitivo realiza su medida en el suelo. Sus características se presentan a continuación.

III-A. Modulo LoRa Ra-02 SX1278



Figura 11: Modulo LoRa Ra-02

LoRa (Long Range) emplea modulación por ensanchamiento de chirps (Chirp Spread Spectrum), lo cual proporciona una comunicación de espectro extendido de gama ultra larga y una inmunidad de alta interferencia mientras minimiza el consumo de corriente.

Debido al ensanchamiento mediante la modulación CSS, las señales empleadas ocupan un ancho de banda reducido, habitualmente 125 kHz, pero su espectro se extiende de forma lineal, por lo que le permite coexistir con otras señales de baja potencia en el mismo canal y proporciona rechazo de interferencia de banda estrecha.

Este módulo integra el chip SX1278, el cual posee una frecuencia de operación de 433 MHz, además cuenta con una sensibilidad de recepción de hasta -148dBm y una potencia de transmisión configurable hasta +20dBm. Para nuestro caso:

III-B. Sensor de Temperatura y Humedad Relativa

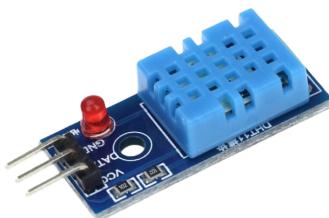


Figura 12: Sensor DHT11

Su función principal es la medición de la humedad relativa del aire y la temperatura ambiente. Para el caso de la humedad su medida puede estar en el rango de 20% a 90% ($\pm 5\%$) y la temperatura entre 0°C y 50°C ($\pm 2^\circ C$).

El protocolo de comunicación es 1-Wire y cuenta con una respuesta de 40 bits, donde 16 bits son para humedad, 16 para temperatura y 8 bits de checksum.

III-C. Sensor de Humedad Capacitivo



Figura 13: Sensor de humedad capacitivo

Este sensor posee un rango de 0 a 100 % para la humedad volumétrica, con una precisión de $\pm 0,3\%$. Su funcionamiento está dado por el principio de variación de la permitividad del suelo, la cual depende directamente de su contenido de agua. A mayor humedad en el suelo, mayor será la capacitancia medida, debido al incremento en la permitividad del material entre los electrodos. La capacitancia del sensor es convertida en una señal de voltaje mediante un circuito acondicionador, típicamente basado en un oscilador o divisor de tensión, obteniendo la relación donde 3V corresponde a un suelo saturado de agua y 0V a un suelo completamente seco.

III-D. Software

La integración del sistema se realizó mediante Arduino, configurando 2 Arduino UNO, respectivamente para la captación y transmisión de las variables medidas, además del empleado para la recepción de los datos.

En el siguiente enlace se encuentran las especificaciones de los dispositivos empleados: Especificaciones.

IV. RESULTADOS

IV-A. Caracterización de la antena

Se llevó a cabo la caracterización de la antena receptora y transmisora utilizando un analizador vectorial de redes (VNA) operando en el intervalo de 200 a 600 MHz. El propósito fue identificar la frecuencia de resonancia y verificar el nivel de adaptación del sistema en la banda de operación prevista.

Antena receptora (Rx): La Figura 14 presenta la respuesta medida del parámetro de dispersión $|S_{11}|$, donde se observa un valor mínimo de $-26,7$ dB a 428.57 MHz. Este resultado indica una excelente adaptación de impedancia, lo cual se traduce en una reflexión de potencia inferior al 0,2 %. Tal comportamiento garantiza una transferencia eficiente de energía desde la línea de transmisión hacia la antena, minimizando las pérdidas por desadaptación.

Por otra parte, la Figura 14 muestra el perfil de la impedancia de entrada en el mismo rango de frecuencias. A 428.57 MHz se registró una impedancia compleja de $Z = 54,10 + 2,53j\Omega$, la cual se aproxima al valor característico de $Z_0 = 50\Omega$ con un componente reactivo reducido. Esta condición sugiere un comportamiento predominantemente resistivo en resonancia, lo que favorece una operación eficiente de la antena como elemento receptor.

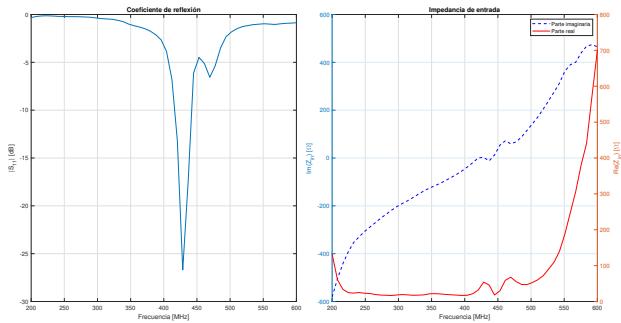


Figura 14: Antena Rx: respuesta medida del coeficiente de reflexión $|S_{11}|$ e impedancia de entrada medida

Antena transmisora (Tx): La Figura 15 presenta el coeficiente de reflexión $|S_{11}|$ medido, el cual alcanza un valor mínimo de $-21,5$ dB a 428.57 MHz. Esta medida indica que menos del 0,8% de la potencia incidente es reflejada, evidenciando una buena adaptación entre la antena y la línea de transmisión a dicha frecuencia. Este comportamiento asegura una transferencia energética eficiente y baja pérdida por desadaptación en transmisión.

La impedancia de entrada correspondiente en ese punto fue de $Z = 57,11 - 5,57j\Omega$, lo que sugiere un sistema levemente inductivo, pero predominantemente resistivo. Tal característica favorece una operación eficiente en transmisión, permitiendo máxima entrega de potencia hacia el espacio libre.

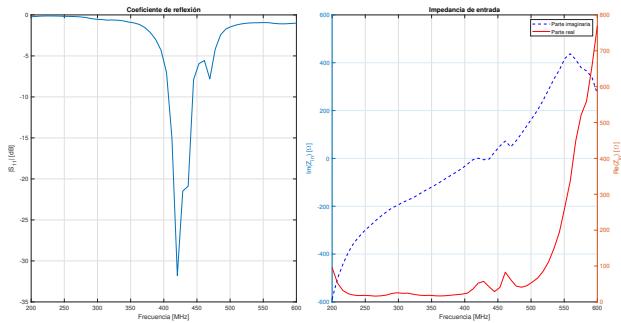


Figura 15: Antena Tx: respuesta medida del coeficiente de reflexión $|S_{11}|$ e impedancia de entrada

V. COSTOS DEL PROYECTO

A continuación se presenta la estimación de costos de los principales componentes utilizados para la implementación del proyecto. Los precios están expresados en pesos colombianos.

El desarrollo técnico e integración del sistema requirió aproximadamente 15 horas hombre distribuidas entre cuatro integrantes del equipo. Si se valoran a una tarifa simbólica de 5000 pesos/hora por persona, el costo estimado por tiempo de ingeniería asciende a 300,000 pesos.

Elemento	Costo
Módulo LoRa Ra02 (x2)	64,000
Arduino UNO (x2)	40,000
Soporte para antena	38,000
Cobre esmaltado calibre 14 (5 m)	12,500
Sensor DHT11	8,000
Sensor capacitivo de humedad de suelo	12,000
Conectores SMA y URF a SMA	20000
Materiales varios (cables, soldadura, etc.)	10,000
Total estimado	204,500

Cuadro I: Resumen de costos del proyecto

Costo total del proyecto: 604,500 pesos.

VI. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Con el fin de verificar el comportamiento real de la antena diseñada, se realizaron pruebas de campo bajo condiciones controladas. Estas pruebas permiten comparar el desempeño teórico y simulado con los resultados obtenidos en un entorno real, evaluando la efectividad de la antena en términos de alcance, ganancia y estabilidad de la señal. Las mediciones se llevaron a cabo a diferentes distancias, garantizando línea de vista y condiciones similares para todos los casos.

VI-1. Pruebas de campo: Para validar el funcionamiento del sistema completo, se realizaron ensayos experimentales al aire libre a distancias de 350 m, 700 m y 1200 m entre transmisor y receptor. En todas las pruebas, siempre que las antenas tipo Yagi-Uda estuvieran correctamente alineadas, la comunicación fue exitosa, sin errores en la recepción de datos.

El sistema transmite paquetes LoRa que contienen tres parámetros ambientales: temperatura del ambiente (T), humedad relativa (H) (ambos medidos con el sensor DHT11), y humedad del suelo (S), medida mediante un sensor capacitivo. Cada lectura es recibida y decodificada por el módulo receptor, que muestra el contenido del mensaje, así como el nivel de señal RSSI y el SNR, permitiendo evaluar la calidad del enlace.

La comunicación se mantuvo estable en todas las distancias mencionadas, confirmando el correcto diseño del enlace y la efectividad de las antenas desarrolladas. Se utilizó un delay de un segundo en el IDE de arduino entre mediciones.

Un video demostrativo de las pruebas puede consultarse haciendo clic en este enlace.

VI-2. Error en los datos: Durante las pruebas experimentales, se observó que en la mayoría de los casos la información transmitida fue recibida de forma íntegra, lo cual valida el funcionamiento del sistema en condiciones reales. Sin embargo, ocasionalmente se detectaron errores cualitativos en la recepción, principalmente en forma de caracteres extraños o ilegibles dentro del mensaje, indicando una posible corrupción parcial de datos. Esta alteración puede deberse a interferencias, ruido ambiental o desalineación momentánea de las antenas, especialmente en las distancias mayores.

VI-3. Cálculo de la Potencia Radiada Efectiva y Consideraciones Normativas: Para calcular la potencia efectiva radiada por el transmisor LoRa, se consideraron las siguientes condiciones:

- Potencia de salida del módulo LoRa: 2 dBm
- Ganancia de la antena Yagi obtenida por simulación: 9.77 dBi
- Pérdidas en cables y conectores: 1.2 dB
- Pérdida adicional por desadaptación (reflexión): 0.014377 dB

La potencia radiada aparente se calcula con la siguiente expresión:

$$P_{\text{radiada}} = P_{\text{Tx}} + G_{\text{antena}} - L_{\text{cables}} - L_{\text{reflexión}}$$

$$P_{\text{radiada}} = 2 + 9,77 - 1,2 - 0,014377 = 10,5556 \text{ dBm}$$

Este valor cumple con el límite de 10 mW (equivalente a 10 dBm) establecido en la normativa para transmisores no licenciados, ya que las pérdidas introducidas en el sistema reducen la potencia efectiva por debajo del umbral, incluso considerando una antena de alta ganancia.

Resolución 105 de 2020 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE). Esta resolución establece el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF) y las condiciones técnicas para el uso de las diferentes bandas.

El Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias es un documento dinámico que se actualiza periódicamente para incorporar nuevas tecnologías y armonizar el uso del espectro con las tendencias internacionales. Una de estas actualizaciones se realizó mediante la Resolución 737 del 2022, la cual modificó la Resolución 105 de 2020.

La banda de 433 MHz, que abarca el segmento de 433,05 a 434,79 MHz, está designada para aplicaciones de tipo Industrial, Científico y Médico (ISM). El uso de esta banda es de carácter libre, lo que significa que no se requiere un permiso, siempre y cuando los equipos cumplan con las condiciones técnicas estipuladas, como el límite de potencia radiada, para no generar interferencias perjudiciales a otros servicios de radiocomunicaciones. Las condiciones para esta banda no fueron alteradas por la Resolución 737 de 2022, por lo que los parámetros definidos en la resolución original de 2020 siguen siendo los vigentes para tu aplicación.

VII. CONCLUSIONES

1. Se diseñó, construyó y validó exitosamente un sistema de monitoreo agro-meteorológico de bajo costo, cumpliendo el objetivo principal de establecer un enlace de comunicación robusto y confiable a una distancia de 1.2 km. Este resultado valida la efectividad de la tecnología LoRa en la banda de 433 MHz para aplicaciones de telemetría en entornos rurales, superando el requisito inicial de 500 [m].
2. El diseño de las antenas Yagi de 7 elementos fue un factor determinante para el éxito del proyecto. Las mediciones con el VNA demostraron una excelente adaptación de impedancia en la frecuencia de operación (cercana a 428 MHz), con valores de S_{11} inferiores a -20 dB. Esto aseguró una transferencia de potencia eficiente y minimizó las pérdidas por reflexión, un logro clave considerando la construcción artesanal de las antenas.
3. El proyecto demostró la viabilidad de operar dentro del marco regulatorio colombiano para bandas de uso libre. La Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) calculada, considerando la ganancia de la antena diseñada y las pérdidas del sistema, se ajusta a los límites establecidos por la Resolución 105 de 2020 de la ANE. Esto evidencia que es posible diseñar antenas con una ganancia considerable (9,77 [dBi]) para enlaces de largo alcance sin infringir la normativa vigente para la banda de 433 MHz.
4. Los errores de datos esporádicos observados durante las pruebas de campo sugieren que, sería bueno incorporar protocolos de corrección de errores. Asimismo, el diseño de la antena podría optimizarse aún más para centrar su resonancia exactamente en 433 MHz además de corregir factores como equivocaciones en la fabricación e imperfecciones.

REFERENCIAS

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4^a ed., Wiley, 2012.
- [2] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2^a ed., Wiley-IEEE Press, 2001.
- [3] Didácticas Electrónicas, "S-A-A-2 NanoVNA V2 Analizador de Vector de Red 3G," disponible en: didacticaselectronicas.com.
- [4] Agencia Nacional del Espectro (ANE), "Resolución 105 de 2020," [En línea]. Disponible en: <https://www.ane.gov.co/Sliders/ANE%202021/CompilatoriaResolucion%CC%81nANE105de2020.pdf>. [Accedido: jul. 2025].
- [5] L. E. Arteaga y J. E. Burbano, "Efectos del cambio climático: Una mirada al campo," *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 35, no. 2, pp. 79-89, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.org.co/pdf/rca/v35n2/2256-2273-rca-35-02-00079.pdf>.
- [6] IDEAM - SENA, "Manejo e interpretación de variables del clima y de agrometeorología," Bogotá, Colombia, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://sac.org.co/wp-content/uploads/2013/05/Cartilla-Clima-IDEAM.pdf>.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3ra ed., John Wiley & Sons, 2005.
- [8] Agencia Nacional del Espectro (ANE), Resolución 105 de 2020,"2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ane.gov.co/Sliders/ANE%202021/Compilatoria%20Resolucion%CC%81nANE105de2020.pdf>. [Accedido: 24 de julio de 2025]