

Entrega 3 Proyecto Diseño de Sistemas Electrónicos

Jose Luis Cadena Téllez - 2160456
Felipe Alberto Castro Benavides - 2160469
Julián Eduardo Jerez Vera - 2160460
Andrés Sebastián Parra Esteban - 2160431
Andrés Felipe Vargas Molano - 2160450
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Santander, Colombia

I. DIAGRAMA DE BLOQUES

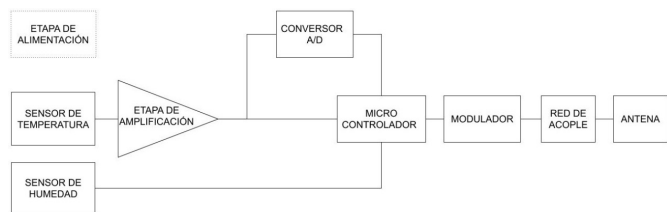


Fig. 1. Diagrama de bloques del diseño.

II. ESPECIFICACIONES DE LOS DIAGRAMAS

A. SENSOR DE TEMPERATURA

Como sensor de temperatura se escogió un termistor tipo PTC de referencia TFPT1206 que presenta una resistencia de 10[kΩ] a 25°C con una tolerancia de $\pm 0.5\%$. Este termistor fabricado por VISHAY tiene un rango de operación de -55°C hasta 150 °C, y un precio que ronda los \$2 USD.

Se escogió este tipo de sensor ya que, para la aplicación no es necesaria una exactitud alta, por lo que el parámetro más importante a la hora de escoger fue el costo tanto del sensor como del circuito de adecuación de la señal de salida del respectivo sensor.

La simulación del termistor se hizo con el modelo de pspice TFPT1206L1002 de la librería THERMISTOR_VISHAY en el software OrCAD de Cadence. Esta simulación se hizo en conjunto con la etapa de amplificación.

B. SENSOR DE HUMEDAD

Se decidió utilizar el sensor de humedad relativa Si7021 fabricado por Silicon Labs. Este es un sensor de alta precisión y moderno, consume baja potencia y contiene una tapa protectora contra polvo y tierra, que para trabajar en campos abiertos resulta siendo muy útil. Existen dos versiones de dicho sensor, una que trabaja a 5V y otra a 3.3V. Se decidió escoger el de 3.3V ya que el resto de circuitos del proyecto también trabajan a 3.3V.

Este sensor opera con un protocolo de comunicación serial I²C. Dicho sensor tiene un rango de medición de humedad de 0-80% RH con una precisión de $\pm 3\%$, opera en el rango de 0-100% RH y tiene un bajo consumo de corriente, 150uA activo y 60nA en modo de reposo. Los precios de este sensor rondan alrededor de \$2 USD.

En la figura 2 se muestran los distintos módulos implementados en Proteus encerrados en cuadros azules.

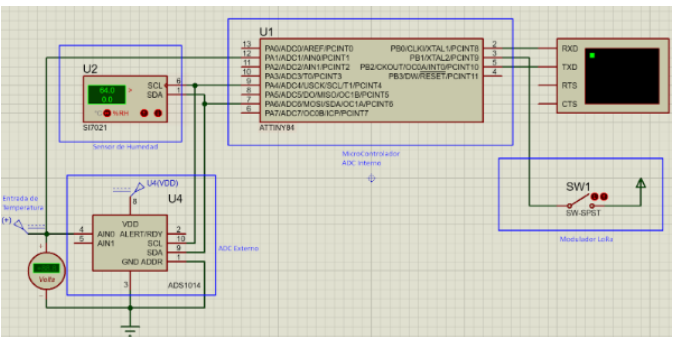


Fig. 2. Simulación del microcontrolador.

La simulación del módulo Si7021 se realizó en Proteus, ya que el modelo de dicho sensor se encuentra en la base de datos. El sensor de humedad va conectado directamente al microcontrolador, en donde se muestra el funcionamiento de este modulo. Para la programación en el microcontrolador se utilizaron unas librerías predefinidas para la comunicación I²C.

Cabe resaltar que este sensor es una placa de desarrollo que contiene el sensor de humedad, un sensor de temperatura, un ADC interno, y la lógica de la interfaz I²C. Para nuestro caso solo lo estamos utilizando para medir humedad.

Rango de medición	0-92%
Salida	Digital
Alimentación	3.3V
Protocolo	I ² C(SCL y SDA)

TABLE I
REQUISITOS DEL SENSOR DE HUMEDAD

A continuación se muestra las simulaciones para tres valores distintos de humedad, 64%, 40% y 72%:

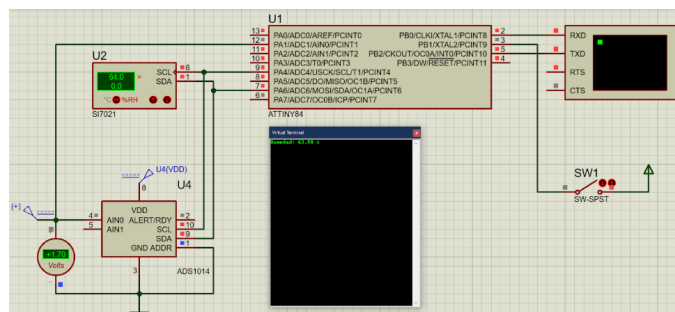


Fig. 3. Simulación de Humedad 1.

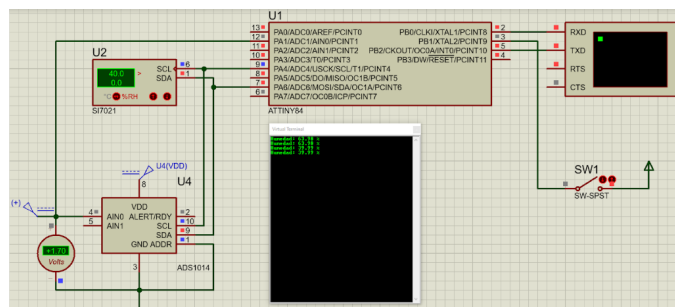


Fig. 4. Simulación de Humedad 2.

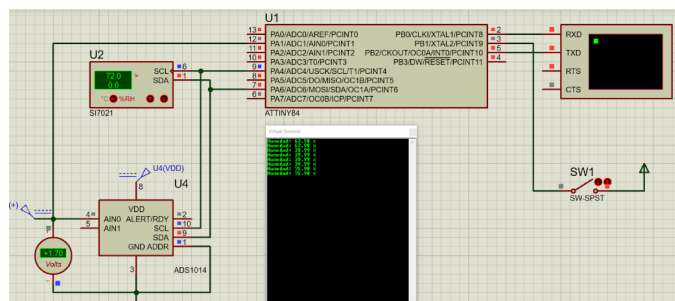


Fig. 5. Simulación de Humedad 3.

C. ETAPA DE AMPLIFICACIÓN

La adecuación de la señal de temperatura sensada se realizó empleando el circuito de la figura 6:

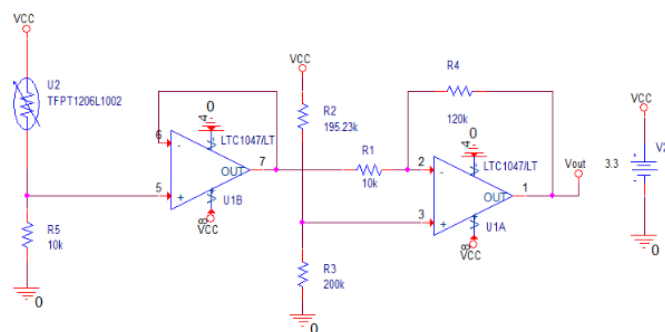


Fig. 6. Circuito de amplificación.

El divisor presente en la parte izquierda del circuito permite transformar las variaciones de la PTC a variaciones de tensión, las cuales se envían al amplificador inversor que se encarga de adaptar la señal para que tenga un rango de salida de 0-3.3V que corresponden a temperaturas entre -20°C y 60°C respectivamente. El seguidor de tensión conformado por el OPAMP U1B se emplea para desacoplar la impedancia del divisor de tensión y las impedancias del amplificador.

El opamp se seleccionó buscando una relación entre bajo offset y bajo costo. Se escogió el LTC1047CSW#PBF ya que este tiene dos OPAMPs en el mismo integrado y presenta un offset de 1uV.

La simulación de esta etapa se realizó siguiendo el circuito de la figura 7 y para esto se empleó el modelo de simulación de pspice LTC1047/LT de la librería LIN_TECH del software OrCAD. A continuación se muestra la respuesta Voltaje vs Temperatura de la etapa de amplificación.

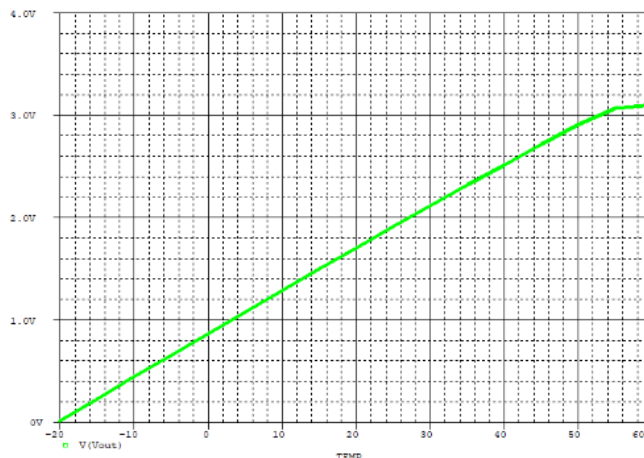


Fig. 7. Voltaje vs Temperatura de la etapa de amplificación.

Y los valores máximo y mínimo de la figura 7, cuyo comportamiento es lineal, se muestran a continuación:

Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
X Values	-20.000	53.442	-73.442
V(Vout)	9.714m	3.0190	-3.0093

Fig. 8. Valores Máximo y Mínimo.

Estos valores máximos y mínimos corresponden al rango de medición real de este sensor, el cual sería de $[-20^{\circ}\text{C}$ a 53.442°C], suficiente para este proyecto.

D. CONVERSADOR ADC

Para esta etapa que se encarga de hacer la conversión correspondiente de las señales de temperatura sensadas, se propuso el ADC de 12 bits de precisión libre de ruido, ADS1014 de Texas Instruments, el cual posee un package de $2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$. Este conversor es compatible con el protocolo I2C, trabaja a 3kSPS en su máxima resolución, posee un voltaje de referencia low-drift incorporado lo cual lo hace más robusto ante cambios de la señal de entrada y de alimentación, además de ser de bajo consumo de potencia.

Para llevar a cabo la simulación se usó el modelo presente en el software Proteus. En las figuras 9, 10 y 11 se aprecia el correcto funcionamiento del circuito y cumple con los rangos de temperatura trabajados. El precio del conversor ronda los \$1.4 USD teniendo en cuenta los diferentes distribuidores del mismo.

A continuación se muestra el ADC simulado para 3 valores de temperatura, -3.18°C , 13.95°C y 30.98°C :

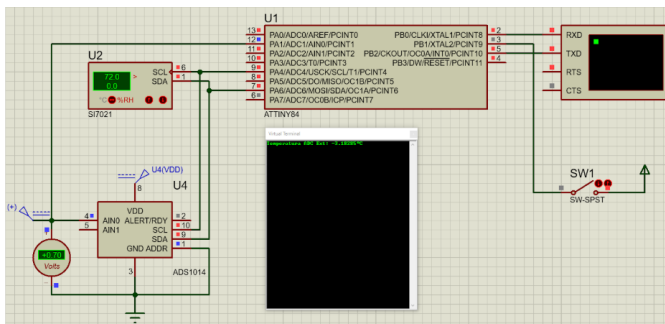


Fig. 9. ADC para un voltaje de 0.7V.

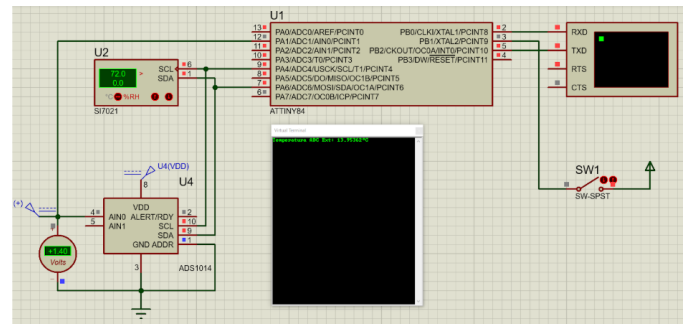


Fig. 10. ADC para un voltaje de 1.4V.

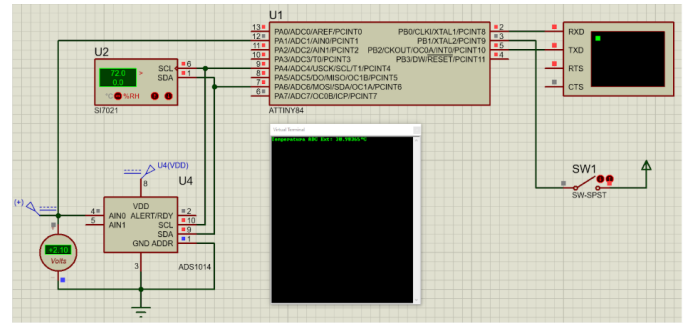


Fig. 11. ADC para un voltaje de 2.1V.

E. MICROCONTROLADOR

El microcontrolador que se seleccionó es el ATtiny84. Este es un microcontrolador de 8-bits desarrollado por ATMEL, que utiliza la arquitectura AVR, cuenta con protocolos I2C y SPI, 14 pines SOIC y un conversor ADC interno de 10-bits, el cual se utiliza para realizar las conversiones análogo-digitales de las medidas de temperatura, para realizar una comparación del funcionamiento y rendimiento con el ADC externo.

Para su correcto funcionamiento, el microcontrolador necesita una tensión de alimentación entre 2.7V y 5.5V para trabajar en un rango de temperatura de -40°C a 85°C . Para nuestro diseño usaremos una alimentación de 3.3V, la cual es la alimentación para las demás etapas del circuito.

Por otro lado, el microcontrolador cuenta con una memoria flash de 8KB para almacenar el programa a implementar, 512B de SRAM y una memoria EEPROM de 512B. Para realizar la programación de este microcontrolador se utilizó el IDE de Arduino, con las respectivas librerías de ATtiny. El conversor ADC es capaz de trabajar a 76kSPS en su máxima resolución, y cuenta con un voltaje de referencia interno de 1.1V, pero se puede ajustar para que el voltaje de referencia sea igual a la alimentación del microcontrolador. Este microcontrolador tiene un costo de \$1.98US y las dimensiones de package son de 4x4 mm.

Como se mostró anteriormente, el microcontrolador se simuló en Proteus y se implementó un “Serial Plotter” para

mostrar los valores y comprobar el correcto funcionamiento. A la hora de intentar simular todos los bloques juntos se debe de eliminar el “Serial Plotter” con el fin de que quepa todo en los 8KB de memoria del microcontrolador.

F. ADC Interno

El ADC interno del microcontrolador se configuró para leer la señal de voltaje que sale de la etapa de amplificación de temperatura. Esto se logró configurando los registros internos del microcontrolador. A continuación se muestran tres simulaciones para el conversor análogo-digital interno con los mismos valores de temperatura anteriormente simulados:

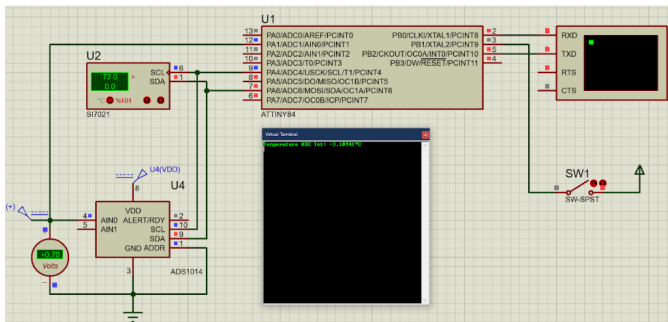


Fig. 12. ADC Interno para un voltaje de 0.7V.

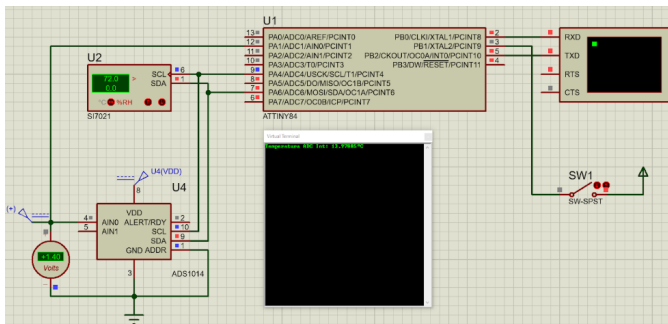


Fig. 13. ADC Interno para un voltaje de 1.4V.

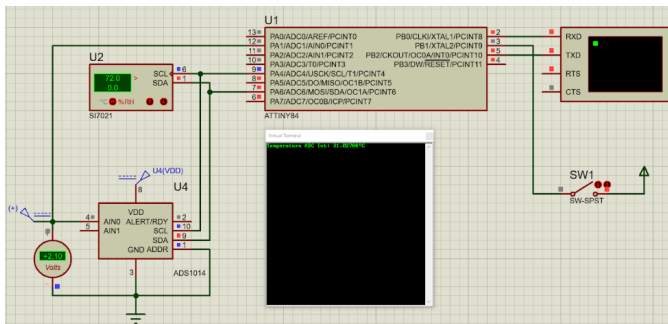


Fig. 14. ADC Interno para un voltaje de 2.1V.

G. MODULO LoRa

La frecuencia a la cual se va a transmitir es de 915 MHz, que corresponde a la banda permitida en Colombia para hacer proyectos de IoT. La técnica de modulación utilizada es LoRa™, ideal para aplicaciones de IoT y aficionados. Uno de los moduladores más utilizados es el RFM95, una placa de desarrollo conocida como “transceptor”, es decir, transmisor y receptor a la vez. Este modulador permite realizar comunicaciones de espectro extendido con alcances ultra largos y una alta inmunidad a interferencias minimizando el consumo de corriente.

Este modulador soporta técnicas de modulación como FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ y OOK. Si se utiliza la técnica LoRa™ se puede llegar a tener sensibilidades de hasta -148dBm. Si se combina esta sensibilidad alta con una amplificación interna de +20dBm se tiene un modulador que funciona de forma adecuada en aplicaciones que requieran un alto rango de transmisión o alta robustez. Este modulador tiene una interfaz SPI por la cual se comunica con el microcontrolador y este le envía los datos a modular.

Para simular el módulo LoRa™ se tuvo que hacer por partes. Primero se simuló en Proteus el envío de los datos del microcontrolador al módulo RFM95 a través de SPI, esto solo se pudo hacer parcialmente ya que Proteus no tiene este módulo RFM95.

Para simular la parte del microcontrolador que envía los datos hacia el modulador LoRa se utilizó un “SPI Debugger” en Proteus. En el “Serial Plotter” se ve cómo se reciben los datos incorrectos, debido a que el microcontrolador no está recibiendo respuesta del modulador RFM95 como se observa en las figuras, ya que no se encontró modelo en Proteus para poder simular correctamente. Sin embargo en el “SPI Debugger” se puede ver cómo se están enviando los datos correctamente.

Se intentó simular la señal de “ready” que envía el módulo RFM95 al microcontrolador cuando ya se terminaron de enviar los datos con un interruptor, pero esto no fue satisfactorio ya que existe más complejidad que solo un enable para esta señal del módulo.

A continuación se muestran las simulaciones de LoRa en Proteus y lo que muestra el “SPI Debugger”:

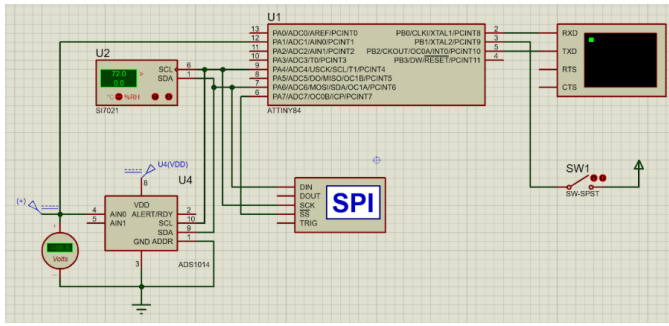


Fig. 15. Circuito con SPI Debugger.

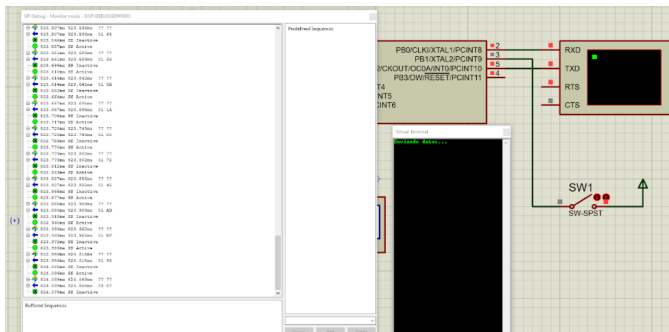


Fig. 16. SPI Debugger.

La parte de modulación se hizo con la ayuda de GNU Radio, en donde se pudo importar algunos flujogramas para esta modulación, donde se puede observar como se realiza esta. Como se puede ver en la figura 17, el flujograma empieza conectándose a un Socket PDU, el cual es una conexión a un servidor UDP (servidor de protocolo de datagramas de usuario), y a través de la consola de Linux se conectó a dicho servidor y se le enviaron algunos datos al flujograma para realizar las pruebas.

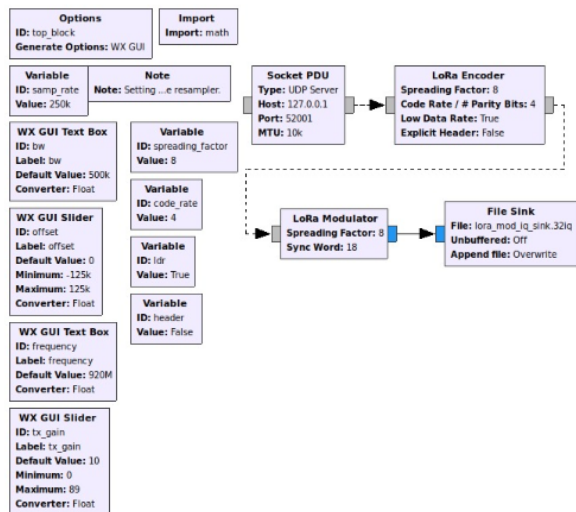


Fig. 17. Flujograma de modulación LoRa™.

Luego de que se procesan los datos y se hace la modulación de LoRa™, esta simulación en tiempo se guarda como un archivo de texto. Para visualizar la señal modulada con LoRa™ se utilizó un programa llamado InSpectrum, el cual permite ver esta señal en el dominio del tiempo. La modulación LoRa™ está basada en técnicas de modulación de espectro ensanchado derivadas de la tecnología chirp de espectro ensanchado (CSS).

A continuación se muestra la señal modulada con LoRa™, confirmando así que la modulación se hace de forma correcta.



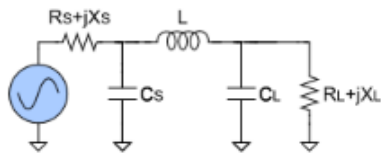
Fig. 18. Modulación LoRa™ en tiempo.

El módulo RFM95 es una buena alternativa para aplicaciones IoT ya que tiene un buen rango de funcionamiento, es robusto y tiene un precio asequible alrededor de \$3 USD.

H. RED DE ACOPLAMIENTO

A la salida del puerto del módulo LoRa™ RFM95, se tiene una impedancia de 50Ω . Pero la antena diseñada mostrada en la figura 23 tiene una impedancia de $52+j2 \Omega$. Para acoplar la impedancia de la antena para que sea exactamente 50Ω se utilizó una red de acople tipo π con un factor Q de 10. Este factor Q es el factor de calidad que mide la eficiencia de radiación de la antena. Para el cálculo de las inductancias y capacitancias requeridas se utilizó una página que realiza este cálculo.

PI NETWORK IMPEDANCE MATCHING



INPUTS

Frequency	F	915	MHz
Source Resistance	RS	50	Ohm
Source Reactance	XS	0	Ohm
Load Resistance	RL	52	Ohm
Load Reactance	XL	2	Ohm
Q Factor	Q	10	Ohm
Circuit DC Current		Pass DC Current	

OUTPUTS

L: 1.77e-9 CS: 3.41e-11 CL: 3.36e-11

Fig. 19. Valores elementos red de acople.

Para simular la red de acople π se usó el circuito mostrado en la figura 20 con la ayuda del software OrCAD. La Red de acople corresponde al circuito encerrado en azul:

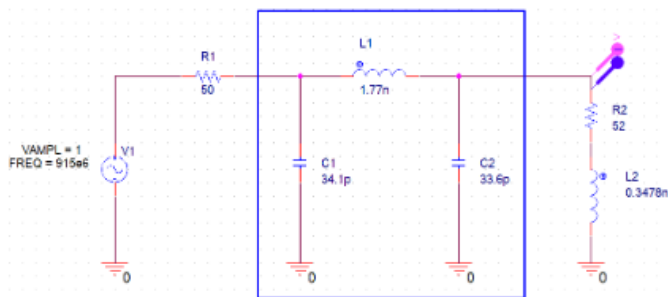


Fig. 20. Simulación Red de Acople OrCAD.

El modulador LoRa™ se simuló como una fuente sinodal de frecuencia 915MHz con una impedancia de 50 Ω en serie. La red de acople π se implementó con los valores dados por el software mostrados en la figura 19. La antena se simuló como una impedancia de valor 52+j2 Ω . Importante recalcar que la impedancia es de la forma $R+jwL$ y w es $2\pi f$. L2 calculado con las fórmulas anteriores resulta en un valor de 0.3478nH. A continuación se muestran los resultados de la simulación:

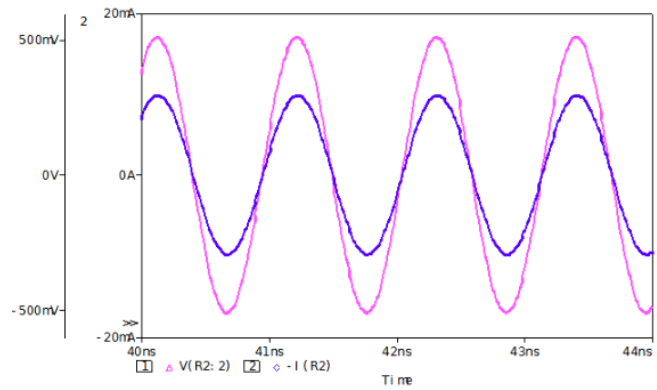


Fig. 21. Voltaje y Corriente del circuito de Acople.

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	YatLastX(V(L1:2)/(-I(R2)))	51.51613

Fig. 22. Valor de la resistancia equivalente.

Como se puede ver en la figura 22 el valor de impedancia visto en la antena es de 51.5 Ω y se observa que el voltaje y la corriente están en fase, por lo tanto es una carga puramente resistiva. Concluyendo así que la red de acople funciona correctamente.

I. ANTENA

Se seleccionó un diseño de antena de meander-line tipo F invertida. Este tipo de antena se usó por su forma geométrica para reducir las dimensiones de la PCB, la antena puede formar una línea de meandro para reducir la altura mientras se conserva su longitud eléctrica diseñada. Este tipo de antenas son diseñadas para aplicaciones de IoT que operan a frecuencias desde 868MHz hasta 955MHz. Esta antena es ideal para usar con transmisores como el RFM95 con una ganancia máxima de 30dBm. El tamaño de la antena diseñada es de 43x20 mm. Se considera una antena de tamaño medio y de bajo costo, muy asequible para aplicaciones IoT.

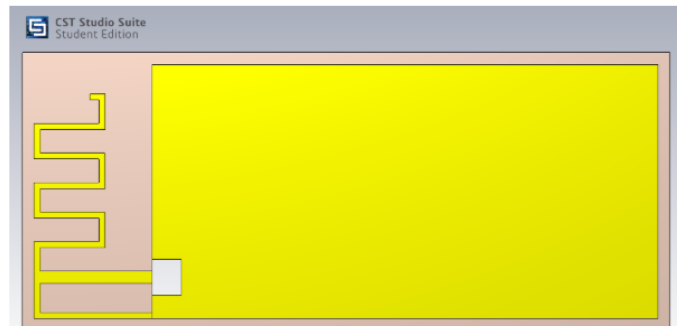


Fig. 23. Vista superior antena.

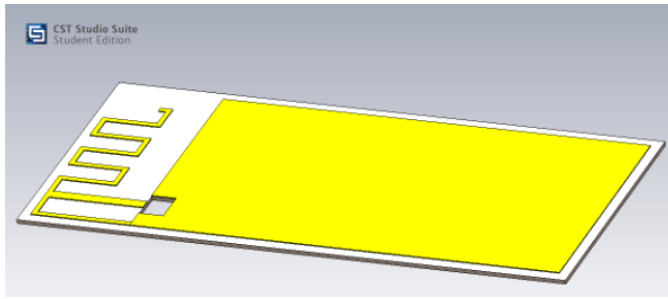


Fig. 24. Perspectiva antenna.

El diseño de la antenna fue en base al realizado por Fredrik Kervel en 2011 [18]. A continuación se van a mostrar los resultados de simular la antenna en el software CST Studio Suite de Dassault Systèmes.

El parámetro S11 representa cuánta potencia de la antenna es reflejada hacia la fuente, también es conocido como “coeficiente de reflexión”, Γ o “pérdida de retorno”. Por lo tanto es ideal que a la frecuencia que se desea operar, el parámetro S11 sea lo más pequeño posible. A continuación se muestra el resultado de la simulación.

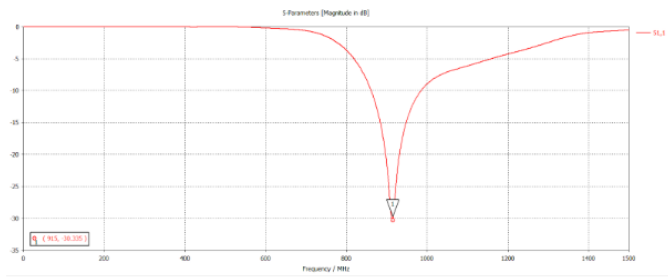


Fig. 25. Parámetro S11.

Como se puede ver en la figura 25, a 915MHz el coeficiente S11 es de -30dB, lo cual significa que muy poca potencia se refleja de vuelta hacia la fuente.

Otra simulación importante es la de la Carta de Smith, la cual es una herramienta que permite visualizar la impedancia de una línea de transmisión y de un sistema de antenas como una función de la frecuencia. Esta carta se puede usar para comprender las líneas de transmisión y cómo se comportan desde el punto de vista de las impedancias. También toman un papel muy importante en el acople de los circuitos ya que permiten ver el valor de la impedancia de la antenna a una cierta frecuencia.

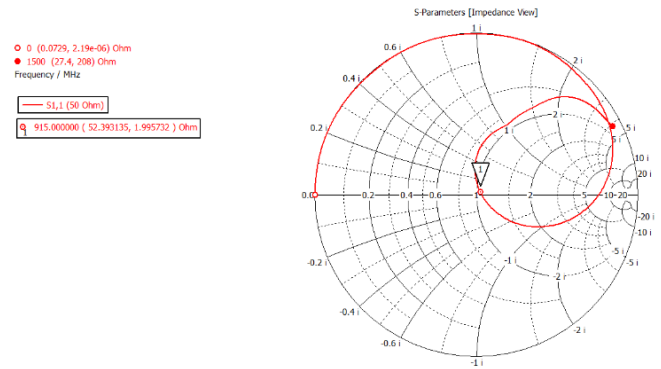


Fig. 26. Carta de Smith.

Como se puede ver en la figura 26, a una frecuencia de 915MHz (cursor 1) la antenna tiene una impedancia de $52.39+j2 \Omega$, lo cual es casi 50Ω . Este comportamiento quiere decir que la antenna diseñada se comporta como una carga de 50Ω y por lo tanto, en teoría, no sería necesaria una red de acople de impedancias. De igual manera se implementó la red de acople para evitar problemas.

A continuación se muestran las diferentes potencias en la antenna. Una de las medida más importante es la potencia radiada a 915MHz, lo cual nos da una idea de cuanto potencia es radiada realmente.

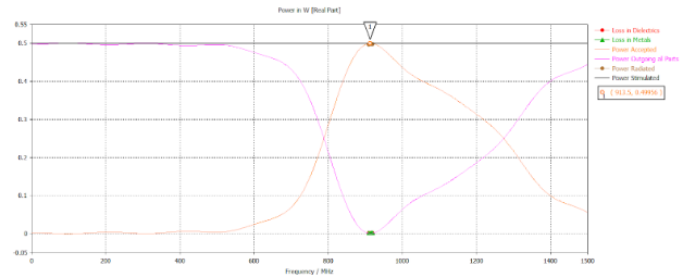


Fig. 27. Potencias en la Antena.

En la figura 27 se puede observar que la potencia radiada a 915MHz es de aproximadamente 0.5W, lo cual es igual a la potencia simulada (línea negra) lo que es equivalente a 27 dBm. La norma impuesta por la ANE dice que el límite de potencia radiada es de 30dBm, con lo cual se comprueba que estamos dentro de la norma.

Finalmente tenemos el patrón de radiación, también conocido como “far-field pattern” lo cual se refiere a la dependencia direccional (angular) de la fuerza de las ondas de radio de la antenna. Este patrón de radiación es una representación gráfica de las características de radiación de la antenna, en función de la potencia. A continuación se muestra el patrón de radiación para nuestra antenna:

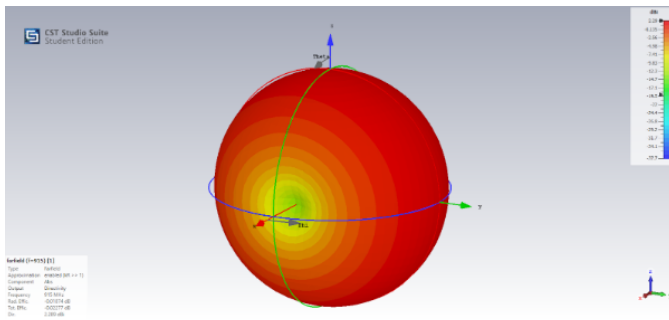


Fig. 28. Potencias en la Antena.

Como se puede ver en la figura 28, la antena tiene un comportamiento casi omnidireccional, irradia igualmente en casi todas las direcciones (esfera) excepto en la del eje x, en donde la radiación es menor.

J. ETAPA DE ALIMENTACIÓN

Para la etapa de alimentación se seleccionó una batería de 3.3V ya que lo que se plantea es que el proyecto sea portable. Este valor se seleccionó en base a los valores de tensión necesarios para alimentar cada uno de los componentes. Además, se incluyó un regulador de tensión de 3.3V step-up NCP1402 que permite eliminar el ruido de la fuente y proporcionar un valor de 3.3V hasta mínimo con una tensión de arranque de 0.8 V, con el fin de que si se descarga la batería, se siga proporcionando la alimentación correspondiente a cada uno de los componentes.

REFERENCES

- [1] Bor, M., Vidler, J. E., & Roedig, U. (2016). LoRa for the Internet of Things.
- [2] Semtech: AN1200.22 LoRaTM Modulation Basics. <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>. : Semtech, 2015
- [3] Wallace, R., 2013. Antenna Selection Quick Guide. [ebook] Texas Instrument. Available at: <https://www.ti.com/lit/an/swra351a/swra351a.pdf>
- [4] 2018. Temperature Sensing With PTC Circuit. [ebook] Texas Instrument. Available at: <https://www.ti.com/tool/CIRCUIT060003>
- [5] Co.mouser.com. 2020. SMD PTC - Nickel Thin Film Linear Thermistors. Available at: <https://co.mouser.com/datasheet/2/427/tfpt-1762890.pdf>
- [6] MySensors. 2020. Air Humidity Sensor - Si7021 — Mysensors - Create Your Own Connected Home Experience. Available at: https://www.mysensors.org/build/humidity_si7021
- [7] E. Gomez, "Temperatura y humedad sensor SI7021 con Arduino", Rinconingenieril.es, 2020. Available: <https://www.rinconingenieril.es/temperatura-y-humedad-sensor-si7021/>.
- [8] S. Labs, "I2C HUMIDITY AND TEMPERATURE SENSOR", Silabs.com, 2020. [Online]. Available: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si7021-A20.pdf>.
- [9] "RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module", Cdn.sparkfun.com, 2020. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/a/e/7/e/b/RFM95_96_97_98W.pdf.
- [10] L. Technology, "Dual Micropower Zero-Drift Operational Amplifier with Internal Capacitors", Analog.com, 2020 Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1047fa.pdf>.
- [11] GitHub. 2019. Lucullustheonly/Tinywire. [online] Available at: <https://github.com/lucullusTheOnly/TinyWire/tree/master/examples>.
- [12] Technoblogy.com. 2016. Technoblogy - Making Your Own I2C Peripherals. [online] Available at: http://www.technoblogy.com/show?1G29cite_note1.
- [13] Catsensors.com. 2019. Tecnología Lora Y Lorawan - Catsensors. [online] Available at: <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>.
- [14] Medium. 2019. Haciendo Iot Con Lora: Capítulo 1.- ¿Qué Es Lora Y Lorawan?. [online] Available at: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-cap%C3%ADtulo-1-qu%C3%A9-es-lora-y-lorawan-8c08d44208e8>.
- [15] En.wikipedia.org. 2020. Lora. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/LoRa>.
- [16] EEWEB. 2020. Pi-Match. [online] Available at: <https://www.eeweb.com/tools/pi-match/>.
- [17] Technology, I., 2020. The Q Factor Of Antennas – What Is Q Factor, What Affects It, And How Do You Calculate It?. [online] TurboFuture. Available at: <https://turbofuture.com/industrial/The-Q-Factor-of-Antennas-What-is-Q-Factor-What-Affects-It-and-How-Do-You-Calculate-It>.
- [18] Kervel, F., 2011. 868 Mhz, 915 Mhz And 955 Mhz Inverted F Antenna. [online] Texas Instruments. Available at: <https://www.ti.com/lit/an/swra228c/swra228c.pdf?ts=1598794869292>.
- [19] Bevelacqua, P., 2015. S-Parameters For Antennas (S11, S12, ...). [online] Antenna-theory.com. Available at: <http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>.
- [20] Theory, A., 2020. Smith Charts. [online] Antenna-theory.com. Available at: <http://www.antenna-theory.com/tutorial/smith/chart.php>.
- [21] Wolff, C., n.d. Antenna Radiation Pattern - Radartutorial. [online] Radartutorial.eu. Available at: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antenna%20Pattern.en.html>.
- [22] GitHub. 2020. Sandeepmistry/Arduino-Lora. [online] Available at: <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa>.
- [23] Benchoff, B., 2016. Building A Lora PHY With SDR. [online] Hackaday. Available at: <https://hackaday.com/2016/11/18/building-a-lora-phy-with-sdr/>.
- [24] GitHub. 2016. Bastillereasearch/Gr-Lora. [online] Available at: <https://github.com/BastilleResearch/gr-lora>.
- [25] GitLab. 2020. LeoKorbee/ATtiny84_low_power_LoRa_node_OOP. [online] Available at: https://gitlab.com/iot-lab-org/ATtiny84_low_power_LoRa_node_OOP/-/tree/master.