

**Facultad de Informática
Universidad Nacional de La Plata**



Análisis de la Comunicación de Radio Frecuencia con Módulos nRF24L01

Trabajo Final para obtener el grado de: Especialista en Redes y Seguridad

Autor: Tamara Gagliardi

Director: Fernando G. Tinetti

Fecha: Agosto 21, 2018

Índice

1 Introducción	3
1.1 Objetivos	3
1.2 Motivación	3
1.3 Organización del contenido	4
2. Estado del Arte	5
2.1 Implementaciones y uso de RF	5
2.2 Canales, frecuencias y bandas	6
2.3 Limitaciones de las comunicaciones RF	8
2.4 Arduino Uno	8
2.5 Módulo nRF24L01	11
3 Metodología y experimentación	13
3.1 Identificación del armado de la experimentación	13
3.2 Materiales	15
3.3 Procedimiento del armado	15
3.4 Software y librerías	19
3.5 Código	20
3.6 Desarrollo de la práctica	22
3.7 Observaciones durante la experimentación	29
4 Interpretación y discusión de los resultados	31
4.1 Ámbito laboral/industrial	31
4.2 Ámbito descampado	35
4.2 Ámbito hogar	40
5 Conclusiones y Trabajo futuro	45
5.1 Trabajo futuro	46
Referencias	48

1 Introducción

Cuando se busca implementar soluciones de comunicación inalámbrica de IoT (Internet of Things, Internet de las Cosas), tales como sistemas de riego inalámbrico, soluciones de domótica, hay varias opciones por elegir. Las mismas varían en costo, eficiencia y dificultad en su implementación. Con el acceso a software libre y gratuito al igual que comunidades abiertas de desarrollo de librerías aplicadas a las comunicaciones, se vuelve más accesible realizar implementaciones de comunicaciones inalámbricas. El siguiente trabajo se enfoca en la comunicación de radio frecuencia con un estudio específico del módulo nRF24L01. Es importante una caracterización general de este sistema y módulo de comunicaciones, que está entre los de menor costo y con presencia/disponibilidad en el mercado desde hace varios años. Con el objetivo de llevar a cabo esta caracterización general, evaluar y comprender su funcionamiento se diseñaron diferentes experimentos, que nos permitieron identificar características de dicho módulo. El objetivo final es, por un lado, identificar y encontrar valores para métricas básicas tales como tiempos de comunicaciones, pérdida de datos, entre otros componentes. Por otro lado, se busca sentar las bases y obtener experiencia para luego proponer e implementar una biblioteca de comunicaciones simple pero completa y confiable para transferencias de datos basadas en nRF24L01.

1.1 Objetivos

Se desea analizar la infraestructura de comunicaciones de radio frecuencia (RF) con el fin de evaluar características tales como el alcance y el rendimiento de la misma. Más específicamente, se plantea el análisis experimental con hardware de bajo costo, Arduino con módulos de comunicación de RF llamados nRF24L01, para:

- Evaluar el alcance y rendimiento de comunicaciones RF en tres ambientes: hogareño, industrial/laboral y rural.
- Elaborar y documentar un sistema mínimo de transferencia de datos entre módulos, incluyendo la documentación de características de funcionamiento en los varios ambientes y observaciones hechas en la experimentación.

1.2 Motivación

Las comunicaciones de radio frecuencia (RF) han adquirido importancia en el área de la industria de redes y sensores. El bajo costo de la producción de micro controladores facilitan la expansión

de una nueva generación de sensores llamados “sensores inteligentes” (Ferrari; Flammini; et al., 2008). Al ser económico, eficiente y pequeños en tamaño se ha promovido también como parte del surgimiento de redes de sensores inalámbricas (wireless). Se le da el nombre de nodo a cada dispositivo que forma parte de una red que comparten un mismo objetivo. Su implementación es amplia y varía dependiendo de la frecuencia en la cual opera.

Hay varias tecnologías inalámbricas que han expandido su implementación en las últimas décadas, tal es el caso de Bluetooth, Wi-Fi y ZigBee. Gracias a dichas tecnologías podemos encontrar artefactos hogareños e industriales que hacen uso de las comunicaciones de radio frecuencia en la banda ISM (industrial, scientific and medical) 2.4 GHz. Algunos ejemplos incluyen el horno microondas, routers Wi-fi, teclado inalámbrico, mouse inalámbrico, controles remotos de variada índole, entre otros. El módulo nRF24L01 utilizado en las experimentaciones realizadas en este proyecto opera a 2.4 GHz. A diferencia de las tecnologías mencionadas anteriormente, el chip nRF24L01 ofrece un menor consumo de energía, su implementación es más sencilla dado que el protocolo de comunicación es menos complejo y su costo es significativamente menor (Abdullah; et al., 2014).

Existen varias plataformas de hardware para conectar y coleccionar la información provista por las redes de sensores, en este trabajo nos enfocaremos en Arduino. De estilo open source (libre), el Arduino ofrece versatilidad, sencillez y una vasta comunidad de contribuidores que facilita su rápida adaptación (Bell, 2013). Así mismo, se encuentran librerías open source que permiten el desarrollo de tests e implementaciones de soluciones utilizando el módulo nRF24L01.

1.3 Organización del Contenido

En el capítulo 2 se profundizan los temas más importantes relacionados a las comunicaciones de radiofrecuencia y el trabajo de análisis realizado sobre Arduino Uno y el módulo nRF24L01. En todos los casos, las descripciones y explicaciones se concentran en el uso del módulo de comunicaciones de radiofrecuencia con la placa de desarrollo Arduino. En el capítulo 3 se explica el procedimiento que se siguió para completar la experimentación y se fundamenta su diseño. En este caso, la descripción se lleva a cabo con el mayor nivel de detalle posible principalmente teniendo en cuenta dos aspectos: 1) que se pueda replicar, de manera tal que todo lo necesario quede en este documento, y 2) que se pueda aprovechar para avanzar en los temas relacionados con las comunicaciones de radiofrecuencia en este contexto. El siguiente capítulo, el capítulo 4,

cuenta con los resultados obtenidos en cada experimento, y una breve descripción y análisis de los resultados obtenidos. Se concluye este trabajo con el capítulo 5, en donde se sintetizan las deducciones generadas gracias a los resultados y se elabora sobre los posibles trabajos futuros. Posteriormente, se dan las referencias de las fuentes de información utilizadas a lo largo de todo el trabajo y de este informe en particular.

2. Estado del Arte

Con el fin de crear una base conceptual, en este capítulo se destacan los usos y limitaciones de las comunicaciones de radiofrecuencia; al igual que el concepto de canales, frecuencias y bandas. Luego, se expande sobre las especificaciones de el Arduino Uno y de el chip nRF24L01.

2.1 Implementaciones y uso de RF

Históricamente, el uso de radiofrecuencia como medio de comunicación dio pie a varias implementaciones, dentro de las que se destacan:

- Telefonía: Las comunicaciones telefónicas son una importante aplicación del multiplexaje por división de frecuencias. La telefonía móvil utiliza transmisión de señales a través de la atmósfera en la banda de radiofrecuencia (RF) (Oppenheim; et al., 1998).
- Radiodifusión (AM-FM): La radio cuenta con un transmisor y un receptor el cual recibe e interpreta las señales enviadas por las radiodifusoras.
- Automotriz: Los automóviles modernos cuentan de redes de sensores que monitorean el correcto funcionamiento de su motor y sub-sistemas (Bell, 2013).
- Ambiental: Con el uso de sensores se puede monitorear diversos aspectos del ambiente como la humedad, índice de contaminación, detección de sismos, entre otros (Bell, 2013).
- Seguridad y vigilancia: Un sistema básico de seguridad está diseñado para grabar, alertar y prevenir problemas de seguridad en el ambiente en donde se coloquen los sensores de monitoreo (Bell, 2013).
- Radionavegación y radiolocalización: Tanto en el ámbito aéreo como naval, RF ha sido utilizado por entes del gobierno históricamente tanto para mantener contacto con los individuos en aviones y embarcaciones como a su vez es utilizado en los mismos para navegar por aire, tierra y agua.
- Wi-Fi: Dentro de las soluciones más cotidianas, el Wi-Fi (Wireless Fidelity) emitido por los routers es una conexión de tipo RF. Gracias a ella usuarios pueden conectarse a la red de Internet para acceder a múltiples páginas web, aplicaciones y demás contenido.

En casos de la telemetría, se pueden identificar rápidamente en un rango de varios metros y fuera de la línea de visión objetos marcados con etiquetas RFID (Radio Frequency Identifier). Los sistemas RFID cuentan con un transpondedor ubicado en el objeto que quiere ser identificado y un lector. Cuando el transpondedor (generalmente en forma de etiqueta) entra dentro de la zona de lectura, la energía enviada por el lector activa al transpondedor generando el intercambio de datos (Finkenzeller, 2010). Se pueden utilizar RFIDs en varias soluciones industriales y de negocio como es la identificación y seguimiento logístico de mercadería. En aeropuertos se puede hacer un seguimiento de paquetes y equipaje gracias a esta tecnología.

En implementaciones más recientes, se utilizan señales RF existentes, ya sea de radio, televisión o telefonía, como medio portador de datos sin la necesidad de una batería. Como fue demostrado en la publicación de *Ambient Backscatter: Wireless Communication Out of Thin Air* de alumnos de la Universidad de Washington de Estados Unidos, con el uso de dos módulos RF se puede diseñar un método de pago inalámbrico y un celular móvil que no requieren de una fuente de alimentación sino que utiliza señales existentes en su alrededor como medio transmisor.

2.2 Canales, Frecuencias y Bandas

Una onda de radio es una onda electromagnética generada por una antena. La misma puede ser generada con diferentes frecuencias. Para que un receptor pueda interpretar la señal enviada debe operar en la misma frecuencia que el transmisor que emitió dicha onda.

El espectro electromagnético se divide en bandas las cuales son intervalos de frecuencias a los que se les asigna un propósito dentro de las radiocomunicaciones. La banda ISM se refiere a el grupo de bandas de radiofrecuencia que fueron reservadas mundialmente para el uso de radiofrecuencias no comerciales en áreas de trabajo industriales, científicas y médicas. Según la zona geográfica, en la banda de los 2.4 GHz se utilizan de 7 a 14 canales y 13 en Europa. El ancho de banda de la señal (22 MHz) es superior a la separación entre canales consecutivos (5MHz), por eso se hace necesaria una separación de al menos 5 canales con el fin de evitar interferencias entre celdas adyacentes (Simons, 2012).

Debido a que la banda ISM 2.4 GHz está abierta para ser utilizada por quien quiera operar un dispositivo en dicha banda, ocurre que hay muchos artefactos haciendo uso de la misma lo que puede llevar a interferencias. Existen dos métodos que se usan para modular la frecuencia en la banda 2.4 GHz y prevenir interferencias por ende optimizando la comunicación. Se puede emplear

el salto de frecuencia (conocido como frequency-hopping spread spectrum, FHSS) o el espectro ensanchado por secuencia directa (conocido como direct-sequence spread spectrum, DSSS). Bluetooth hace uso de FHSS mientras que Wireless USB, IEEE 802.11b/g/a (comúnmente llamado Wi-Fi) y IEEE 802.15.4 (comúnmente llamado ZigBee) utilizan DSSS (Winfield ; et al., 2006). FHSS consiste en transmitir una parte de la información en una determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo llamada “dwell time” e inferior a 400 ms. Pasado este tiempo se cambia la frecuencia de emisión y se sigue transmitiendo a otra frecuencia (Guacara, 2010). La técnica DSS consiste en la combinación de la señal a transmitir en una secuencia de bits a mayor velocidad de transmisión. A esta secuencia se la conoce como chipping code o “código de troceado”, y no es más que un patrón redundante de bits asignado a cada bit a enviar, que divide la información del usuario acorde a un “ratio de esparcimiento” (Spread Ratio). Cuando se desea enviar la información, se transmiten los códigos correspondientes. Por ejemplo, si el bit a enviar es 1 la secuencia que se transmite es 00010011100. Si uno o más bits del patrón sufren interferencias durante la transmisión, el receptor podría reconstruir el dato enviado, gracias a la redundancia del chipping code (Torralba Reyero, 2003). En la Tabla 1 se muestran las diferentes tecnologías junto a sus canales y técnicas para prevenir la interferencia.

Comparación de tecnologías 2.4 GHz			
	Velocidad de transferencia de datos	Número de canales	Método de prevención de interferencia
Wi-Fi (802.11b)	11 Mbps	13 (Europa)	Canal fijo de prevención de colisiones (DSS)
Bluetooth	723 Kbps	79	Canal adaptivo de salto de frecuencia (FHSS)
Wireless USB	62.5	79	Frecuencia ágil (DSS)
Zigbee	128 Kbps	16	Canal fijo de prevención de colisiones (DSS)

Tabla 1. Comparación de Wi-Fi, Bluetooth, Wireless USB y Zigbee en su uso de canales, velocidad de transferencia y método de prevención de interferencia.

2.3 Limitaciones de las comunicaciones RF

La energía electromagnética irradiada por una antena se dispersa en direcciones múltiples. Algunas de ellas siguen una trayectoria directa y corta sin obstrucciones a la antena receptora. A esto se lo conoce como “Line of Sight” (LOS). En comunicaciones RF, la zona de Fresnel (Fresnel Zone) es el área elíptica que se forma de un punto A al punto de comunicación B conectados por el “Line of Sight”. Para asegurar una buena comunicación RF, la zona Fresnel debe tener un 60% de su área liberada de obstrucciones (Campbell Scientific, 2016). En la siguiente figura se ilustran dos torres, cada cual con una antena. Entre ambas antenas se observa una cadena montañosa que representa la posible obstrucción. También se ilustra la mencionada zona de Fresnel.

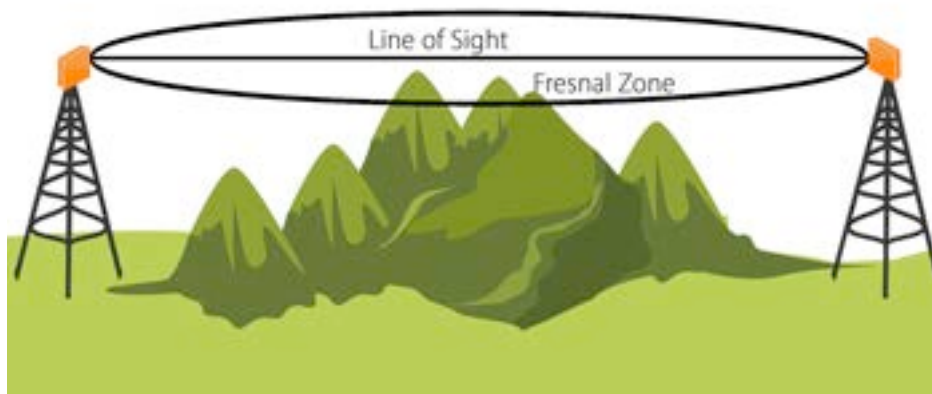


Figura 1. Se muestra la línea recta visual sin obstrucción (Line of Sight) y la zona elíptica de Fresnel entre dos puntos de conexión. Imagen obtenida de <http://www.proxim.com/products/knowledge-center/calculations/calculations-fresnel-clearance-zone>

Adicionalmente, las comunicaciones RF se ven afectadas en la presencia de interferencia electromagnética (EMI, electromagnetic interference) también conocidas como RFI (radio-frequency interference). EMI es toda perturbación que degrada, obstruye o interrumpe el funcionamiento de las señales de microondas (Gilani, 2018). La misma puede ser causada por artefactos hogareños como un horno microondas, un control remoto, estaciones de radio y televisión, por nombrar algunos.

2.4 Arduino Uno

Arduino fue desarrollado hace algo más de una década, y su crecimiento en el mercado se debe a la sencillez del producto junto a su bajo costo y software de uso gratuito y abierto (open source)

(página oficial Arduino www.arduino.cc, 2018). Los Arduinos se han utilizado para desarrollar prototipos de soluciones hogareñas y semi industriales. El Arduino permite conectar sensores, actuadores de diferentes índoles como botones y perillas. Desde su creación varios modelos de la placa electrónica con microcontrolador se han desarrollado, dentro de las que se encuentra el Arduino Uno.

A continuación se encuentran las características técnicas del Arduino Uno R3 obtenidas en <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. Se utilizó esta versión del Arduino para realizar las experimentaciones.

• Microcontrolador	ATmega328P
• Tensión de funcionamiento	5V
• Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
• Voltaje de entrada (límite)	6-20V
• Digital pines I/O	14 (de los cuales 6 proporcionan una salida PWM)
• PWM digital pines I/O	6
• Pines de entrada analógica	6
• Corriente DC por Pin I/O	20mA
• Corriente DC para Pin 3.3V	60mA
• Memoria flash de	32KB ATmega328P de los que 0,5 KB son utilizados por el gestor de arranque.
• SRAM	2KB ATmega328P
• EEPROM	1KB ATmega328P
• Velocidad de reloj	16 MHz
• Longitud	68,6 mm
• Anchura	53,4 mm
• Peso	25 g

La Figura 2 ilustra los diferentes componentes del hardware Arduino Uno. GND representa “ground” o cable a tierra. Se ilustran los pines de referencia a comunicaciones analógicas y digitales al igual que los pines de voltaje (3V, 5V). Los pines serán los puntos de conexión a los

módulos nRFL01. El microcontrolador, al igual que la fuente de alimentación también se ven reflejados en la figura.

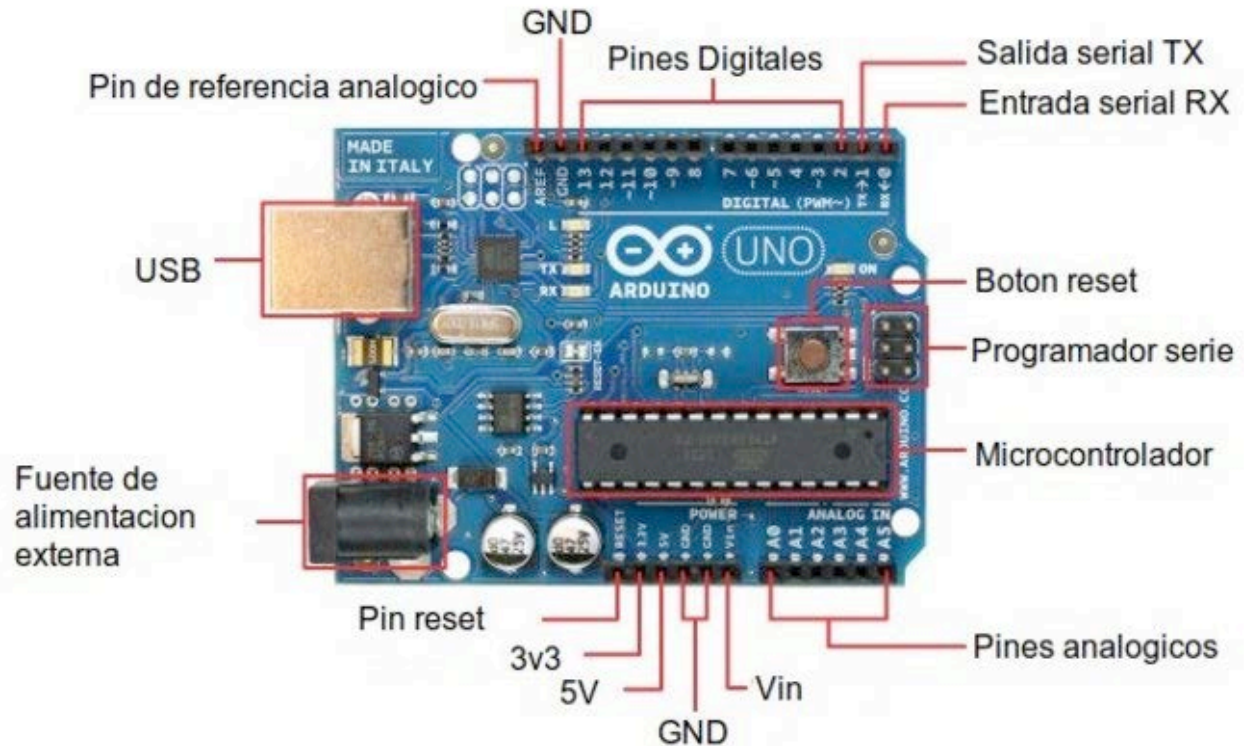


Figura 2. Características técnicas del Arduino Uno R3. Incluyendo los pines, fuente de alimentación, puerto USB y el botón de reset.

Pin VIN:

Este pin puede ser utilizado para alimentar otros dispositivos conectados a la placa. Hay que tener en cuenta que placa en sí no regula la tensión.

Pin GND:

El pin conexión a tierra (ground).

Pin 5v (Volts):

A través de este pin se puede alimentar la placa.

Pin 3.3v (Volts):

Se obtiene una tensión de 3.3v lo que permite alimentar dispositivos de baja tensión.

Pines de entradas analógicas:

La placa de Arduino cuenta con 6 pines de entradas analógica (pin A0 al A5). La tensión que miden va de 0 a 5v, aunque es posible cambiar su rango usando una función con el pin AREF.

Pin IOREF:

El pin IOREF es una copia del pin VIN y se utiliza para indicar a los demás dispositivos conectados a la placa que las tensiones de los pines de entrada y salida son 5v.

Pin RESET:

Este pin tiene el mismo funcionamiento que el botón RESET, se utiliza para reiniciar el microcontrolador.

Pines de entradas y salidas digitales:

Las entradas y salidas digitales son 14 (pin 0 al 13) y ofrecen una tensión de 5v.

Pines A5 SCL y A4 SDA:

Se pueden utilizar para conectar dispositivos que lleven a cabo comunicaciones mediante la librería Wire.

Pin AREF:

Ofrece un voltaje de referencia para las entradas analógicas.

Pines 1 TX y 0 RX:

Estos pines se utilizan para recibir y transmitir datos en serie.

2.5 Módulo nRF24L01

Como se describe en la página oficial de Nordic Semiconductor,

<https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01>,

el nRF24L01 es un chip transceptor que opera en la banda abierta y gratuita de 2.4GHz. Cuenta con un sintetizador de RF y un acelerador de protocolo por hardware Enhanced ShockBurst™ con una interfaz SPI (Serial Peripheral Interface) de alta velocidad para un óptimo control de las aplicaciones. El Enhanced ShockBurst posee un *payload* de 1 a 32 bytes de largo, manejo de pérdida de paquetes automatizado y la posibilidad de una conexión en forma de estrella (star network topology) de 1:6 gracias a su tecnología MultiCeiver™. El nRF24L01 es de baja

potencia y corto alcance. El módulo puede llegar a transmitir datos a 2Mbps al aire libre sin interferencia de paredes u otros obstáculos en distancias menores a 40 metros y a una velocidad de 1Mbps a 8 metros de distancia. El voltaje al que opera es de 1.9 V ~ 3.6 V, transmite con una corriente de 7mA ~ 11.3mA y recibe a 12.6mA ~ 13.5mA. Se debe destacar que el módulo es sensible a una pobre alimentación de corriente lo que puede llevar a su mal funcionamiento. Es importante que la alimentación sea de 3.3 V y preferentemente ofrecido por una fuente de pared. En la siguiente sección de “Metodología y experimentación” se incluye una representación gráfica del nRF24L01 junto a una descripción de la ubicación de los pines que conforman al chip.

Hay cuatro modos en los que el nRF24L01 se puede encontrar: sin corriente-no conectado, standby (en espera), RX (recibiendo) y TX (transmitiendo). El mismo se puede conectar a la placa Arduino Uno y ser programado tanto como transmisor, receptor o transceptor. Algunas aplicaciones del nRF24L01 son: mouse inalámbrico, teclado para PC inalámbrico, auriculares y micrófonos inalámbricos para VOIP (voice over IP), controles remotos para consolas de video juego, RFID activos, artefactos deportivos y juguetes. El módulo puede utilizar 125 canales diferentes lo que da la posibilidad de tener 125 nodos independientes en una misma red. Cada canal puede tener hasta 6 direcciones únicas. Esta característica, asociada con su pequeño tamaño (ver Figura 3), hace que nRF24L01 se utilizado en proyectos hogareños inalámbricos tales como puertas de garaje automatizadas, manejo inalámbrico de luces e implementaciones similares de domótica.

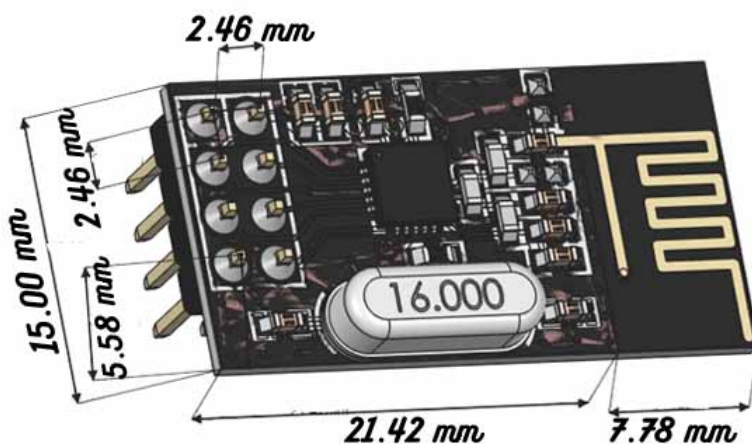


Figura 3. Representación del módulo nRF24L01 y sus dimensiones. Existen tan solo 2,46 mm separando los pines unos de otros y un área de 15.00 mm por 21,42 mm en donde se encuentran los componentes del nRF24L01. Cabe destacar que la sección de 7,78 mm señala el área donde se encuentra la antena del módulo.

3 Metodología y Experimentación

En esta sección se describe la metodología diseñada para llevar a cabo las experimentaciones en los tres ambientes seleccionados. Se describen en detalle los materiales al igual que el procedimiento seguido para armar dos Arduinos Uno con un módulo nRF24L01 cada uno.

3.1 Identificación del armado de la experimentación

Espacio:

Para evaluar el funcionamiento y rendimiento de los módulos, se efectuarán mediciones en tres espacios:

- **Ámbito hogareño:** Departamento en segundo piso, dos dormitorios, dos baños, living y comedor.
- **Ámbito industrial laboral:** Oficina amplia de estilo espacio abierto con pocas paredes de concreto. Columnas de metal expuesto y salas de conferencias de vidrio aislante.
- **Ámbito rural/descampada:** Zona semidesértica de montaña con vegetación baja, arbustos y caminos principalmente de tierra.

Se optó por tres ambientes diversos para evaluar cómo la comunicación del nRF24L01 se ve afectada, o no, en ambientes compuestos por variados materiales y con diferentes distribuciones del espacio. Se realizarán las mismas mediciones en los tres ambientes, tomando notas de observaciones sobre el área, condiciones y demás factores que puedan tener implicancia en los resultados obtenidos.

Los componentes:

Los componentes principales son las dos placas Arduino Uno junto a dos módulos nRF24L01. Fueron seleccionados para esta experimentación dado a su bajo costo, sencilla implementación y amplia documentación. Como referencia, en el 2018 un Arduino Uno en Aliexpress (<https://www.aliexpress.com/>) cuesta entre 5 a 10 dólares mientras que un par de módulos nRF24L01 tiene un costo de promedio de 75 centavo de dólar a 3 dólares. Ambos componentes principales poseen una comunidad activa donde desarrolladores comparten sus experiencia usando los productos y se encuentran disponibles bibliotecas open source para su libre distribución.

En la sección siguiente de “Materiales” se cubren en detalle todos los materiales utilizados al igual que sus cantidades.

La captura de resultados:

Se siguió el mismo método de captura de resultados para los tres ambientes. Ello permitió tener un método de captura homogénea para luego poder comparar los resultados en los diferentes ambientes. En el código se incluyeron impresiones a la pantalla para mostrar el tiempo de envío y recepción, al igual que los mensajes perdidos. Se utilizó la captura de pantalla en el IDE de Arduino para visualizar y copiar los resultados. En la sección a continuación titulada “Desarrollo de la práctica” se describen en detalle los diferentes métodos pensados para la captura y representación de los resultados.

Aunque el código que se ejecuta en cada Arduino Uno es básicamente el mismo, la diferencia está en qué modo se encuentra cada uno al comienzo de la experimentación. Uno de los Arduinos-NRF opera como el “transmisor” ya que es el que comienza por enviar un mensaje mientras que el otro Arduino-NRF se encuentra (también inicialmente) en la función de “receptor”. A continuación se muestra un ejemplo de los mensajes impresos a pantalla cuando se comienza la experimentación.

```
Transmisor: Comienzo de transmisión
El mensaje enviado : 1
El mensaje recibido : 1
Tiempo recibido: 11460
Calculo ::: tiempo envío 11460 - tiempo recibo 13756
RTT 2296
```

A continuación se muestra un ejemplo de el mensaje impreso a pantalla cuando un paquete no puede ser enviado o se identifica un problema en el envío/recepción del mismo:

```
Transmisor: Comienzo de transmisión
El mensaje enviado : 18
El mensaje recibido : 18
Tiempo recibido: 49625504
Calculo ::: tiempo envio 49625504 - tiempo recibo 49635660
```

RTT 10156

Transmisor: Comienzo de transmisión

XX Problema en el envío XX

XX Tiempo máximo acabado XX

Pérdida de paquete: 19 Paquetes perdidos:3

3.2 Materiales

A continuación se enumeran los materiales utilizados en la experimentación:

2 LED

2 módulos nRF24L01+

2 resistores

2 capacitadores

2 Arduino Uno

2 placa de prototipo (bread board)

2 cables USB para Arduino Uno

24 cables conectores (macho hembra)

1 cable de fuente de alimentación de pared

3.3 Procedimiento del armado

A continuación se explica el armado de un Arduino Uno junto a su módulo nRF24L01. El mismo procedimiento de armado se repite dos veces ya que uno de los módulos será programado como transmisor-receptor y el otro como receptor-transmisor.

Siguiendo la Figura 4 y Figura 5 del módulo nRF24L01 y Planilla 1 se conectarán los pines del módulo RF a la placa de Arduino Uno. Se deberá agregar a su vez un capacitor entre la entrada de voltaje VCC 3.3 del módulo y el Arduino Uno GRD (ground) como se ilustra en la Figura 5. El capacitador ayuda con el ruido y con la alimentación del Arduino Uno al módulo nRF24L01. Es sabido que hay problemas con la corriente que genera el Arduino tanto por no ser constante, suficiente o por crear picos de corriente que interfieren en el correcto funcionamiento del módulo.

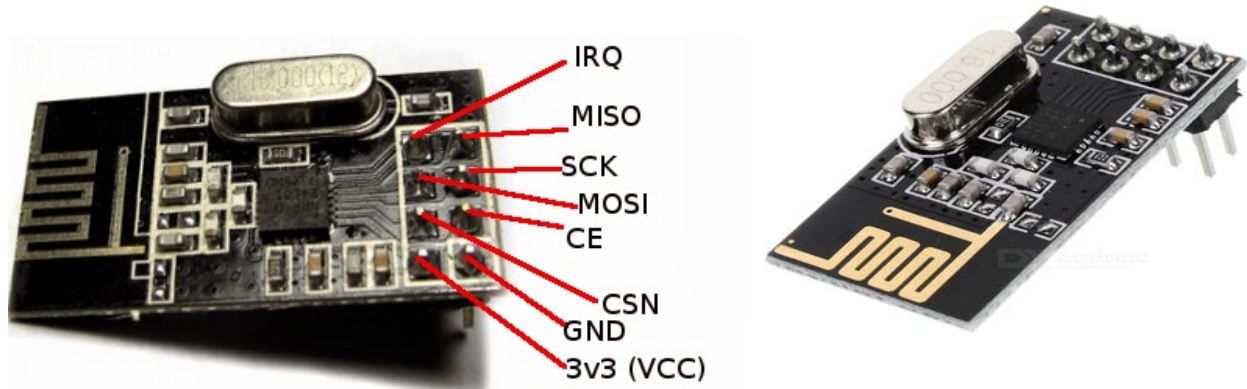


Figura 4. Representación de un nRF24L01 junto a la ubicación y nombres de los pines.

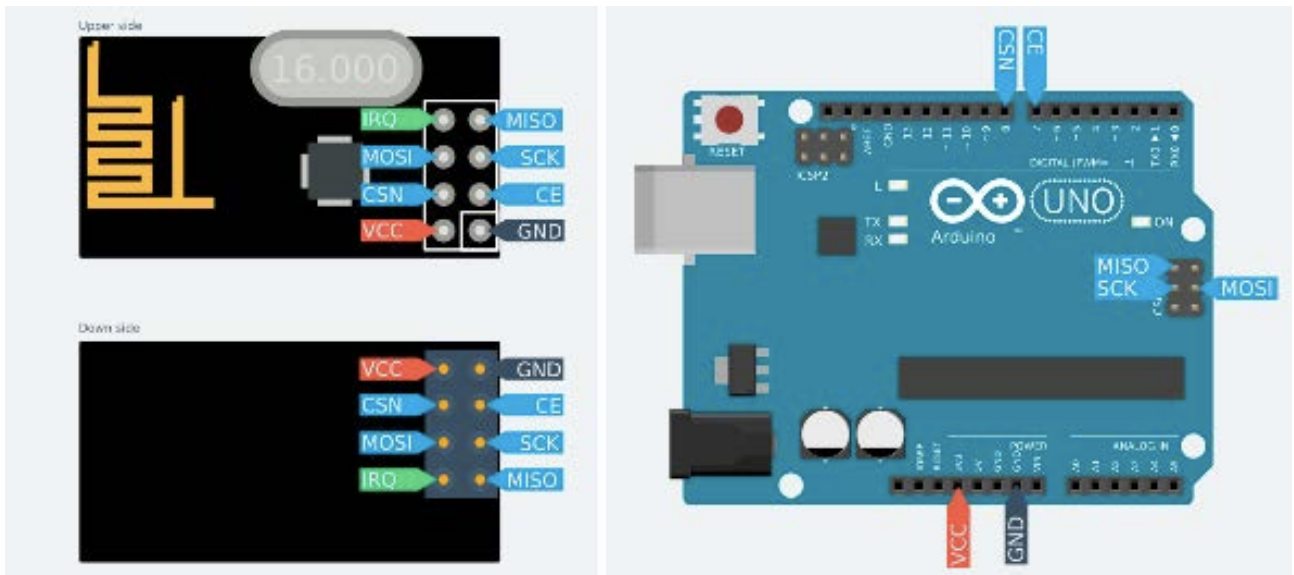


Figura 5. Representación de un nRF24L01 visto desde arriba y abajo junto a la nomenclatura de sus pines. A mano derecha se encuentra la representación de un Arduino Uno junto a los pines a los que se conectará el nRF24L01.

Pin nRF24L01	Arduino Uno
GND	GND
VCC	VCC 3.3
CE	9
CSN	10
SCK	13
MOSI	11
MISO	12
IRQ	no se usa
LED	8

Planilla 1. Definiciones de los pines en nRF24L01 y sus correspondientes pinout en Arduino Uno. Siguiendo la planilla se conecta el nRF24L01 de tal forma que, como ejemplo, el CE del nRF24L01 se conecte al pin 9 del Arduino Uno.

La Figura 6 indica el diagrama del cableado a seguir para conectar un Arduino Uno a un módulo nRF24L0. También se ilustra el uso de una placa de prototipo para conectar el capacitor, el LED (pin 8 del Arduino Uno) y el resistor. Para visualmente identificar el sistema que será empleado como transmisor-receptor se lo conecta a una LED roja mientras que el receptor-transmisor utilizará una LED azul. La Figura 7 ilustra el Arduino Uno junto al nrf24L01.

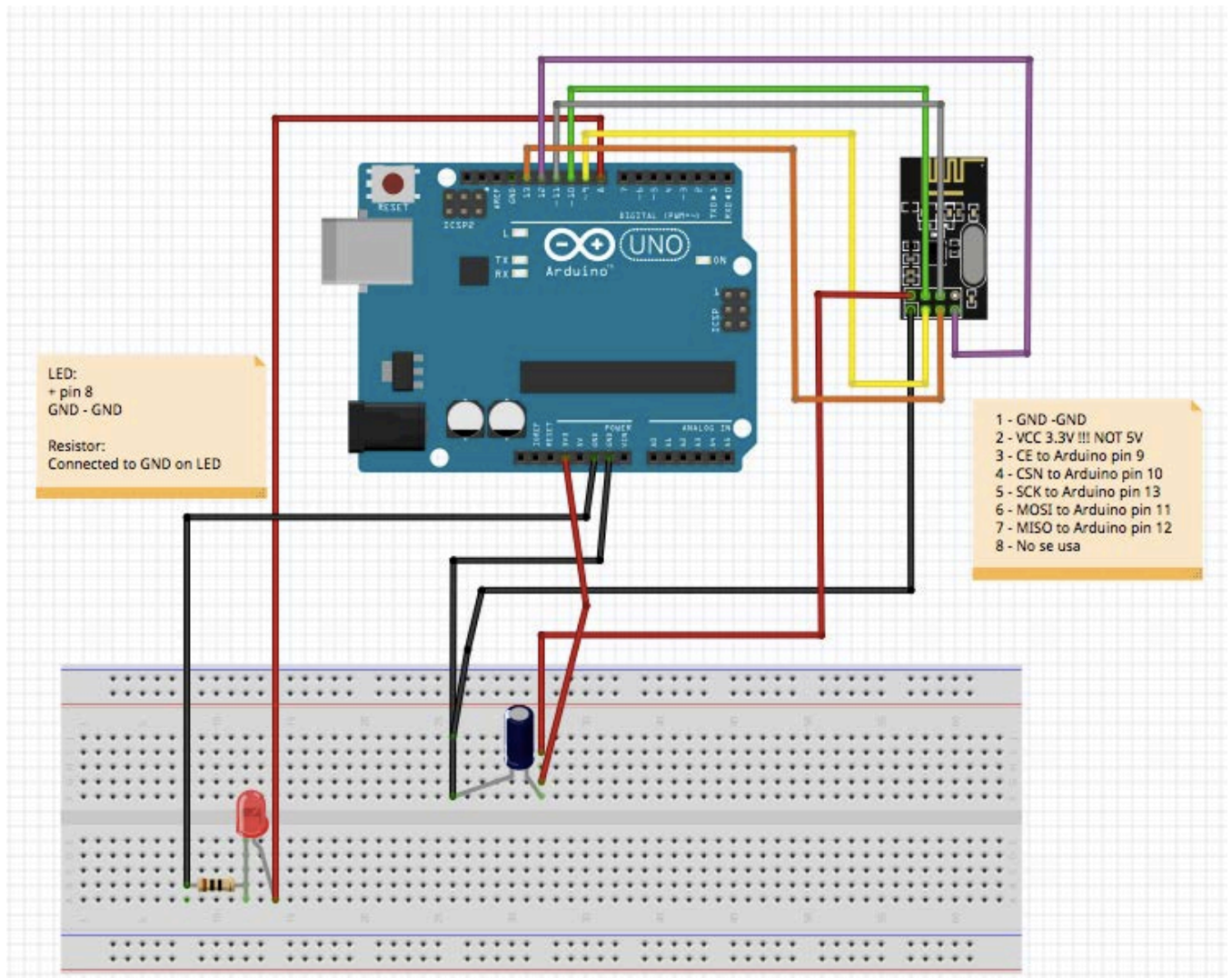


Figura 6. Cableado Arduino Uno, módulo nRF24L01, capacitor y LED. Codificado transmisor-receptor representada gracias al LED roja.

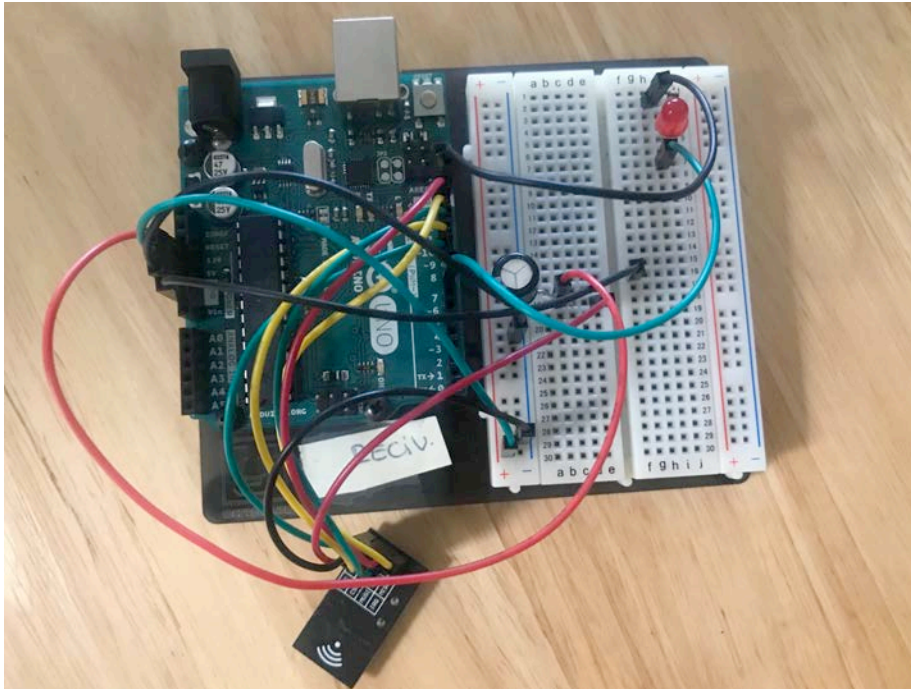


Figura 7. Imagen de un Arduino Uno junto a un módulo nRF24L01.

3.4 Software y Librerías

La plataforma utilizada es la del Arduino IDE, de uso libre y gratuito. Se utilizaron dos librerías SPI y RF24.

La librería RF24 ofrece una vasta variedad de clases descritas en <http://maniacbug.github.io/RF24/classRF24.html>. Dentro de las mismas se utilizarán las siguientes funciones:

startListening() y *stopListening()*: Función utilizada para indicar el momento en que el módulo nRF24L0+ comienza a escuchar o deja de escuchar en el canal. Estas funciones nos ayudan a decidir cuando un módulo está en modo receptor o transmisor.

setPALevel(RF24_PA_LOW): Función utilizada para indicar el nivel de amplificación a ser implementado (Power Amplifier). El nivel RF24_PA_LOW tiene un valor de -12dBm. Se optó por este valor para mejorar el alcance de la señal, haciéndolo seguro y estable.

La librería también incluye los siguientes valores RF24_PA_MIN= -18dBm, RF24_PA_MED=-6dBm y RF24_PA_HIGH=0dBm.

openWritingPipe(): Función utilizada para abrir un canal (pipe) de escritura. La dirección se asigna con un identificador de 5 bytes de longitud.

openReadingPipe(): Función utilizada para abrir un canal (pipe) de lectura. Pueden identificarse hasta 6 canales de lectura simultáneamente.

Serial Peripheral Interface (SPI) es un protocolo de comunicación síncrona utilizada por microcontroladores en el Arduino Uno para comunicarse con los periféricos. En un bus SPI una de las partes genera el Clock al que llamamos master, y el resto son los esclavos, pudiendo haber uno o varios en el bus. Cuando el master envía información, lo hace por una línea de datos que normalmente de nombre MOSI (Master Out Slave In) y si el esclavo responde lo hace a través de una línea llamada MISO (Master In Slave Out) (Grusin, 2018).

Se utilizan la función de tiempo *micros()* para obtener el tiempo en el cual el mensaje es enviado y recibido. El valor es luego utilizado para calcular el tiempo de envío (RTT, round trip time).

3.5 Código

Se realizaron múltiples versiones del código, cada una de ellas mejorando la versión anterior. Luego de analizar los resultados con la última versión se identificaron áreas en donde el código podría ser mejorado, lo que llevaron a la versión final titulada 8.0. Las principales diferencias entre las últimas dos versiones es que en la versión anterior se incluye un *if()* en la función principal de *loop()* implementada para verificar que al comienzo de la transmisión no haya mensajes en el canal. Además, en la función de transmisión de la versión anterior se utiliza una función *while ()* para indicar que no se manda mensaje mientras que la versión 8.0 opta por utilizar *if ()*, que en realidad es equivalente, dada la forma de los programas de Arduino, en su función *loop()* . A continuación se muestra el pseudo código para describir cada función en detalle.

Pseudo código:

Inicialización de las variables a ser utilizadas dentro de las cuales se destacan: valor del pipe transmisor y receptor, el paquete de envío, el valor de baudio y las variables para el tiempo de envío y recibo del mensaje.

```
void init_nrf()
{
    Creo el radio y establezco el pipe de lectura y de escritura.
}

void setup()
{
    Comienzo la comunicación serial y establezco los pines para ser utilizados por la
    lámpara LED. Llamo a la función init_nrf para comenzar el radio de comunicación.
}

void loop()
{
    Iniciar el modo transmisor().
    Inicia el modo receptor().
    Calcular el RTT (round trip time).
}

void led_on()
{
    Encender la lámpara LED.
}

void led_off()
{
    Apagar la lámpara LED.
}

bool modo_transmisor()
{
```

```

    Se usa stopListening() para dejar de escuchar en el canal.
    Se toma el tiempo de envío con micros().
    Se envía el paquete utilizando write(paquete enviado y el tamaño del paquete).
    Se prende la LED.
    Si el mensaje no puede ser enviado se muestra en pantalla un error y se inicializa
    el módulo mediante init_nrf().
}

bool modo_receptor()
{
    Comenzamos a escuchar mediante startListening().
    Se continúa escuchando en el radio mientras que no se recibe un mensaje, se espera
    un tiempo determinado. Si no se recibe un mensaje se imprime a pantalla un error de
    otro modo se lee el radio utilizando read(paquete y tamaño de paquete).
    Se toma el tiempo de recepción mediante micros().
    Se apaga la lámpara LED.
}

void update_paquete()
{
    Esta función se utiliza para incrementar el número del paquete (mensaje) que se
    envía.
}

void calc_rtt()
{
    Si el paquete enviado es el mismo que el paquete recibido calculamos el RTT (round
    trip time) restando del tiempo recibido el tiempo enviado.
    Si hubo problema en envío se imprime un error.
    Se llama a la función update_paquete() para incrementar el número del paquete.
}

```

3.6 Desarrollo de los Experimentos

Identificación de los tres ambientes:

Se identificaron tres áreas representativas de los ambiente hogareño, industrial laboral y ámbito rural/descampada. La Figura 8 y Figura 9 ilustran el ámbito industrial-laboral con áreas abiertas de

estilo loft, con vigas de metal y vidrios aislantes. Se observan mesas y sillas, cajones de metal y techos altos. La Figura 10 ilustra el ambiente representativo del ámbito rural, zona semidesértica con suelo de tierra y arbustos bajos. Se observa un sendero peatonal sin pasto, primordialmente compuesto de tierra con piedras suelta. La Figura 11 muestra el espacio hogareño utilizado para las experimentaciones. El mismo es un departamento ubicado en el segundo piso, dos dormitorios, dos baños y una sala living-comedor contigua a una cocina abierta.

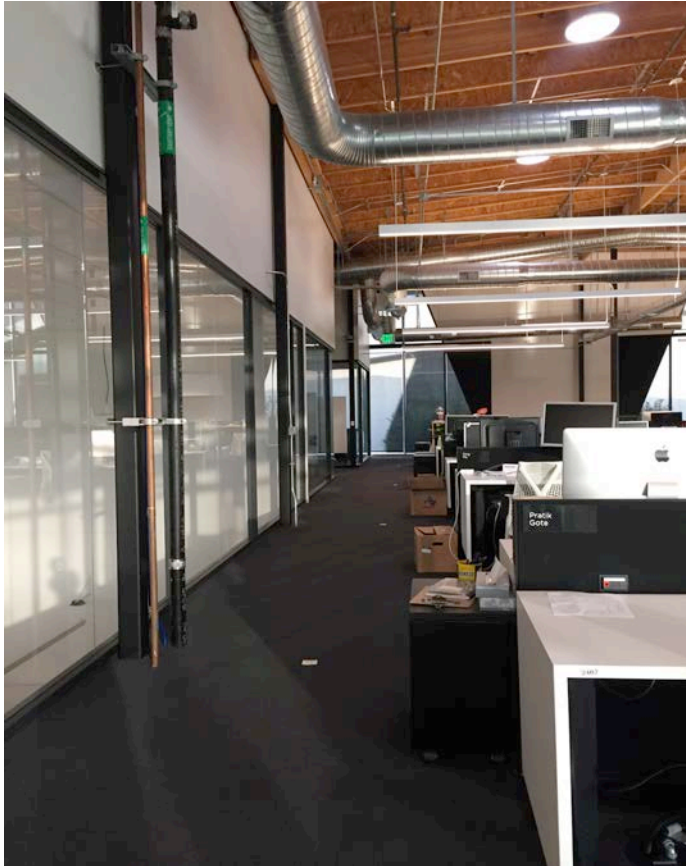


Figura 8. Ámbito industrial laboral con un pasillo sin muchos obstáculos, techos altos y vidrios aislantes.

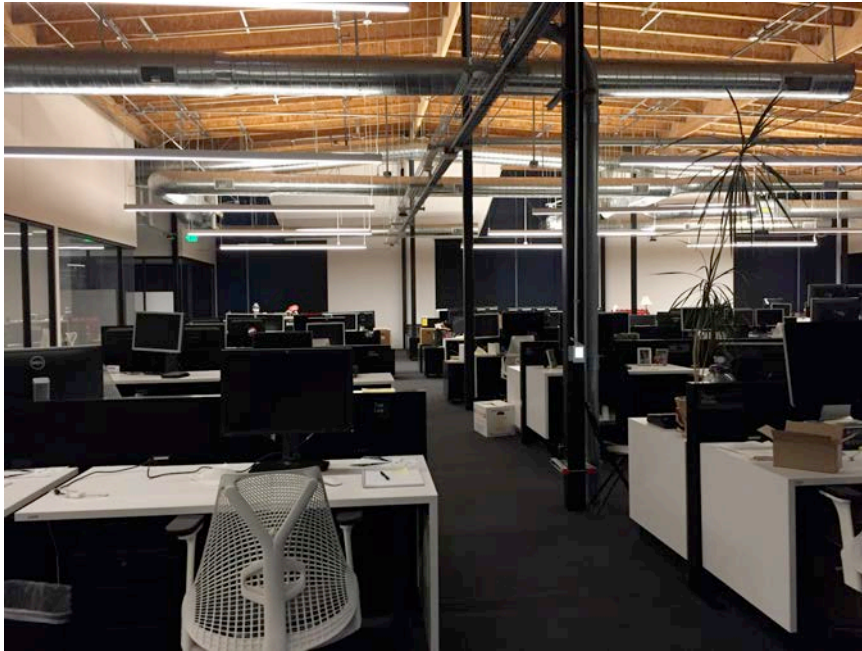


Figura 9. Ámbito industrial laboral con mesas y sillas dispersas en un concepto abierto.



Figura 10. Ámbito rural/descampada con arbustos bajos y sendero de tierra con piedras sueltas.



Figura 11. Ámbito hogareño con paredes de madera revestido piso cubiertos con alfombra. Distribución de los espacios abiertos, con dos dormitorios, dos baños y un living comedor.

Se evaluaron diferentes métodos de obtención de datos. Los mismos se describen a continuación incluyendo observaciones en cada escenario.

Ubicación de los módulos:

Se evaluaron diferentes métodos para realizar los experimentos en los ambientes.

1) Caminar en dirección no establecida hasta que se pierda la señal: Este método consiste en caminar en cualquier dirección alejándose del módulo nRF24L01 hasta que el LED deje de iluminarse, lo que indicará la pérdida de la señal.

Complejidad: Mientras que en alguno de los ambientes no hay paredes que entorpezcan la medición a través de cinta métrica, en el ambiente hogareño se dificulta obtener una medición precisa.

2) Establecer puntos de obtención de datos y realizar mediciones en cada punto: Se comienza por identificar un punto cero (base 0), con la ayuda de una cinta métrica se agregan bases separadas por una unidad igual de distancia. De esta manera se identificaron dentro de la misma recta cinco

(5) bases ubicadas cada cinco (5) metros. Se posicionó uno de los módulos en un sitio fijo, mientras que el otro módulo fue movido a través de los distintos puntos identificados.

Complejidad: En espacios cerrados y restringidos por paredes se dificulta identificar la mejor ubicación de las bases dado que el espacio es limitado y no se pueden obtener 5 bases en una línea recta.

3) Medición guiada a través de una piola/cuerda: Se ata un extremo de una piola a uno de los módulos mientras que el otro extremo se deja libre. Se camina alejándose del origen y cuando la señal se pierde se corta la piola. Luego se mide el largo total de la piola y se repite el mismo ejercicio varias veces.

Complejidad: Al igual que el primer método, hay muchos caminos que se pueden tomar para alejarse del origen con diferentes factores de obstrucción.

4) Nivel al que se colocaron los módulos: En un principio los módulos se posicionaron al ras del piso. La Figura 12 ilustra en el ambiente industrial-laboral el posicionamiento de uno de los Arduino Uno en las primeras capturas de datos. Se observó que la señal era pobre o poco eficiente ya que se observaba gran cantidad de pérdida de mensajes. Mientras se trataba de identificar el problema se optó por primero resetear los Arduinos pero se observa el mismo problema. Al posicionar los módulos Arduino a aproximadamente 20 pulgadas la comunicación mejoró. En el ámbito industrial se utilizaron sillas para elevar los módulos mientras que en el ámbito rural/descampado se utilizó una caja de herramientas. La Figura 13 ilustra el posicionamiento de uno de los Arduino Uno elevado utilizado una silla. En la Figura 14 podemos divisar como se utilizaron banquetas de aproximadamente 25 pulgadas para elevar cada Arduino junto a su módulo nRF24L01.

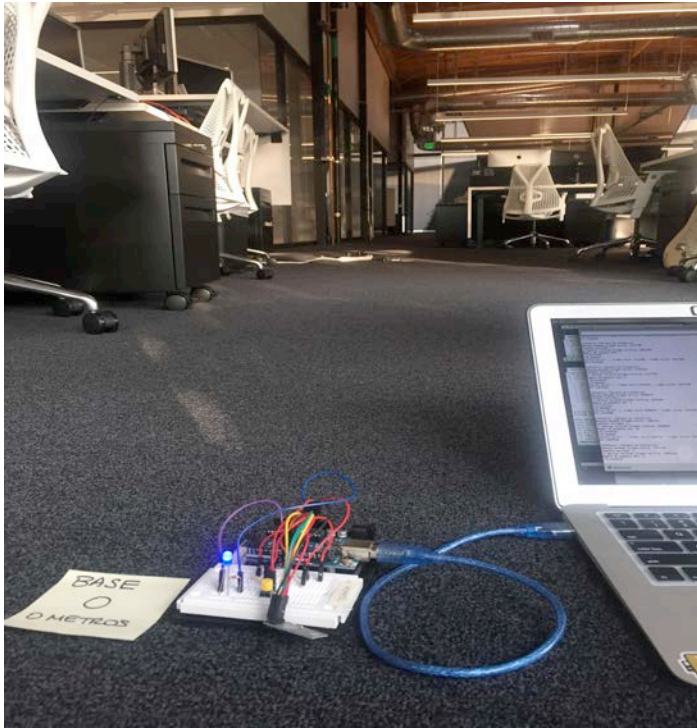


Figura 12. Arduino Uno junto al módulo nRF24L01 conectado a la computadora en el ambiente industrial-laboral al ras del piso.

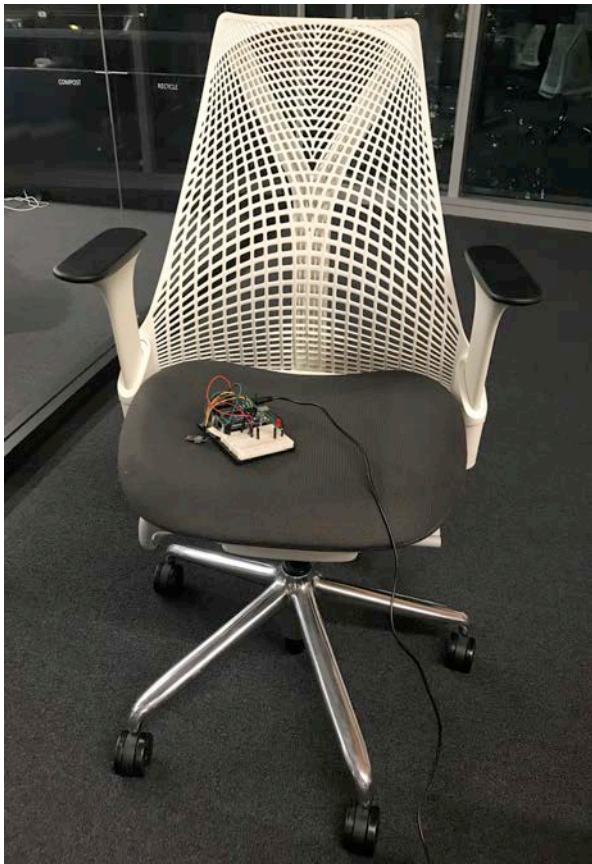


Figura 13. Arduino Uno con corriente de pared posicionado sobre una silla en el ambiente industrial-laboral.

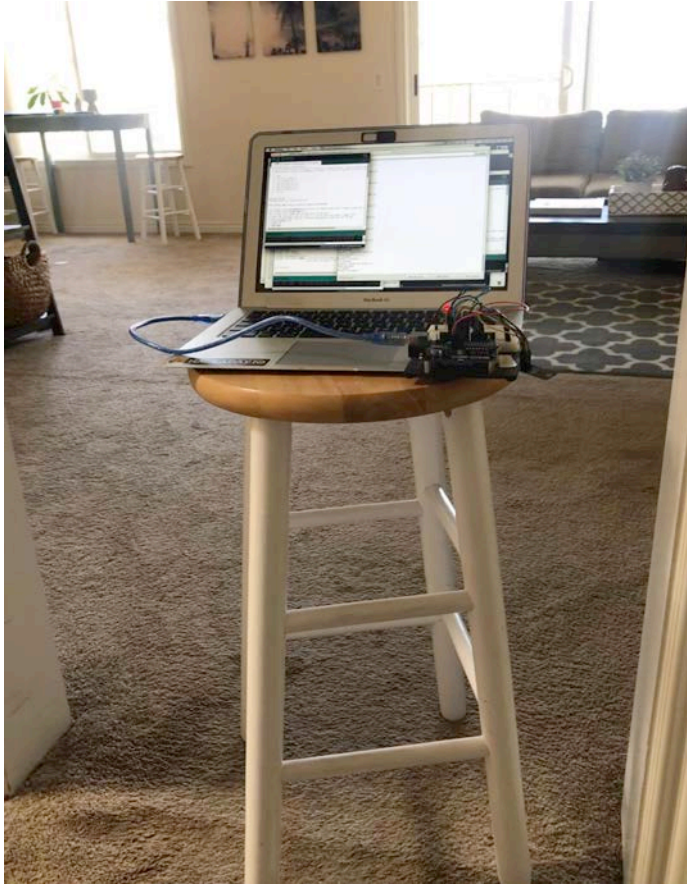


Figura 14. Arduino Uno conectado a una computadora sobre una banqueta en el ambiente hogareño.

Diseño de la obtención de datos:

En un principio se optó por realizar los experimentos dos veces para obtener los datos del receptor e independientemente del transmisor en cada base. Mediante la primera experimentación no se observó gran diferencia entre las dos capturas. Por ello se optó por realizar las experimentaciones siguientes teniendo el módulo receptor estacionario en la base 0 (0 metros) conectada a una fuente de electricidad de pared. El módulo transmisor se conectó a una computadora la cual realiza la captura de pantalla de los valores del envío de paquete, este módulo se desplaza a través de las cinco bases.

Una de las consideraciones fue el tiempo de captura de paquetes (mensajes) en cada base. Se evaluó tanto la obtención de datos medida en un tiempo dado (ejemplo cinco minutos). También se evaluó la obtención de datos mediante una cantidad de mensajes específico. Se tomaron 200-300 mensajes en cada base, con la excepción en donde el envío de mensajes falla consecutivamente por varios intentos.

Se utilizó la pantalla de monitoreo serial (accesible mediante Tool > Serial Monitor) en el IDE de Arduino para observar los mensajes impresos por el código. Los mismos incluyen el mensaje enviado, el mensaje recibido, el cálculo de RTT y cuando hay problema en el envío.

3.7 Observaciones Durante la Experimentación

Problemas con el espacio:

Durante la práctica hubieron varios problemas relacionados con el espacio utilizado para la captura de datos:

- Condiciones ambientales: Durante la captura en el área rural/espacio abierto hubieron días de lluvia y neblina, condiciones no óptimas para elementos electrónicos descubiertos. Se optó por sólo realizar los experimentos en los días soleados despejados.
- Espacios hogareño pequeño: El departamento usado para el testeo del ámbito hogareño es amplio de dos dormitorios, dos baños con un living y una cocina. Debido al diseño del departamento no se pueden colocar más de 4 bases en forma recta.
- Posibles zonas de interferencias: En el ámbito industrial se observó que en una zona había gran pérdida de señal, pasado dicho punto la señal se volvía a establecer. Se identificó esta área como una zona negativa para la señal. No se pudo identificar la causa de la interferencia en la señal. Algunas posibles causas pensadas: dispositivos electrónicos en la zona (impresoras, teléfonos, scanner), elementos de construcción tales como vigas de metal. Dicho problema se observó en la primera experimentación realizada. Debido a que esta zona estaba en construcción en las siguientes versiones del código se debió cambiar el ámbito industrial/laboral en las tomas de mediciones subsiguientes.

Problemas relacionados con el hardware:

- Alimentación del módulo: Se observó que la señal tenía fallas intermitentes en el envío mientras se utilizó una batería como fuente de alimentación. Utilizando alimentación de pared o de un USB de una computadora dichos fallos no se volvieron a observar.

Código y captura de tiempo:

El código fue cambiando a través de la experimentación. Algunos puntos identificados para mejorar la captura de datos se destacan a continuación:

- Agregar más mensajes posteados en la pantalla de captura de datos Arduino: Se agregaron mensajes para identificar cuando había falla en el envío del mensaje, cuando se alcanza el tiempo máximo de espera y mensaje de obtención del tiempo transcurrido.

- `setPALevel()`: El PA representa Power Amplifier. Se exploraron `RF24_PA_MIN`, `RF24_PA_LOW`, `RF24_PA_HIGH`, `RF24_PA_MAX`. Se observó `RF24_PA_LOW` ayuda a una mejor transmisión.

- Captura de tiempo en millis y micros: Arduino cuenta con las funciones `millis()` y `micros()` las cuales capturan el tiempo en milisegundos o microsegundos desde que comenzó a correr el software en el Arduino. Si el Arduino no se resetea y continúa prendido por más de tres meses, la data se re programa a cero (overflow) luego de cincuenta (50) días. Se decidió utilizar micros ya que captura una medida más precisa.

- Agregar RTT (round trip time): En redes se utiliza RTT para calcular el tiempo que tarda un paquete de datos enviado desde un emisor en volver a este mismo emisor habiendo pasado por el receptor de destino. En un principio el código no contaba con la función de cálculo de RTT. Se utilizó la captura de tiempo en `micros()` cuando el transmisor envía el mensaje, se vuelve a capturar el tiempo cuando el transmisor recibe el mensaje y luego se resta el valor el tiempo de recepción con el de envío.

- Cambiar el mensaje enviado por un número incremental: Las primeras iteraciones del código incluía el envío de un mensaje fijo. Luego se decidió agregar un contador el cual se utilizará para incrementar de a uno el valor del mensaje enviado. Esto nos permite contar 100 mensajes enviados y a su vez, visualizar si algún mensaje se perdió en el envío.

- Experimentar con payload: nRF24L01 cuenta con la opción de setear el tamaño del payload. El tamaño predefinido es 16 mientras que hay opción de un mínimo de 8 a un máximo de 32. Mientras el cambiar el tamaño del payload ofrece flexibilidad hay que evaluar los datos enviados. Por ejemplo, `char` representa 1 byte, `int` 2 bytes y `float` 4 bytes (<https://www.arduino.cc/en/Reference/Float>). En el caso que se programe el payload a 8 bytes pero se envíe un `int` (2) y dos `float` (4+4) el mensaje no cabrá en el payload. Dado que el máximo

número de mensajes enviados (200-300) no sobrepasa el tamaño predefinido del payload, no se utilizó un ajuste de payload en el código final.

4 Interpretación y Discusión de los Resultados

A continuación se incluyen los resultados sintetizados de la primera y la última base de cada ambiente, donde se observaron capturas exitosas de mensajes. Aunque en realidad se llevaron a cabo experimentos en las 5 bases de cada ambiente, en principio se muestran explícitamente la primera y la última en la cual se pudieron comunicar los módulos, dado que las estaciones intermedias son similares en cuanto a rendimiento o directamente una interpolación de los resultados entre la primera y la última base. Los mensajes enviados se representan en el eje X mientras que el RTT obtenido para dicho mensaje se representa en el eje Y. Los valores del RTT fueron calculados utilizando la función `micros()` la cual obtiene el tiempo en microsegundos.

Se identificaron “outliers” que representan a los valores que sobrepasan al promedio del tiempo de envío-recibo del mensaje. Los mismos no forman parte de los cálculos del promedio, desviación estándar o valores mínimos y máximos del tiempo de RTT. Sin embargo, en cada caso se muestran de manera específica para tener una idea de los que se podrían considerar “casos anómalos” de RTT.

4.1 Ámbito Laboral/Industrial

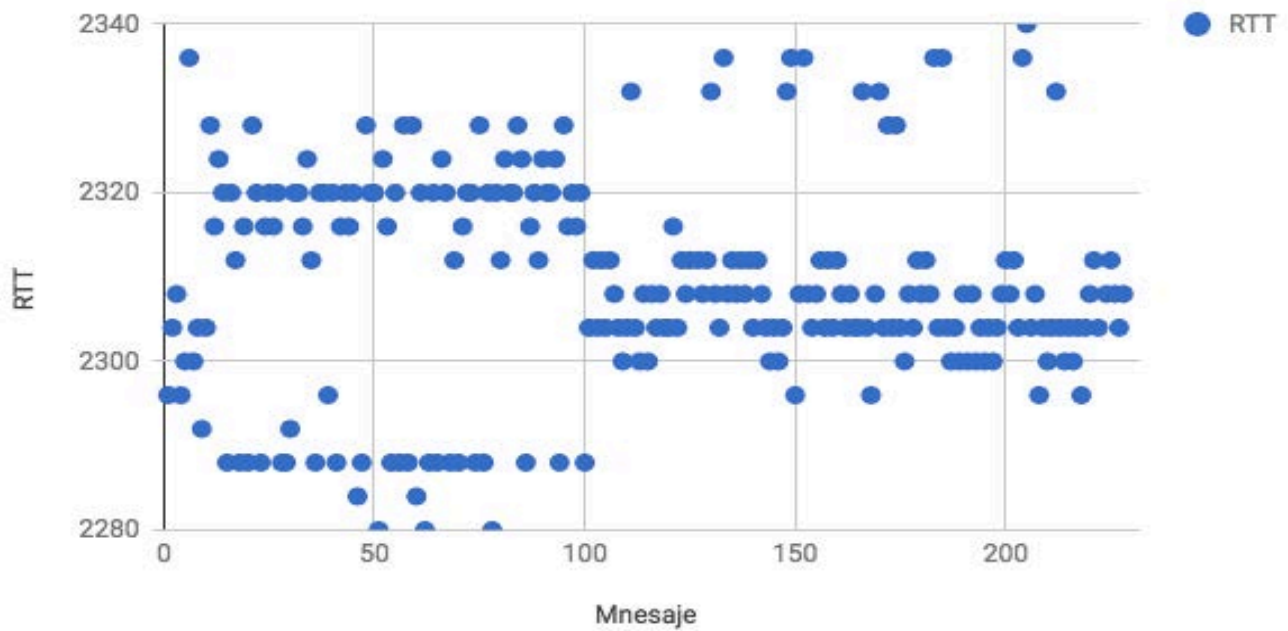
En esta sección se ilustran los resultados del ambiente laboral-industrial el cual posee áreas espaciosas con mesas, sillas y cajoneras distribuidas en el espacio.

Base 1 (5 metros): Resultados y Observaciones

En la Figura 15 se ilustran los resultados en donde los módulos se encuentran a una distancia de 5 metros uno de otro en el ambiente industrial. Se podrían identificar tres “clases” de tiempos, alrededor de los valores de tiempo de $2290\mu\text{s}$ (2.29ms), $2310\mu\text{s}$ (2.31ms) y $2320\mu\text{s}$ (2.32ms). No está clara la razón de este agrupamiento, pero quizás lo más probable es que esté más relacionado con la sincronización de los módulos que con la velocidad de las comunicaciones. Esta sincronización está a su vez relacionada con la posibilidad de que el receptor esté en modo de recepción durante el período de tiempo en el cual el emisor transmite el dato/paquete por RF. Se debe tener en cuenta que el RTT involucra 2 mensajes uno de “transmisor” a “receptor” y otro

en sentido contrario (recordar que los nombres “transmisor” y “receptor” están relacionados con el modo de comunicación inicial de cada módulo). Esto significa que se deben enviar y recibir dos mensajes, para los cuales los dos módulos deben coincidir en su modo de comunicación (uno enviando y otro recibiendo durante el tiempo en el cual el anterior envía). Mediante la Figura 15 se observa una pequeña disparidad en el RTT en el transcurso del tiempo. Se observa un patrón de un RTT mínimamente más elevado en los primeros 100 mensajes enviados que en los siguientes 100.

Messages (x) vs RTT (y)



Número de mensajes

Figura 15. Gráfico de resultados de 200+ mensajes de la base 1 en donde los transceptores se encuentran a 5 metros de distancia. Ámbito: laboral/industrial.

La Tabla 2 ilustra que la diferencia entre los valores máximo y mínimo del tiempo RTT es de tan solo 60 microsegundos lo cual significa que hay una constancia entre los valores de RTT obtenidos en los 228 mensajes analizados. A su vez, la diferencia entre el valor mínimo y el promedio es de 29 microsegundos, mientras que la diferencia entre el valor máximo y el promedio es de 31 microsegundos.

Avg	St. Deviation	Min	Max
2309.185841	12.7083865	2280	2340

Tabla 2. Captura del promedio (Avg), desviación estándar (St. Deviation), el valor mínimo (Min) de RTT y el valor máximo (Max) de RTT con los transceptores a 5 metros de distancia. Ámbito: laboral/industrial.

En la Tabla 3 se muestra la captura de 2 mensajes “outliers”. En otras palabras, se observaron dos mensajes que excedieron en al menos el 50% del tiempo promedio de todos los mensajes del experimento. El promedio de tiempo de envío-recepción es de alrededor de 2309 microsegundos. Cuánto mayor es el número de mensajes “outliers” se puede decir que hay más problemas en la comunicación, ya sea por problemas en el envío del mensaje o interrupción de la misma. En este caso, se estima que el problema puede haberse causado por interferencias en el ambiente ya que en la zona laboral/industrial hay muchos elementos electrónicos como computadoras, módems Wi-Fi, impresoras, máquinas de fax, teclados y mouse inalámbricos, teléfonos, entre otros componentes. Se conoce, que muchos de estos elementos operan a 2.4 GHz que es la misma frecuencia en que los módulos nRF34L01 operan.

Outliers	Mensaje	RTT
	126	23888
	223	4280

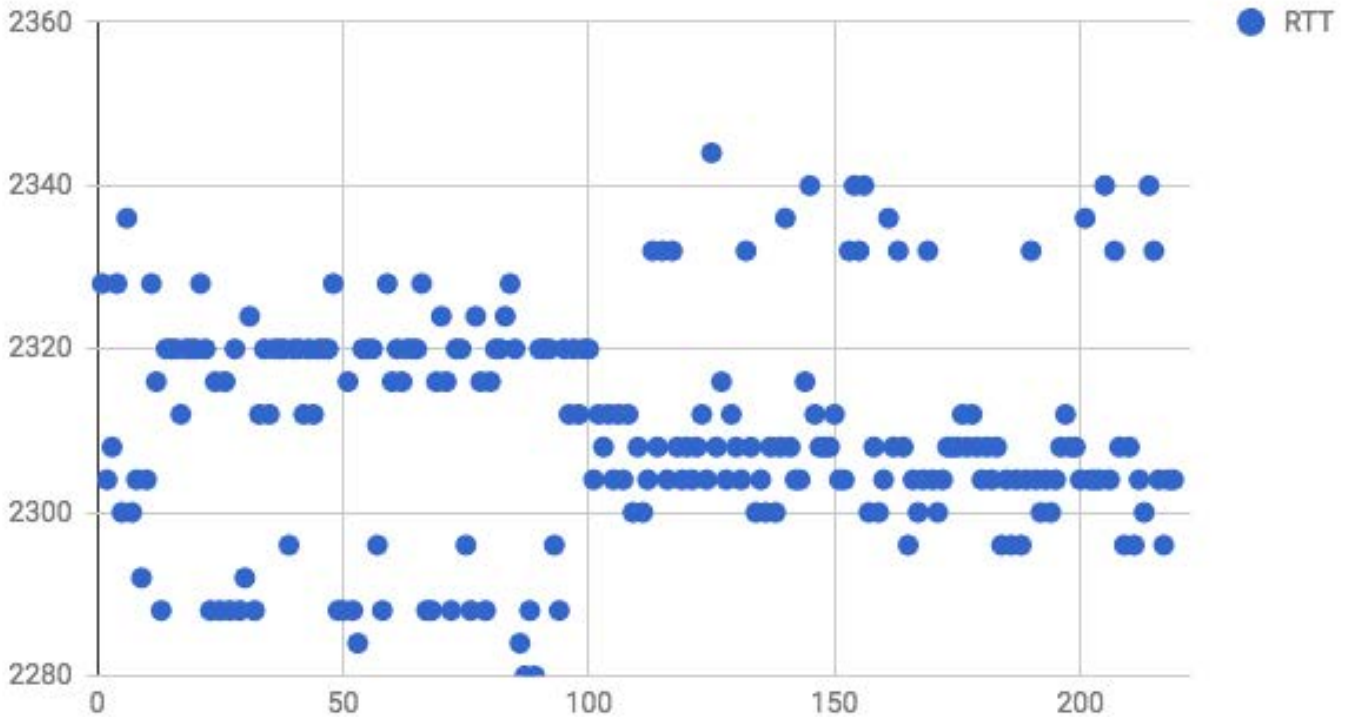
Tabla 3. Mensajes “outliers” en la base 1 (5 metros de distancia entre transceptores). Ámbito: laboral/industrial.

Luego de observar los resultados se puede decir que la eficacia de la comunicación a 5 metros en el ambiente industrial es muy buena.

Base 5 (25 metros): Resultados y Observaciones

La Figura 16 se muestran los resultados en donde los módulos se encuentran a una distancia de 25 metros en el ambiente industrial/laboral. Se observa que el tiempo RTT se agrupa en cuatro valores: 2280µs (2.28ms), 2320µs (2.32ms), 2310µs (2.31ms) y 2330µs (2.33ms). Los valores son similares observados cuando los transceptores se encontraban a 5 metros de distancia.

Messages (x) vs RTT (y)



Número de mensajes

Figura 16. Gráfico de resultados de la base 5 (25 metros) ámbito laboral/industrial.

En la Tabla 4 se observa que la diferencia entre el valor máximo y valor mínimo de RTT es de 64 microsegundos. Este valor es tan solo 4 microsegundos mayor que el valor observado cuando los módulos se encuentran a 5 metros. La diferencia entre el valor máximo y el valor promedio de RTT es de aproximadamente 34 microsegundos mientras que la diferencia entre el valor mínimo y el promedio es de 30 microsegundos. Estos valores también son muy similares a los valores observados en la base 1 (5 metros). Podemos deducir que al incrementar la distancia en el ambiente industrial/laboral no se ve afectada en gran proporción la eficiencia de la comunicación RF utilizando módulos nRF24L01.

Avg	St. Deviation	Min	Max
2310.410959	13.26771167	2280	2344

Tabla 4. Captura del promedio (Avg), desviación estándar (St. Deviation), el valor mínimo (Min) de RTT y el valor máximo (Max) de RTT con los transceptores a 25 metros de distancia. Ámbito: laboral/industrial.

Se observa una distribución relativamente constante del RTT la cual es similar a la base 1 (distancia de los módulos a 5 metros) donde se observa una leve diferencia entre los primeros 100 y los consecutivos 100 mensajes. De hecho, los resultados ilustrados en la Figura 15 (base 1) son casi idénticos a los ilustrados en la Figura 16 (base 5). En principio esto indica que el incremento de distancia de 20 metros no afecta la comunicación entre los módulos manteniendo el ambiente en cierta forma “homogéneo”. Se debe recordar que el ambiente industrial en el que se llevaron a cabo estos experimentos es amplio, casi sin paredes u obstáculos al menos en el rango de 5m a 25m. Se puede decir que la comunicación aún es confiable a 25 metros en el área industrial con una pequeña degradación promedio de 31.23 microsegundos.

4.2 Ámbito Descampado/Rural

En esta sección se ilustran los resultados obtenidos en el ámbito descampado. El mismo es el de una zona semi rural con arbustos bajos y suelo de tierra sin edificaciones cercanas, tal como se mostró en el capítulo anterior.

Base 1 (5 metros): Resultados y observaciones

La Figura 17 ilustra los resultados en donde los módulos se encuentran a una distancia de 5 metros uno de otro en el ambiente descampado/rural. El eje X representa los mensajes enviados mientras que el eje Y representa el RTT en microsegundos. Similarmente al ambiente industrial/laboral el agrupamiento de RTT se encuentra dividido en tres grupos alrededor de los valores de 2290 μ s (2.29ms), 2310 μ s (2.31ms) y 2320 μ s (2.32ms). Mediante esta observación se puede decir que la eficiencia de la comunicación de los módulos nRF24L01 no se ve afectada por el ambiente en distancias de/o menores a 5 metros. Mientras que en el ambiente industrial hay elementos electrónicos, mesas, gabinetes metálicos y demás muebles de oficina, en el ambiente rural no se observan objetos contundentes más que arbustos bajos. Al igual que en el ambiente industrial, se observa un patrón en donde hay una pequeña diferencia en el valor del RTT de los primeros 100 mensajes y los siguientes 100. Dado que el mismo patrón se repite en diferentes ambientes y a diferentes distancias, uno podría decir que el ambiente y la distancia no son los factores que causan dicho comportamiento. El mismo puede ser causado por una desincronización de los módulos lo cual quizás podría ser mejorado a través de un chequeo en el código utilizado para la experimentación.

RTT vs. Mensaje

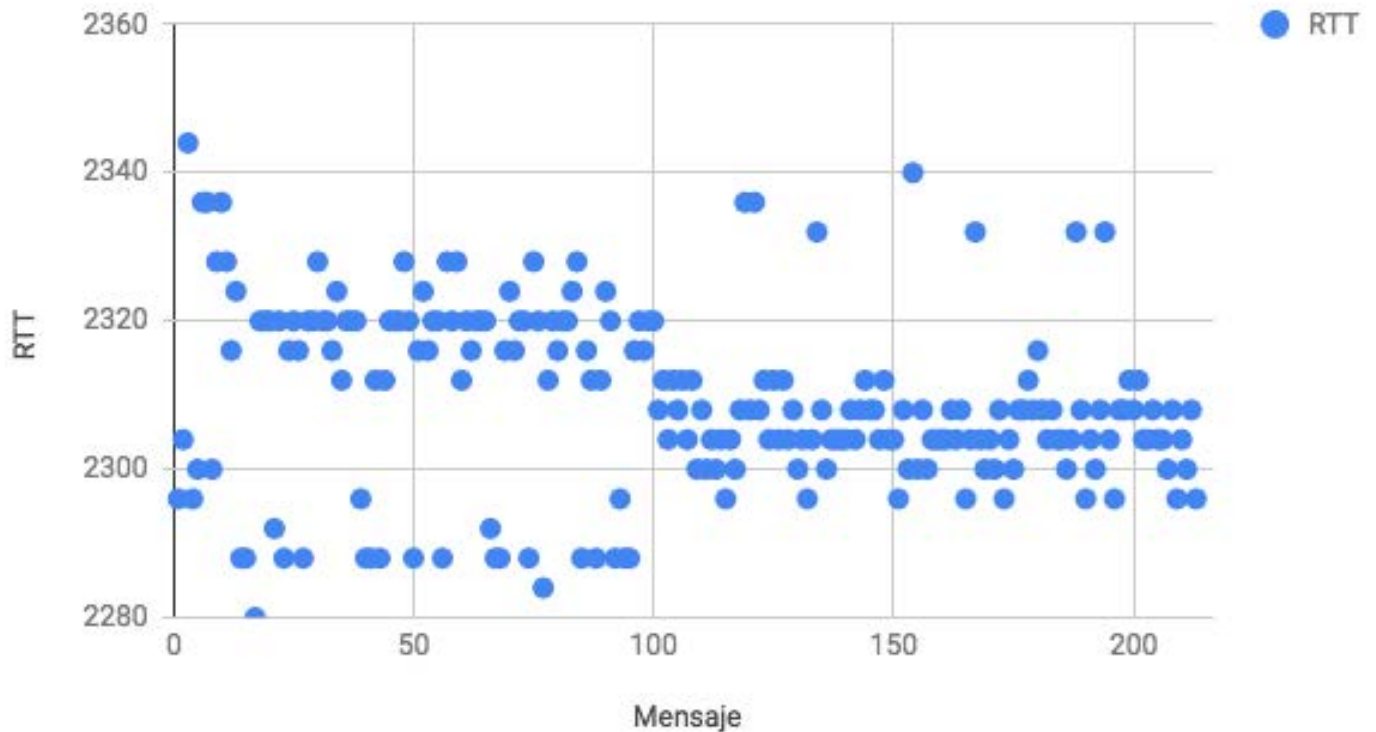


Figura 17. Gráfico de resultados de la base 1 (5 metros) ámbito descampado/rural.

La Tabla 5 ilustra que la diferencia entre el valor RTT máximo y el mínimo es de 64 microsegundos, la diferencia entre el valor máximo y el promedio es de 35 microsegundos mientras que la diferencia entre el valor mínimo y el promedio es de 29 microsegundos. Esos resultados son similares en valor a los obtenidos en el ambiente industrial. El valor promedio de RTT en el ambiente laboral/industrial y en el ambiente descampado/rural es de poco más de 2.3ms (2309 microsegundos). Los resultados rectifican lo asumido anteriormente cuando se compararon la Figura 17 y la Figura 15 en donde se piensa que la eficiencia de la comunicación RF en el ambiente industrial y rural es muy similar con poca discrepancia.

Avg	St. Deviation	Min	Max
2309.245283	12.16459888	2280	2344

Tabla 5. Captura del promedio (Avg), desviación estándar (St. Deviation), el valor mínimo (Min) de RTT y el valor máximo (Max) de RTT con los transceptores a 5 metros de distancia. Ámbito: descampado/rural.

En la Tabla 6 se muestra 1 “outlier”, que se al comienzo el envío de los primeros mensajes. Con una diferencia de 1947 microsegundos al valor promedio de RTT, este mensaje se excede por encima de un 50% del tiempo promedio.

Outliers	Mensaje	RTT
	16	4256

Tabla 6. Mensajes “outliers” en la base 1 (5 metros de distancia entre transceptores). Ámbito: descampado/rural.

Observando el gráfico de la Figura 17 al igual que los valores del promedio, mínimo y máximo se puede decir que la comunicación es confiable. La comunicación de los módulos nRF24L01 no parece ser afectada por el ambiente descampado a 5 metros comparando los resultados obtenidos en el ambiente industrial.

Base 5 (25 metros): Resultados y Observaciones

La Figura 18 ilustra los resultados obtenidos cuando se colocaron los módulos a 25 metros uno de otro en el ambiente descampado-rural. A diferencia de la base 1 (5 metros), no se observa una agrupación muy definida pero se puede deducir que hay 5 valores en donde se concentran la mayor cantidad de resultados: a aproximadamente 2,32ms (2320 microsegundos), 4.26ms (4260 microsegundos), 6.24ms (6240 microsegundos), 10ms (10000 microsegundos), y entre 12.1 ms (12100 microsegundos) y poco más de 27.8ms (27804 microsegundos, de acuerdo a las muestras obtenidas). Se observa una variación importante de los valores de RTT en el transcurso del tiempo en que se hizo la captura de los 192 mensajes. Este comportamiento se puede dar por una degradación en la comunicación. Los saltos en el tiempo RTT (lo que tarda en enviar y recibir un mensaje) también nos indican una desmejora notable en la eficiencia de la comunicación. Se observa que alrededor de los 150 mensajes hay 7 mensajes que tardan entre 14084 microsegundos y 25860 microsegundos (una diferencia entre ambos relativamente muy grande, de 8224 microsegundos). Esto indica que hubo problemas en la comunicación RF entre los módulos. No se ha identificado un patrón específico que nos lleve a explicar o comprender todos los detalles de este comportamiento que se observa en determinados intervalos, pero sí podemos concordar que la degradación de la comunicación es significativa. Se puede especular que el factor de la dispersión en comunicaciones RF es el causante de dichos resultados. La dispersión ocurre cuando la señal choca con objetos de dimensiones pequeñas pero numerosos entre sí, como pueden ser arbustos. Al chocar la señal, ésta se refleja en varias direcciones y puede ser que se provoque un cambio en frecuencia y en la polarización de la onda electromagnética. La

dispersión solamente se da cuando la señal choca con una superficie rugosa (Nocedal de la Garza, 2006). Es importante notar, sin embargo, que esta es solamente una posibilidad y que no la hemos confirmado ni descartado con otros experimentos, que deberían ser definidos de manera específica en este sentido.

RTT vs. Mensaje

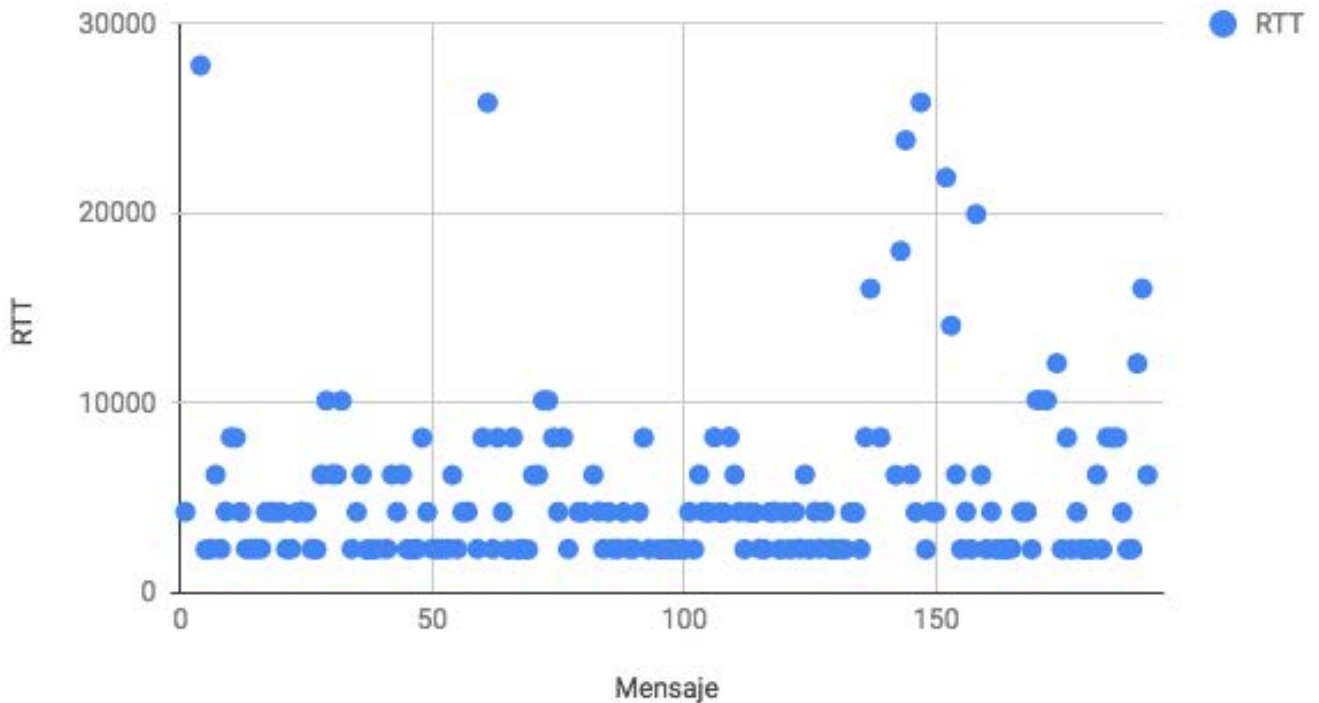


Figura 18. Gráfico de resultados de la base 5 (25 metros) ámbito descampado/rural.

La Tabla 7 nos ilustra que la desviación estándar es 4316 microsegundos mayor a 25 metros de distancia que a 5 metros de distancia. Este valor se refleja en la alta variación de valores de RTT. A su vez, la diferencia entre el valor máximo y el mínimo, al igual que la diferencia entre dichos valores y el valor RTT promedio es significativamente más alta en valor que en la base 1 (5 metros) del área rural/descampado y que ambas bases del área industrial/laboral.

Avgs	St. Deviation	Min	Max
5305.483146	4625.220427	2288	27804

Tabla 7. Captura del promedio (Avg), desviación estándar (St. Deviation), el valor mínimo (Min) de RTT y el valor máximo (Max) de RTT con los transeptores a 25 metros de distancia. Ámbito: descampado/rural.

La Tabla 8 identifica los 14 mensajes que poseen un RTT que excede el valor promedio del tiempo que tarda un mensaje en ser enviado y recibido. No se identifica un patrón en los mensajes, tanto de cuándo es que el RTT incrementa o en cuanto valor se genera el incremento de tiempo. El elevado número de outliers puede estar dado al tipo de alimentación utilizado en el ambiente rural. Las corriente otorgada por las baterías utilizadas puede que afecten al rendimiento y eficacia de la comunicación RF. En artículos compartidos por personas que utilizaron los módulos nRF24L01 se indicó que una alimentación de pared confiable resulta en una mejor comunicación. Agregado al problema de alimentación, el factor de dispersión también puede ser el causante del elevado número de mensajes “outliers”.

Outliers	Mensaje	RTT
	2	8139760
	3	2064100
	33	2035292
	40	2035420
	58	2040940
	78	2036800
	81	2034892
	94	2034952
	138	2042864
	140	2035492
	141	2044112
	151	14233872
	166	2043064
	173	2036840

Tabla 8. Mensajes “outliers” en la base 5 (25 metros de distancia entre transceptores). Ámbito: descampado/rural.

Estos resultados en cierta forma no son los esperados específicamente teniendo en cuenta los resultados obtenidos para la misma distancia en el ambiente laboral/industrial (Figura 16 y Tabla 4). El alto número de mensajes outliers y en el valor elevado del promedio e incluso de la desviación estándar llevan a concluir que hay una alta degradación en la eficacia de la comunicación a 25 metros en el ámbito descampado. Cuanto más grande es el valor de la desviación estándar, mayor es la medida de dispersión de los datos. Un detalle agregado que se observa en la Figura 18 es que al incrementar el tiempo, mayor es la posibilidad de que haya

degradación de la comunicación ya que hay una mayor concentración de valores de RTT altos en los últimos mensajes capturados. Dado las observaciones y resultados se puede decir que la comunicación RD de los módulos nRD24L01 se ve negativamente afectada a distancias mayores de 25 metros en el área rural/descampado.

4.2 Ámbito Hogar

En esta sección se incluyen los resultados el área hogareña. El mismo es un departamento de dos dormitorios, con dos baños y un living-comedor en el segundo piso, tal como se mostró en el capítulo anterior.

Base 1 (5 metros): Resultados y Observaciones

La Figura 19 muestran los resultados en donde los módulos se encuentran a una distancia de 5 metros uno de otro en el ambiente hogareño. Se observa una agrupación similar a la de la base 1 del área industrial/laboral y la base 1 del área descampado/rural. Los mensajes se concentran en los valores aproximadamente de 2310 microsegundos, 2320 microsegundos y con alrededor de 10 mensajes que rodean el valor de 2340 microsegundos. Se observan similitudes con la Figura 15 y la Figura 17.

RTT vs. Mensaje

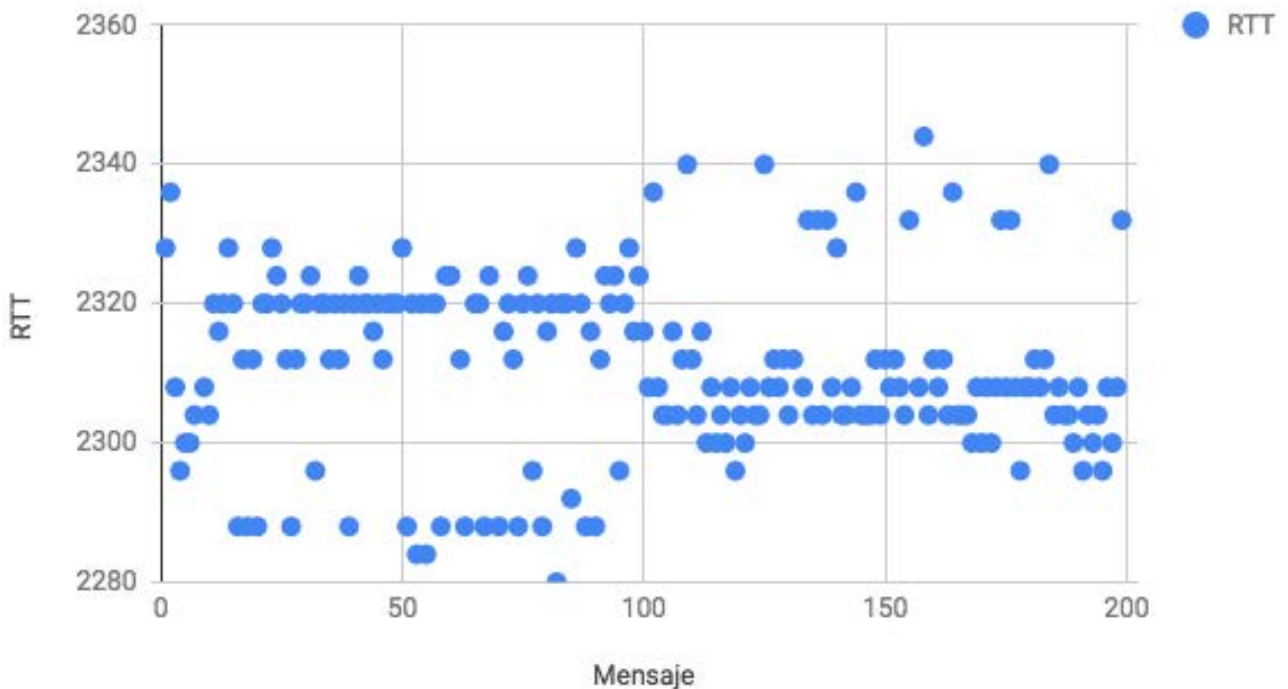


Figura 19. Gráfico de resultados de la base 1 (5 metros) ámbito hogar.

La Tabla 9 ilustra valores similares a aquellos observados en la Tabla 5 (área descampado/rural) y Tabla 2 (área industrial/laboral). La diferencia entre el valor máximo y el promedio es de 33 microsegundos mientras que la diferencia entre el valor máximo y el mínimo es 64 microsegundos.

Avg	St. Deviation	Min	Max
2311.051546	12.69847295	2280	2344

Tabla 9. Captura del promedio (Avg), desviación estándar (St. Deviation), el valor mínimo (Min) de RTT y el valor máximo (Max) de RTT con los transceptores a 5 metros de distancia. Ámbito: hogar.

La Tabla 10 captura los 6 mensajes “outliers” en la base 1 (5 metros) en el ambiente hogareño. No se observa un patrón determinado en el cual se generan los outliers. Aunque 4 de los mensajes identificados como “outliers” caen a aproximadamente 200 microsegundos de diferencia al valor promedio RTT (2311 microsegundos), se consideró importante separarlos e identificarlos como outliers ya que el valor es más del 50% del valor promedio. A diferencia de los otros ambientes, en el ambiente hogareño base 1 es en el que más “outliers” se identificaron. Un alto número de “outliers” significa una degradación en la comunicación. La misma se puede generar por los muebles, paredes y objetos que se encuentran en el espacio que se encuentra entre un módulo y su par. La señal RF debe “rebotar” o atravesar diferentes medios lo que afecta a su eficacia.

Outliers	Mensaje	RTT
	8	2035132
	61	4256
	64	4280
	69	4288
	132	2035224
	156	4272

Tabla 10. Mensajes “outliers” en la base 1 (5 metros de distancia entre transceptores). Ámbito: hogar.

Los resultados ilustrados en el la Tabla 9 muestran una comunicación confiable con una pequeña desviación estándar. La diferencia en microsegundos del valor de RTT de un mensaje al siguiente es pequeña pero los mensajes “outliers” indican una degradación en la calidad de la

comunicación. El valor promedio de RTT en la base 1 en el ambiente hogareño es cercano al promedio de los dos otros ambientes (industrial y descampado).

Base 2 (10 metros): Resultados y Observaciones

La Figura 20 se muestran los resultados en donde los módulos se encuentran a una distancia de 10 metros uno de otro en el ambiente hogareño. Dado que en la base 3 (15 metros) no se pudieron capturar efectivamente mensajes se muestran los resultados de la base 2. Se observan tres valores en los que se agrupan los mensajes: aproximadamente entre 2200 y 2300 microsegundos, 4250 microsegundos y 6250 microsegundos. Alrededor del 90% de los mensajes tienen un valor de entre 2200 microsegundos y 2300 microsegundos. Los objetos en el espacio y elementos electrónicos tales como router Wi-Fi, horno Microondas, televisión y controles remotos, que generan campos electromagnéticos pueden negativamente afectar las comunicaciones.

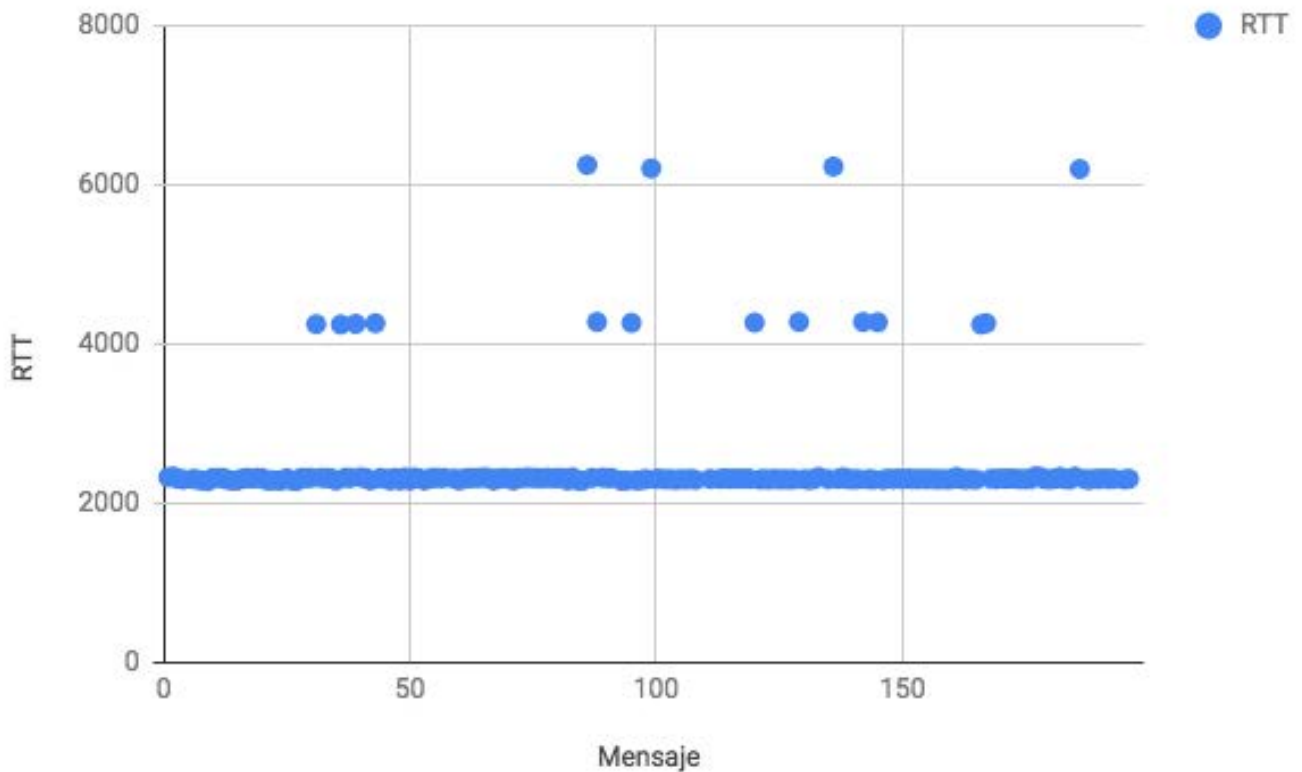


Figura 20. Gráfico de resultados de la base 2 (10 metros) ámbito hogar.

La Tabla 11 identifica un alto valor en la desviación estándar de 730 microsegundos. Esto indica que hay una gran variación en los valores RTT. La diferencia entre el valor máximo y el promedio

es de 3735 microsegundos lo que representa casi un 50% de incremento del valor promedio (2517 microsegundos).

Avg	St. Deviation	Min	Max
2517.475936	730.016794	2280	6252

Tabla 11. Captura del promedio (Avg), desviación estándar (St. Deviation), el valor mínimo (Min) de RTT y el valor máximo (Max) de RTT con los transceptores a 10 metros de distancia. Ámbito: hogar.

La Tabla 12 identifica 8 mensajes “outliers” que exceden el valor promedio de RTT. No se observa un patrón determinado que nos permita identificar cada cuando es que se presenta un mensaje outlier. Al igual que en las otras bases donde se identificaron dichos mensajes, los mismos se presentan cuando hay problemas en la comunicación. En la Figura 20, se observaron 16 mensajes que poseen un RTT de 200+ y 400+ microsegundos que el promedio. Los mismos no se separaron como outliers ya que es una gran cantidad de mensajes y se considera que separarlos no resultaría en una representación verdadera de los resultados.

Outliers	5	2039064
	58	2035160
	92	2036052
	109	2036484
	110	2037968
	112	2035360
	134	2035552
	194	2035424

Tabla 12. Mensajes “outliers” en la base 2 (10 metros de distancia entre transceptores). Ámbito: hogar.

En el espacio hogareño se encontraron problemas importantes en la eficiencia y rendimiento de la comunicación al aumentar las distancias. Se estima que esta degradación es causada por los múltiples artefactos de variados materiales por los que la señal debe transitar. Es importante mencionar tres conceptos que ayudan en la explicación del comportamiento de las señales RF en diferentes medios. La reflexión ocurre cuando una señal electromagnética, que se propaga, llega a un objeto cuyas dimensiones son mucho más grandes que la longitud de onda de la señal electromagnética y que tiene diferentes propiedades eléctricas. Un porcentaje de la señal es transmitido dentro del objeto (para materiales que no son conductores perfectos) y otro porcentaje

es reflejado. La difracción de las señales de radio es la curva que hacen las señales alrededor de un objeto, la cual provoca un cambio de dirección de la señal. La cantidad de curvatura o el cambio de dirección se incrementa cuando: el grosor de los objetos se reduce o aumenta la longitud de onda. Mencionado anteriormente, la dispersión es el fenómeno que ocurre cuando una señal de radio golpea contra una superficie rugosa o áspera y la energía reflejada es difundida o reflejada en varias direcciones. Por último, la refracción es el cambio de dirección o curvatura de una señal electromagnética cuando ésta se transmite de un medio a otro, siempre y cuando éstos tengan un índice de refracción diferente (Universidad de las Américas Puebla, 2018).

No se pudo capturar ningún mensaje en la base 3 a 25 metros y por ello se ilustran los resultados de la última base en la que eficientemente hubieron capturas. Se dificulta medir con claridad los 25 metros ya que hay componentes en el ambiente, como muebles y paredes, que entorpecen la medición exacta de la distancia entre los dos módulos. La Figura 21 ilustra el espacio representativo de la base 3 (25 metros) en el ambiente hogareño. Desde dicha base, no se visualiza el módulo receptor.



Figura 21. Vista desde la base 3 (15 metros) en el ambiente hogar.

5 Conclusiones y Trabajo Futuro

Tal como se comenta en la introducción, este trabajo busca sentar las bases y obtener experiencia para luego proponer e implementar una biblioteca de comunicaciones simple pero completa y confiable para transferencias de datos basadas en la combinación de ARduino y nRF24L01. En este sentido, se han identificado características muy específicas y significativas a través de experimentos a diferentes distancias y ambientes de comunicaciones.

Como conclusión general, se podría afirmar que se ha demostrado la factibilidad de utilizar comunicaciones de radiofrecuencia utilizando una combinación mínima de placas de desarrollo de muy bajo costo (quizás la de más bajo costo del mercado), Arduino UNO y módulos de comunicaciones que también son de muy bajo costo: nRF24L01. Esta factibilidad, sin embargo, debe entenderse en el contexto de las características de estas comunicaciones, que se han identificado a través de múltiples experimentos de distancia y ambientes, tal como se ha mostrado en los capítulos anteriores.

Los módulos nRF24L01 han demostrado tener una comunicación eficaz y estable en distancias cortas, específicamente de 5 metros, independientemente del ambiente, y se debe remarcar que se han utilizado en ambientes muy heterogéneos. En estas distancias, su rendimiento es alto, teniendo un bajo índice de paquetes identificados con un alto RTT, lo que da lugar a una menor posibilidad (casi nula) de pérdida de mensajes. En los tres ambientes utilizados como campos de testeo se observó que dos módulos nRF24L01 pueden establecer comunicación y mantenerla a través del tiempo, en este caso representado por el envío efectivo (es decir, confirmado con envío-recepción del mensaje de ambos módulos) de aproximadamente 200 mensajes.

Al aumentar la distancia a 25 metros se observa una degradación en la comunicación, y esta degradación se ve reflejada en una mayor cantidad de mensajes “outliers”, representativos de un alto valor de RTT en microsegundos. Se podría afirmar que las degradaciones son tan heterogéneas como los ambientes en los que se han realizado los experimentos. Los módulos nRF24L01 pueden eficientemente, y con poca degradación y pérdida de mensajes, llevar a cabo las comunicaciones en algunas zonas hasta superar los 25 metros. La comunicación y conexión entre dos módulos se ve altamente afectada en áreas en donde los módulos pueden estar separados por paredes y artefactos de gran presencia física o generación de interferencia. Observando los resultados del ambiente hogareño, se estima que no se puede establecer una comunicación confiable a 25 metros dado que el ambiente está congestionado con muebles,

paredes, el campo de visión tiene obstrucciones y/o hay demasiadas interferencias electromagnéticas en general para las señales de RF de los dispositivos.

5.1 Trabajos Futuros

Se podría considerar que el “trabajo futuro final”, por decirlo de alguna manera, es la mencionada biblioteca de comunicaciones de radiofrecuencia completa y confiable. Se puede entender que la definición de “completa” es bastante discutible, pero como mínimo debería ser posible comunicar dos módulos en términos de envío-recepción de datos en ambos sentidos (aunque no necesariamente full duplex). Una vez implementada esta forma de comunicaciones, se podrían intentar otros tipos de comunicaciones, como las comunicaciones colectivas. Todo indica que por las características de las comunicaciones de radiofrecuencia en general, y de la implementación del módulo específico en particular, el nRF24L01, al menos las comunicaciones del tipo broadcast (desde un módulo a todos los demás) serían en principio factibles. La definición de comunicaciones confiables es en cierto modo, más sencilla: expresado de manera informal todo envío debería tener una confirmación de llegada (*acknowledge*) o un reporte de error en caso de no ser posible. Sin que necesariamente se implemente un protocolo como TCP, el resultado a nivel de API (Application Programming Interface) debería ser el mismo: todo dato enviado es efectivamente enviado cuando es posible hacerlo y en caso contrario el usuario recibe un reporte de error (por ejemplo, para TCP: la conexión no está establecida, se superó el tiempo máximo/timeout, etc.).

A nivel de utilización de la biblioteca básica de las comunicaciones para los módulos utilizados, identificada de manera explícita en el capítulo 3: RF24, quedan por explorar algunas funciones específicas que modifican el comportamiento de los módulos. Dos de ellas son: a) El uso de generación de confirmaciones (*acknowledgements*) a la vez que transfiere datos (*payload*), en cierta forma como el denominado piggybacking, que es utilizado por ejemplo en el protocolo TCP, y b) el cambio de configuración de potencia de la señal, que a su vez implica un cambio en el consumo del módulo. No se han utilizado todas las variantes por ser inicialmente demasiado complejas y definir un conjunto muy grande de experimentos a definir y analizar. Estas opciones son ahora más posible de ser analizadas dada la experiencia adquirida y la caracterización de las comunicaciones al menos en términos de dónde hay más problemas o los tiempos de comunicaciones que se observaron.

Una de las características específicas del módulo comunicaciones de radiofrecuencia utilizado, el nRF24L01, es la posibilidad definir canales, a la vez de identificar (sensar) el nivel de ruido de cada canal. Es muy posible que aprovechando estas posibilidades (canales + identificación de ruido por canal) se pueda como mínimo mejorar en términos de evitar pérdidas de paquetes como las identificadas a nivel experimental en algunos de los ambientes.

Referencias

1. ABDULLAH, A; BAHAROM, S; BASERY, M. N.; DERAHMAN, M. N.; MOHAMAD K. A.; MOHAMED, M. A; MUHAMED A. (2014). *Home Switch Automation System Based on Ultra Low Power Wireless Solution*, Faculty of Computer Science and Information Technology, Universiti Putra Malaysia; Consultado via web el 17 de Julio de 2018, disponible en <http://www.globalcis.org/ijipm/ppl/IJIPM272PPL.pdf>
2. BELL, Charles. (2013). *Beginning Sensor Networks with Arduino and Raspberry Pi (Technology in Action)*.
3. Campbell Scientific. (2016). Line of Sight Obstruction, Consultado via web el 23 de Julio de 2018, disponible via web en <https://s.campbellsci.com/documents/au/technical-papers/line-of-sight-obstruction.pdf>
4. DOWNEY, Chris. (2013). *Understanding Wireless Range Calculations*; Consultado via web el 10 de Agosto de 2017, disponible en <http://www.electronicdesign.com/communications/understanding-wireless-range-calculations>
5. FERRARI, Paolo; FLAMMINI, Alessandra; MARIOLI, Daniele; SISINNI, Emiliano; TARONI, Andrea. (2009). *Wired and wireless sensor networks for industrial applications*, Microelectronics Journal 40 1322–1336; Consultado el 20 de Septiembre de 2017, disponible en <http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Wired%20and%20Wireless%20Sensor%20Networks%20for%20Industrial%20Applications.pdf>
6. FINKENZELLER, Klaus. (2010). *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near Field Communication*.
7. FORCIER, Neil.(2015). *Building a Wireless Sensor Network with the nRF24L01 Part 1*; Consultado el 29 de Octubre de 2017, disponible en <http://forcetronic.blogspot.com/2015/12/building-wireless-sensor-network-with.html>
8. GERRIOR, Mark; WINFIELD WOODINGS, Ryan. (2006). *Avoiding Interference in the 2.4-GHz ISM Band*; Consultado el 19 de Julio de 2018, disponible en https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273359
9. GILANI, Natasha. (2018). *Ventajas y desventajas de las comunicaciones de radio por microondas*; Consultado el 10 de Abril de 2018, disponible en <https://www.geniolandia.com/13182158/ventajas-y-desventajas-de-las-comunicaciones-de-radio-por-microondas>

10. GUACARA. (2010). Espectro expandido por salto de frecuencia (FHSS), codificación, sistemas telefónicos inalámbricos, medida de la información y codificación de fuente; Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada UNEFA; Consultado el 21 de Julio de 2018, disponible en <https://www.slideshare.net/tarazona19/semana-8>
11. HAGEN, Jon. B. (2009). *Radio-Frequency Electronics: Circuits and Applications*.
12. HARRIS, Mark G. (2017). *This Cell Phone Can Make Calls Even Without a Battery*; Artículo consultado via web el 3 de Septiembre de 2017, disponible en <https://www.wired.com/story/this-cell-phone-can-make-calls-even-without-a-battery/>
13. LIU, Vincent Liu, PARKS, Aaron, TALLA, Vamsi, GOLLAKOTA, Shyamnath, WETHERALL, David, SMITH, Joshua R. (2013). *Ambient Backscatter: Wireless Communication Out of Thin Air*; Consultado via web el 3 de Septiembre de 2017, disponible en <http://abc.cs.washington.edu/files/comm153-liu.pdf>
14. NOCEDAL DE LA GARZA, Manuel J. (2006). *RF Jamming, Tesis profesional*; Consultado via web el 15 de Agosto de 2018, disponible en http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/nocedal_d_jm/capitulo1.pdf
15. Nordic Semiconductor official page. Página de características técnicas de nRF24L0; Consultado via web el 22 de Julio de 2018, disponible en <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01>
16. OPPENHEIM, Alan V, WILLISKY Alan S., NAWAB Hamid S. (1998). *Señales y sistemas*
17. TOMASI, Wayne. (2013). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*; Consultado via web el 12 de Septiembre de 2017, disponible en https://books.google.com.ar/books?id=_2HCio8aZiQC&pg=PA159&dq=comunicaciones+radiofrecuencia+usos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjSxOGhi73WAhVqw1QKHV0mAx4Q6AEIKjAA#v=onepage&q=radiofrecuencia&f=false
18. TORRALBA REYERO, Miguel Ángel. (2003). *Tecnologías inalámbricas*; Artículo consultado via web el 22 de Julio de 2018, disponible en http://www.conganat.org/seis/is/is44/IS44_08.pdf
19. Universidad de las Américas Puebla (2018). Capítulo 1 Propagación de RF. Notas de cátedra consultado via web el 27 de Julio de 2018, disponibles en catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da/capitulo1.pdf