
Diseño de dispositivo inalámbrico para la medición de tiempos de reacción de atletas ante un estímulo visual dado para entrenamientos en diferentes deportes

José Ramón Corona Boch



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



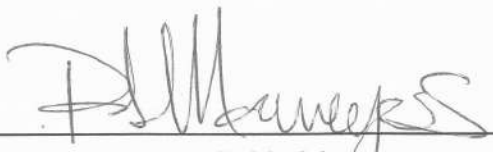
**Diseño de dispositivo inalámbrico para la medición de tiempos
de reacción de atletas ante un estímulo visual dado para
entrenamientos en diferentes deportes**

Trabajo de graduación presentado por José Ramón Corona Boch para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2018

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

(f) 
Ing. Luis Montenegro

(f) 
MSc. Pablo Oliva

Fecha de aprobación: Guatemala, 7 de Diciembre de 2018.

Quiero agradecer principalmente a Dios por guiarme y protegerme a lo largo de mi vida. A mis padres, por su amor incondicional y su constante apoyo. A mis hermanos quienes siempre me han acompañado en mis buenos y malos momentos. A la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, que me otorgó la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y por haberme aconsejado en el camino. A mis amigos que me ayudaron a superarme y seguir adelante. A mis profesores que me enseñaron y resolvieron dudas en mis cursos, compartiendo enseñanzas de diferentes áreas. A mi asesor por ayudarme para poder llevar a cabo este trabajo de graduación.

Prefacio	III
Lista de figuras	VIII
Lista de cuadros	IX
Resumen	X
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Ciencia aplicada al deporte fase 1	3
2.2. Fitlight	4
3. Justificación	5
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo general	6
4.2. Objetivos específicos	6
5. Alcance	7
6. Marco teórico	8
6.1. Tiempo de reacción	8
6.2. Sensor de movimiento	9
6.2.1. LED infrarrojo con fotodiodo	9
6.2.2. Sensores capacitivos	10
6.2.3. Receptor de infrarrojo TL1838	11
6.3. Comunicación por radio frecuencia con NRF24L01+	11
6.4. Proceso aditivo: Impresión 3D	12
6.4.1. Sinterización selectiva por láser	12
6.4.2. Multi Jet Fusion	13

7. Diseño e implementación de sensor infrarrojo y sensor capacitivo	14
7.1. Selección de sensores	14
7.2. Sensor infrarrojo	15
7.2.1. Sensor infrarrojo implementando con fotodiodo receptor	15
7.2.2. Sensor infrarrojo implementando con módulo receptor TL1838	15
7.2.3. Ángulo de rebote del sensor infrarrojo.	17
7.3. Sensor capacitivo	18
7.3.1. Diseño del sensor capacitivo con una pieza de aluminio	18
7.3.2. Implementación del sensor capacitivo junto al microcontrolador	19
8. Comunicación inalámbrica entre el dispositivo maestro y los esclavos des-	
arrollados	22
8.1. Selección de tecnología y módulo de comunicación inalámbrica	22
8.2. Control del módulo de comunicación inalámbrica NRF24L01L+	23
8.2.1. Comunicación entre módulo maestro y esclavo	24
8.2.2. Integración de comunicación inalámbrica junto a los sensores y medi-	
ción del tiempo de reacción	27
9. Módulo electrónico del dispositivo	30
9.1. Módulo electrónico del dispositivo esclavo.	30
9.2. Módulo electrónico del dispositivo maestro.	37
10. Diseñar el encapsulado del dispositivo para que pueda resistir salpicaduras	
de agua, sudor e impactos.	40
10.1. Modelos de los elementos utilizados en el dispositivo esclavo	40
10.2. Encapsulado del dispositivo esclavo	42
10.3. Encapsulado prototipo del dispositivo esclavo con Impresión 3D	44
10.4. Impermeabilidad al agua en impresión 3D	47
10.5. Análisis de esfuerzos del encapsulado del dispositivo esclavo	47
11. Conclusiones	48
12. Recomendaciones	49
13. Bibliografía	50
14. Anexos	52
14.1. Circuitos de prueba, placas PCB y encapsulados para los dispositivos	52
14.2. Planos del encapsulado y diagramas de conexión para el dispositivo maestro	
y esclavo	57
14.3. Códigos fuente para el dispositivo maestro y esclavo	65
14.4. Repositorios para el manual de usuario y librería lib-rf2gh4-10.h	72

Lista de figuras

1. Diagrama de conexión del sensor capacitivo en la placa Arduino	3
2. Dispositivo medidor de tiempos de reacción inalámbrico	4
3. Dispositivos Fitlight	4
4. LED infrarrojo	9
5. Fotodiodo	9
6. Configuración de incidencia indirecta	10
7. Sensor capacitivo	10
8. Efecto conductor sobre el sensor capacitivo	11
9. Receptor de infrarrojo TL1838	11
10. Pines del módulo NRF24L01	12
11. Componente de una impresora 3D de SLS	12
12. Componente de una impresora 3D de MJF	13
13. Esquemático del sensor infrarrojo con fotodiodo	15
14. Esquemático del módulo TL1838 con microcontrolador	16
15. Diagrama del circuito IR emisor	16
16. Diagrama de flujo de la programación del módulo de censado por IR	17
17. Pieza de prueba para el ángulo de rebote del sensor infrarrojo.	17
18. Esquemático del sensor capacitivo	19
19. Carga del capacitor en circuito RC	19
20. Gráfica de la respuesta del circuito sin tocar la pieza metálica	20
21. Gráfica de la respuesta del circuito al tocar la pieza metálica	20
22. Diagrama de flujo de la programación del sensor capacitivo.	21
23. Esquema de conexión NRF24L01+ con PIC16F887	23
24. Diagrama de flujo del programa para el módulo maestro	25
25. Diagrama de flujo del programa para el módulo esclavo	26
26. Esquemático para el módulo maestro y esclavo	26
27. Calibración de temporizador a 1 ms	27
28. Diagrama de flujo del programa para el módulo maestro	28
29. Diagrama de flujo del programa para el módulo esclavo	29
30. Diagrama de conexión del sensor capacitivo en el dispositivo esclavo	30

31. Diagrama de conexión del sensor infrarrojo emisor en el dispositivo esclavo . .	31
32. Diagrama de conexión del sensor infrarrojo receptor en el dispositivo esclavo .	32
33. Diagrama de conexiones del dispositivo esclavo para μ C, NRF24L01+ y LEDs	33
34. Diagrama de conexiones del dispositivo esclavo para la fuente de alimentación	34
35. Flujo de corriente en el dispositivo esclavo alimentado con fuente USB	34
36. Diagrama de conexión de los LEDs RGB en el dispositivo esclavo	35
37. Placa impresa del circuito principal del dispositivo esclavo	36
38. Placa del circuito impreso para los LEDs RGB en el dispositivo esclavo	37
39. Diagrama de conexión del puerto USB del módulo esclavo	37
40. Placa del circuito impreso del puerto USB del módulo esclavo	37
41. Diagrama de conexión del dispositivo maestro	38
42. Placa impresa del circuito principal del dispositivo maestro	39
43. Modelos 3D utilizados para el LED IR, TL1838 y sensor capacitivo	40
44. Modelo de la placa electrónica principal, placa LEDs y NRF24L01+	41
45. Modelo 3D del interruptor, puerto USB y LED de 3 mm	41
46. Modelos utilizados para la ventana para los LEDs RGB y tuerca.	41
47. Modelo utilizado para la encapsulado	42
48. Modelo del ensamblaje del dispositivo esclavo	42
49. Modelo del encapsulado del dispositivo esclavo	43
50. Modelo del encapsulado del dispositivo esclavo parte superior	43
51. Modelo del encapsulado del dispositivo esclavo parte intermedia	44
52. Modelo del encapsulado del dispositivo esclavo parte inferior	44
53. Encapsulado del dispositivo esclavo parte superior y tapadera	44
54. Encapsulado del dispositivo esclavo parte intermedia	45
55. Encapsulado del dispositivo esclavo parte inferior	45
56. Ensamblaje del dispositivo esclavo	46
57. Prueba de impermeabilidad con impresión 3D utilizando PLA	47
58. Análisis de elementos finitos del dispositivo esclavo	47
59. Circuito prueba para la implementación del módulo del sensor infrarrojo . . .	52
60. Circuito prueba para la implementación del módulo del sensor capacitivo . . .	53
61. Placa de circuito impreso del puerto micro USB 2.0 tipo B	53
62. Implementación de la placa impresa del circuito principal del dispositivo es-	
clavo	53
63. Vista inferior de la placa impresa del circuito principal del dispositivo esclavo	54
64. Placa de circuito impreso para las conexiones de los LEDs RGB	54
65. Placa impresa del circuito principal del dispositivo maestro	55
66. Contacto metálico para el sensor capacitivo	55
67. Encapsulado del dispositivo esclavo	56
68. °Encapsulado del dispositivo esclavo: Vista inferior	58
69. °Encapsulado del dispositivo esclavo: Vista superior	59
70. °Circuito principal del dispositivo maestro	60
71. °Circuito principal del dispositivo esclavo: Página 1	61
72. °Circuito principal del dispositivo esclavo: Página 2	62
73. °Circuito de las conexiones LED	63
74. °Circuito de las conexiones USB	64
75. Programación desarrollada en CCS C Compiler para el dispositivo maestro . .	65

76.	Programación desarrollada en CCS C Compiler para el dispositivo esclavo . . .	67
77.	Manual de usuario	72
78.	Librería lib-rf2gh4-10.h Bizintek Innova S.L.	72

Lista de cuadros

1. Pruebas del ángulo de rebote del sensor infrarrojo	18
2. Comparación de características entre los módulos ESP8266 y NRF24I01+. . .	22
3. Byte de instrucción del módulo maestro	27
4. Corriente necesaria para el funcionamiento del dispositivo esclavo.	31

El proyecto plantea el desarrollo y fabricación del hardware y software de una red de dispositivos electrónicos para la medición de tiempos de reacción de una persona ante un estímulo visual. Se busca que los dispositivos se implementen en los entrenamientos de alto rendimiento, brindando una herramienta para la captura del tiempo en que tarda una persona en reaccionar de forma exacta y precisa manteniendo un bajo costo de fabricación.

Para la medición del tiempo de reacción de una persona se construyó una red de dispositivos inalámbricos; al activarse un dispositivo se despliega una alarma visual que indica que se inicia la toma del tiempo. El individuo en entrenamiento percibe la alarma y interactúa con el dispositivo activado para detener el tiempo, ya sea tocándolo o colocando un objeto (raqueta, mano, etc.) a una cierta distancia mínima de este. La red de dispositivos manda el tiempo obtenido hacia una computadora en donde se almacena para su posterior análisis.

La red de dispositivos consistió en el desarrollo de un prototipo de módulo esclavo que se comunica por radiofrecuencia a un módulo maestro. El dispositivo maestro se encarga de activar y manejar todas las funciones que se implementaron en el esclavo. El dispositivo esclavo es el encargado de interactuar con el usuario. En el módulo esclavo se implementaron dos tipos de sensores que se pueden activar de forma independiente. El primero es un sensor infrarrojo que puede detectar diferentes tipos de movimientos y objetos a una distancia máxima de 15 cm. El segundo es un sensor capacitivo el cual funciona cuando la persona toca una sección de aluminio colocada en la parte superior del dispositivo. Se utilizan 12 LEDs RGB como alarma visual en el dispositivo esclavo, estos indican la activación del dispositivo e inicio de la toma del tiempo. El módulo esclavo logró capturar un tiempo de reacción en la escala de milisegundos, el cual es enviado hacia el módulo maestro y este lo manda a través de comunicación SPI a un computador.

Se utiliza el microcontrolador PIC16F887 para gobernar todas las funciones en cada dispositivo. Para comunicación inalámbrica entre los dispositivos se utiliza el módulo NRF24L01+, el cual utiliza la banda de radiofrecuencia de 2.4 GHz a una velocidad de transmisión de datos de 1Mbps. Se tiene cobertura hasta 15 metros entre los dispositivos.

The project proposes the development and manufacture of electronic devices for the measurement of reaction times of a person before a visual stimulus. The devices were designed for high performance training, providing a tool to capture accurately the time, maintaining a low cost of manufacturing.

A network of wireless devices was built to measure the reaction time of a person; When a device is activated, a visual alarm is displayed indicating that the time-taking is started. The individual in training perceives the alarm and interacts with the activated device to stop the time, either by touching it or placing an object (racket, hand, etc.) at a certain minimum distance from it. The network of devices sends the time obtained to a computer where it is stored for further analysis.

The device network consist in the development of a slave module prototype that communicates by radio frequency to a master module. The master device is responsible for activating and control all the functions that were implemented in the slave. In the slave module, two types of sensors were implemented. The first is an infrared sensor which detect different types of movements and objects at a maximum distance of 15 cm. The second is a capacitive sensor which detect when the person touches an aluminum section placed on top of the device. 12 RGB LEDs are used as a visual alarm on the slave device, these indicate the activation of the device and start of the time-taking. The slave capture a reaction time on the millisecond scale, which is sent to the master module and sends it through SPI communication to a computer.

The PIC16F887 microcontroller is used to control all functions on each device. For wireless communication between devices, the NRF24L01 + module is used, which uses the 2.4 GHz radio frequency band at a 1Mbps data transmission speed. It has coverage up to 15 meters between the devices.

CAPÍTULO 1

Introducción

El término tiempo de reacción se refiere a el intervalo de tiempo que existente entre un estímulo y la respuesta medible. En las ciencias aplicadas al deporte se divide en tres fases a el tiempo de reacción: la primera es el tiempo que el atleta tarde en percibir el estímulo, este puede ser visible, aditivo o kinestésico; la segunda fase es el tiempo que el atleta tarde en procesar el estímulo y dar una respuesta consecuente, esta puede ser el comenzar a mover una extremidad o una parte del cuerpo. Y la última fase es el tiempo que el atleta tarde en realizar el movimiento hasta que es percibido por el sensor, en esta fase se evalúa a la agilidad motora del atleta. En la actualidad los ejercicios para aumentar la velocidad de movimiento y minimizar los tiempos de reacción son parte diaria y fundamental de los entrenamientos de alto rendimiento.

La presente investigación se centra en la construcción de una red de dispositivos electrónicos, los cuales puedan capturar el tiempo de reacción de una persona ante un estímulo visual. El motivo principal por el cual se decide desarrollar estos dispositivos, es el de brindar una herramienta precisa y exacta para la captura de tiempos de reacción en entrenamientos de agilidad y velocidad motora. Ya que en los entrenamientos actuales solo se cuenta con dispositivos de medición de tiempo sencillos, como relojes o cronómetros manuales, incluso en ocasiones solo se cuenta con la habilidad del entrenador para estimar el tiempo de reacción. En el mercado ya se encuentran dispositivos similares a este, pero tienen precios elevados por lo que no son accesibles a todos los atletas; es debido a esto que los dispositivos se desarrollaran manteniendo costos bajos e implementando funciones iguales y similares a los ya existentes.

El funcionamiento de dichos dispositivos es que al activarse despliegan una alarma visual y el atleta, en entrenamiento, tiene que interactuar con estos dispositivos ya sea tocándolos o colocando un objeto (raqueta, mano, etc.) a una cierta distancia mínima de estos. El tiempo de reacción que captura el dispositivo inicia cuando se activa y presenta la alarma visual, la cual se presenta con LEDs RGB, y finaliza en el momento que se detecta la respuesta del atleta al activar un sensor del dispositivo.

Los dispositivos se desarrollaran para que se acoplen al entrenamiento requerido por el

atleta de una forma que estos le sean fácil de utilizar. Es por esto que los dispositivos trabajan de forma inalámbrica. Otras características que poseen los dispositivos es que cuentan con una batería la cual les permite almacenar la carga para no interrumpir la sesión de entrenamiento.

2.1. Ciencia aplicada al deporte fase 1

Puede encontrarse un trabajo similar en [1], esta tesis trata acerca de la implementación de un dispositivo para la toma de tiempos de reacción de forma inalámbrica. Lo que se logró fue la construcción de dicho dispositivo utilizando la placa de desarrollo Arduino en conjunto con módulos de transmisión inalámbrica por wifi XBEE 2SC.

En el dispositivo de captura se implementó una placa Arduino Uno, un módulo XBEE y un circuito para el sensor capacitivo. Para la implementación del sensor capacitivo se utilizó la librería "capacitiveSensor" incluida en el entorno de programación de la placa Arduino. Para implementar un sensor capacitivo con esta librería, se utilizan dos pines de la placa Arduino, en la Figura 2 se muestra el diagrama de conexión. Ambos pines se conectan a una resistencia de $10\text{ M}\Omega$ y en el pin de recepción se coloca una pieza de aluminio. El funcionamiento del sensor capacitivo consiste en activar el pin de envío y medir el tiempo que tarda el pin de recepción en detectar la activación. Al tocar la pieza de aluminio del sensor, el tiempo de recepción aumenta, por lo que se puede detectar la presencia de la persona por esa diferencia en los tiempos.

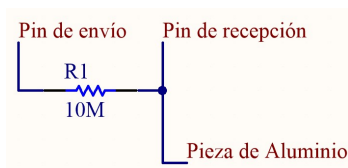


Figura 1: Diagrama de conexión del sensor capacitivo en la placa Arduino. [1]

Para el diseño del encapsulado se utilizó el software de diseño Inventor. Esta herramienta de diseño es ampliamente utilizada en el diseño de estructuras, ya que permite realizar análisis de esfuerzos y deformaciones.

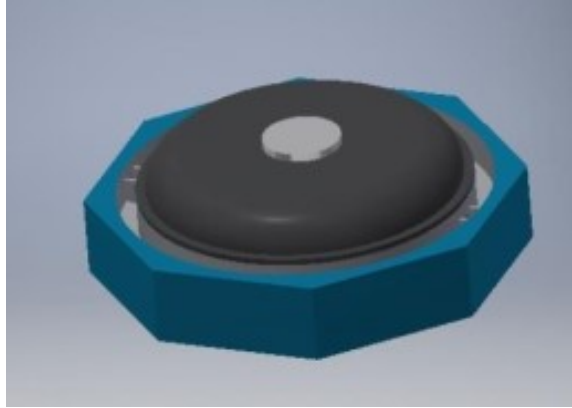


Figura 2: Dispositivo medidor de tiempos de reacción inalámbrico. [1]

2.2. Fitlight

Es un dispositivo el cual logra medir el tiempo de reacción de forma inalámbrica, este es un dispositivo el cual lleva en el mercado varios años y es ampliamente conocido. Esta empresa vende paquetes de cuatro o seis dispositivos junto con una tableta electrónica.

Estos dispositivos tienen comunicación inalámbrica solo con una tableta electrónica la cual coordina la forma en la que se van ir activando dichos dispositivos. Al recibir la señal los dispositivos encienden una luz y el usuario tiene que pasar un objeto o su mano cerca para que el dispositivo pueda detectarlo con un sensor y así tomar el tiempo de reacción del usuario.

Los dispositivos tienen un peso de 0.3 Kg, un diámetro de 15 cm, rango cobertura de 50 metros y la batería interna almacena energía eléctrica para 1.5 horas de uso continuo. Además, los dispositivos pueden ser controlados con un software que tiene múltiples herramientas para crear entrenamientos y realizar análisis de los tiempos de reacción capturados. El precio del paquete de seis unidades está cerca de los Q4000. [2]



Figura 3: Dispositivos Fitlight. [2]

En la actualidad las competencias de alto rendimiento son cada vez más exigentes, por lo cual los atletas para poder triunfar tienen que entrenarse arduamente; dicho entrenamiento tiene que abarcar la parte física como mental. En ciertos deportes, es de gran importancia que los atletas puedan identificar un objetivo en el menor tiempo posible, luego tomar una decisión casi instantánea y finalmente ejecutar un movimiento pulido arduamente para lograr el punto decisivo que les de la partida.

Los ejercicios para mejorar la velocidad de reacción son ampliamente utilizados y parte fundamental en los entrenamientos diarios de la mayoría de deportes. Estos ejercicios pueden consistir en recorrer una serie de obstáculos en el menor tiempo posible, o también en tomar el tiempo que se tarda en correr entre dos puntos. Con el objetivo de tomar estos tiempos de una forma más exacta y precisa se propone la creación de estos dispositivos de medición.

Los dispositivos a desarrollar emitirán un estímulo visual el cual tendrá que identificar el atleta, con lo que se agudizara sus sentidos y toma de decisiones. Este tipo de dispositivos ya se encuentran en el mercado pero el costo es elevado además de que son poco conocidos. El dispositivo va a tener un bajo costo económico, manteniendo las funcionalidades, para que el deporte nacional pueda tener mayor acceso a esta tecnología y así incrementar su rendimiento.

4.1. Objetivo general

Diseño de dispositivos inalámbricos para la medición de tiempos de reacción de atletas ante un estímulo visual dado para entrenamientos en diferentes deportes.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar dos tipos de sensores de presencia para la detección de la respuesta del usuario al estímulo dado. Los sensores serán lo suficientemente versátiles para la detección de gran variedad de movimientos.
- Seleccionar e implementar comunicación inalámbrica entre el dispositivo maestro y los esclavos desarrollados.
- Diseño e implementación del módulo electrónico del dispositivo.
- Diseñar el encapsulado del dispositivo para que pueda resistir salpicaduras de agua, sudor e impactos.
- Desarrollar un manual para el manejo del dispositivo, añadiendo además planos del dispositivo, diagramas electrónicos y diseño del circuito impreso con los componentes utilizados.

El principal objetivo de este trabajo, es el de desarrollar todas las herramientas de hardware y software necesarias para la creación de un dispositivo maestro y un dispositivo esclavo, los cuales puedan trabajar en conjunto para capturar el tiempo que tarda una persona en presentar una respuesta ante un estímulo visual. Este trabajo abarca la selección e implementación de un módulo de comunicación inalámbrica para los dispositivos. También comprende el desarrollo de dos tipos de sensores, uno se enfocará en poder detectar la presencia de una persona mediante el contacto con la piel de la mano y el otro sensor se desarrollará para que pueda detectar la presencia de objetos hasta una distancia de 15 cm.

Los dispositivos tendrán una forma de almacenamiento de energía para que estos puedan ser utilizados en un área para entrenamientos deportivos. También se incluye en este trabajo el desarrollo del encapsulado para el dispositivo esclavo, la construcción de placas de circuito impreso para los dispositivos, la implementación de una alarma visual en el dispositivo esclavo y la selección e implementación de un tipo de comunicación entre el dispositivo maestro y un computador.

6.1. Tiempo de reacción

El término tiempo de reacción se refiere a el intervalo de tiempo que existente entre un estímulo y la respuesta medible [3]. Existe una gran variedad de definiciones del término tiempo de reacción. Algunos sinónimos de este término son: tiempo de latencia, velocidad de reacción motora y latencia de respuesta.

Las primeras investigaciones que se centraron en el estudio del tiempo de reacción fueron por parte del campo de la fisiología en el siglo XIX; se llevaron a cabo experimentos como el estímulo del nervio motor de ranas en diferentes puntos y se observó que el tiempo de latencia era mayor cuando mayor era la longitud del músculo [4]. También se realizaron estudios de la velocidad de transmisión nerviosa táctil, auditiva y visual. Se le denominó tiempo de reacción simple al período que corresponde a la trasmisión neuromuscular [4].

Bernia fue un psicólogo que realizó investigaciones del tiempo de reacción en el siglo XX, en sus estudios divide en tres etapas al tiempo de reacción fisiológico [4]. En primer lugar, coloca a la aferencia desde el órgano sensorial hasta el cerebro; luego se da la concepción, discriminación y decisión voluntaria; la última fase es la de ejecución de la respuesta [4].

En la actualidad las ramas de ciencias enfocadas al deporte juntan el tiempo de reacción fisiológico y el tiempo de reacción entre el comienzo de la ejecución del movimiento hasta su detección por parte del sensor utilizado; formando así una definición en la que se abarca la cualidad física del individuo [3].

6.2. Sensor de movimiento

6.2.1. LED infrarrojo con fotodiodo

Los sensores son dispositivos importantes en la robótica y automatización; ya que permiten que los circuitos electrónicos puedan reaccionar de cierta manera a un determinado impulso. Hay una gran variedad de dispositivos capaces de detectar movimiento, uno de los más utilizados, debido a su bajo costo, es el sensor infrarrojo.

Los módulos de sensores infrarrojos se componen de un LED infrarrojo y de un fototransistor o fotodiodo. El LED infrarrojo emite radiación en el rango de frecuencia del espectro infrarrojo, al cual no se puede ver a simple vista (700nm-1mm). El aspecto de este emisor es similar al de un LED normal de 5 mm, consume 20 mili-amperios (mA) de corriente y soporta hasta 3 voltios (VDC). El ángulo de irradiación infrarroja horizontal para este emisor se encuentra entre 20 a 60 grados.

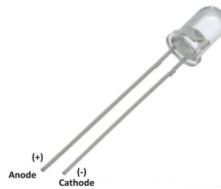


Figura 4: LED infrarrojo

El fotodiodo es un tipo de resistor que cambia su resistencia dependiendo de la luz infrarroja que recibe. Cuando no está recibiendo luz su resistencia es muy elevada, y cuando recibe luz su resistencia disminuye.



Figura 5: Fotodiodo

Hay dos formas de ubicar el LED IR y el fotodiodo, una es en configuración de incidencia directa, esta consiste en colocar uno enfrente del otro, haciendo que el LED IR quede exactamente enfrente del fotodiodo. De este modo se detecta cuando un objeto se interponga entre ellos, ya que obstruye el infrarrojo. Y la otra configuración es la de incidencia indirecta, en esta configuración el LED IR se coloca a la par del fotodiodo y cuando un objeto está enfrente de ellos la luz infrarroja rebota en el objeto y llega al fotodiodo.

El módulo implementado a un microcontrolador necesita un amplificador operacional (op-amp) para que amplifique la señal que produce el fotodiodo, ya que la variación de su salida es ligera. El op-amp se conecta como un comparador, para que pueda producir un 1 lógico (+3.3 VDC) cuando se está detectando un objeto y un 0 lógico (0 VDC) cuando no. El sensor infrarrojo implementado con un fotodiodo receptor es susceptible al infrarrojo

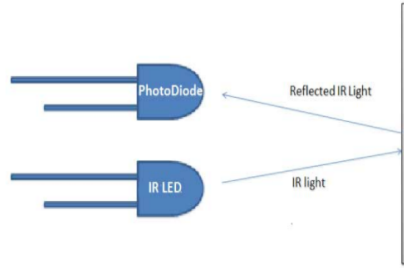


Figura 6: Configuración de incidencia indirecta

presente en el ambiente emitido por el sol y algunos dispositivos electrónicos, por lo que no se recomienda su uso por las posibles medidas erróneas.

6.2.2. Sensores capacitivos

Los sensores capacitivos los vemos implementados en muchos dispositivos domésticos y son ampliamente utilizados en la industria. Estos básicamente se componen de una pieza de metal, como el aluminio, la cual se tiene que tocar para que el sensor funcione.

Este tipo de sensores utilizan el cuerpo humano para modificar la capacitancia total de un circuito resistencia-capacitor (RC)^[5] y así detectar la presencia de una persona al tocar la pieza de metal. La piel del cuerpo humano es un buen dieléctrico ya que esta se compone de una gran cantidad de agua. Es por esto que se logra interactuar con el campo eléctrico del capacitor en el circuito RC, aumentando su constante dieléctrica global que produce un incremento en la capacitancia total del circuito.

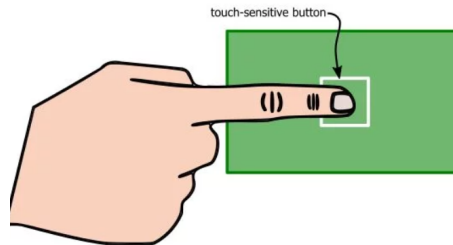


Figura 7: Sensor capacitivo. ^[6]

Al colocar el dedo cerca de la placa, y al ser la piel humana conductiva, se crea una tierra virtual sobre la placa conductora.^[7] Se puede resumir que esto genera otro capacitor en paralelo al existente, ya que el cuerpo humano tiene una capacidad alta de absorber la carga eléctrica. Al tener dos capacitores en paralelo se puede simplificar como solo un capacitor con mayor capacitancia.^[6]

Se tiene que entender que la parte electrónica está aislada del ambiente por lo que no necesariamente se tiene que tocar la placa metálica conductora, normalmente está cubierta con algún tipo de polímero el cual tiene una permitividad baja.

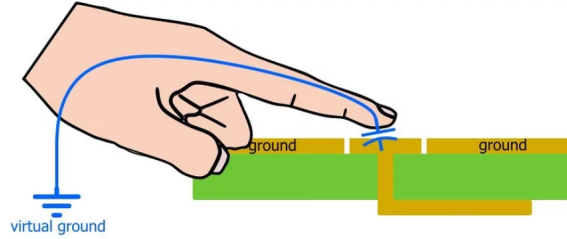


Figura 8: Efecto conductor sobre el sensor capacitivo. [6]

6.2.3. Receptor de infrarrojo TL1838

El receptor TL1838 es un tipo de receptor infrarrojo, se caracteriza por cambiar su estado al recibir una señal infrarrojo a una frecuencia de 38 KHz. Esto se debe a que internamente posee un filtro pasabanda [8], el cual se encuentra calibrado para que su frecuencia de corte sea 38 KHz, de esta forma todas las demás frecuencias no las tomará en cuenta.

Tiene un bajo consumo de corriente, aproximadamente 2 mA, y se puede alimentar con un voltaje máximo de 6 VDC [8]. Es un dispositivo que se utiliza comúnmente en televisores, como receptor de la luz infrarroja emitida por un control remoto. Puede llegar a percibir luz infrarroja hasta una distancia de 15 m con un ángulo de 35 grados.

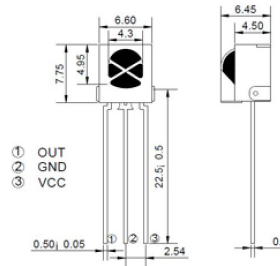


Figura 9: Receptor de infrarrojo TL1838. [8]

6.3. Comunicación por radio frecuencia con NRF24L01+

El módulo de radio frecuencia de Nordic Semiconductor NRF24L01+ es un dispositivo ideal para la comunicación entre microcontroladores (μC) en cortas distancias. Algunas de sus características es que este puede trabajar en la banda de 2.4 GHz. Puede transmitir datos a una velocidad de 250 Kbps a 2 Mbps, tiene un consumo de energía mínimo, 11.3 mA en Tx y 13.5 mA en Rx, comúnmente cuando el módulo se encuentra en modo escucha (en espera de mensaje entrante) se tiene un consumo de 19 mA. La distancia de transmisión en campo abierto puede llegar a 100 metros. Puede trabajar en 125 canales diferentes, cada unidad puede comunicarse de forma bidireccional con otros 6 módulos en el mismo canal. [9]

El rango de operación es de 1.9 a 3.6 VDC en su alimentación, pero los otros pines



Figura 10: Pines del módulo NRF24L01+. [9]

pueden tolerar 5 VDC. Este módulo tiene un microcontrolador (μ C) que lo maneja. Podemos trabajar con el μ C interno mediante los pines de comunicación serial (SPI) que posee el módulo. Al leer y cambiar los valores de los registros del μ C se puede ejecutar operaciones en el módulo. El módulo está diseñado para aplicaciones de comunicación inalámbrica de bajo consumo de corriente. La potencia de la señal emitida puede ser programada para 0, -6, -12 o -18 dBm, se configura la potencia cambiando el valor del registro PWR-UP. [9]. Se tiene un consumo 11.3 mA al transmitir datos con una potencia de 0 dBm.

6.4. Proceso aditivo: Impresión 3D

6.4.1. Sinterización selectiva por láser

La sinterización selectiva por láser (SLS) es un proceso en el cual un láser o serie de láseres, se utilizan para derretir y llevar hasta el punto de fundición, de forma selectiva, a termoplásticos los cuales se encuentran en forma de polvo. Este proceso se utiliza para la producción de piezas de prototipo resistentes y las cuales son funcionales, manteniendo un buen acabado superficial y de gran detalle. Es ideal para la fabricación de piezas con geometrías complejas, como las que se necesitan en los sectores aeroespaciales, de la automoción y de la electrónica. [10]

Durante el proceso de sinterización y fundición ocurren varios fenómenos físicos, químicos y térmicos. En la sinterización la superficie del polvo del polímero absorbe la energía del láser, y ocurre una transferencia calorífica. Luego ocurre un proceso en el que se unen las partículas, porque está en estado líquido, y al interactuar con la atmósfera se enfrían rápidamente. [11]

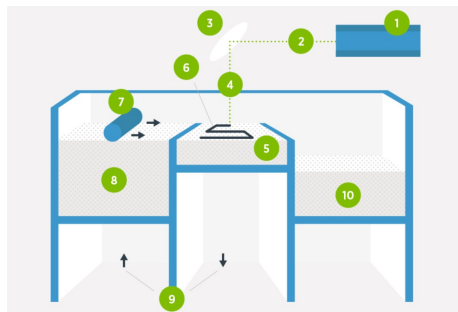


Figura 11: Componente de una impresora 3D de SLS. [11]

La Figura [11] muestra los componentes necesarios en una impresora 3D de SLS. Los

elementos involucrados son: un puntero láser, un espejo reflector que puede variar su ángulo de rebote mediante un motor, una recámara en donde se está fabricando la pieza, otra recámara en donde se encuentra el material en polvo, un rodillo que se encarga de colocar una nueva capa de material para que el láser la pueda sinterizar y otra recámara en donde cae parte del polvo que no es fundido.

6.4.2. Multi Jet Fusion

Multi Jet Fusion (MJF) es un proceso de manufactura aditiva, su funcionamiento consiste en la aplicación de un agente fundente sobre una capa de material, estos se funden dentro de la recámara de construcción. Luego se aplica un agente detallante que modifica la capa de fusión generando así la superficie que necesitamos. Para el acabado superficial de la pieza, esta se expone a una alta temperatura lo que desencadena reacciones de fusión en el material y entre los agentes. Todo este proceso se realiza dentro una recámara de construcción, la cual se retira y se deja enfriar después de la última etapa del proceso. [12]

Este tipo de tecnología es una de las más rápidas en el mercado, para la fabricación de piezas de plástico. Esta tecnología permite trabajar geometrías complejas en un período corto de tiempo, por lo que se reducen los costos de fabricación y se puede tener un proceso de diseño y producción más rápido. [13]

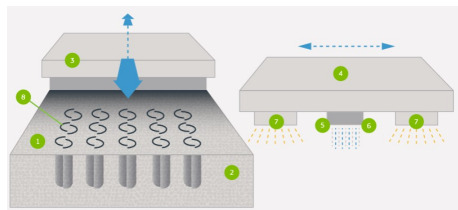


Figura 12: Componente de una impresora 3D de MJF. [11]

En la Figura [12] se observan los componentes principales para realizar una impresión en MJF, estos son: el material base, agente fundente, agente detallante, fuente de energía térmica, carrete de dispersión y unidad de recubrimiento del material.

Diseño e implementación de sensor infrarrojo y sensor capacitivo

7.1. Selección de sensores

En el mercado se encuentran una gran variedad de sensores capaces de detectar la presencia de una persona. Debido a que se tiene que minimizar el consumo de energía del circuito y mantener un costo bajo se descartó la compra de módulos de sensores prefabricados y algún tipo de detección por visión de computadora implementando cámaras.

Se decide utilizar sensores emisores de luz infrarroja ya que cumplen el requerimiento de ser económicos y de bajo consumo de energía. Además, el tener un empaquetado tipo LED, nos ofrece una gran resistencia a las condiciones ambientales. La configuración en la que se implementará este sensor en el dispositivo, es la detección por rebote, esta consiste en emitir luz infrarroja, la cual rebota en el objeto hacia un receptor. Una desventaja de la configuración de detección por rebote, es que el rango en que trabaja no le permite detectar objetos ubicados exactamente sobre el sensor, es decir que estén los objetos a pocos milímetros del emisor y receptor infrarrojo, ya que no rebota la luz infrarroja en algún ángulo posible hacia el receptor.

Se decide implementar un sensor capacitivo, para que el dispositivo pueda detectar cuando la persona toque al dispositivo. Este tipo de sensores son robustos en su funcionamiento, ya que el circuito interno queda protegido del ambiente por la estructura que lo encapsula. Para implementar el sensor capacitivo se necesita una pieza de metal afuera del encapsulado, esta pieza es la que toca el usuario, con la mano desprotegida, para que active el sensor.

7.2. Sensor infrarrojo

7.2.1. Sensor infrarrojo implementando con fotodiodo receptor

A continuación, se describirá un circuito básico para demostrar el funcionamiento de un sensor infrarrojo, utilizando un LED emisor de infrarrojo y un fotodiodo receptor, ambos en encapsulado estándar de 5 mm. Se colocan en configuración de activación por rebote del infrarrojo en el objeto detectado.

Se utilizó un op-amp lm 324 en configuración comparador, una resistencia de 100 y una de 10 k Ω ; en la Figura 13 observamos el diagrama de conexión. El LED IR y el fotodiodo se pusieron uno a la par del otro para que al colocar un objeto enfrente de este, la luz infrarroja rebotara en el objeto e incidiera de forma indirecta en el fotodiodo.

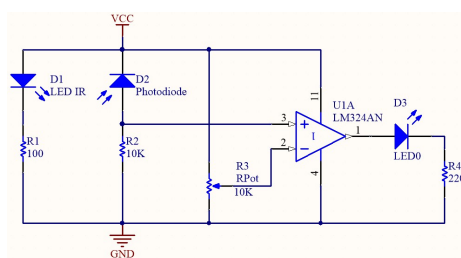


Figura 13: Esquemático del circuito para el sensor infrarrojo implementado con fotodiodo receptor.

Se observó un cambio en el voltaje de la resistencia del fotodiodo, este voltaje cambia de 0 a 40 mili-Voltios (mV) cuando se coloca un objeto delante del sensor. De esta forma se puede detectar la presencia de un objeto. Con el potenciómetro de 10 k Ω se puede variar la distancia máxima a la que el sensor detectar un objeto; ya que, al cambiar el valor de resistencia del potenciómetro, el voltaje contra el cual compara el op-amp cambia. Se ajustó el potenciómetro para conseguir una salida de 1 lógico (3.3 VDC) a una distancia de 5 cm.

Se realizaron pruebas de funcionamiento y se determinó que el fotodiodo es afectado significativamente por la luz infrarroja en el ambiente, que es emitida por el sol y por dispositivos que utilizan comunicación infrarroja. Esto provoca que haya fallos en la detección cuando no se está en un ambiente controlado. Es debido a esto que esta implementación del sensor IR con fotodiodo receptor solo podrá ser utilizada en ambientes bajo techo y nunca bajo la luz directa del sol.

7.2.2. Sensor infrarrojo implementando con módulo receptor TL1838

El receptor TL1838 al recibir pulsos de luz infrarroja a una frecuencia de 38 KHz cambia su salida de 1 a 0 lógico [8]. Mientras no reciba luz infrarroja a 38 KHz su salida es 1 lógico. Esto es debido a que internamente tiene un circuito que actúa como un filtro pasa banda, el cual atenúa todas las demás frecuencias y siendo su banda de paso solo la frecuencia de 38 KHz. La Figura 14 nos muestra el diagrama de conexión para este módulo receptor junto al microcontrolador.

Para producir la frecuencia de 38KHz en el LED emisor de IR se utiliza un integrado

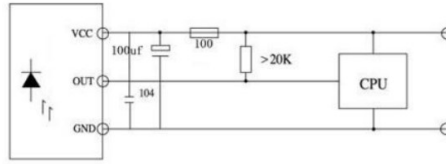


Figura 14: Esquemático del módulo TL1838 con microcontrolador

NT555 en configuración astable. La explicación en el campo de la electrónica de un circuito multivibrador astable es, que no tiene ningún estado estable; este posee dos estados a los que se les llaman inestables, entre los que conmuta a un tiempo determinado. La frecuencia a la que conmuta el integrado NTE555 depende, del tiempo requerido para cargar y descargar el condensador conectado a su pin de alcance máximo y pin de disparo. En la Figura 15 se encuentra el esquemático utilizado para que el integrado NT555 pueda producir una señal cuadrada con ciclo de trabajo del 50%, de 38 kHz y que pueda ser activado al recibir un pulso de 3.3 VDC.

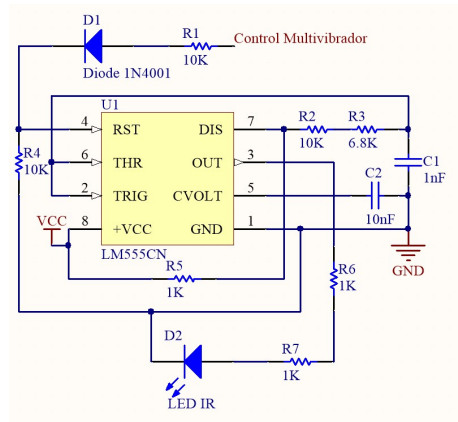


Figura 15: Diagrama del circuito IR emisor

Se decide utilizar un multivibrador NTE555 debido a que el microcontrolador puede permanecer en estado “dormido” hasta que la interrupción en el puerto lo despierte. También para minimizar el procesamiento de interrupciones de los módulos necesarios para producir esta señal de 38 KHz en uno de los pines del microcontrolador. Minimizando así el código utilizado y volviéndolo más eficiente.

La Figura 16 nos muestra la programación implementada para el manejo del sensor infrarrojo en el dispositivo esclavo, en la red de dispositivos. Este sensor se activa cuando el dispositivo esclavo recibe un mensaje desde el dispositivo maestro, este mensaje es enviado por radiofrecuencia utilizando el módulo NRF24L01+.

Cuando se recibe un mensaje en el módulo RF NRF24L01+ este activa el pin IRQ [9] el cual está conectado a una entrada en el microcontrolador (μC) del dispositivo esclavo, por lo que se produce una interrupción. Al leer el mensaje y determinar que se necesita activar el sensor se enciende un pin el cual activa al multivibrador NTE555, con lo que se comienza a emitir una señal de 38 KHz en el LED emisor de IR. Mientras tanto el μC se queda evaluando la respuesta del receptor de IR TL1838, que, al detectar luz infrarroja, la cual rebota en el

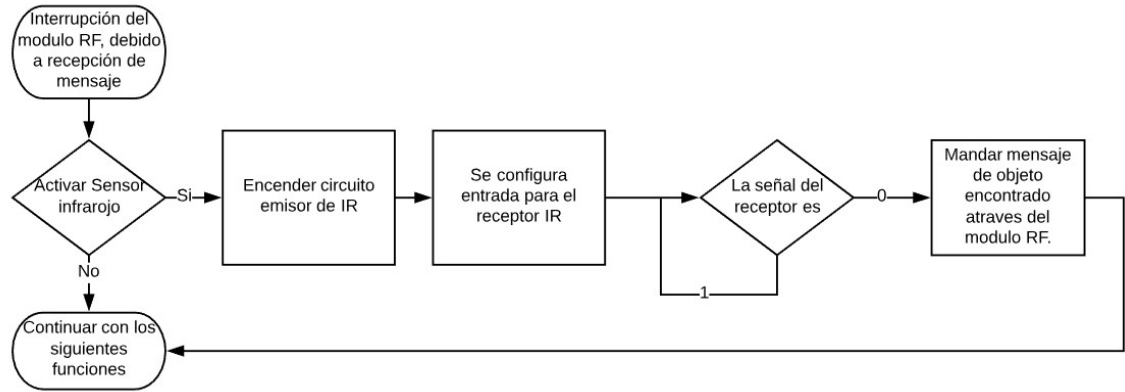


Figura 16: Diagrama de flujo de la programación del módulo de sensado por IR

objeto detectado, cambia su salida de 1 a 0 lógico [8] con lo que el μC detecta este cambio de estado y manda un mensaje vía el módulo RF al dispositivo maestro, se apagan los pines que se utilizaron, se reinician variables y el μC se queda esperando a un nuevo mensaje del dispositivo maestro.

El módulo implementado cumple con los requerimientos de funcionamiento ya que puede detectar a un objeto no importando el tipo de geometría o el color de este, siempre y cuando pueda rebotar la luz infrarroja en el objeto. Una desventaja que se encontró al implementar este sensor es se necesitan que pase un ciclo de la frecuencia de 38KHz en el IR para que el receptor TL1838 se active, cambiando de estado su salida.

7.2.3. Ángulo de rebote del sensor infrarrojo.

A continuación, se describirá el proceso para determinar el ángulo de inclinación tanto para el emisor de infrarrojo, como para el receptor TL1838. En la Figura 17 observamos una de las piezas que se utilizaron para realizar las pruebas. Las piezas fueron fabricadas con un proceso aditivo de PLA en una impresora en 3D con 0.15 mm de altura de capa y un relleno del 10 %. Cada pieza de prueba se fabricó con un ángulo diferente, respecto a la vertical del centro de la pieza, para el emisor y receptor de infrarrojo. La distancia horizontal entre centros es de 10 mm y ambos están colocados sobre el mismo plano vertical.

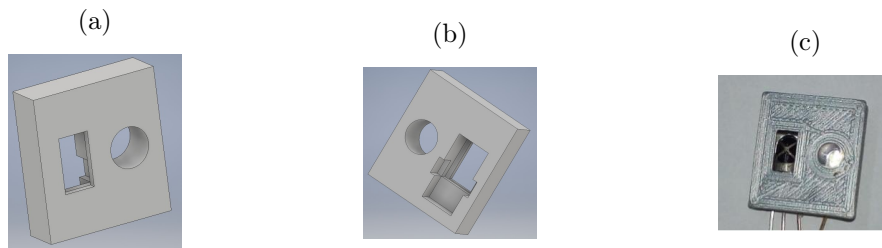


Figura 17: Pieza de prueba para el ángulo de rebote del sensor infrarrojo.

El Cuadro 1 muestra el resumen de los resultados obtenidos para cada prueba realizada, en donde nos interesa la cantidad de aciertos que se obtuvieron realizando 20 movimientos

Ángulo emisor	Ángulo receptor	Aciertos	Detección a 15 cm
5	-5	100 %	Si
5	-8	100 %	Si
5	-12	100 %	No
8	-5	100 %	Si
8	-8	100 %	Si
8	-12	100 %	No
12	-5	100 %	Si
12	-8	90 %	Si
12	-12	75 %	No

Cuadro 1: Pruebas del ángulo de rebote del sensor infrarrojo

alternados, y si el sensor IR con ese ángulo de rebote es capaz de detectar a una distancia igual o mayor de 15 cm. Se observa que al colocar a el módulo receptor TL1838 con una inclinación de -12 grados, con respecto al plano vertical de la pieza, decrece la cantidad de movimientos detectados por el sensor infrarrojo y se disminuye la distancia máxima de detección. El anexo 59 nos muestra la implementación del sensor infrarrojo utilizado para realizar las pruebas. Al realizar las pruebas también se determina que al fabricar las piezas con impresión 3D la luz infrarroja puede introducirse en sus paredes, ya que son finas capas colocadas de abajo hacia arriba. Al introducirse el infrarrojo dentro de la pieza puede llegar al módulo receptor TL1838, provocando así una lectura errónea, es decir, que se activa el sensor cuando no hay objeto.

Para evitar lecturas erróneas y maximizar la distancia de detección se utilizó un ángulo de 5 grados para el emisor y receptor de infrarrojo. Para que el infrarrojo no se introduzca dentro de la impresión en 3D, utilizando como material PLA, se recomienda usar una altura de capa de 0.15 mm con 60 % de relleno y 2 mm de espesor de pared. También se recomienda usar un color de PLA oscuro. El anexo 67 nos muestra el dispositivo esclavo incluyendo los sensores infrarrojos en la parte superior.

7.3. Sensor capacitivo

7.3.1. Diseño del sensor capacitivo con una pieza de aluminio

Se utilizó una pieza de aluminio redonda de 2.5 cm de radio, 1 resistencia de 1 M Ω , un capacitor de 100 pico-faradios (pF) y un microcontrolador (μ C) PIC 16F887. Se observa en la Figura 18 el esquemático del sensor capacitivo, en donde la conexión indicada en el diagrama como “pin de envío de señal” es una patilla del μ C configurada como salida y el “pin receptor de señal” es una patilla de entrada en el μ C. En la terminal que se indica como “placa de aluminio” se coloca la pieza circular de aluminio de 5 cm de diámetro, esta pieza es la que se tiene que tocar para activar al sensor.

El algoritmo que se utiliza en el μ C para identificar el cambio de la capacitancia total en el circuito RC consistió en: mandar un 1 lógico (3.3 VDC) en el pin de envío y luego medir el tiempo que tarda en cargarse el capacitor y provocar que en el pin de recepción se detecte

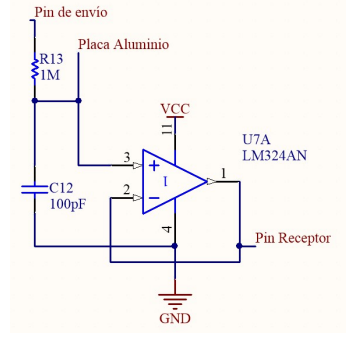


Figura 18: Esquemático del sensor capacitivo

un 1 lógico. Esto toma un tiempo el cual lo podemos determinar con la ecuación de carga y descargar de un circuito resistencia-capacitor. Este tiempo aumenta cuando se toca la pieza metálica ya que se modifica la capacitancia total del circuito. [5]

$$V(t) = e^{\frac{-t}{R \cdot C}}$$

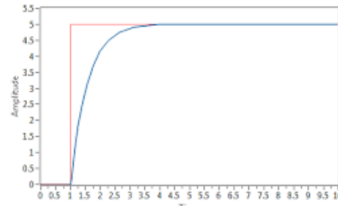


Figura 19: Carga del capacitor en circuito RC

El voltaje en el capacitor del circuito RC va aumentado con forma de una curva exponencial. Al tocar la pieza de metal aumentamos la capacitancia, con lo que la curva exponencial ahora es más lenta, lo que implica que se toma un mayor tiempo en llegar al voltaje de 1 lógico. De esta forma determinamos si alguien está tocando la pieza metálica. Para el desacople de impedancias con la entrada del μC y el circuito se coloca un op-amp 741 en modo seguidor.

7.3.2. Implementación del sensor capacitivo junto al microcontrolador

Se programa el μC para que este enciende el pin de envío de señal durante 750 μS y luego lo apague durante 500 μS . Los resultados obtenidos se presentan en la Figura [20] y Figura [21].

Se logra observar que el circuito tarda en cargarse 130 μS al no estar tocando la pieza metálica Figura [20] y luego cuando se toca a la pieza podemos ver que el tiempo incrementa significativamente, siendo siempre mayor a 250 μS . Este aumento no es siempre el mismo porque depende del tamaño del área de contacto entre la piel y la pieza metálica. Una mayor área de contacto provoca un mayor incremento en el tiempo de carga del circuito RC.

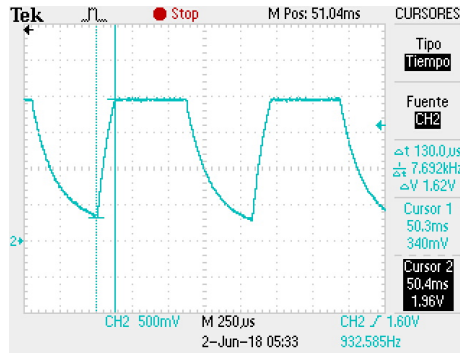


Figura 20: Gráfica de la respuesta del circuito sin tocar la pieza metálica

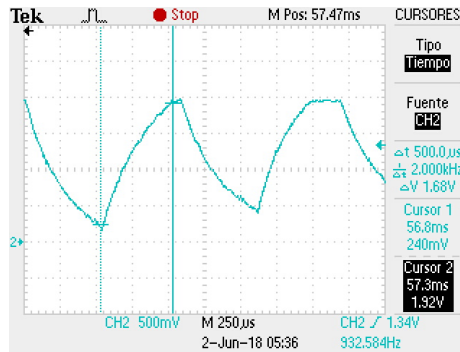


Figura 21: Gráfica de la respuesta del circuito al tocar la pieza metálica

Para implementar al sensor capacitivo, se necesitan dos pines del microcontrolador, uno se utiliza como salida para alimentar al circuito RC que es nuestro sensor capacitivo y el otro se configura como entrada para detectar cuando el circuito se cargue hasta alcanzar un voltaje que el μC pueda detectarlo como activo, que es igual a 2 VDC.

La programación consiste en utilizar un temporizador interno del μC para medir el tiempo en que tarde en alcanzar un voltaje de 2 VDC en el circuito RC. Si este tiempo tomado es mayor a $250 \mu S$ es porque hay una persona tocando la pieza metálica y se continúa con el programa. Se coloca $250 \mu S$, aunque se sabe que al circuito RC le va a tomar $130 \mu S$ en cargarse, porque al aproximarse la mano de la persona a la pieza metálica comienza a aumentar la capacitancia del circuito sin haberlo tocado. Así que para evitar que el circuito se active antes que la persona toque el objeto, se coloca el valor de $250 \mu S$, con esto se descarta la variables del área de contacto o presión aplicada sobre el sensor, tan solo se resume a detectar cuando la persona toque la pieza de aluminio. Cuando no se toca la pieza es necesario esperar $500 \mu s$ para asegurar que el circuito se encuentre completamente descargado y así poder comenzar el ciclo medición nuevamente. El anexo 60 nos muestra la implementación del sensor capacitivo utilizado para realizar las pruebas.

Se cumplen los requerimientos de ser económico y de bajo consumo de energía. Además de ser bastante robusto, además el circuito solo se activa cuando es tocado por una persona y no antes del contacto entre la pieza de aluminio y la mano. Se le tiene que indicar a los usuarios, que tienen que tener la mano sin guantes o vendas, el dispositivo aún puede funcionar si la mano contiene residuos de tiza o tierra, ya que no cubren por completo la piel

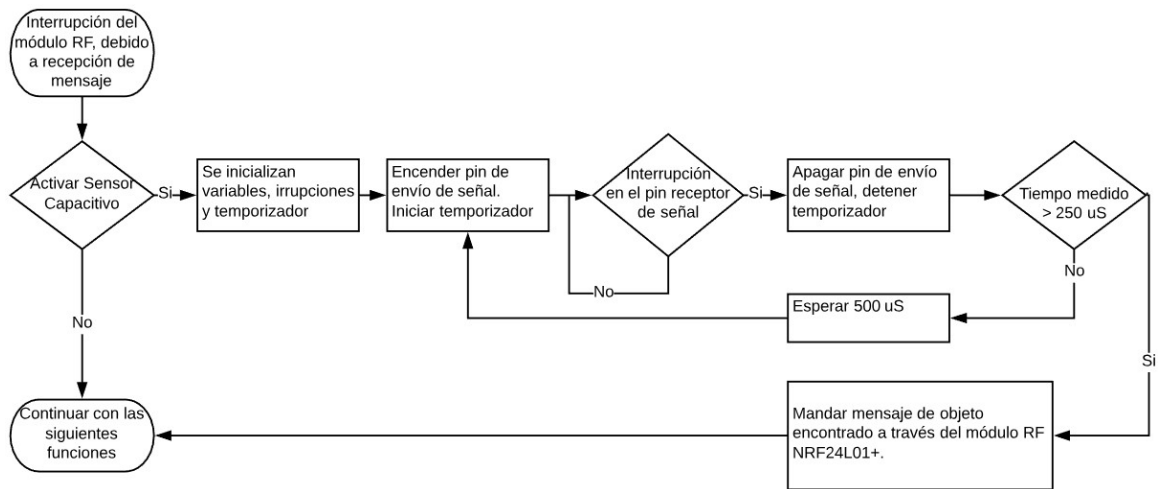


Figura 22: Diagrama de flujo de la programación del sensor capacitivo.

del individuo. El anexo [67](#) nos muestra el dispositivo esclavo incluyendo el sensor capacitivo en la parte superior. El anexo [66](#) nos muestra la pieza utiliza como contacto metálico para el sensor capacitivo. Esta pieza utiliza 15 tiras de alambre AWG 24.

Comunicación inalámbrica entre el dispositivo maestro y los esclavos desarrollados

8.1. Selección de tecnología y módulo de comunicación inalámbrica

Las principales tecnologías para la comunicación inalámbrica actualmente son vía radiofrecuencia, Wifi y Bluetooth. Todas tienen la característica de transmitir datos a altas velocidades en bandas superiores a 2.4 GHz. Debido a la gran disponibilidad en el mercado de módulos Wifi y radiofrecuencia de bajo costo económico y de bajo consumo de energía se descarta a la tecnología Bluetooth. Los módulos a comparar a continuación son el módulo Wifi ESP8266 [14] y el módulo de radiofrecuencia NRF24L01+ de Nordic Semiconductor [9]; se escogieron debido principalmente a su precio en el mercado el cual es bajo y el tamaño de los módulos el cual es pequeño comparado ante otras opciones.

Debido al alto consumo de corriente cuando transmite el módulo ESP8266 [14] y a que no se necesita enviar grandes cantidades de información entre los dispositivos se descarta este módulo. Por lo que se seleccionó el módulo de NRF24L01+ para realizar la comunicación

Características	NRF24L01+	ESP8266
Ancho de banda	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad de transmisión	1 y 2 Mbps	54 Mbps
Nodos	125 canales, 6 en el mismo canal	-
Tamaño	2.48*1.43 cm	2.9*1.5 cm
Consumo	19 mA	146 mA
Costo prom.	\$2.50	\$ 3.25

Cuadro 2: Comparación de características entre los módulos ESP8266 y NRF24L01+.

inalámbrica entre los dispositivos.

8.2. Control del módulo de comunicación inalámbrica NRF24L01+

La arquitectura interna del módulo NRF24L01+ contiene un microcontrolador quien es el encargado de manejar todas las funciones del módulo. Podemos acceder al μC interno mediante los pines de comunicación serial (SPI) [9]; al leer sus registros y cambiar sus valores en determinada secuencia podemos ejecutar operaciones en el módulo.

El PIC 16F887 es un microcontrolador de 8 bits el cual está diseñado para aplicaciones de bajo consumo, este puede trabajar hasta una frecuencia de 20 Mhz, este contiene módulos periféricos como temporizadores, conversores analógicos, salidas de PWM, módulos de comunicación USART, SPI, I2C, etc.

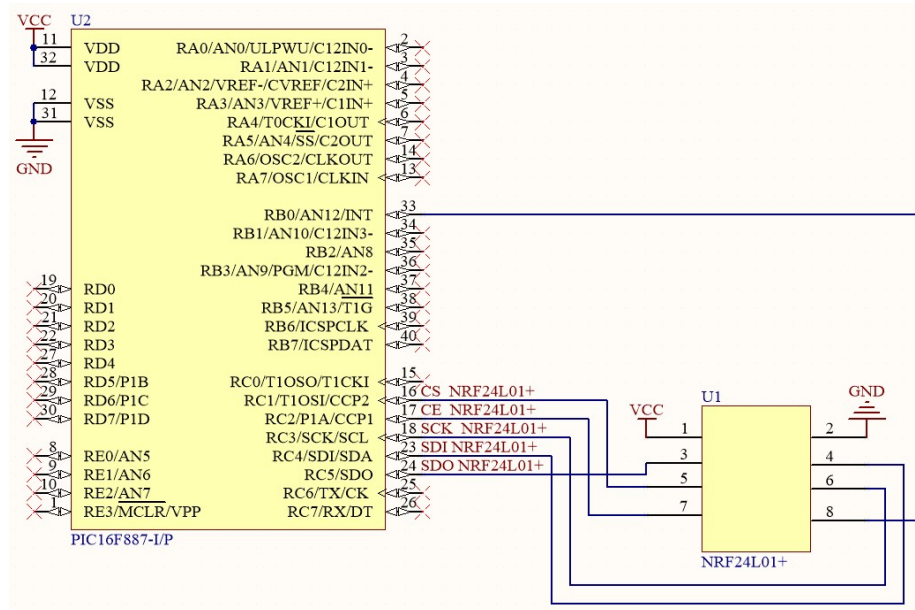


Figura 23: Esquema de conexión NRF24L01+ con PIC16F887

Se conecta el PIC16F887 y el módulo NRF24L01+ según el diagrama en la Figura 23. Ambos componentes están alimentados a una fuente de 3.3 VDC para su correcto funcionamiento y comunicación. Para desarrollar la programación del PIC16F887 se utiliza lenguaje C en el compilador CCS v5 de Texas Instruments. Además, se integra la librería lib-rf2gh4-10.h para el manejo del módulo NRF24L01+, esta librería fue desarrollada por la empresa Bizintek Innova, S. L. [15] [16]. Esta es una librería Open Source programada en lenguaje C, la cual tiene funciones para controlar la comunicación y funcionamiento del módulo NRF24L0+ mediante el SPI de un microcontrolador. Se realizaron ajustes para adaptarla al PIC16F887. Se utilizan de la librería lib-rf2gh4-10.h las funciones de: RF-INT-EN, RF-CONFIG, RF-ON, RF-SEND y RF-RECEIVE.

- RF-INT-EN: Configura como entrada el pin del μC al que está conectado el pin IRQ del NRF24L01+. Además, se coloca en esa pata una interrupción que se activa en flanco

de bajada, transición del nivel alto al bajo.

- **RF-CONFIG:** Se colocan como parámetros de entrada a esta función el canal y la dirección del NRF24L01+. Este módulo maneja 125 diferentes canales y dentro del canal se le asigna una dirección estática, pueden comunicar por el mismo canal 8 módulos NRF24L01+. Para realizar la configuración del canal y dirección esta función usa la comunicación del SPI del μC para enviar una serie de instrucciones consecutivas para cambiar el valor de los registros. Además, habilita otras funciones en el NRF24L01+ como el auto-reconocimiento de paquetes, retransmisión de paquetes, velocidad de transmisión a 1 Mbps y potencia de salida de 0 dBm.
- **RF-ON:** Coloca el módulo NRF24L01+ en modo espera o escucha, para que pueda recibir datos enviados en el canal configurado.
- **RF-SEND:** Esta función toma como parámetros de entrada la dirección del módulo NRF24L01+ al que se va enviar el mensaje y a un vector de ocho casillas en donde se almacenan los datos a enviar, en cada casilla se puede almacenar 1 byte de información. Esta función ejecuta una serie de comandos en el módulo NRF24L01+ para enviar los datos hacia el dispositivo indicado, también nos devuelve un byte que indica el resultado del envío de los datos. Este byte de respuesta tiene el valor 0 si el envío de los datos fue correcto y el módulo NRF24L01+ receptor verificó los paquetes enviados. Si el byte de respuesta que nos devuelve la función contiene el valor 1, significa que el envío fue correcto, pero no hubo respuesta del módulo receptor. El valor del byte de respuesta es 2, si hubo un error por parte del módulo emisor por lo que no se envió el vector de datos.
- **RF-RECEIVE:** Esta función se utiliza cuando se produce una recepción de datos en el módulo NRF24L01+, se encarga de almacenar los datos recibidos en un vector y guardar la dirección del emisor. La función nos devuelve el valor 0 si la recepción es única, 1 si es múltiple y 2 si no ha habido recepción de datos.

8.2.1. Comunicación entre módulo maestro y esclavo

Se desarrolla la programación del PIC16F887 en lenguaje C, incluyendo la librería `lib-rf2gh4-10.h`. Se tiene que configurar en el microcontrolador la comunicación SPI, ya que esta es la forma de comunicación implementada en el módulo NRF24L01+. También se tiene que colocar una interrupción para el pin al que está conectada la pata IRQ del módulo NRF24L01+, debida a que nos indica cuando hay recepción en el módulo, además de tener otras funciones. Otra configuración que se tiene que realizar al inicio es la del canal, que es la banda en que se va a transmitir los datos, hay disponible 125 canales; también se le tiene que dar una dirección ya que en la misma banda se puede comunicar hasta con otros 8 módulos a la vez.

A continuación, se describirá el desarrollo de una prueba de comunicación inalámbrica entre el módulo maestro y el esclavo utilizando los módulos NRF24L01+. La prueba consiste en que al presionar un botón en el módulo maestro envía un mensaje al módulo esclavo, activando al módulo esclavo el cual estaba en modo escucha. Al encenderse el módulo esclavo enciende un LED y para desactivarlo se tiene que presionar un botón, esto provoca que se

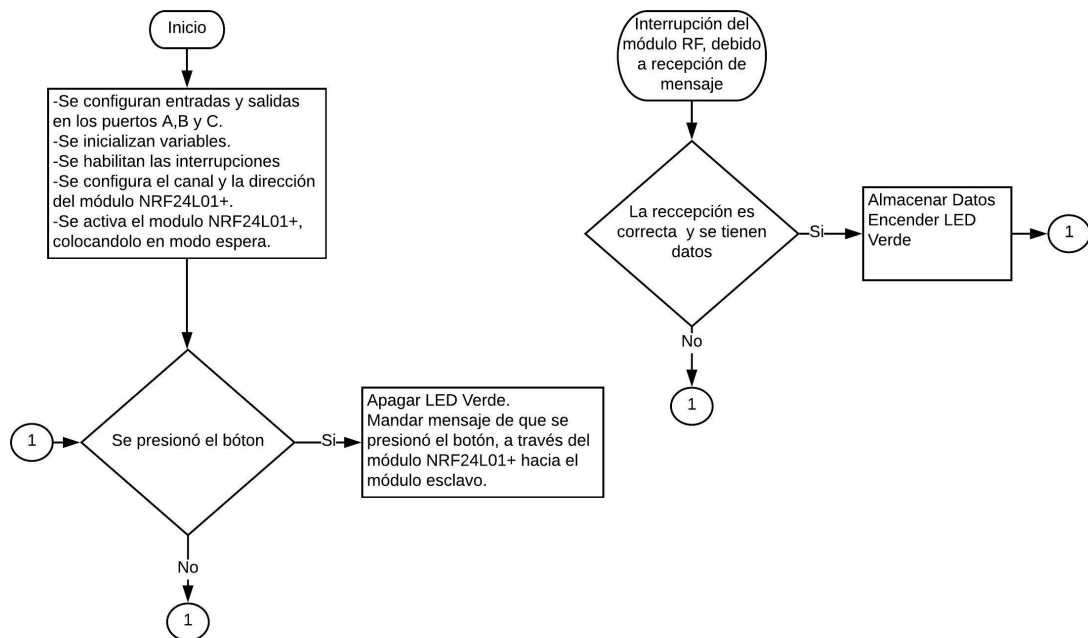


Figura 24: Diagrama de flujo del programa para el módulo maestro

apague el LED y mande un mensaje hacia el módulo maestro. El módulo maestro al recibir este mensaje de desactivación del módulo esclavo enciende un LED.

En la Figura 24 y Figura 25 observamos el programa utilizado para el módulo maestro y esclavo respectivamente. Se utilizó el diagrama de conexión de la Figura 26 en ambos módulos, con un voltaje de alimentación de 3.3 VDC. Se configuró el mismo canal y al módulo maestro se le colocó la dirección número 1 y al esclavo la dirección número 8. Con esta implementación se logró que los módulos fueran capaces de enviar y recibir datos.

Luego se continuaron realizando más pruebas cambiando el canal de comunicación y las direcciones en los módulos. Finalmente se procedió a agregar otro módulo esclavo a la red, agregando otro botón en el módulo maestro para encender el segundo esclavo, se logró controlar ambos módulos esclavos desde el dispositivo maestro ya que cada módulo cuenta con su propia dirección en el canal seleccionado.

Se logró cumplir con el requerimiento de bajo costo y consumo de energía ya que cada módulo solo consume 25 mA cuando está funcionando el módulo NRF24L01+ en conjunto con el microcontrolador. Además, se determinó que los módulos pueden transmitir mensajes a una distancia mayor a 28 metros en campo libre, siendo este un rango de distancias aceptable para su uso en diferentes tipos de canchas de entreno. La cobertura de comunicación es mayor a la indicada, pero se corre el riesgo de pérdida de paquetes además que se disminuye al atravesar obstáculos, como las paredes, decrecen considerablemente el rango de transmisión.

8.2.2. Integración de comunicación inalámbrica junto a los sensores y medición del tiempo de reacción

La programación para el módulo maestro se muestra en la Figura 28. La programación implementa comunicación UART, debido a que el dispositivo maestro tiene que ser controlado desde un computador.

Para controlar a los dispositivos a través de la comunicación UART se desarrolló un protocolo, este consiste en el envío de un carácter o byte, que son de 8 bits, en donde cada bit tiene asignado una función. Los dos bits más significativos nos indican el sensor que vamos a encender, los siguientes cuatro bits nos indican la dirección del módulo esclavo que se va a utilizar, y finalmente los dos bits menos significativos nos indican el color de los LEDs que se van a encender. El cuadro 3 presenta la codificación utilizada en los bits de la instrucción. Cuando el maestro recibe el byte de instrucción este lo almacena y envía el mensaje a través del módulo NRF24L01+, todos los módulos esclavos se encuentran en modo escucha, el módulo esclavo con dicha dirección es el que recibe y almacena el mensaje.

Bits	Descripción
XXXXXX01	Color Verde
XXXXXX10	Color Azul
XXXXXX11	Color Rojo
XX0001XX	Dirección 1
:	:
XX1000XX	Dirección 8
01XXXXXX	Sensor Infrarrojo
10XXXXXX	Sensor Capacitivo

Cuadro 3: Codificación del byte de instrucción para manejar al módulo maestro con comunicación UART.

La Figura 29 nos muestra la programación utilizada en el módulo esclavo. Al encenderse el μC inicializa todas sus configuraciones y asigna un canal y dirección al módulo NRF24L01+. Luego el dispositivo esclavo entra en modo escucha, esperando a que se dé una interrupción, por parte del módulo NRF24L01+ utilizado, al recibir un mensaje desde el módulo maestro. Cuando se produce la interrupción debido a la recepción se almacena los datos recibidos en un vector. Luego el μC decodifica los datos recibidos y enciende el color de los LEDs indicados en el mensaje, luego inicia la toma del tiempo de reacción al cargar el valor correspondiente en el temporizador 1 y finalmente enciende el sensor que se requiere, ya sea el sensor infrarrojo o el capacitivo.

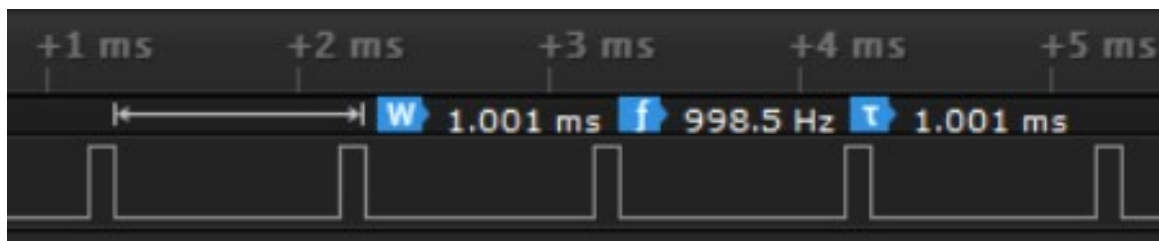


Figura 27: Calibración de temporizador a 1 ms

El tiempo de reacción está calibrado a 1 mS, es por eso que se le carga el valor de 63575 al temporizador 1 del μC , ya que se está usando el oscilador interno de 8 Mhz y se tiene un pre-escalar de 1 a 1. Para ajustarlo a ese valor se creó un programa el cual encendía a los LEDs durante 0.1 μS a cada 1 mS, es decir, se tenía una señal cuadrada con período de 1 mS con 10% de ciclo de trabajo. La Figura 27 nos muestra la señal generada, se observa que el período es de 1.001 mS, por lo que tenemos un error el cual va a provocar que a cada segundo capturado se tenga un 1 mS de más.

Cuando se detecta la respuesta del usuario en el dispositivo esclavo, por parte del sensor que se encuentre activado, el dispositivo procede a apagar los LEDs encendidos y parar la captura del tiempo de reacción, al apagar el temporizador 1. Luego el dispositivo esclavo envía el tiempo de reacción capturado hacia el dispositivo maestro y se coloca en modo escucha, esperando una nueva instrucción del módulo maestro.

El tiempo capturado en el dispositivo esclavo se divide y almacena en cuatro variables, en donde cada variable es del tamaño de un byte. La primera variable guarda las unidades y decenas de milisegundo, los valores almacenados en esta variable van desde 0 hasta 99. La segunda variable almacena las centenas de milisegundos, la tercera nos indica los segundos y la cuarta variable los minutos transcurridos. Para el caso que se tenga un tiempo de reacción de 0 minutos con 1.387 S, el dispositivo esclavo almacena el valor de 87 en la variable 1, la variable 2 almacena el valor 3, el valor de la variable 3 es 1 y la variable 4 guarda el valor 0.

El dispositivo maestro al recibir el tiempo de reacción, lo envía en su puerto USART hacia el computador. De esta forma no se agrega a el tiempo de reacción capturado la latencia de la comunicación inalámbrica, provocada por la separación física entre el módulo esclavo y maestro. El anexo 75 y 76 nos muestra el código fuente implementado para el dispositivo maestro y esclavo respectivamente. El anexo 78 es el link de un repositorio en donde se colocó la librería utilizada para el manejo de los módulos NRF24L01+.

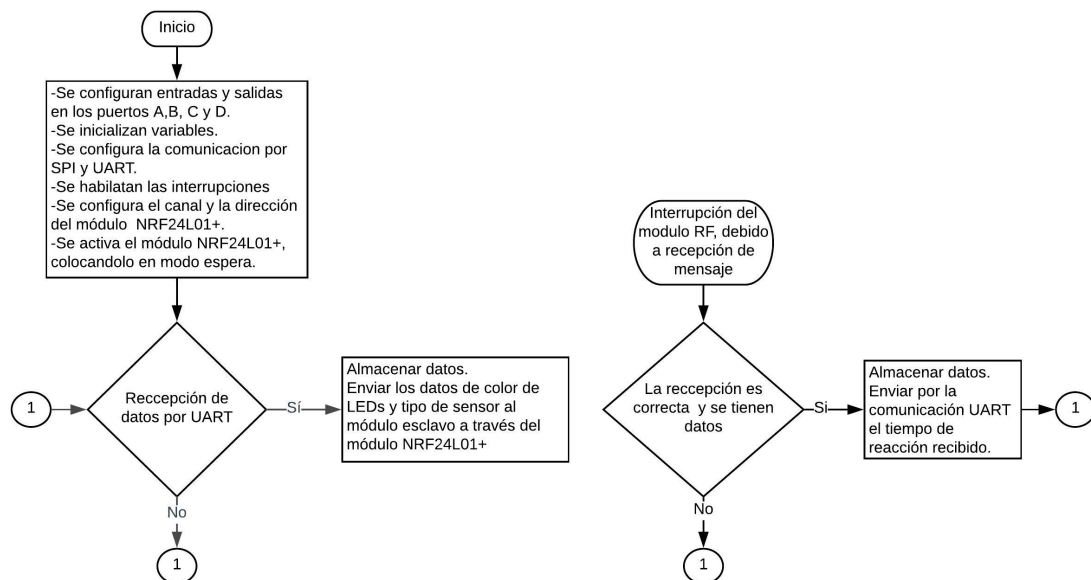


Figura 28: Diagrama de flujo del programa para el módulo maestro

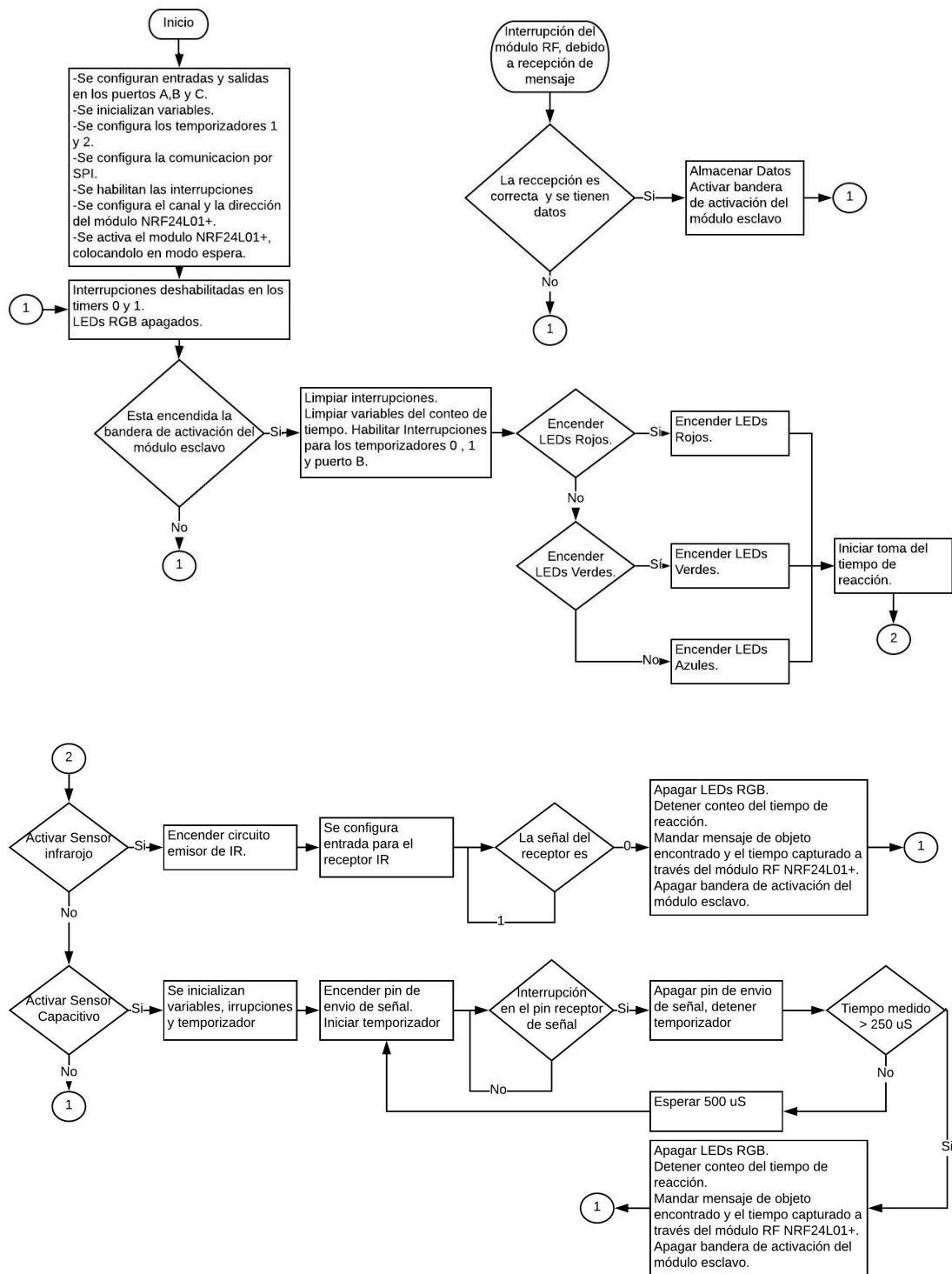


Figura 29: Diagrama de flujo del programa para el módulo esclavo

Módulo electrónico del dispositivo

En el siguiente capítulo se presentarán los esquemáticos utilizados para el desarrollo de la placa electrónica principal del módulo del esclavo y módulo maestro. También se presentará el esquemático para la placa de conexiones de los LEDs RGB utilizados y puerto hembra micro USB 2.0 tipo B. La fuente de alimentación de todos los esquemáticos es de 3.3 VDC, esta proviene del regulador de voltaje LDL1117 que se conecta a la batería utilizada para almacenar la energía eléctrica en los dispositivos.

9.1. Módulo electrónico del dispositivo esclavo.

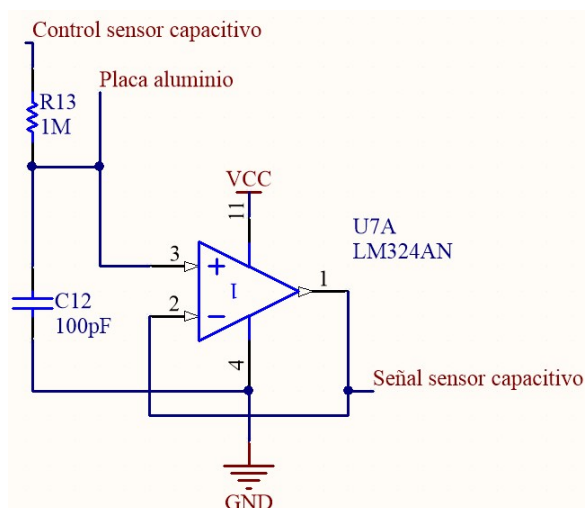


Figura 30: Diagrama de conexión del sensor capacitivo en el dispositivo esclavo

La Figura 30 nos muestra el diagrama de conexión para el sensor capacitivo, en la conexión “Placa Aluminio” se conecta mediante cables una pieza de aluminio circular, según lo indicado en la sección 7.3.2.

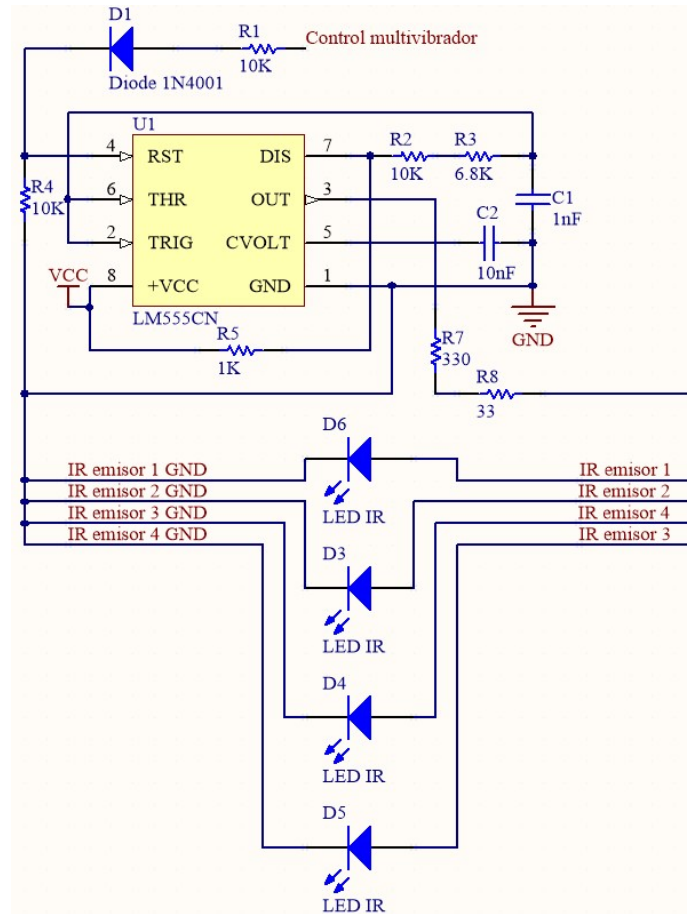


Figura 31: Diagrama de conexión del sensor infrarrojo emisor en el dispositivo esclavo

Los LEDs emisores de infrarrojo se conectan de forma paralela, siendo alimentados por la salida del multivibrador NE555, tal como se indica en la Figura 31. La resistencia R7 y R8 conforman el valor de 360 ohms, alimentando a los LEDs infrarrojo con 1.6 VDC. Se utilizan cuatro sensores infrarrojos para tener una mayor área de detección de objetos en el plano horizontal. En la Figura 32 observamos el circuito para los receptores de infrarrojo TL1838. La corriente consumida para cada caso de funcionamiento del dispositivo se presenta en el Cuadro 4. Se observa que el mayor consumo se tiene cuando se encienden los LEDs verdes y se utilizan los sensores infrarrojos.

	Sensor infrarrojo(mA)	Sensor capacitivo(mA)
LEDs de color rojo	71	56
LEDs de color verde	78	63
LEDs de color azul	78	63

Cuadro 4: Corriente necesaria para el funcionamiento del dispositivo esclavo.

La Figura 33 nos muestra la conexión del PIC16F887, utilizado en el dispositivo esclavo,

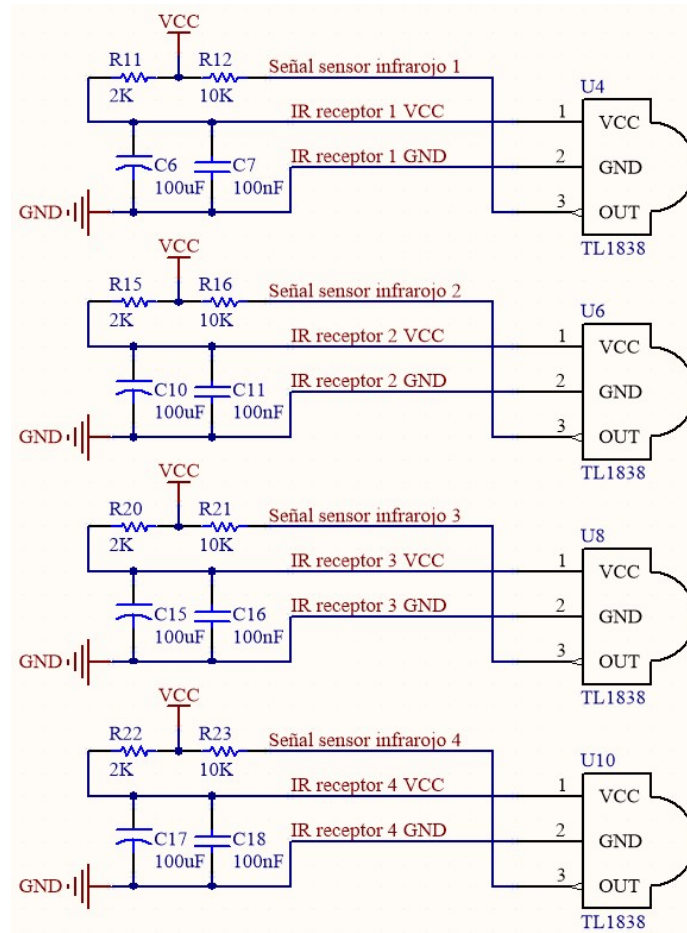


Figura 32: Diagrama de conexión del sensor infrarrojo receptor en el dispositivo esclavo

junto al módulo de comunicación inalámbrica NRF24L01+ y los transistores para el control de los LEDs RGB. Se asignó un nombre a cada conexión que físicamente se realiza por cables hacia la placa de circuito impreso principal (PCB). Como es el caso del módulo NRF24L01+, el cual no está colocado en la placa electrónica y se conecta a esta mediante cables con sus respectivos conectores y terminales. Los LEDs RGB del módulo, son utilizados como la alarma visual para el estímulo, son controlados mediante la activación de los transistores en el esquema de la Figura 33, cada transistor solo activa a un color básico (rojo, verde o azul) en los LEDs RGB.

Para el circuito de alimentación del dispositivo se utiliza un regulador de voltaje LDL1117, este regulador puede convertir una señal lineal de entrada entre 2.5 VDC y 18 VDC a un voltaje fijo de 3.3 VDC y puede entregar una corriente máxima de 1.2 A. Para almacenar la energía se utiliza una batería de litio de 3.7 VDC con capacidad de almacenamiento de 4200 mAh.

El esquemático del circuito de carga de batería y regulación del voltaje de alimentación en el dispositivo se muestra en la Figura 34 y los diagramas para el flujo de la corriente de alimentación del circuito se encuentran en la Figura 35. Para cargar la batería de litio se utiliza el circuito integrado MCP73831, este integrado carga la batería de litio a una

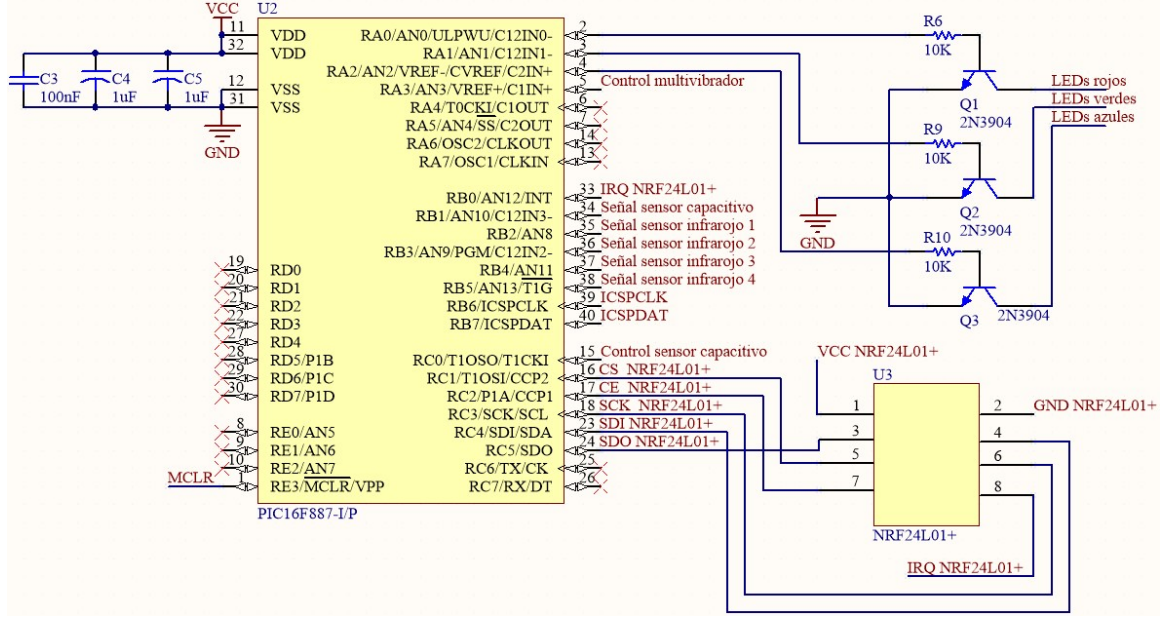


Figura 33: Diagrama de conexión del microcontrolador, LEDs RGB y módulo NRF24L01+ en el dispositivo esclavo

corriente de 500 mA y a un voltaje de 4.2 VDC. El LED rojo en el pin STAT del MCP73831 se enciende cuando la batería está cargándose y el verde se enciende cuando la batería se encuentra completamente cargada. En el puerto micro USB 2.0 tipo B del dispositivo esclavo se conecta una fuente de alimentación externa de 5 VDC. Al conectar esta fuente de alimentación externa el circuito integrado MCP73831 se activa y comienza a cargar la batería interna del dispositivo con la energía eléctrica proveniente de la fuente externa. Se colocó un diodo Shottcky B130LAW y un transistor MOSFET DMP1045U canal P, para que el dispositivo esclavo pueda utilizarse mientras se está cargando la batería. El circuito se obtuvo de un manual de Microchip [17].

Cuando no hay una fuente de alimentación conectada en el puerto USB el transistor MOSFET conecta la batería al resto del circuito, permitiendo que la corriente fluya desde su pin surtidor hacia su pin drenaje, en donde se encuentra todo el resto del circuito. El transistor MOSFET, cuando no hay alimentación, tiene un voltaje en el pin compuerta de 0 V (V_G), por la resistencia de 100 Kohms conectada a tierra, y en el surtidor (V_G) tiene el voltaje de la batería (V_{bat}), Figura 34.

La ecuación 1 se utiliza para calcular el voltaje entre el pin compuerta y surtidor (V_{GS}), el resultado de la ecuación es el voltaje que tiene la batería. El transistor MOSFET utilizado necesita que V_{GS} sea más negativo que -1 VDC para que se active [18], y debido a que se tiene un voltaje más negativo que este, el transistor se encuentra activado cuando no hay alimentación en el puerto USB.

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0V - V_{bat} = -V_{bat} \quad (1)$$

Para el caso en el que se conecta una fuente de alimentación externa en el puerto USB,

el transistor MOSFET permanece apagado, este tiene en su pin compuerta el voltaje de entrada ($V_{entrada}$) y en su pin surtidor el voltaje de la batería. Se utiliza la ecuación [2] para obtener el voltaje entre el pin compuerta y el pin surtidor (V_{GS}) para el peor caso posible. Se analiza el peor escenario posible porque no se quiere que el transistor se active cuando esté conectada la fuente de alimentación externa en el puerto USB, si se llegará a activar el transistor MOSFET la batería seguiría alimentando al resto del circuito, con lo que nunca podría cargarse en su totalidad. El peor de los casos sucede cuando el voltaje de entrada es de 4.75 VDC, que es el voltaje mínimo que nos puede dar un puerto USB 2.0 según su estándar, y se tiene un voltaje en la batería de 4.2 VDC, que es el voltaje máximo que se tiene en la batería cuando está completamente cargada. También se considera en la ecuación [2] el voltaje entre el pin drenaje y el pin surtidor provocado por la conducción del diodo interno del transistor MOSFET, este voltaje es de 0.6 VDC según especificaciones del fabricante [18]. Se obtiene un voltaje de V_{GS} de 1.15 VDC con lo cual el transistor MOSFET se encuentra apagado, desacoplando la batería del resto del circuito.

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_{entrada-min} - [V_{bat-max} - V_{SD}] = 4.75V - (4.2V - 0.6V) = 1.15V \quad (2)$$

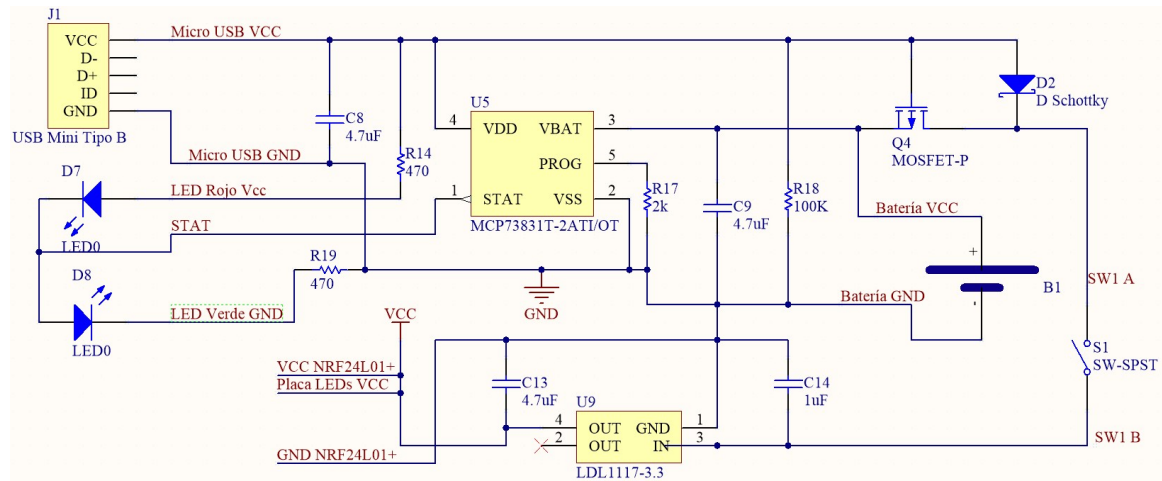


Figura 34: Diagrama de conexión para el circuito de carga de batería y regulación del voltaje de alimentación en el dispositivo esclavo

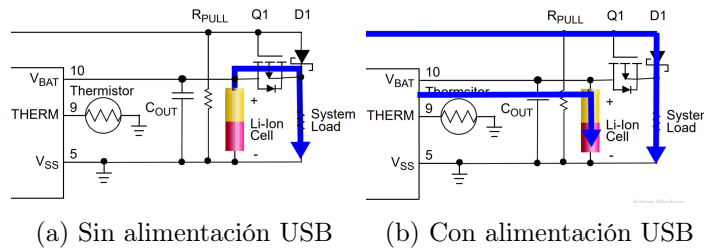


Figura 35: Flujo de la corriente al conectar una fuente de alimentación en el puerto micro USB 2.0 del dispositivo esclavo. [17]

Cuando se conecta la alimentación en el puerto USB el transistor MOSFET se apaga, desacoplando la batería del resto del circuito, para que la batería pueda cargarse completamente de forma más rápida. Debido a que se quiere que el dispositivo esclavo funcione

cuando se este cargando la batería, se coloca un diodo Shottky, Figura 34, que se activa y permite que fluya la corriente del puerto USB hacia el resto del dispositivo, como se indica en la Figura 35b. Cuando se conecta el puerto USB se activa el diodo ya que la diferencia entre las terminales del diodo Shottky es mayor a 0.37 VDC, que es su voltaje de diodo (V_f) [19]. Para este diodo Shottky se tiene una corriente de fuga o de escape de 0.15 mA a 4.2 VDC, esta corriente de fuga es absorbida por la batería, lo que provoca que se disminuya la vida útil de la batería.

La Figura 37 muestra la placa principal del dispositivo esclavo, todas las conexiones en las que necesitaban colocar cables de elementos que no van directamente sobre la placa, se colocan conectores. Adicionalmente se diseñó una para el puerto micro USB 2.0 tipo B que utiliza para cargar el dispositivo esclavo, el diagrama de conexiones se presenta en la Figura 39 y la placa del circuito impreso en la Figura 40. Debido a la gran cantidad de conexiones por cable para manejar los doce LEDs RGB se diseñó cuatro placas de circuito impreso impreso, en cada placa se conectan tres LEDs RGB. El diagrama de conexión lo observamos en la Figura 36 y la placa del circuito impreso en la Figura 38.

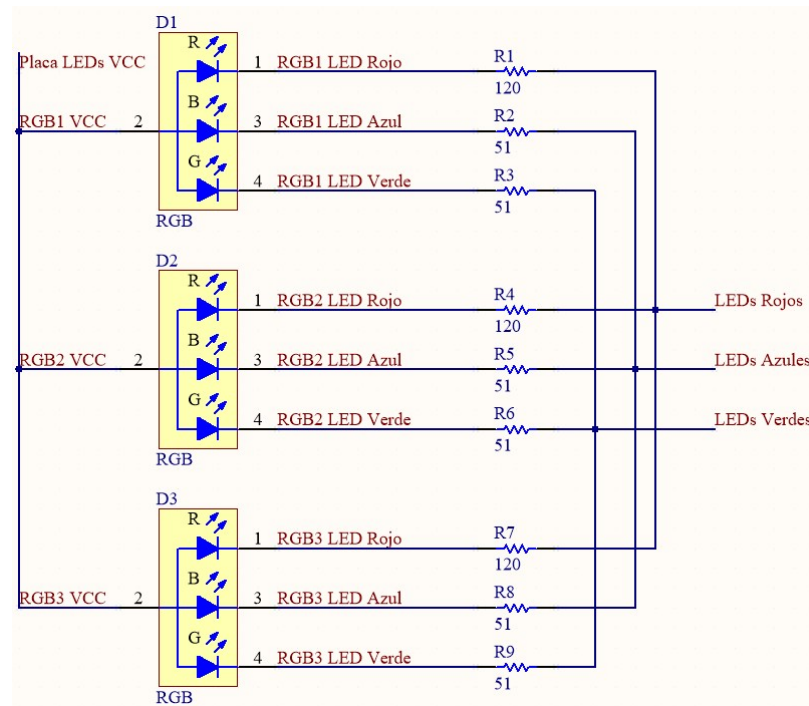


Figura 36: Diagrama de conexión de los LEDs RGB en el dispositivo esclavo

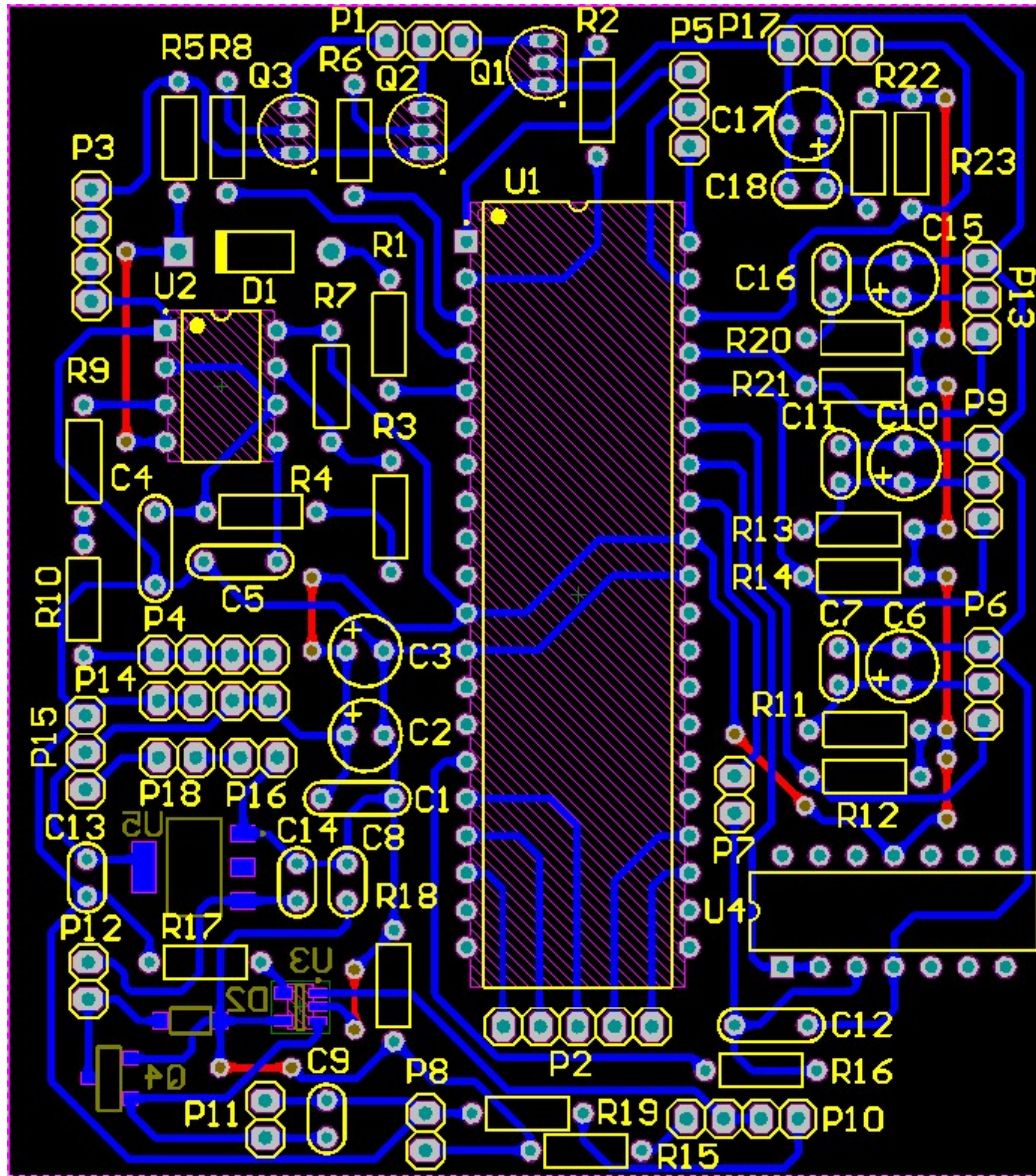


Figura 37: Placa impresa del circuito principal del dispositivo esclavo

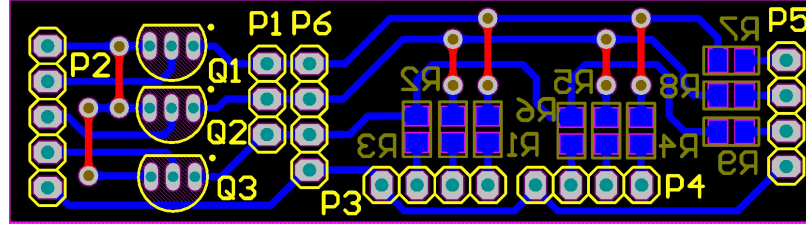


Figura 38: Placa del circuito impreso para los LEDs RGB en el dispositivo esclavo

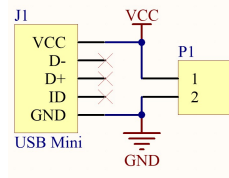


Figura 39: Diagrama de conexión del puerto micro USB tipo B para carga en el dispositivo esclavo

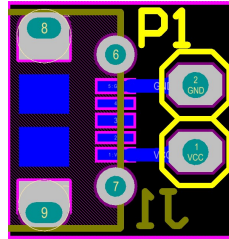


Figura 40: Placa del circuito impreso del puerto micro USB tipo B para carga del dispositivo esclavo

El anexo [71](#) y [72](#) nos muestra el diagrama de conexiones utilizado para crear la placa de circuito impreso del módulo esclavo, incluyendo las terminales para las conexiones por cable a elementos externos de la placa. El anexo [62](#) y [63](#) nos muestra la implementación de la placa impresa del circuito principal del dispositivo esclavo.

El anexo [73](#) nos muestra el diagrama de conexiones para el PCB del circuito de conexiones LED y en el anexo [64](#) se muestra la placa obtenida. El anexo [74](#) muestra el diagrama de conexiones para el PCB del circuito para el puerto micro USB 2.0 tipo B y el anexo [61](#) se muestra el PCB implementado.

9.2. Módulo electrónico del dispositivo maestro.

La Figura [41](#) nos muestra el diagrama de conexiones utilizado para desarrollar la placa impresa del circuito principal del dispositivo maestro que se presenta en la Figura [42](#). La fuente de alimentación en los esquemáticos para el módulo maestro es de 3.3 VDC y proviene del regulador LDL1117 integrado, el cual se alimenta con la batería interna del dispositivo. En el dispositivo maestro se necesita un PIC16F887 y un módulo NRF24L01+ para la comunicación inalámbrica, según la programación desarrollada en la sección [8.2.2](#) se necesita colocar conectores en los pines para la comunicación SPI. Se colocó un LED para indicar cuando esté encendido el dispositivo maestro. En la placa impresa a todas las conexiones por cable, se colocó el espacio para conectores.

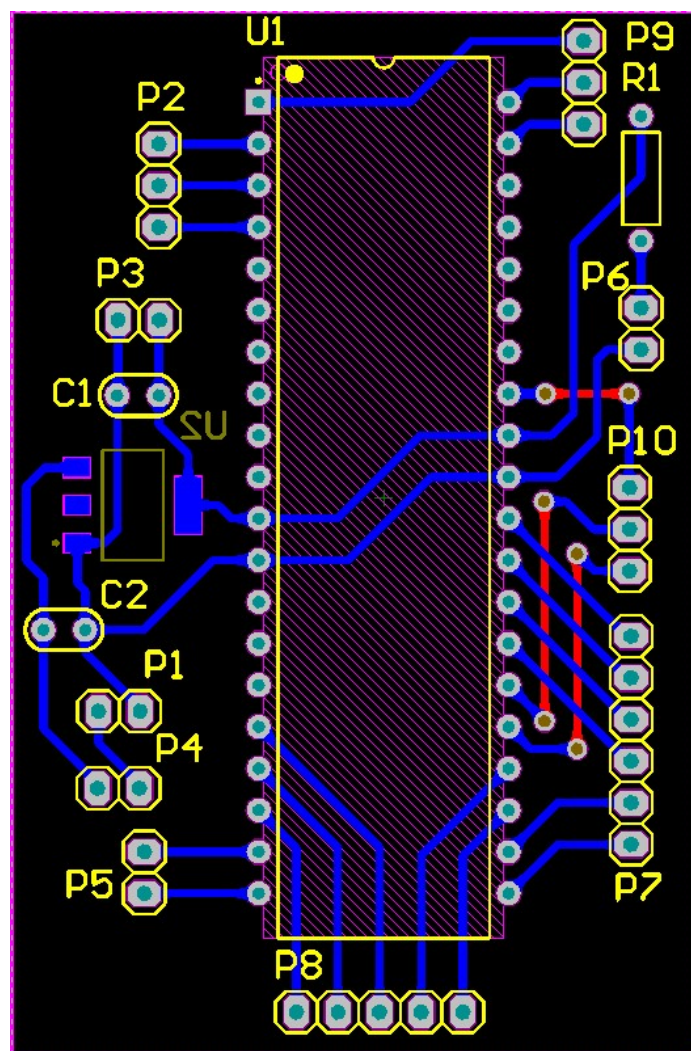


Figura 42: Placa impresa del circuito principal del dispositivo maestro

Diseñar el encapsulado del dispositivo para que pueda resistir salpicaduras de agua, sudor e impactos.

Para el diseño del encapsulado del dispositivo se utilizó el software Inventor 2017. Se crearon todos los modelos y luego se juntaron en un archivo de ensamblaje. Mediante restricciones espaciales se logró colocar cada elemento dentro del encapsulado esclavo y luego se modificó el archivo del encapsulado para que los pudiera contener en el lugar especificado.

10.1. Modelos de los elementos utilizados en el dispositivo esclavo

Los modelos de cada objeto están hechos con medidas tomadas con un vernier de cada elemento real que se va a utilizar en el dispositivo esclavo. Los modelos utilizados se presenta en la Figura 43, Figura 44, Figura 45 y Figura 46.

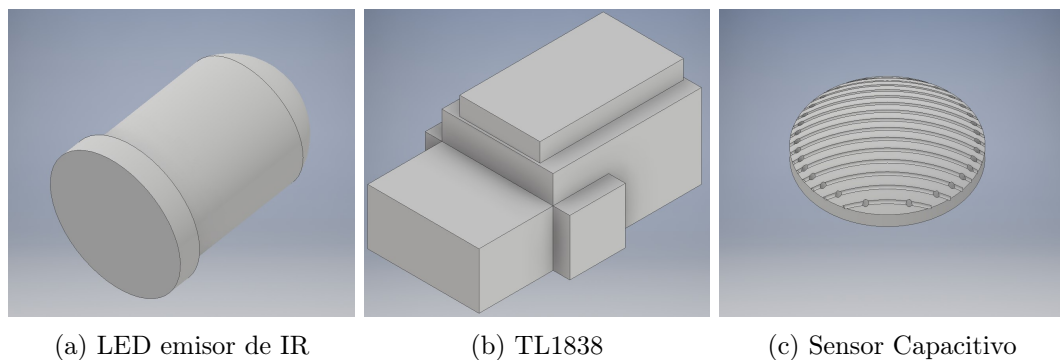
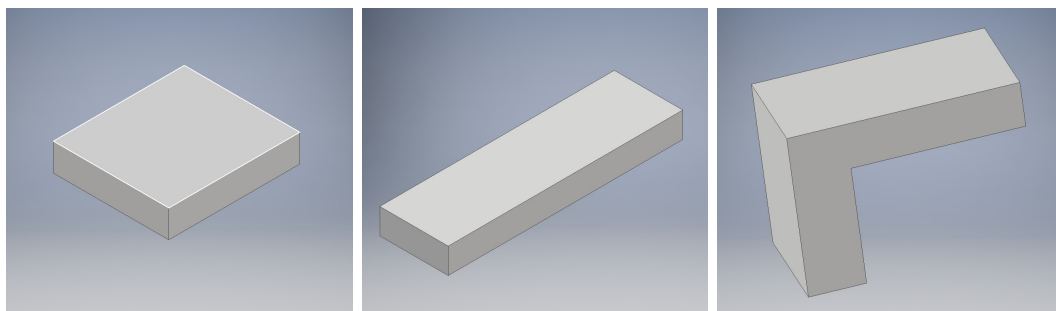
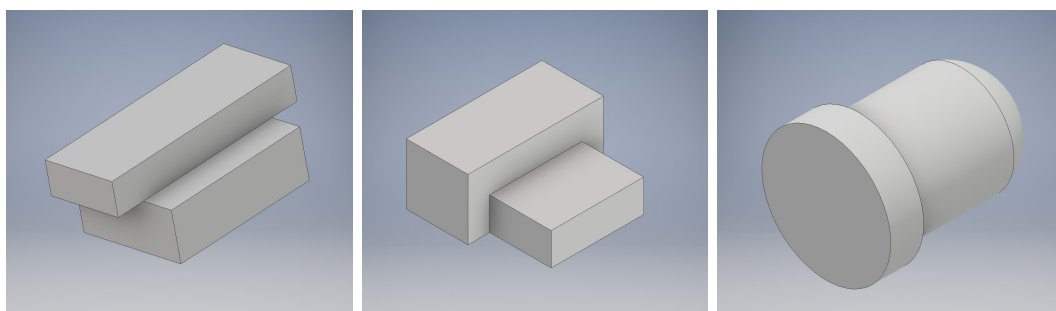


Figura 43: Modelos utilizados para el LED emisor de IR, receptor de IR TL1838 y sensor capacitivo



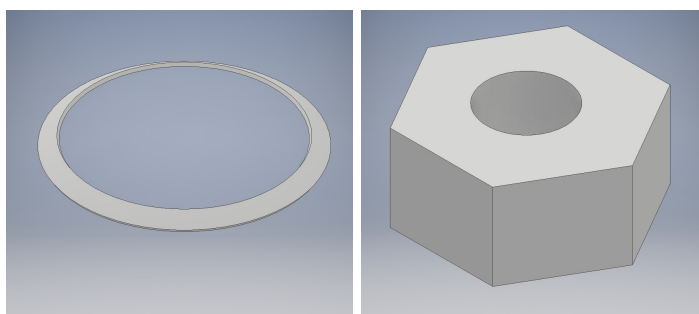
(a) Placa electrónica principal (b) Placa de LEDs RGB (c) Módulo NRF24L01+.

Figura 44: Modelos utilizados para la placa electrónica principal, placa de LEDs RGB y módulo NRF24L01+.



(a) Interruptor (b) Puerto Micro USB tipo B (c) LED de 3 mm

Figura 45: Modelos utilizados para el interruptor, puerto Micro USB tipo B y LED de 3 mm.



(a) Ventana de LEDs RGB (b) Tuerca

Figura 46: Modelos utilizados para la ventana para los LEDs RGB y tuerca.

La Figura 45b muestra un modelo simplificado del puerto hembra micro USB tipo B, en este se incluye el espacio para la placa que se necesita para conectarlo a la placa principal, ya que este puerto se coloca en el borde exterior del disco. La Figura 43c nos muestra el modelo para el sensor capacitivo sin los cables que se colocan sobre este, según lo descrito en la sección 7.3.2.

10.2. Encapsulado del dispositivo esclavo

Para obtener el encapsulado del dispositivo esclavo primero se generó un disco con las dimensiones y forma deseada, este modelo se muestra en la Figura 47. Luego se procedió a juntar todos los modelos de los elementos internos que se utilizan en el dispositivo esclavo en un archivo de ensamblaje. Este nos permite colocar una pieza como referencia, para colocar y restringir de forma espacial todos los elementos en el ensamblaje.

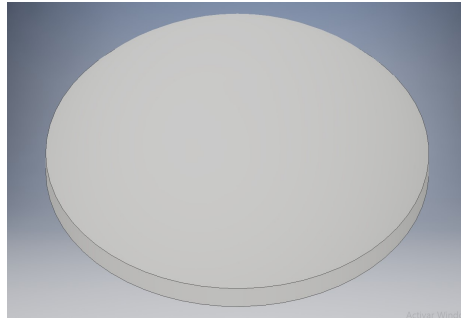


Figura 47: Modelo utilizado para la encapsulado

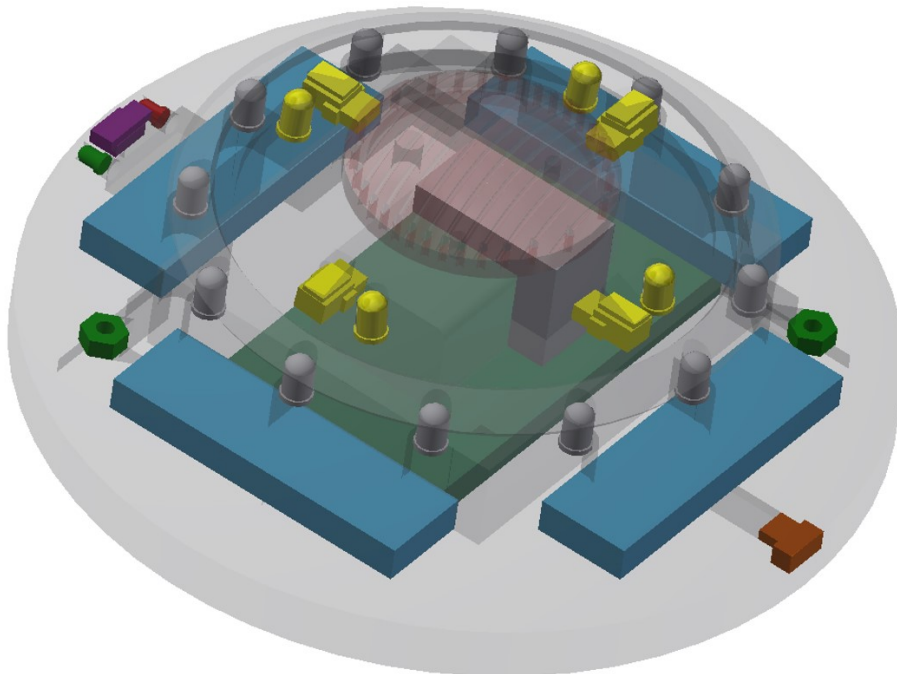


Figura 48: Modelo del ensamblaje del dispositivo esclavo

La Figura 48 nos muestra al ensamblaje del dispositivo esclavo. Para fines de visualización espacial se coloca en transparente el modelo del encapsulado y se le asigna un color a cada elemento. En color rojo suave observamos al sensor capacitivo, este se colocó en la parte superior del disco, abajo de este, en color gris, observamos la posición del módulo NRF24L01+. Se le asignó el color amarillo a los elementos para el sensor infrarrojo, que son los cuatro LEDs emisores de infrarrojo y cuatro receptores de infrarrojo TL1838, estos elementos se colocan a -5 y 5 grados respecto al plano vertical, según lo descrito en la

sección 7.2.3. En color celeste observamos la placa que se encarga de manejar a los grupos de LEDs RGB. En color gris observamos a los LEDs RGB y sobre estos se coloca una ventana transparente para proteger a los LEDs. En morado observamos al puerto micro USB tipo B y a la par de este los LEDs de 3 mm que se utilizan para indicar el estado de carga de la batería. En naranja observamos al interruptor que se utiliza para encender y apagar el dispositivo. La batería tiene un color verde claro y esta se coloca en la parte de abajo del dispositivo. La placa electrónica principal se coloca en el centro del dispositivo. Finalmente, en color verde oscuro observamos a las tuercas que se necesitan para sostener la tapadera del dispositivo.

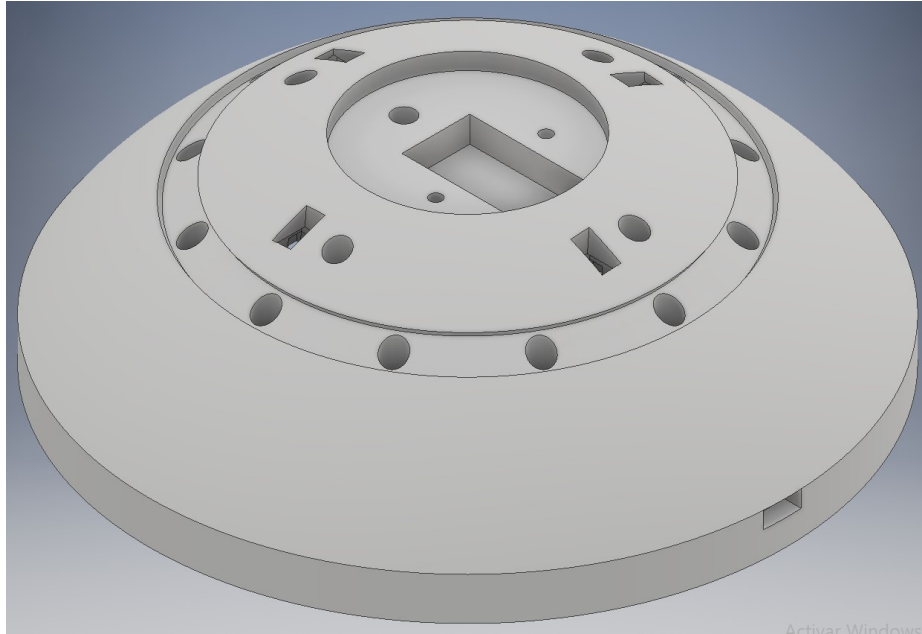


Figura 49: Modelo del encapsulado del dispositivo esclavo

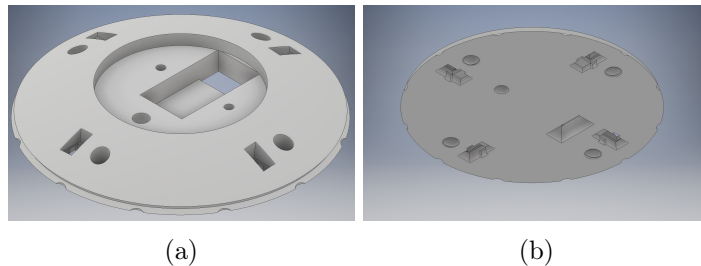


Figura 50: Modelo del encapsulado del dispositivo esclavo parte superior

El encapsulado final obtenido se presenta en la Figura 49. Para una mejor visualización del encapsulado se dividió en tres secciones, la Figura 50 nos muestra la sección superior, esta contiene las cavidades para los sensores infrarrojos, sensor capacitivo y el módulo NRF24L01+. La Figura 51 nos muestra la sección media del encapsulado, esta contiene las cavidades para las placas de circuitería electrónica y para los LEDs RGB. La sección inferior del dispositivo esclavo la observamos en la Figura 52, en esta se colocan el interruptor, tapadera y el puerto hembra micro USB tipo B. El anexo 68 y 69 nos muestra los planos con las dimensiones para el encapsulado del dispositivo esclavo.

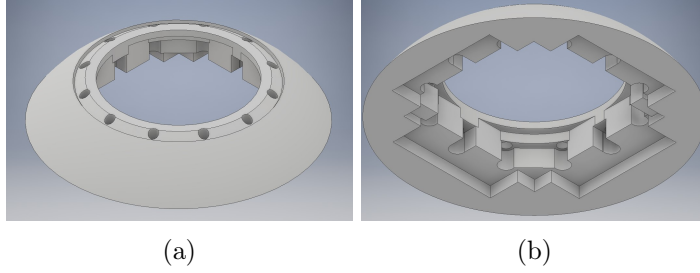


Figura 51: Modelo del encapsulado del dispositivo esclavo parte intermedia

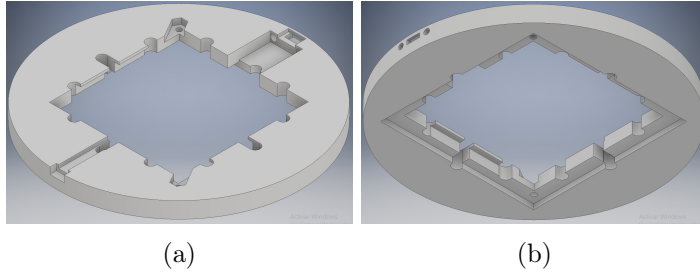


Figura 52: Modelo del encapsulado del dispositivo esclavo parte inferior

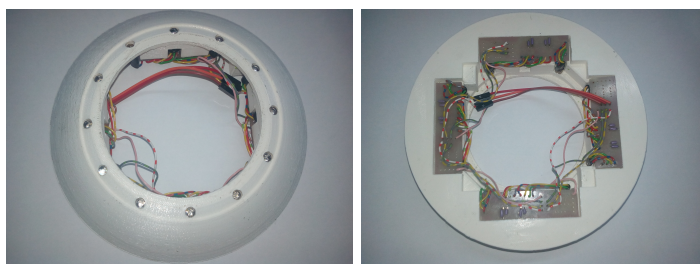
10.3. Encapsulado prototipo del dispositivo esclavo con Impresión 3D

Se construye el prototipo de encapsulado del dispositivo esclavo con impresión 3D con PLA. Se decide dividir en tres secciones el encapsulado para minimizar errores en la impresión. La Figura 53 muestra la sección superior, esta se imprimió con 0.15 de altura de capa, 2 mm de espesor de pared y 60 % de relleno.

El anexo 67 presenta el encapsulado del dispositivo esclavo incluyendo la pieza que se utiliza como contacto metálico para el sensor capacitivo.



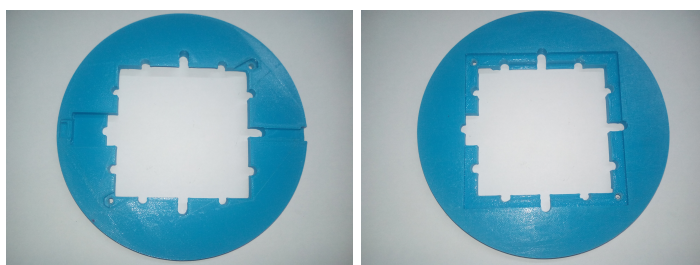
Figura 53: Encapsulado del dispositivo esclavo parte superior y tapadera



(a)

(b)

Figura 54: Encapsulado del dispositivo esclavo parte intermedia



(a)

(b)

Figura 55: Encapsulado del dispositivo esclavo parte inferior

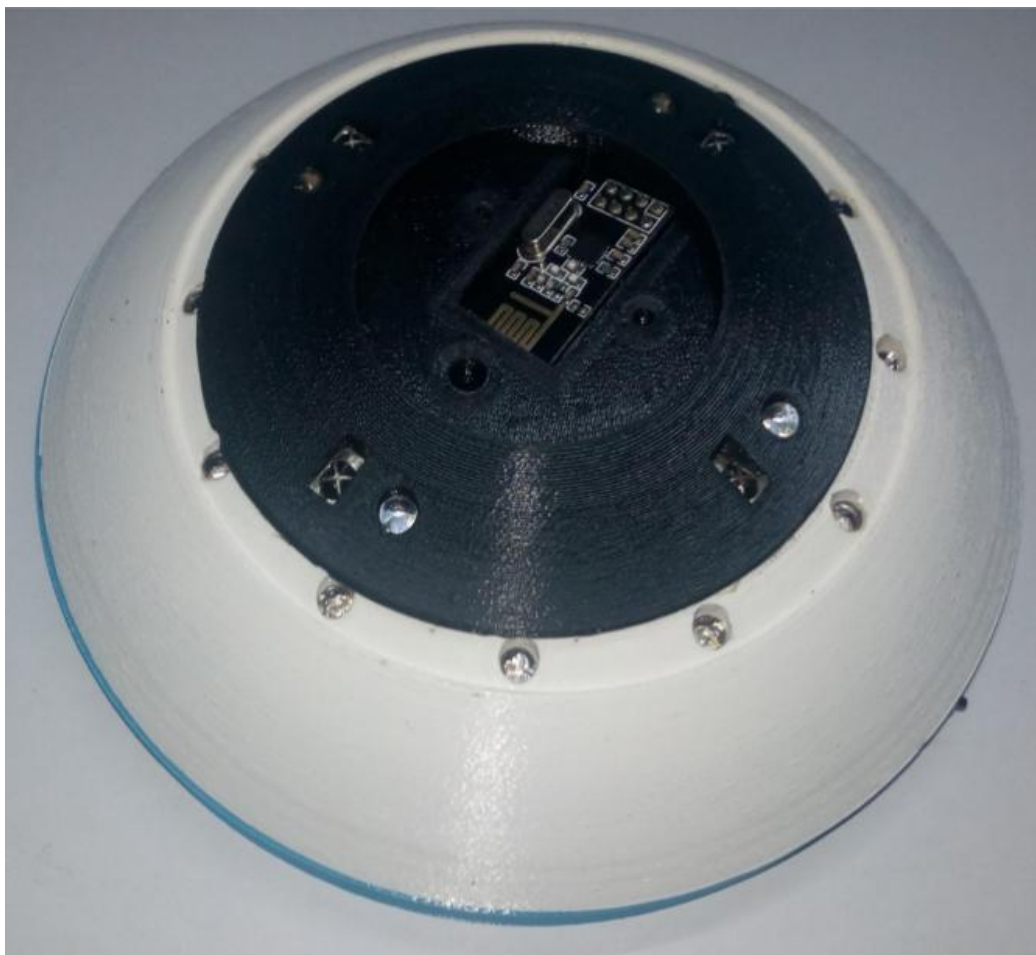


Figura 56: Ensamblaje del dispositivo esclavo

10.4. Impermeabilidad al agua en impresión 3D

Para la resistencia al agua se realizaron pruebas con impresiones en 3D, siendo este un proceso de fabricación aditivo el cual la pieza se forma colocando material en finas capas. Se puede configurar el grosor de pared, altura de la capa, porcentaje de llenado entre paredes, etc. Se realizaron pruebas en la impresora Ultimaker 3D con PLA, en la Figura 57 siguiente vemos a una caja con un espesor de pared de 2 milímetros, utilizando 20 % de relleno y 0.06 de espesor de capa. En esta se colocó agua por 6 horas y se observó que su nivel no cambio, pero después de un día el nivel era ligeramente inferior.

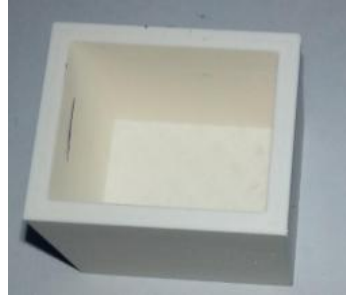


Figura 57: Prueba de impermeabilidad con impresión 3D utilizando PLA

10.5. Análisis de esfuerzos del encapsulado del dispositivo esclavo

Se utilizó el análisis de elementos finitos incluido en el software Inventor, para determinar la sección en la que se encuentra la mayor concentración de esfuerzos. Esta es la sección en donde se presenta la mayor deformación y posible falla estructural. Para realizar el análisis de elementos finitos se ingreso las propiedades mecánicas del material Ultimaker 3 PLA [20], este es el material que se utilizó para la fabricación del encapsulado del dispositivo esclavo. Se colocó un fuerza de 1 KN sobre la estructura y se observó que la sección crítica que encuentra en la parte superior del encapsulado del dispositivo esclavo. Esta sección al aplicarle dicha fuerza presenta un esfuerzo de tensión de Von Mises máximo de 20.09 MPa y un factor de seguridad mínimo de 2.29.

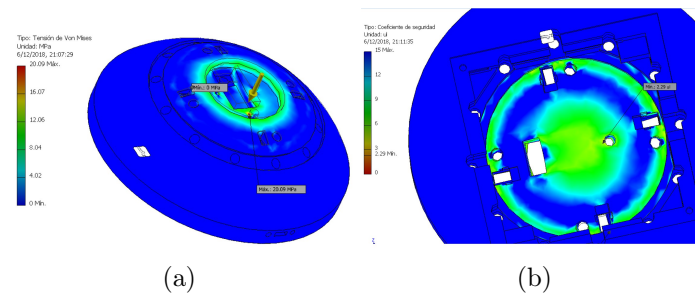


Figura 58: Análisis de elementos finitos del dispositivo esclavo

1. Se encontró que los sensores infrarrojos colocados en configuración de detección por rebote pueden detectar una gran cantidad de objetos y movimientos, pero presentan un funcionamiento erróneo al estar directamente bajo la luz del Sol, ya que este también emite luz infrarroja. Los sensores desarrollados pueden detectar un 100 % de los movimientos generados con las extremidades del cuerpo en un ambiente bajo techo o con una intensidad de luz solar leve.
2. Se observó que el sensor capacitivo implementado puede detectar la presencia de la piel de la extremidad del cuerpo humano antes que exista el contacto con la pieza metálica. El tiempo de carga del circuito aumenta al doble, como mínimo, cuando se está tocando la pieza metálica con la palma de la mano.
3. Se encontró que las piezas de imprimidas en 3D utilizando PLA con una altura de capa de 0.06 mm, relleno del 20 % y un grosor de pared de 2 mm son capaces de contener agua por algunos días. La densidad de estas estructuras dificulta que sean atravesadas por luz infrarroja.
4. Se logró capturar tiempos de reacción en la escala de milisegundos en el dispositivo esclavo. El tiempo es mandado hacia el dispositivo maestro a través de un módulo de radiofrecuencia y este, a su vez, lo trasmite a un computador que controla la red de dispositivo por medio de comunicación USART.
5. Se determinó que el consumo máximo de corriente del dispositivo es de 78 mA, se presenta este consumo cuando se activa el sensor infrarrojo en conjunto con el color verde en los LEDs RGB.

CAPÍTULO 12

Recomendaciones

1. Para la implementación del sensor infrarrojo, se recomienda utilizar otro tipo de receptor, ya que el TL1838 es afectado por la luz directa del Sol, aunque su fabricante indica que solo se activa cuando recibe una señal infrarroja a 38 KHz. Se puede basarse en el mismo principio de funcionamiento, implementando un filtro pasa banda, con una frecuencia de corte que anule las frecuencias de infrarrojo emitidas por el Sol.
2. Realizar las placas de circuito impreso con componentes de superficie (SMD), reemplazando a los componentes de agujeros pasados (THT). Esto permitirá diseñar un encapsulado más compacto que el actual.
3. Colocar sellos O-Rings estándar en todos los agujeros para LED, esto mejorará la resistencia al agua en el encapsulado, haciéndolo casi impermeable.

- [1] J. Búcaro, “Módulo: Aparato Inalámbrico Emisor de Luz Tipo RGB para Medir Tiempo de Reacción”, Tesis de mtría., Universidad del Valle de Guatemala, dic. de 2017.
- [2] F. CORP, *Speed and Agility Training System For Athletes*. dirección: <https://www.fitlighttraining.com/>.
- [3] M. McComb, *Capacitive mTouch™ Sensing Solutions*, 2008. dirección: http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/DeviceDoc/en542979.pdf.
- [4] J. Pérez, *El tiempo de reacción específico visual en deportes de combate*, 2014. dirección: https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/661009/robles_perez_josejuan.pdf?sequence=1.
- [5] M. T. Inc, *mTouch™ Sensing Solution User’s Guide*, 2008. dirección: http://www.microchip.com/stellent/groups/picmicro_sg/documents/devicedoc/en534865.pdf.
- [6] M. T. Inc, *Touch and Input Sensing Solutions*, 2013. dirección: <https://www.semitron.de/wp-content/uploads/2015/10/Touch-and-Input-Sensing-Solutions.pdf>.
- [7] M. T. Inc, *Capacitive mTouch™ Sensing Solutions: Design Guidelines*, 2008. dirección: http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/DeviceDoc/en542979.pdf.
- [8] *IR Receiver Modules for Remote Control Systems, TL1838 Hoja de Datos*, [Revisado Sept. 2018], Vishay, abr. de 2018.
- [9] *Single chip 2.4GHz Transceiver, NRF24L01+ Hoja de datos, NRF24L01+*, [Revisado Sept. 2018], Nordic Semiconductor, mar. de 2008.
- [10] M. Cottleer y J. Joyce, “3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth”, *Deloitte Review*, vol. 14, págs. 5-19, 2014.
- [11] Stratasys, *Selective Laser Sintering (SLS) | Powder Bed Fusion | Stratasys Direct*. dirección: <https://www.stratasysdirect.com/technologies/selective-laser-sintering>.

- [12] A. Bournias, *HP MJF vs. SLS: A 3D Printing Technology Comparison*. dirección: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison>.
- [13] M. Ahart, *3D Printing: How to Choose the Right Technology for Your Design*, 2018. dirección: <https://www.protolabs.com/resources/blog/3d-printing-how-to-choose-the-right-technology-for-your-design/>.
- [14] *ESP8266EX*, *Hoja de Datos*, ESP8266EX, [Revisado Sept. 2018], ESPRESSIF, sep. de 2018.
- [15] *mOway Beginner Manual*, [Revisado Sept. 2018], Bizintek Innova, S.L., mar. de 2011. dirección: https://www.smartschoolsystems.com/downloads/Moway_Beginners_Manual.pdf.
- [16] M. Vera, “Programación de microbots mOway para la realización de tareas cooperativas mediante comunicación por RF”, Tesis de mtría., Miguel Herádez de Elche, sep. de 2009. dirección: http://coolab.umh.es/moway_web/PFC_MCarmenVera/PFC_Mari_Carmen_Vera.pdf.
- [17] *Designing A Li-Ion Battery Charger and Load Sharing System With Microchip’s Stand-Alone Li-Ion Battery Charge Management Controller, AN1149 Hoja de Datos*, AN1149, [Revisado Sept. 2018], Microchip, mayo de 2008.
- [18] *P-channel enhancement mode MOSFET, DMP1045 Hoja de Datos*, DMP1045U, [Revisado Sept. 2018], Diodes Incorporated, mar. de 2018.
- [19] *1.0A surface mount schottky barrier rectifier, B130LAW Hoja de Datos*, B130LAW, [Revisado Sept. 2018], Microchip, mar. de 2017.
- [20] *HP 3D High Reusability, PA 12 Hoja de datos*, PA 12, [Revisado Sept. 2018], Hewlett Packard, jun. de 2017.

14.1. Circuitos de prueba, placas PCB y encapsulados para los dispositivos

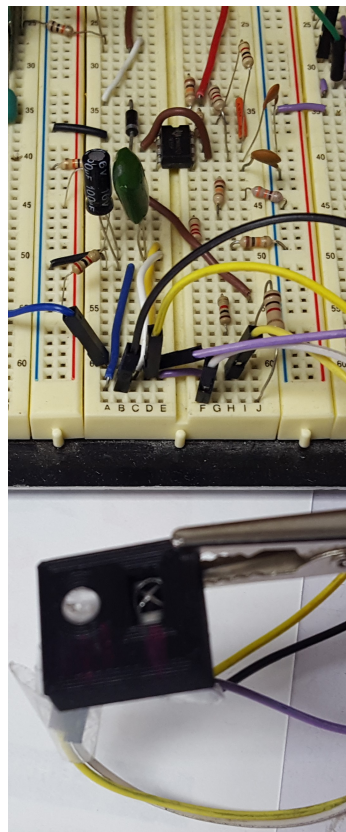


Figura 59: Circuito prueba para la implementación del módulo del sensor infrarrojo

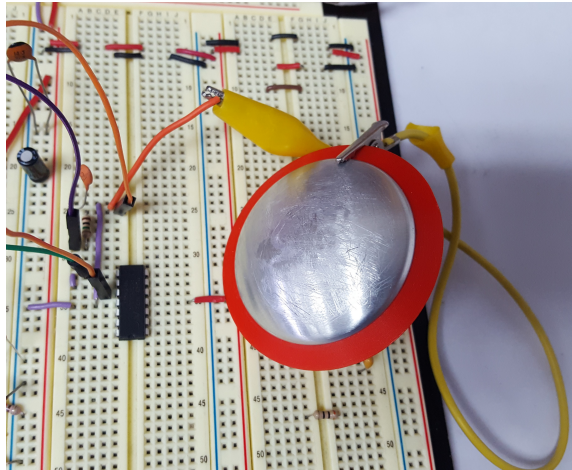


Figura 60: Circuito prueba para la implementación del módulo del sensor capacitivo

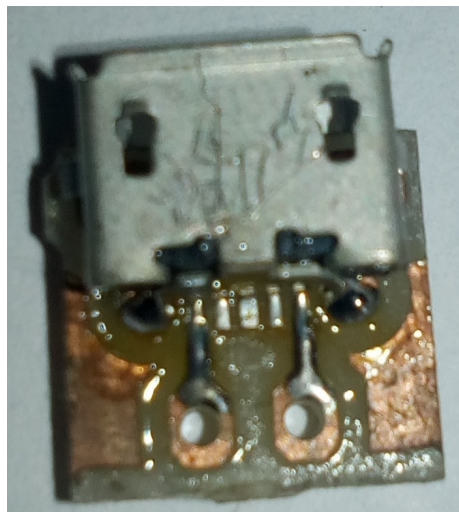


Figura 61: Placa de circuito impreso del puerto micro USB 2.0 tipo B

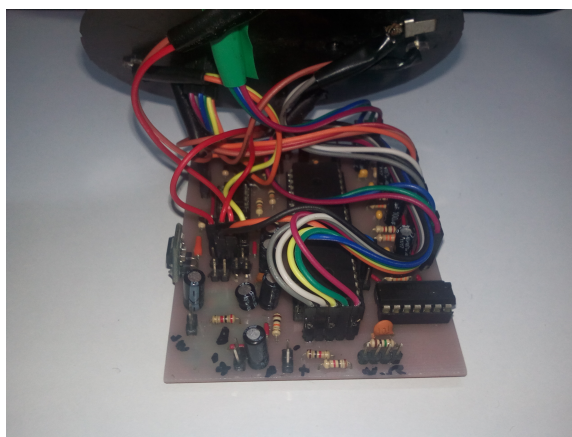


Figura 62: Implementación de la placa impresa del circuito principal del dispositivo esclavo



Figura 63: Vista inferior de la placa impresa del circuito principal del dispositivo esclavo

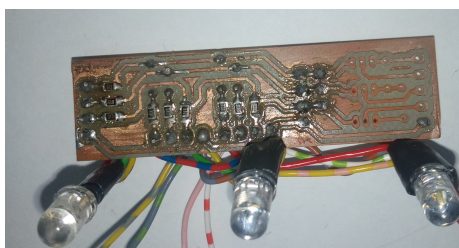
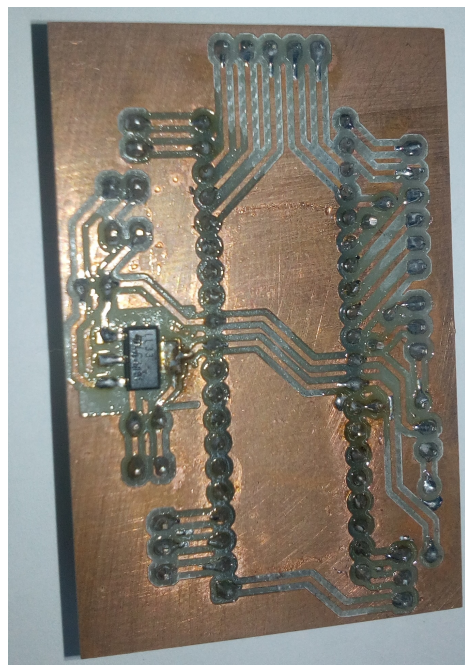


Figura 64: Placa de circuito impreso para las conexiones de los LEDs RGB



(a) Vista inferior



(b) Vista superior

Figura 65: Placa impresa del circuito principal del dispositivo maestro

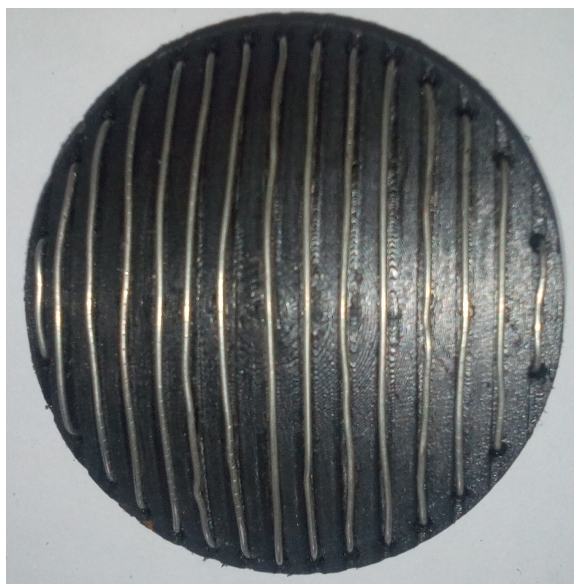


Figura 66: Contacto metálico para el sensor capacitivo

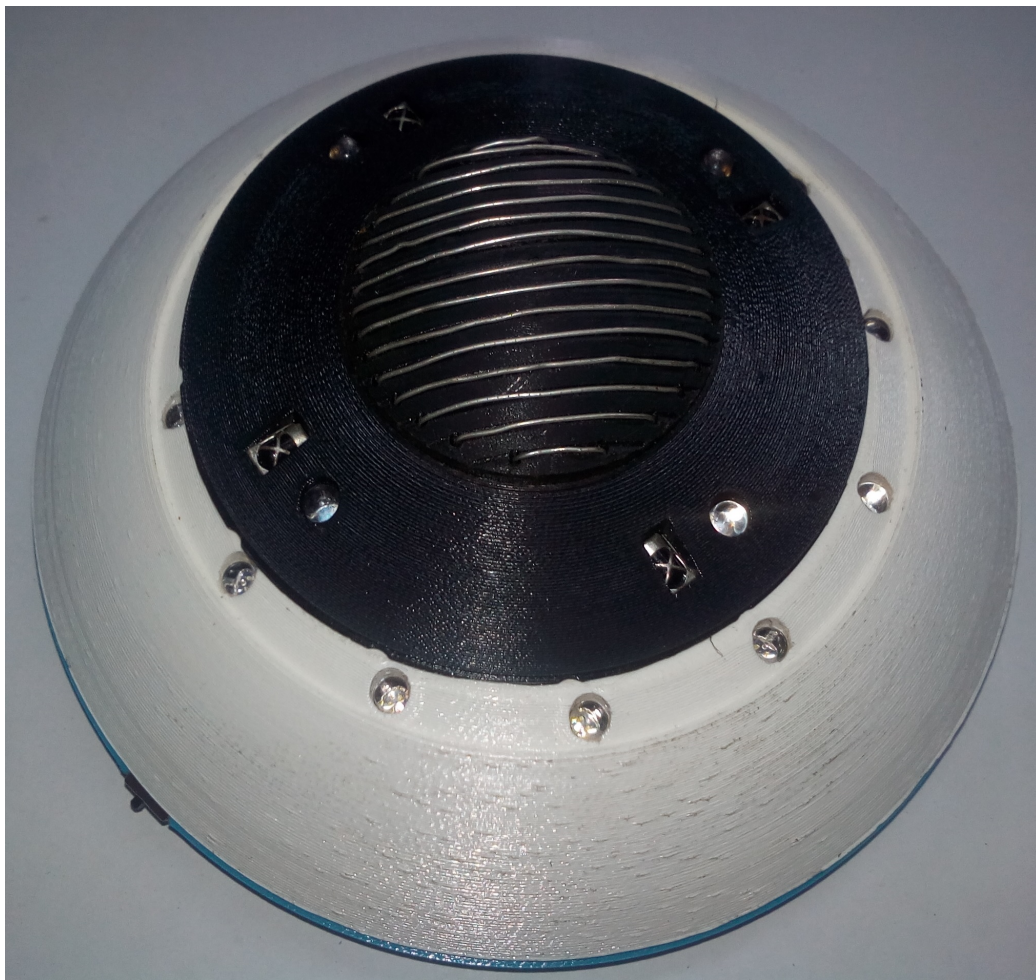
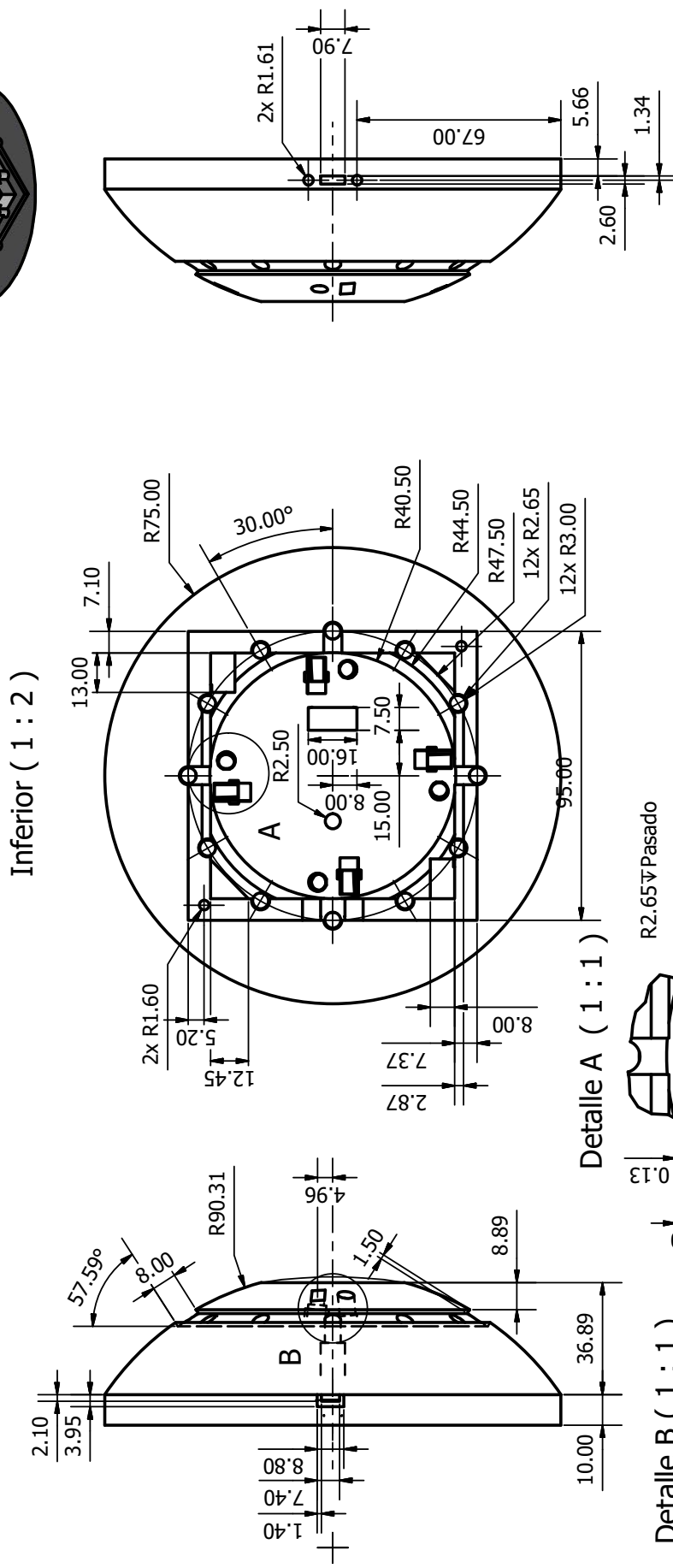


Figura 67: Encapsulado del dispositivo esclavo

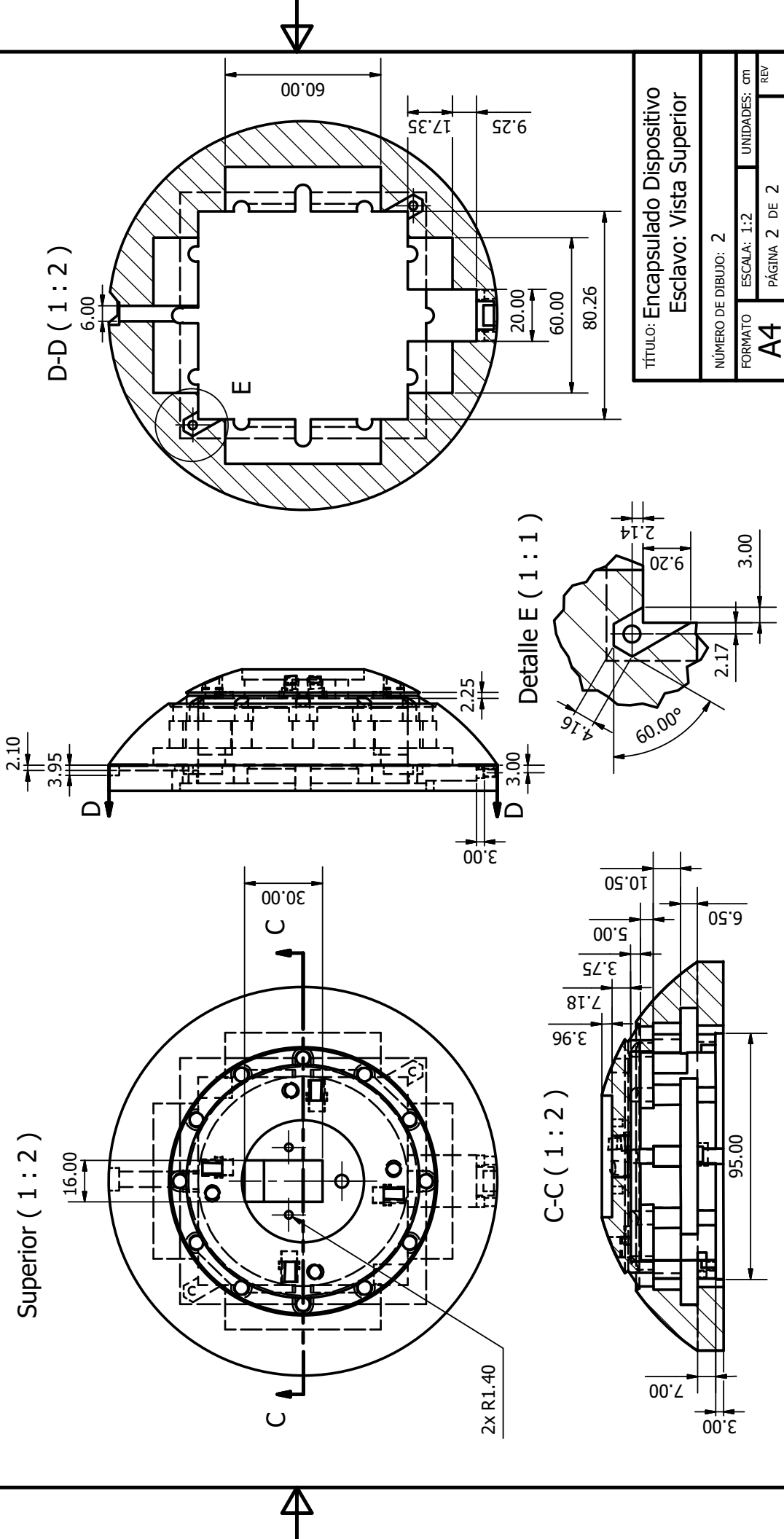
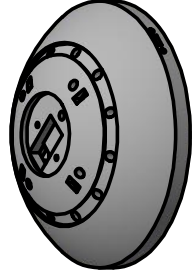
14.2. Planos del encapsulado y diagramas de conexión para el dispositivo maestro y esclavo

Figura 68:



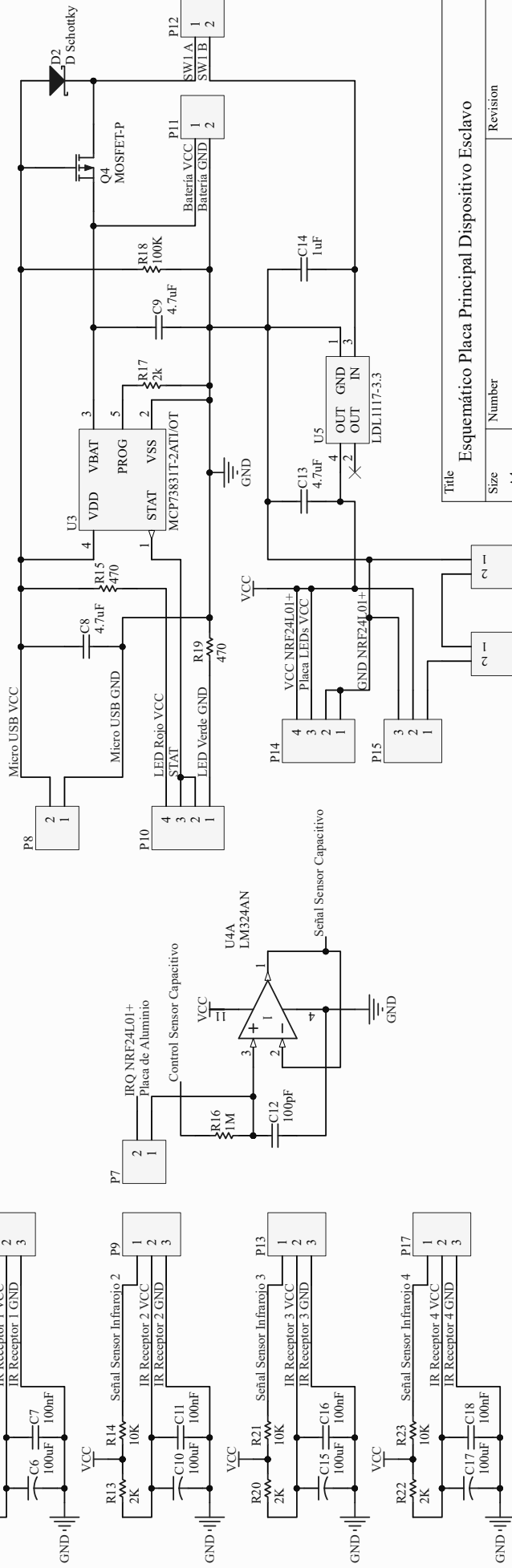
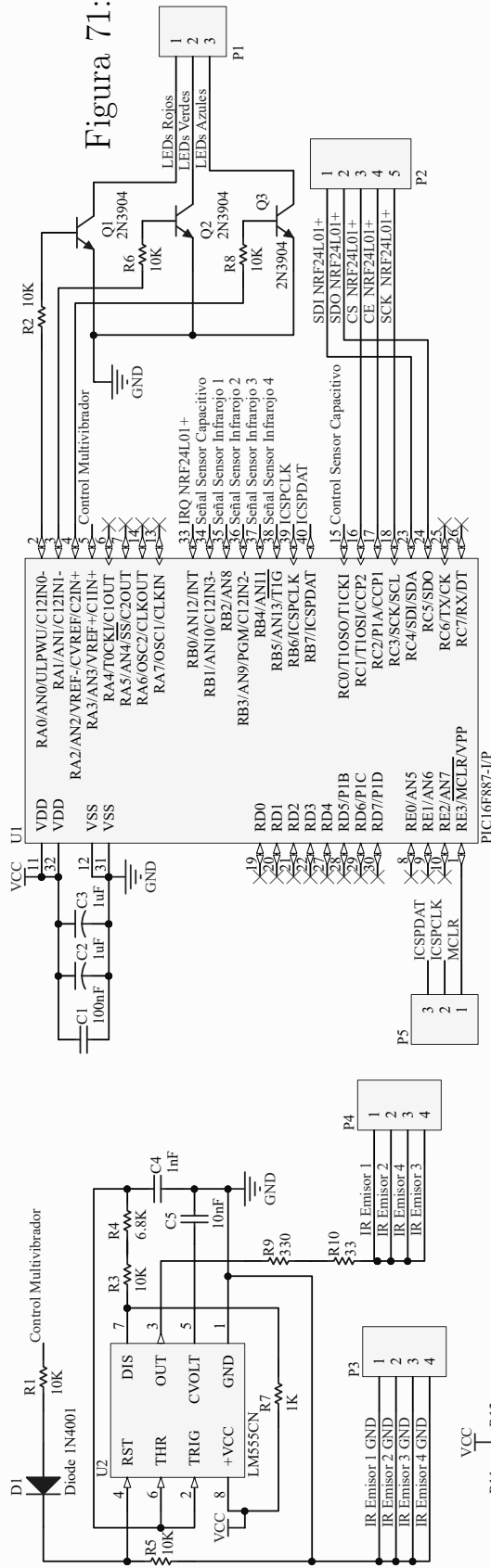
 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt		DIBUJADO POR José Corona FECHA 30/09/2018		DISEÑADO POR José Corona FECHA 30/09/2018		REVISADO POR FECHA		APROBADO POR FECHA		NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Disp. Tiempo de Reacción.		NÚMERO DE DIBUJO: 1		TÍTULO: Encapsulado Dispositivo Esclavo: Vista Inferior		FORMATO A4		ESCALA: 1:2		UNIDADES: mm		PÁGINA 1 DE 2		REV	
TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y 14.5 - 2009.		TOLERANCIAS GENERALES LINEAL X ± .5 XX ± .05 XXX ±		ANGULAR ±		FRACCIONES ±		RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓		MATERIAL Genérico		TRATAMIENTO		MASA: N/D		ÁNGULO DE PROYECCIÓN		DISP. TIEMPO DE REACCIÓN		REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.		PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.		REVISIÓN	

Figura 69:



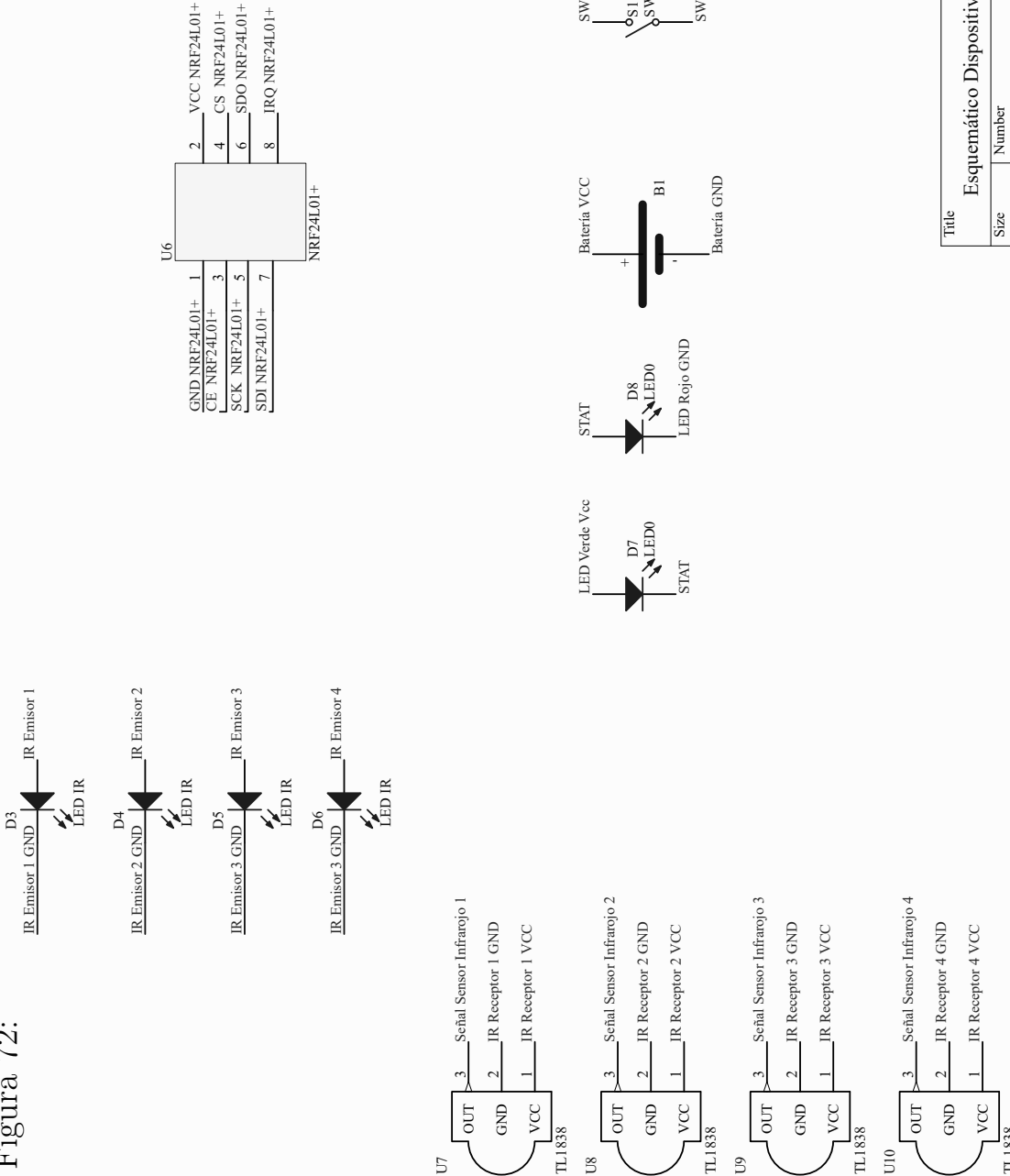
1

1



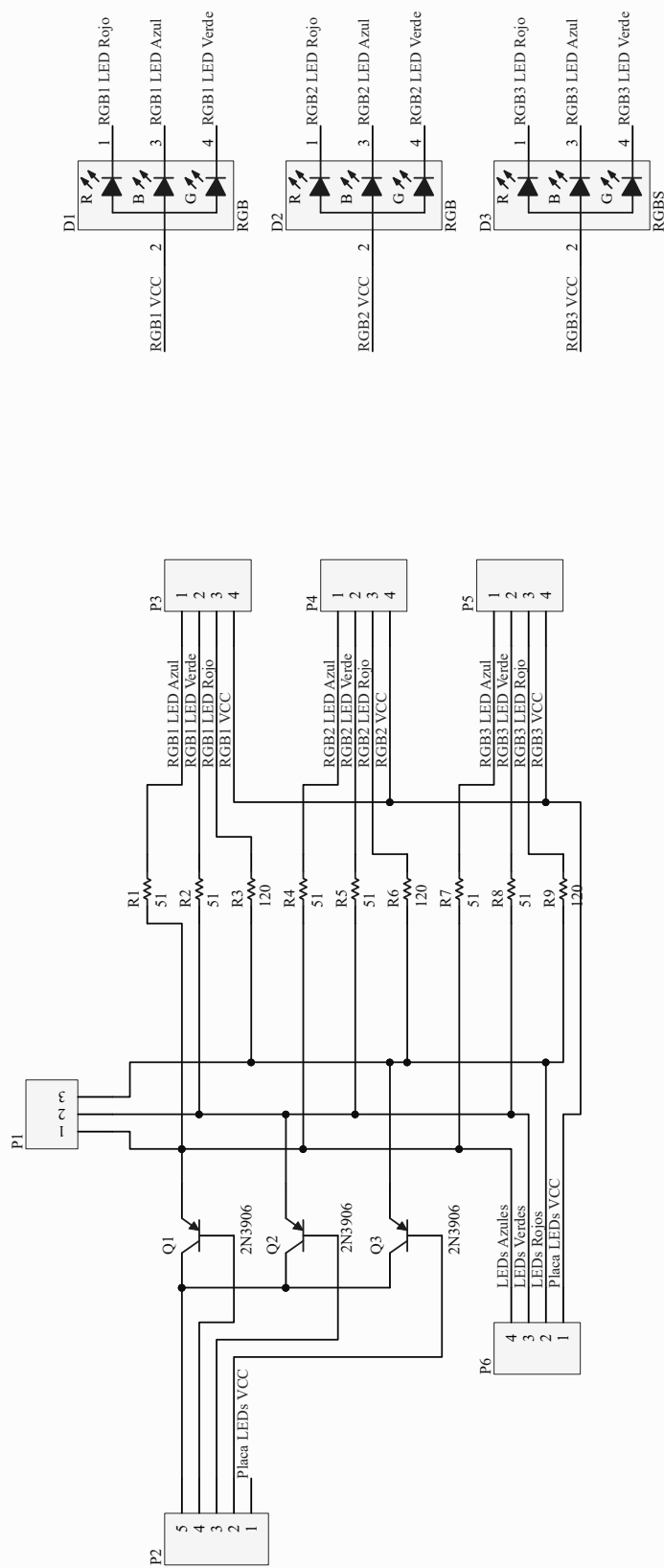
Esquemático Placa Principal Dispositivo Esclavo		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	30/09/2018	Sheet 1 of 2
File:	E:\Jose\Sheet1.SchDoc	Drawn By: José Corona

Figura 72:



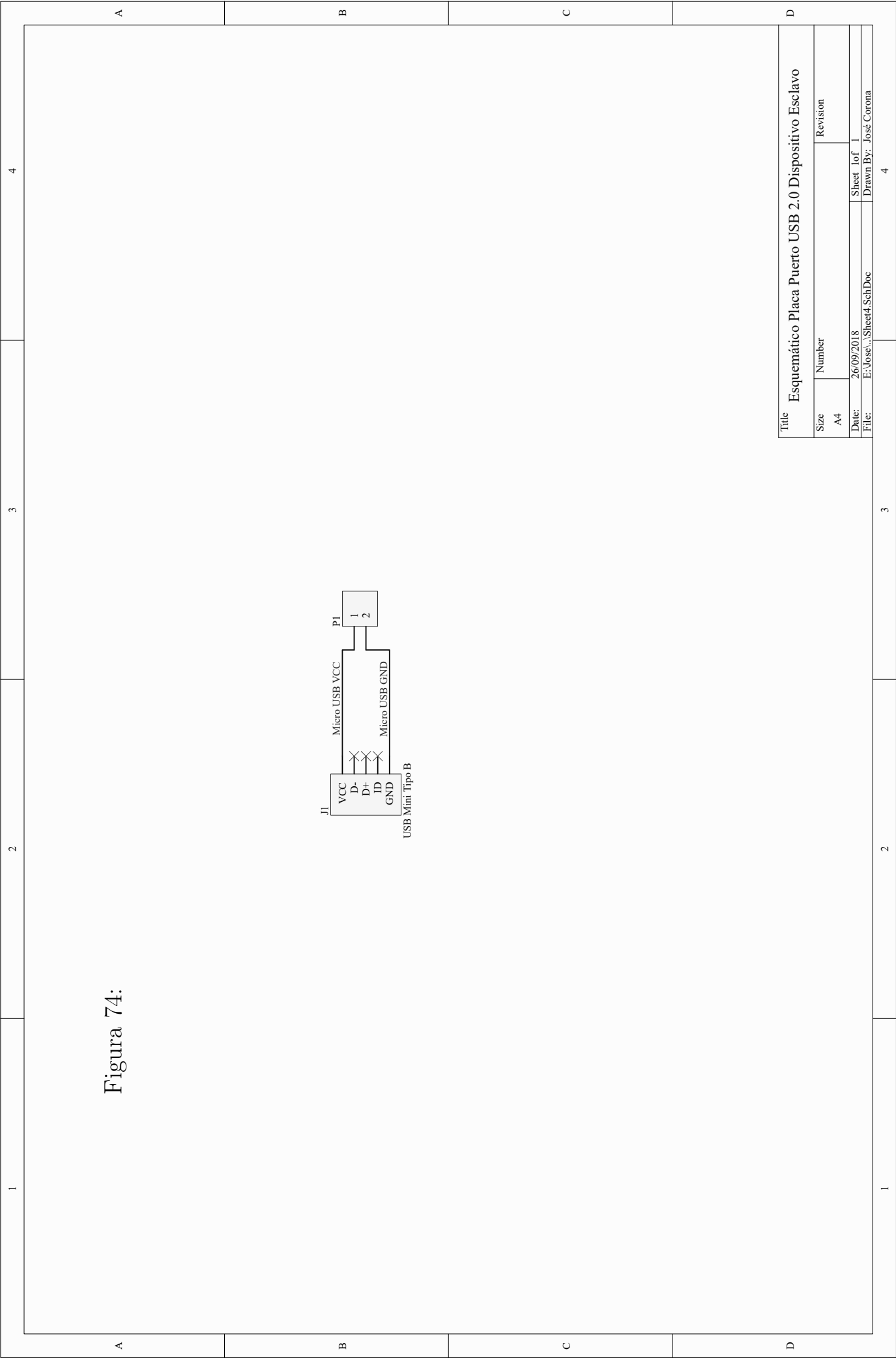
Esquemático Dispositivo Esclavo		
Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	30/09/2018	Sheet 2of 2
File:	E:\Jose\...\Sheet1.2.SchDoc	Drawn By: José Corona

Figura 73:



Esquemático Placa LEDs RGB Dispositivo Esclavo

Size	Number	Revision
A4		
Date:	30/09/2018	Sheet 1 of 1
File:	E:\Jose\...\Sheet2.SchDoc	Drawn By: José Corona



14.3. Códigos fuente para el dispositivo maestro y esclavo

Figura 75: Programación desarrollada en CCS C Compiler para el dispositivo maestro

```
#include <16F887.h>
#FUSES NOWDT, XT, PUT, NOPROTECT, NODEBUG, NOBROWNOUT, NOLVP, NOCPD, NOWRT
#use delay(clock=8000000)
#use rs232(baud=1200,xmit=pin_C6,rcv=pin_C7,parity=N,bits=8)
#include "lib_rf2gh4_10.h"

#byte porta=0x05
#byte portb=0x06
#byte portc=0x07
#byte portd=0x08
static int8      dato;
static int8      dato1;
#int_ext
void int_ext_isr(void)
{
    int8 ret1;
    ret1 = RF_RECEIVE();
    if ( (ret1 == 0) || (ret1 == 1) ){    //Recpección de datos NRF24L01
        do{
            dato=0;
            dato1=0;
            dato=RF_DATA[0];
            dato1=RF_DATA[1];

            if(dato==0x01){
                output_high(PIN_A0);
            }
            if(dato1==0x01) {
                output_high(PIN_A1);
            }

            ret1 = RF_RECEIVE();
        } while ( (ret1 == 0) || (ret1 == 1) );
    }

    putc(0x69);
    putc(RF_DATA[2]);
    putc(RF_DATA[3]);
    putc(RF_DATA[4]);
    putc(RF_DATA[5]);
    putc(0x66);
}
```

```

void main()
{
    int8 ret2;
    int8 valor;
    int8 i;
    i=0;
    porta=0;
    portd=0;
    set_tris_a(0b00000000);
    set_tris_d(0b00000000);

    RF_INT_EN();           // Habilitar interrupción RB0/INT.
    RF_CONFIG_SPI();       // Configurar módulo SPI del PIC.
    RF_CONFIG(0x40,0x01);  // Configurar módulo RF canal y dirección.
    RF_ON();               // Activar el módulo RF.
    delay_ms(5);

    while(true){
        if(kbhit()){       //Hay un dato en espera del computador
            valor=getc();
            output_low(PIN_A1); //Apagamos las banderas
            output_low(PIN_A0);
            portd=valor;
            RF_DATA[0]=(valor>>6);
            RF_DATA[2]=(valor>>0)&0b00000011;
            RF_DIR=(valor>>2)&0b00001111; // Dirección del receptor.
            ret2=RF_SEND(); // Enviar datos.
            delay_ms(5);
        }
    }
}

```

Figura 76: Programación desarrollada en CCS C Compiler para el dispositivo esclavo

```
#include <16F887.h>
#FUSES NOWDT, INTRC_IO, PUT, NOPROTECT, NODEBUG, NOBROWNOUT, NOLVP, NOCPD, NOWRT
#use delay(clock=8000000)

#include "lib_rf2gh4_10.h"

#byte porta=0x05          // Dirección del puerto A.
#byte portb=0x06          // Dirección del puerto A.
#byte portc=0x07          // Dirección del puerto A.
#byte portd=0x08
#byte OPTION_REG=0x81
#byte OSCCON=0x8f
static int1      rf_estado;      //Bandera de activiacion del disp.
static int8      dato;
static int8      led;
static int1      ciclo;
static int1      b_capacitivo;   // Bandera del sensor capacitivo
static int8      t_seg;
static int8      t_min;
static int8      t_mili_seg;
static int8      t_cen_mili_seg;

#int_ext          // Interrupción del módulo RF.
void int_ext_isr(void)
{
    int8 ret1;
    ret1 = RF_RECEIVE();
    if ( (ret1 == 0) || (ret1 == 1) )
    {
        do
        {
            if (rf_estado==0){
                dato=RF_DATA[0];    //Almacenamos lo que nos mandaron
                led=RF_DATA[2];
                rf_estado=1;        //Bandera de activación
            }
            ret1 = RF_RECEIVE();
        } while ( (ret1 == 0) || (ret1 == 1) );
    }
}

#int_rb          // Interrupción del módulo capacitivo
void int_rb_isr(void)
```

```

{
    if (input(PIN_B1)==1){
        if(get_timer0()>=0x38 && get_timer0()<0xF0){
            b_capacitivo=1;
        }
        else{
            set_timer0(0);
            output_LOW(pin_c0);
            ciclo=0;
        }
    }
    clear_interrupt(int_rb);
}

#int_timer0 //Temporizador para el módulo capacitivo
void timer0_isr()
{
    if(dato==0x02){
        if (ciclo==1){
            set_timer0(0);
            ciclo=0;
            output_LOW(pin_c0);
        }
        else{
            set_timer0(0);
            ciclo=1;
            output_HIGH(pin_c0);
        }
    }
    clear_interrupt(int_TIMER0);
}

#int_timer1 //Temporizador para la toma del tiempo
void timer1_isr()
{
    if(rf_estado==1){
        set_timer1(63575);
        t_mili_seg=t_mili_seg+0x01;
        if (t_mili_seg==0x64){
            t_mili_seg=0x00;
            t_cen_mili_seg=t_cen_mili_seg+0x01;
            if (t_cen_mili_seg==0x0A){
                t_cen_mili_seg=0x00;
                t_seg=t_seg+0x01;
                if (t_seg==0x3C){
                    t_seg=0x00;
                    t_min=t_min+0x01;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
}
clear_interrupt(int_TIMER1);
}

void main()                                //Programa principal
{
    led=0;
    t_mili_seg=0;
    t_cen_mili_seg=0;
    t_seg=0;
    t_min=0;
    int8 ret2;
    b_capacitivo=0;
    ciclo=1;
    set_tris_a(0b00000000);    // Todo el puerto A como salida.
    set_tris_b(0b00111111);
    set_tris_c(0b00000000);
    porta=0;                    // Inicialmente lo ponemos a cero.
    portb=0;
    portc=0;
    portd=0;
    OPTION_REG=0b11010000;
    OSCCON=0b01110111;

    RF_INT_EN();                // Habilitar interrupción RB0/INT.
    RF_CONFIG_SPI();            // Configurar módulos SPI del PIC.
    RF_CONFIG(0x40,0x08);       // Configurar módulo RF (canal y dirección).
    RF_ON();                     // Activar el módulo RF.
    delay_ms(5);
    rf_estado=0;
    setup_timer_0(rtcc_internal|rtcc_div_4);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_1);
    set_timer1(63575);    //63540
    disable_interrupts(global);
    clear_interrupt(int_rb);
    clear_interrupt(int_TIMER0);
    clear_interrupt(int_TIMER1);
    enable_interrupts(int_rb);
    enable_interrupts(global);
    output_LOW(pin_c0);

    while(true){                // Bucle infinito.
        disable_interrupts(int_TIMER0);
        disable_interrupts(int_TIMER1);
        if (rf_estado==1){      //Activación del dispositivo

```



```

if (dato==0x02){                                     //Borramos banderas
    clear_interrupt(int_TIMER0);
    clear_interrupt(int_rb);
    set_timer0(0);
    enable_interrupts(int_TIMER0);
    enable_interrupts(int_rb);
}
else {
    disable_interrupts(int_TIMER0);
    disable_interrupts(int_rb);
}
t_mili_seg=0;
t_cen_mili_seg=0;
t_seg=0;
t_min=0;
enable_interrupts(int_TIMER1);
if(led==0x01){output_high(PIN_A0);}
if(led==0x02){output_high(PIN_A1);}
if(led==0x03){output_high(PIN_A2);}
set_timer1(63575);
while(dato==0x01){                                  //esperamos que funcione el sensor infrarojo
    output_high(PIN_A3);
    if ((input(PIN_B2)==0) || (input(PIN_B3)==0) || (input(PIN_B4)==0) || (input(PIN_B5)==0)) {
        porta=0;
        rf_estado=0;                                //apagamos bandera
        disable_interrupts(int_TIMER1); // detenemos el tiempo capturado
        RF_DATA[0]=0;
        RF_DATA[1]=0x01;                            //se detecto sensor infrarojo
        RF_DATA[2]=t_mili_seg; //tiempo capturado
        RF_DATA[3]=t_cen_mili_seg;
        RF_DATA[4]=t_seg;
        RF_DATA[5]=t_min;
        RF_DIR=0x01;                                // Dirección del receptor.
        ret2=RF_SEND();                             // Enviar datos.
        dato=0x00;
        output_low(PIN_A3);                          //Apagamos el LED emisor de infrarrojo
    }
}
while(dato==0x02){                                  //esperamos que funcione el sensor capacitivo
    if(b_capacitivo==1){
        porta=0;
        rf_estado=0;                                //apagamos bandera
        disable_interrupts(int_TIMER1); // detenemos el tiempo capturado
        disable_interrupts(int_TIMER0);
        disable_interrupts(int_rb);
        clear_interrupt(int_rb);
        clear_interrupt(int_TIMER0);
        RF_DATA[1]=0;
    }
}

```

```

        RF_DATA[0]=0x01;           //se detectó el capacitivo
        RF_DATA[2]=t_mili_seg; //tiempo capturado
        RF_DATA[3]=t_cen_mili_seg;
        RF_DATA[4]=t_seg;
        RF_DATA[5]=t_min;
        RF_DIR=0x01;// Dirección del receptor.
        ret2=RF_SEND();           // Enviar datos.
        b_capacitivo=0;
        output_LOW(pin_c0);
        ciclo=1;
        dato=0x00;
    }
}

}
output_low(PIN_A0); //Apagamos LEDs de alarma visual
output_low(PIN_A2);
output_low(PIN_A3);
}
}

```

14.4. Repositorios para el manual de usuario y librería lib-rf2gh4-10.h

<https://github.com/JoseCorona14417/Manual-Usuario>

Figura 77: Manual de usuario

https://github.com/JoseCorona14417/Liberia-lib_rf2gh4_10

Figura 78: Librería lib-rf2gh4-10.h Bizintek Innova S.L.

