

Dispositivo Portátil para Sistema de Alambrado Virtual

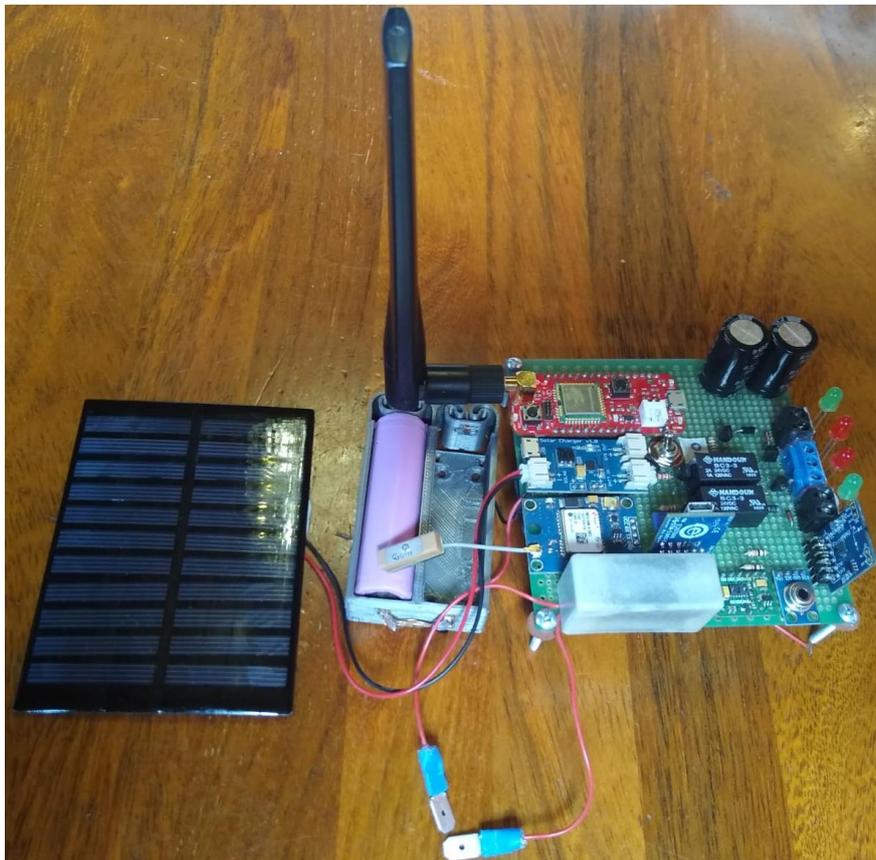
Autor: *Adrián Salvo.*

Director: *Santiago Abbate.*

Codirector: *Jorge Cogo.*

Jurado: *Pedro Gabarret, Nicolás Tempone & Darío Osorio.*

Fecha: *30/10/23*



Resumen

El presente trabajo comprende el proyecto final integrador de la carrera Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Río Negro. El mismo trata del desarrollo del prototipo de un collar para animales de pastoreo, que permite obtener su ubicación geográfica y parámetros biométricos. Esta información se transmite en forma inalámbrica a una estación base donde es procesada para que esté al alcance del productor ganadero o entidad científica. A su vez el sistema en cuestión recibe de la estación base, puntos geográficos generando límites virtuales que el animal no debe traspasar. Para poder lograr esto se utilizan distintos tipos de actuadores que procuran corregir la dirección de desplazamiento.

La estación base es parte del proyecto final integrador realizado por otros dos alumnos de la misma institución. Es por esto que el desarrollo de la misma queda fuera del alcance de este documento.

El trabajo conjunto del collar y la estación base fue presentado en la 12^a edición (año 2022) del concurso **IB50K** que realiza el Instituto Balseiro, resultando proyecto finalista del mismo y obteniendo el premio especial **ARSAT** al mejor proyecto en telecomunicaciones. Este despertó un gran interés por parte del jurado en especial por la oportunidad económica que representa como producto comercial. La experiencia en sí misma, la devolución de los jurados e interacción con mentores asignados, permitieron mejorar el desarrollo de este proyecto.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Río Negro por brindarme el acceso a la educación universitaria. A mis directores de tesis Santiago Abbate y Jorge Cogo por su ayuda incondicional. A mis padres y compañeros por acompañarme durante todos los años de estudio.

Índice.

Capítulo 1: Prólogo.

1.1	Introducción.....	6
1.2	Conceptos que deberá considerar el sistema.....	6
1.3	Diagrama en bloques.	7
1.4	Especificación operacional de las actividades y tareas a realizar.	8

Capítulo 2: Elección de módulos comerciales.

2.1	Definición de requerimientos operativos.....	11
2.2	Módulo GNSS	12
2.3	Módulo Comunicación.....	15
2.4	Módulo Actuadores	18
2.5	Módulo Sensores	22
2.6	Módulo Procesamiento.....	26
2.7	Módulo Alimentación.....	29

Capítulo 3: Desarrollo de subsistemas.

3.1	Alimentación.....	46
3.1.1	Regulador de tensión	48
3.2	Procesamiento	50
3.3	Sensores	52
3.4	Actuadores	52
3.4.1	Actuadores Aversivos.....	52
3.4.2	Actuadores sonoros	53
3.5	PCB.....	55
3.6	Prototipo.....	57

Capítulo 4: Programación.

4.1	Entorno de programación.....	59
4.2	Sensor Temperatura	59
4.3	Sensor Cardíaco	61

4.4 Unidad de medición Inercial.....	64
4.5 GNSS.....	68
4.6 Actuadores.....	72
4.7 Recepción LoRa.....	74
4.8 Transmisión LoRa.....	79

Capítulo 5: Funcionalidad.

5.1 Definición de perímetro	87
5.2 Actuadores.....	88
5.3 Adquisición de datos.....	90
5.4 Comunicación.....	91

Capítulo 6: Consumo energético.

6.1 Mediciones.....	92
6.2 Módulo de alta tensión	95

Capítulo 7: Conclusiones.

7.1 Objetivos cumplidos	99
7.2 Pasos siguientes.....	99

Capítulo 8: Fuentes.

8.1 Bibliografía.....	100
8.2 Referencias.....	101

Capítulo 1: Prólogo.

Este capítulo se centra en la introducción del tema principal detallando las actividades necesarias para llevar a cabo el desarrollo del "Dispositivo Portátil para Sistema de Alambrado Virtual".

1.1 Introducción.

Una práctica efectiva de pastoreo es necesaria para evitar la pérdida de especies forrajeras nativas y erosión del suelo. "La duración del periodo de pastoreo debería regularse en forma tal de evitar el consumo temprano del rebrote y de asegurar el mantenimiento de un nivel mínimo de biomasa residual, mientras que la duración del periodo de descanso debería permitir la recuperación del área foliar removida por el ganado" (Distel, 2013).

En vista de que los productores ganaderos suelen encontrar problemas relacionados con el manejo del pastoreo de animales bovinos y ovinos, tales como el sub y sobre pastoreo de pastizales sumado a los costos de alambrar las grandes extensiones de tierra donde se realiza esta práctica, surge la necesidad de desarrollar un sistema tecnológico que dé solución a tales inconvenientes.

Si bien la evolución de esta idea a lo largo del tiempo ha dado lugar a numerosas patentes, aún no se ha conseguido concretar un producto ampliamente comercial por diversos factores como el ahorro de energía y distancias de transmisión. Se espera que el sistema en cuestión se base en tales desarrollos dando solución a los inconvenientes que se presentaron. Así mismo se espera que su implementación tenga impacto positivo en la producción ganadera de la zona norpatagónica permitiendo reducir costos frente a los sistemas tradicionales, habilitar estrategias de pastoreo sustentable, e incorporar información de utilidad para el monitoreo de los animales y su localización por ejemplo frente a desastres naturales.

La demanda para el desarrollo del sistema surge como propuesta inicial de parte del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (**INTA**) hacia la Universidad Nacional de Río Negro (**UNRN**). La formulación de los conceptos básicos fue establecida en base a conversaciones entre ambas partes y se fueron consolidando con la lectura de diferentes artículos y el estudio de sistemas similares ya existentes.

1.2 Conceptos que deberá considerar el sistema.

Se requiere que el sistema contemple y aplique los siguientes conceptos:

Portabilidad: Se planea que el sistema se sujete al animal mediante un collar amarrado al cuello del mismo, por lo tanto el sistema debe ser liviano y poco voluminoso para evitar fatigamiento y atascamientos respectivamente.

Autonomía: Se planea que el sistema se energice con baterías cargadas por un panel solar siendo de esta forma totalmente autónomo. Para esto se buscará optimizar los consumos energéticos de los distintos subsistemas, permitiendo el apagado de cada uno independientemente de los demás (Anderson and Hale, 2001).

Alambrado virtual: Un alambrado virtual es un sistema electrónico para el monitoreo y control animal, con el cual se puede realizar la delimitación de las regiones en las que puede moverse prescindiendo de alambrados físicos. Estas regiones pueden redefinirse de manera totalmente flexible, permitiendo optimizar el uso de recursos como las regiones de pastoreo (Umstatter, 2011). Se planea que el sistema implemente este concepto permitiendo la definición de límites de pastoreo.

Posicionamiento: Se planea que el sistema cuente con un subsistema de posicionamiento implementado con un sistema global de navegación por satélite (**GNSS**) (Teunissen y Montenbruck, 2017).

Comunicación: Se planea que el sistema cuente con un subsistema de comunicación por radio frecuencia (Anderson and Hale, 2001) que utilice un protocolo de comunicación Long Range (**LoRa**) y que permita el intercambio de información con estaciones base cuya tarea sea el monitoreo y eventual reconfiguración de las zonas de pastoreo o alambrado virtual.

Actuadores: Se planea que el sistema cuente con actuadores que apliquen una estimulación bilateral (Anderson and Hale, 2001) a cada lado del animal cuyo fin sea provocar un cambio en su dirección de desplazamiento.

Monitoreo: Se planea que el sistema cuente con diversos sensores para medir la temperatura corporal, ritmo cardíaco y dirección de desplazamiento del animal (Anderson and Hale, 2001).

1.3 Diagrama en bloques.

Como se puede ver en la **Figura 1** existirán diferentes módulos los cuales cumplirán una determinada función y se relacionarán entre sí.

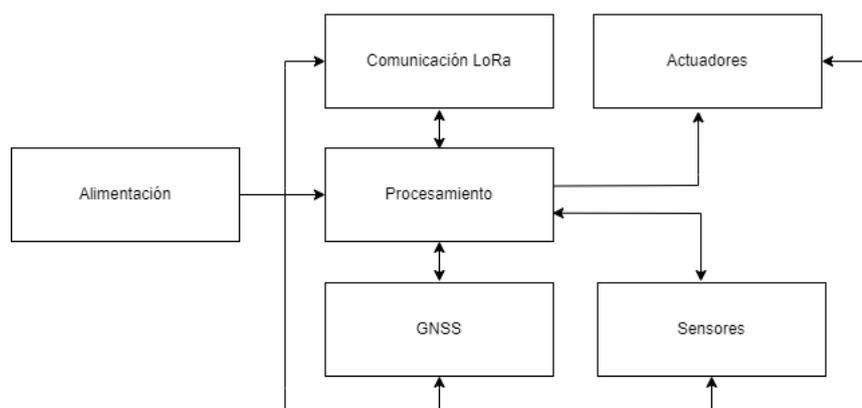


Figura 1: Diagrama en bloques de Dispositivo Portátil para Sistema de Alambrado Virtual.

- El bloque **Alimentación** contempla un panel solar, baterías con un circuito para regular la carga de las mismas y otro para acondicionar la energía.
- El bloque **Comunicación LoRa** cuenta con una antena y un transceptor para la comunicación entre el collar y las estaciones base.
- El bloque **Procesamiento** consta de un microprocesador para el procesamiento de datos.
- El bloque **Actuadores** consta con algún dispositivo sonoro, luminoso o de descarga eléctrica.
- El bloque **GNSS** cuenta con un módulo de posicionamiento y localización global terrestre.
- El bloque **Sensores** podrá contener sensores del tipo magnetómetro, temperatura y ritmo cardíaco.

1.4 Especificación operacional de las actividades y tareas a realizar.

➤ **Investigación.** En esta actividad se desarrollan las siguientes tareas:

1.1 Se realizará un relevamiento de artículos relacionados con el sistema de alambrado virtual.

1.2 Se establecerán requerimientos conceptuales y técnicos del sistema (propios y en común con la estación base) en base a los relevamientos bibliográficos.

➤ **Elección de módulos.** En esta actividad se desarrollan las siguientes tareas:

2.1 Se realizará una investigación y elección de módulos comerciales GNSS.

2.2 Se realizará una investigación y elección de módulos comerciales transceptores.

2.3 Se realizará una investigación y elección de actuadores comerciales.

2.4 Se realizará una investigación y elección de sensores comerciales.

2.5 Se realizará una investigación y elección de microprocesador adecuado para las tareas a realizar.

2.6 Se realizará una investigación y elección de paneles y baterías comerciales.

2.7 Se realizará un estudio y evaluación de posible reelección de componentes y módulos comerciales.

- **Esquemático.** En esta actividad se desarrolla la siguiente tarea:
 - 3.1 Se diseñará el circuito esquemático de las conexiones e interconexiones de cada subsistema.

- **Desarrollo:** En esta actividad se desarrollan las siguientes tareas:
 - 4.1 Se desarrollará el software que permitirá adquirir, almacenar y enviar los datos de posicionamiento y fisiológicos del animal. Este también permitirá recibir de la estación base los límites del alambrado virtual que se utilizaran para tomar decisiones sobre el accionamiento de los actuadores.
 - 4.2 Se desarrollará el subsistema de procesamiento.
 - 4.3 Se desarrollará el subsistema GNSS.
 - 4.4 Se desarrollará el subsistema de comunicación bidireccional inalámbrico por radio frecuencia que comunicará el sistema con las estaciones base.
 - 4.5 Se desarrollará el subsistema de actuadores cuyo fin es aplicar estímulos al animal para re dirigir su posición en el espacio.
 - 4.6 Se desarrollará el subsistema de sensores cuyo fin es medir diversos parámetros del animal como su temperatura, ritmo cardiaco y dirección de desplazamiento.
 - 4.7 Se desarrollará el subsistema de alimentación el cual se encargará de suministrar energía a cada subsistema de forma individual e independientemente.
 - 4.8 Se realizará la integración de subsistemas y posibles correcciones de cada uno.

- **Pruebas 1.** En esta actividad se desarrolla la siguiente tarea:
 - 5.1 Se realizarán pruebas con módulos existentes propiedad de la universidad.

- **PCB.** En esta actividad se desarrolla la siguiente tarea:
 - 6.1 Se desarrollará el diseño del circuito impreso del sistema.

- **Compras.** En esta actividad se desarrolla la siguiente tarea:
 - 7.1 Se realizarán compras de componentes.

- **Ensamble.** En esta actividad se desarrolla la siguiente tarea:
 - 8.1 Se realizará el ensamble del prototipo final.

- **Pruebas 2.** En esta actividad se desarrolla la siguiente tarea:
 - 9.1 Se realizarán pruebas y ajustes del prototipo final.
- **Documentación.** En esta actividad se desarrollan las siguiente tarea:
 - 10.1 Se confeccionará el presente documento.
- **Revisión.** En esta actividad se desarrolla la siguiente tarea:
 - 11 En esta tarea se enviará toda la documentación, al director y codirector del proyecto, para su revisión y se realizarán correcciones en caso de ser indicado.

Capítulo 2: Elección de módulos.

En este capítulo se definen los requerimientos de alto nivel y se seleccionan los módulos comerciales que se utilizarán en cada subsistema.

2.1 Definición de requerimientos funcionales y operativos.

Comunicación: Cada nodo¹ enviará periódicamente a la estación base la información de su posición junto con el pulso cardíaco y temperatura del animal. Por su parte la estación base procesará esta información para que esté al alcance del productor o entidad científica. Así mismo esta será la encargada de definir y transmitir a los nodos los límites del perímetro virtual.

Ubicación: Siendo el módulo GNSS uno de los que más energía consume, debido a que es el que se mantiene operativo la mayor parte del tiempo, en función de la distancia a los límites virtuales se decidirá con qué frecuencia se deben realizar lecturas de ubicación del dispositivo.

Alambrado Virtual: Se definirán 3 zonas que denominaremos zona segura, zona de “alerta sonora” y zona de “descarga eléctrica”. La zona segura no activa ningún actuador mientras que las restantes activan el actuador sonoro y aversivo respectivamente. Si el animal cruza uno de los límites de exclusión se desarrollan distintas acciones dependiendo de los siguientes factores:

1. Si el animal se encuentra en la zona “alerta sonora”, se aplicarán estímulos sonoros y si se encuentra en la zona “descarga eléctrica”, se aplicaran estímulos aversivos en periodos de tiempo espaciados cada 3s hasta que el mismo vuelva a la zona segura o se cumpla un máximo de 5 estímulos.
2. Si el animal sale del perímetro virtual, no se aplicarán más estímulos apelando a que el alejamiento de la manada provoque que el animal se introduzca por sus propios medios a la zona segura. El sistema enviará a la estación base un mensaje para que reconozca el estado del animal como “prófugo”.
3. Si el animal se encuentra en la zona de exclusión y no se reporta movimiento del mismo no se activará ningún actuador. El sistema enviará a la estación base un mensaje para que reconozca el estado del animal como “estático”.

¹ Llamaremos nodo a cada collar.

Sensores: La lectura de la temperatura del animal y ritmo cardíaco se enviará a la estación en períodos de tiempo fijos. La dirección de desplazamiento del animal no será información para ser transmitida y solo será para uso exclusivo del collar.

2.2 Módulo GNSS

Como se habló en el **capítulo 1** acerca de la necesidad de conocer la posición geográfica del ganado para poder referenciarlo a un perímetro virtual de exclusión, el sistema propuesto deberá integrar un módulo **GNSS**. Antes de definir los requerimientos para la elección del mismo se definirán algunos conceptos importantes:

GNSS

Un sistema global de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System, **GNSS**) es una constelación de satélites artificiales que orbitan la Tierra los cuales poseen un reloj atómico. Estos transmiten continuamente su posición y el tiempo del reloj a la frecuencia 1,575 GHz. Un módulo **GNSS** consta de un receptor que escucha las transmisiones de estos satélites y con la información de al menos tres satélites², puede triangular su posición en la Tierra (latitud y longitud) mientras con la de cuatro o más obtener su posición, altitud y velocidad mejorando la precisión mientras más satélites sean.

Los parámetros característicos de los módulos **GNSS** se describen a continuación:

Time to first fix (TTFF): El tiempo hasta la primera solución es una medida del tiempo necesario para que un dispositivo **GNSS** adquiera señales de satélite y datos de navegación para calcular su posición. Un dispositivo **GNSS** debe tener tres conjuntos de datos antes de que pueda proporcionar información de posición precisa: señales de satélite **GNSS**, datos de almanaque y datos de efemérides:

Los **datos de almanaque** contienen información orbital de vehículos satelitales y permiten que el receptor **GNSS** prediga qué satélites están en vista cuando buscan señales **GNSS**. El uso de datos de almanaque ahorra tiempo ya que el receptor puede concentrarse en los satélites que puede ver e ignorar otros que están fuera de su vista.

Los **datos de efemérides** son la posición orbital de cada satélite. Estos datos contienen información sobre el número de la semana, la precisión y el estado del satélite, la antigüedad de los datos, los coeficientes de corrección del reloj del satélite y los parámetros orbitales. Garantiza el cálculo de coordenadas de satélite en tiempo real que se requiere en el cálculo de posición.

El tiempo hasta la primera solución (**TTFF**) tiene cuatro condiciones de inicio que generalmente se especifican para los receptores **GNSS**:

² De la misma constelación GNSS.

- **Cold start:** En este caso, no hay información disponible en el receptor, por lo que el receptor realiza una búsqueda completa de todos los satélites. Esto suele suceder cuando usamos un nuevo receptor **GNSS** o uno que ha sido restablecido de fábrica recientemente. Es la condición de inicio que suele tardar más tiempo.
- **Warm Start:** En este caso, el receptor tiene datos de almanaque válidos (almacenados de un mensaje de navegación recientemente decodificado o mediante GNSS asistido), conoce la hora y tiene una estimación de su ubicación aproximada. Sin embargo, no tiene datos de efemérides almacenados o los datos almacenados están desactualizados. En este caso el receptor puede realizar una búsqueda más inteligente priorizando los satélites que puede determinar que tendrá en vista. El **TTFF** suele ser de unos 45 segundos, esta condición de inicio puede darse cuando el dispositivo ha estado apagado durante un día o dos.
- **Hot start:** En este caso, el receptor tiene datos precisos de efemérides y datos de almanaque. De esta forma puede rastrear rápidamente los satélites en vista y necesita descargar una cantidad mínima de datos para establecer una posición. El **TTFF** de "arranque en caliente", es el más corto y solo toma unos segundos.
- **Aided starts:** Los fabricantes de **GNSS** utilizan varias técnicas para acelerar **TTFF**, incluida la descarga y el almacenamiento de datos de almanaque y efemérides a través de una conexión de red inalámbrica del operador móvil en lugar de a través de los propios satélites GNSS. A esto se le llama **GNSS** asistido.

Sensibilidad de Readquisición: La readquisición caracteriza el rendimiento del receptor en un escenario en el que la señal se reduce en gran medida o se interrumpe durante un breve período de tiempo y luego se restablece. En este caso, el receptor es brevemente incapaz de rastrear la mayoría o todos los satélites, pero debe volver a adquirir (rastrear) la señal cuando se restablece la "visibilidad".

Sensibilidad de adquisición (cold start & hot start): La sensibilidad de adquisición determina el umbral mínimo de potencia de la señal que permite al receptor realizar con éxito un **TTFF** de arranque en frío dentro de un período de tiempo especificado y para una confiabilidad específica.

Sensibilidad de tracking: La sensibilidad de seguimiento se refiere al nivel mínimo de señal que permite al receptor mantener una posición fija dentro de un grado específico de precisión.

Frecuencia de actualización: La tasa de actualización en un receptor determina la frecuencia con que el dispositivo vuelve a calcular e informa de su posición. En general, cuanto más rápida sea la velocidad de actualización, más precisa su posición aparecerá en el mapa, sobre todo cuando se está moviendo a gran velocidad.

NMEA: Es un estándar de comunicación creado por la National Marine Electronics Association con sede en Estados Unidos, que permite que los diferentes instrumentos de navegación se comuniquen entre ellos definiendo los requerimientos de datos, tiempo de transmisión en el formato serial y velocidad. Define también la norma que cada equipo emisor de **NMEA** pueda ser escuchado por muchos receptores. El estándar **NMEA 0183** es la versión más utilizada hoy en día.

Canal: Hardware de un receptor que permite detectar, rastrear y enlazar continuamente la señal de un satélite. Mientras más canales disponibles tiene el receptor, más grande es el número de señales satelitales que un receptor puede rastrear y enlazar simultáneamente.

A continuación se definen las especificaciones que debe cumplir la elección del módulo **GNSS** teniendo en cuenta relevamientos previos de alternativas comerciales y considerando los requerimientos funcionales antes presentados:

Especificaciones que deberán contemplarse en su elección:

- Módulo Comercial.
- Sensibilidad de Tracking menor a -150 dBm.
- Interfaz UART.
- Consumo de energía del orden de los 50 mA.
- Time to first Fix, menor a 30s.
- Temperatura de trabajo entre -20°C y 50°C.
- Tensión de trabajo de 3.3V a 6V.
- Precisión de posición menor a 3 m.
- Modo sleep.
- Antena integrada.
- Navegación: Sistema de posicionamiento global (**GPS**).

Para la elección del módulo **GNSS** se estudiaron cinco opciones disponibles en el mercado. A continuación **Tabla 1** se muestra cada una con una breve descripción de sus puntos fuertes y características.

Parámetro	Especificación	NEO-6M/V	Adafruit Ultimate GPS Breakout	BS-280	C3-470B	skm53
TTF	Cold Start	27 s	35 s	26 s	60 s	36 s
	Warm Start	27 s	33 s	25 s	40 s	33 s
	Hot Start	1 s	1s	1 s	<3 s	1 s
	Aided Starts	<3 s	-	-	-	-
Sensibilidad	Tracking	-161 dBm	-165 dBm	-162 dBm	-156 dBm	-165 dBm
	Reacquisition	-160 dBm	-163 dBm	-160 dBm	-153 dBm	-
	Cold Start	-147 dBm	-148 dbm	-148 dBm	-135 dBm	-148 dBm
	Hot Start	-156 dBm	-	-157 dBm	-	-
Precisión posición horizontal	GPS	2.5 m	3 m	<2.5 m	<10 m	3 m
	SBAS	2 m	2.5 m	<2 m	-	-
Precisión velocidad		0.1 m/s	0.1 m/s	0.1 m/s	-	0.1 m/s
Voltaje de alimentación	VCC	3.3 V a 5V	3.3 V a 5 V	3.6 V a 5.5 V	3.6 V a 5.5 V	5 V ± 5%

Consumo de corriente	ICC tracking (Max)	39 mA (Max performance)	-	-	Sustained supply current Typ: 85mA	35 mA
	ICC tracking (Typ.)	37 mA (Eco)	20 mA	15 mA		-
	ICC tracking (min.)	11 mA (Power save)	-	-		-
	shut-down	-	-	-		TBD
	Acquisition Max	-	-	-		45mA
	Acquisition Typ	47 mA	25 mA	-		-
Protocolo de comunicación		NMEA	NMEA	NMEA-0183	NMEA-0183	NMEA
Frecuencia de actualización		1-5 Hz	1-10 Hz	1-10 Hz	1 Hz	1 Hz
Canales		50	66	72	20	66
Interfaz de comunicación		UART	UART	UART	UART	UART
Precio³ [USD]		\$ 29,3*	\$ 29,5**	\$ 32,6 ***	\$ 26 ****	\$24,9*****

Tabla 1: Comparación de módulos GPS.

Como se puede ver en la **Tabla 1** el módulo **GPS NEO6M/V2** tiene uno de los mejores tiempos **TTFF**, buena relación precio/sensibilidad, rango de alimentación adecuada y modos de bajo consumo por lo tanto se elige este módulo para el sistema. En la **Figura 2** se puede ver una imagen del mismo. En **[DR-1]** se puede ver la hoja de datos del mismo.



Figura 2: Módulo GPS NEO6M/V.

2.3 Módulo Comunicación

El módulo de comunicación inalámbrico se utilizará para la transmisión de la posición y otra información de interés, hacia y desde la estación base. El mismo consta de un transceptor que es un dispositivo que permite la transmisión y recepción de datos en forma inalámbrica mediante radio frecuencia. Los parámetros característicos de estos módulos se describen a continuación:

Potencia de salida: Potencia en los terminales de la antena en condiciones de adaptación.

Sensibilidad: Nivel de señal mínima capaz de detectar.

³ Precios tomados de *mercadolibre.com.ar (dólar oficial al día 30/10/23), **adafruit.com, *** alexnld.com, **** aliexpress.com, ***** ebay.com.

Rango de frecuencia: Es el rango de frecuencias de operación. Existen diferentes transceptores comerciales con la capacidad de operar en distintas bandas de frecuencias. Para poder ser utilizados en el territorio nacional argentino, estos deben poder operar en bandas habilitadas por el organismo regulador ENACOM **[DR-2]**. Es por esto que se eligen como opción para las comunicaciones inalámbricas del sistema, los módulos que operan en la banda ISM de 915 a 928 MHz. El uso de esta banda tiene como ventaja que no requiere de una licencia, pero se deben respetar las condiciones y parámetros técnicos de emisión establecida en **[DR-3]**.

Modulación: Es el método de modulación que se utiliza para transmitir la información enviada en las señales de radiofrecuencia, pudiendo ser **FSK** (Frequency Shift Keying), **GSK** (Gaussian minimum shift keying), **LoRa** (Long Range Modulation), **MSK** (Minimum-shift keying) y **OOK** (On-Off Keying). Es importante tener en cuenta la necesidad del sistema para cubrir grandes distancias de transmisión empleando baja potencia. La comunicación **LoRa** es la única de las anteriores que por su tecnología de modulación de espectro expandido permite cubrir grandes extensiones utilizando bajo consumo energético. Si bien existen otros sistemas similares que permiten grandes áreas de cobertura empleando bajo consumo energético como las redes SigFox y NBLoT, estas trabajan en bandas con licencia y como tal requieren de un operador pago por lo que no son consideradas como opción.

Factor de dispersión: Es un parámetro configurable en la modulación LoRa que generalmente va desde 6 a 12 y determina cuántos símbolos se utilizan para codificar los datos. Mientras más bajo es el valor, más alta es la tasa de transmisión de datos, menos robustez al ruido, mayor consumo energético para el receptor y menor alcance siendo lo contrario a medida que el valor crece.

Ancho de Banda: Porción del espectro radioeléctrico que ocupa un mensaje.

Tasa de bits: Cantidad de bits transmitidos por segundo.

A continuación se definen las especificaciones que debe cumplir la elección del módulo de comunicación teniendo en cuenta relevamientos previos de alternativas comerciales y considerando los requerimientos funcionales antes presentados:

Especificaciones que deberán contemplarse en su elección:

- Módulo Comercial.
- Alta sensibilidad.
- Bajo consumo de energía del orden de los 50 mA.
- Largo alcance del orden de 2 km.
- Tensión de trabajo de 3.3 V a 6 V.
- Temperatura de trabajo entre -20 °C y 50 °C.
- Interfaz SPI / UART
- Modo sleep.
- Incluir antena.
- Bajo precio.

- Modulación LoRa.
- Banda 915 a 928 MHz.

Para la elección del módulo transceptor se estudiaron cinco opciones disponibles en el mercado. En la **Tabla 2** se muestran las características de los mismos.

Parámetro	Especificación	SX1276	RAK811(H)	Hm-trlr-915s	E32-915T20D	Ra-01H	Unidad
Voltaje de alimentación	VCC	1.8 a 3.7	2.1 a 3.45	3.3 a 5.5	2.2 a 5.2	2.7 a 3.6	V
Consumo de corriente	sleep	1	11.8	8 a 12	4	-	uA
	Rx	12.6	5.5	18 a 22	14	12.5	mA
	Tx	28	30	35 a 120	120	105	mA
Temperatura de operación		-40 a 85	-30 a 80	-20 a 85	-40 a 85	-40 a 85	°C
Potencia de salida		20	20	13 a 20	19.3 a 20	20	dBm
Sensibilidad		-111 a -130	-130	-117 a -130	-144 a -146	-140	dBm
Rango de frecuencia		137 a 1020	US915	895 a 935	900 a 931	803 a 930	MHz
Factor de dispersión		6 a 12	-	7 a 12	-	-	-
Ancho de banda		7.8 - 500	-	62.5 a 500	-	-	kHz
Tasa de bits		0.18 - 37.5	-	1.2 a 115.2	0.3 a 19.2	300	Kbps
Interfaz		SPI	UART1, UART3, GPIOs, ADC	UART,RS232, RS485	UART	SPI	-
Modulación		FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa,OOK	LoRa,FSK, GFSK,OOK	LoRa,FSK, GFSK,OOK	LoRa	FSK,GFSK,MSK, GMSK, LoRA, OOK	-
Precio ⁴		\$ 12*	\$ 17**	\$ 12***	\$ 6,2****	\$ 4,5****	USD

Tabla 2: Comparación de módulos transceptores.

Como se puede ver en la **Tabla 2** el módulo **SX1276** tiene uno de los menores consumos de corriente en Tx, igual potencia de salida que el resto y sensibilidad razonable, por esto es elegido como mejor opción para el sistema. En la **Figura 3** se puede ver el mismo y en **[DR-4]** su hoja de datos.

⁴ Precios tomados de: * amazon.com, **ebay, ***aliexpress.com, ****alibaba.com.



Figura 3: Módulo LoRa SX1276.

2.4 Módulo Actuadores

La necesidad de poseer actuadores radica en la posibilidad de poder aplicar estímulos sensoriales que incentiven al animal a retornar al área permitida de pastoreo.

Con la utilización de dos tipos distintos de estímulo, aplicados en ambos lados del cuello, se puede generar que el animal asocie los estímulos negativos con la existencia de un alambrado virtual. La generación inicial de una señal sonora puede ser utilizada (mediante un entrenamiento previo) para que el animal la asocie como una prevención antes de que se produzca una segunda señal que consista en una descarga eléctrica. La segunda señal representa un mayor incentivo que la primera, por lo tanto el animal puede aprender a evitar la segunda utilizando la primera como advertencia. De esta forma se pueden generar los estímulos correspondientes cuando el animal se acerca a los límites virtuales e influir sobre su dirección de desplazamiento.

Se descarta la utilización de actuadores lumínicos ya que estos pueden no ser efectivos a la luz del día. Se analizó también la posibilidad de utilizar actuadores que generen estímulos positivos, sin embargo no se encontraron evidencias de su eficacia a diferencia de los indicados.

Actuador sonoro.

A continuación se muestran las características que deben contemplarse en la elección del actuador sonoro en base a las de las señales que utilizan sistemas similares:

Especificaciones que deberán contemplarse en su elección:

- Principio sonoro.
- Potencia 76-108 dB (Muminov, 2019).
- Frecuencia 2.9 kHz (Muminov, 2019).
- Alimentación 3.3 V.

- Bajo consumo.
- Bajo costo.

Un buzzer o zumbador es un dispositivo transductor capaz de convertir la energía eléctrica en sonido. Estos se pueden clasificar según su principio de funcionamiento en dos tipos:

- Piezoeléctrico.
- Electromagnético.

Los elementos piezoeléctricos son materiales cristalinos que al deformarse físicamente por la acción de una presión generan un potencial eléctrico o, en forma inversa, al aplicar un potencial eléctrico generan una deformación en el material. Esta última acción es la que utiliza el zumbador al juntar una lámina metálica y una lámina de material piezoeléctrico de forma que al aplicar entre ambos un potencial eléctrico se genere un arqueamiento mecánico de ambos materiales debido a la deformación del piezoeléctrico y de esta forma se emita un sonido similar a un “click”. Al quitar el potencial eléctrico aplicado a ambos materiales, estos retornan a su estado anterior y es por esto que los buzzer además emplean un oscilador que puede ser interno o externo para generar un sonido a frecuencia constante.

Por otro lado, los buzzer electromagnéticos, utilizan un imán permanente y una bobina en lugar del piezoeléctrico. Al energizar la bobina, el campo magnético generado por la misma, dobla la lámina de metal mientras que en caso contrario la acción del imán retorna el estado físico previo de la lámina.

La intensidad sonora, frecuencia de resonancia y tensión de alimentación típica de los buzzer hace que sea adecuado para ser implementado en el sistema y es por esto que se lo elige como actuador sonoro. En la **Tabla 3** se muestran algunas opciones disponibles en el mercado:

Buzzer					
Modelo	AI-1223-TWT-3V-2-R	AI-1027-TWT-5V-2-R	IE092505-1	CMI-9705-0380-SMT-TR	BRP2212L-12-C
Fabricante	PUI Audio, Inc.	PUI Audio, Inc.	DB Unlimited	Cui Devices	Intervox
Tecnología	Magnético	Magnético	Magnético	Magnético	Piezoeléctrico
Voltaje de operación	2 V a 4 V	3 V a 7 V	3 V a 7 V	2 V a 5 V	3 V a 15 V
Nivel de presión	82 dB	82 dB	80 dB	80 dB	90 dB
Frecuencia	2300 ± 500 Hz	2730 ± 300 Hz	2700 Hz	2700 ± 300 Hz	4000 ± 500 Hz
Entrada	DC	DC	DC	DC	DC
Consumo promedio	30 mA	30 mA	30 mA	30 mA	4.5 mA
Tipo de montaje	Through Hole	Through Hole	Through Hole	Surface Mount	Montaje en panel, brida
Precio⁵ [USD]	\$ 1.2*	\$ 1.6*	\$ 2.5*	\$ 2*	\$ 2.7*

Tabla 3: Características de buzzers disponibles en el mercado.

⁵ Precios tomados de: *digikey.com

Como se puede ver en la **Tabla 3**, el buzzer modelo **AI-1027-TWT-5V-2-R** es el que mejor cumple con las especificaciones propuestas además de ser el más económico y es por esto que se lo elige para el sistema. En la **Figura 4** se puede ver una imagen del mismo y en **[DR-5]** su hoja de datos.



Figura 4: Buzzer AI-1027-TWT-5V-2-R

Actuador aversivo.

A continuación se muestran las características que deben contemplarse en la elección del actuador aversivo en base a la normativa vigente y el tipo de señales que utilizan sistemas similares:

Especificaciones que deberán contemplarse en su elección:

- Principio por descarga eléctrica.
- Tensión de alimentación no superior a 12 V **[DR-6]**.
- Tensión de salida máximo 10 kV (Muminov, D Na, C. Lee, H Kyu Kang, H Seok Jeon., (2019)).

Como expone el manual de bienestar animal de Senasa y la resolución Senasa No. 25/2013 **[DR-6]** “**EI USO DE LA PICANA ELÉCTRICA SE ENCUENTRA RESTRINGIDO A BOVINOS y CERDOS ADULTOS**”, y debe ser una excepción para situaciones en donde el animal disponga de espacio suficiente para moverse. En el caso de la **VACA LECHERA** no se recomienda usar la picana eléctrica debido a su susceptibilidad al estrés e impacto sobre la producción de leche.

Dado el nivel de voltaje que se requiere para la generación de la descarga eléctrica, se propone como mejor opción la utilización de un convertidor boost step up. Estos son un tipo de fuente de alimentación conmutada con la particularidad que permiten obtener una tensión mayor a su salida que al de su entrada. El esquema básico del mismo se puede ver en la **Figura 5**. Cuando el interruptor está cerrado, estado **ON**, la corriente circula por la malla 1, almacenando energía en el campo magnético de la bobina. Cuando el interruptor está abierto, estado **OFF**, la bobina invierte la polaridad de su potencial de forma de mantener el flujo de corriente y como la suma de tensión **Vs + VL** es mayor a la del capacitor **VC**, el diodo **D1** conduce. De esta forma la corriente circula a través del diodo y por la malla 2 y 3, cargando

el capacitor y alimentando la carga respectivamente. Cuando el interruptor vuelve al estado **ON**, el diodo no conduce y la tensión en la carga V_o será la del capacitor la cuál es igual a $V_s + V_L$ (menos la tensión del diodo) por lo tanto se consigue una tensión de salida más alta que la tensión de entrada. El convertidor podrá funcionar en modo continuo si la corriente a través del inductor nunca es cero y discontinua cuando la corriente a través del mismo sea nula. La tensión de salida del convertidor estará dada en función del ciclo de trabajo y será una expresión distinta en cada caso según el modo de funcionamiento en el cual se encuentre.

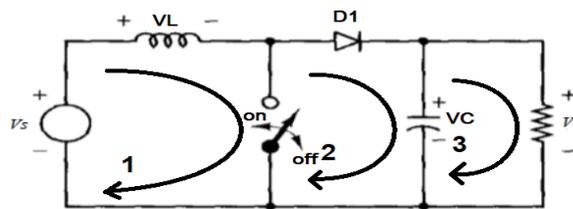


Figura 5: Diagrama convertidor boost.

En la **Tabla 4** se muestran algunas opciones de generadores de alto voltaje disponibles en el mercado que utilizan el principio de un convertidor boost step up. Estos están encapsulados en resina epoxi por lo que son seguros de manipular y tienen precios extremadamente accesibles, del orden menor a 2 dólares en sitios de venta online, como Alibaba **[DR-8]**. Si bien puede parecer que los consumos son excesivos para el sistema, como se verá más adelante, los pulsos de descarga serán empleados solo por una duración de algunos milisegundos y la energía será suministrada a través de capacitores. Esto último será indispensable para permitir que los paneles solares sean los encargados de proveer la energía y en el peor caso permitirá evitar que la batería entregue picos de corriente que pueden afectar su vida útil. Por lo tanto se considera viable esta solución en términos energéticos, lo cual será demostrado analíticamente y empíricamente más adelante.

Módulo	TW-DC-DP	TW-G-GZQ-02	TW-216	BS-1001B	MC-901
Voltaje de entrada	2,8 V a 3,6 V	3,7 V a 7.4 V	3,7 V	3.7 V a 4.2 V	3,7 V a 7,4 V
Corriente máxima de entrada	800 mA	1,2A ±10%	1,8 A a 2 A	1.5 A a 2.5 A	0,5 A a 1 A
Voltaje de salida	6 kV a 7,5 kV	12 kV ±10%	7,5 kV a 8,5 kV	5 kV a 6 kV	800 kV a 1000 KV
Longitud del arco	14 mm	14 mm	5 mm a 6,5 mm	5 mm a 8 mm	1,5 cm a 2 cm

Tabla 4: Comparación de generadores de descarga eléctrica.

Como se puede ver en la **Tabla 4** el módulo **TW-DC-DP** posee el menor consumo de corriente y niveles adecuados de tensión de entrada y salida tomando como referencia artículos como (Muminov, D Na, C. Lee, H Kyu Kang, H Seok Jeon., (2019)). Este módulo (**Figura 6**) es un generador de alto voltaje, capaz de generar una tensión 7 kV aproximadamente [**DR-7**] con una corriente de salida inferior a 10 μ A, inofensiva para humanos y animales. Esta tensión está dentro de los rangos de la mayoría de los electrificadoras de alambrados (Bavera, G. A. 2009.). La distancia de arco es de aproximadamente 14 mm, se puede alimentar con 3V consumiendo **364mA** a este voltaje [**DR-8**].



***Figura 6:** Módulo de alta tensión TW-DC-DP.*

2.5 Módulo Sensores

De acuerdo a la necesidad de medir ciertos parámetros del animal como su pulso cardiaco, temperatura y aceleración, el sistema implementará los siguientes sensores:

Sensor Cardiaco

La utilidad del sensor de ritmo cardiaco radica en poder diagnosticar arritmias cardíacas, ataques cardíacos, insuficiencia cardíaca, periodo de lactancia o enfermedades. La factibilidad y desempeño de su uso en el sistema serán evaluados en el dispositivo final con pruebas sobre animales ya que existen diferentes factores que pueden afectar a su funcionamiento como el pelaje y grosor del cuero del animal. A continuación se muestran las características que deben contemplarse en la elección del sensor cardiaco:

Especificaciones que deberán contemplarse en su elección:

- Alimentación de 3.3 a 6V.
- Medición no invasiva.
- Interfaz I2C / Analógica.
- Modo bajo consumo.
- Bajo costo.

La fotoplethismografía es una técnica no invasiva utilizada para determinar el pulso cardíaco en la cual una fuente emisora de luz, emite sobre la piel y un foto receptor recibe la parte

reflejada de la misma que no ha sido absorbida por el tejido óseo y las componentes de la sangre. Las variaciones en el volumen de los vasos sanguíneos producto del bombeo de flujo sanguíneo en cada pulsación producen variaciones en la cantidad de luz reflejada pudiendo de esta forma discriminar entre la componente constante y variable de la señal con la información. “La componente variable del fotoplestismograma (**PPG**) resulta de la expansión y contracción del lecho arterial, mientras que la componente constante está relacionada con la atenuación debida a la sangre arterial no-pulsátil, la sangre venosa y los tejidos” (S. M. López Silva, M. L. Dotor, J. P. Silveira, R. Giannetti y L. Herrera, 2009).

El par transmisor y receptor se pueden encontrar de forma adyacentes entre sí (paralelos al medio vascular) o enfrentados (con el medio vascular en el medio de ambos) trabajando por reflexión o transmisión respectivamente. Los primeros son útiles para ser utilizados en extremidades como orejas mientras que los segundos son aptos para posicionarse sobre cualquier superficie pulsátil. El método por transmisión no sería práctico para ser implementado debido a la dificultad de su colocación en el animal y es por esto que se elige como mejor opción para el sistema, el método por reflexión. Este método tiene como desventaja que la señal es más débil y susceptible a la luz ambiental a comparación con el método de transmisión. Sin embargo, estas desventajas son fácilmente solucionadas con la implementación de sensores de luz ambiental y amplificadores.

Existen otros métodos no invasivos para medir el pulso cardiaco como los electrocardiogramas (**ECG**). Este, para poder medir los potenciales de las señales eléctricas del corazón, requiere de al menos 3 electrodos dispuestos en distintas partes del torso del animal.

Para la elección del módulo transceptor se estudiaron cinco opciones disponibles en el mercado. En **Tabla 5** se muestran las características de los mismos.

Modulo	MAX30102	AD8232	SEN0203	Heart Rate 8 click	PULSE SENSOR
Método	PPG	ECG	PPG	PPG	PPG
Pulso cardiaco	SI	SI	SI	SI	SI
Oxigeno	SI	NO	NO	NO	NO
Rechazo de luz ambiental	SI	-	NO	SI	SI
Modo Sleep	10 uA	200 nA	NO	0.8 uA	NO
VCC	3.3 V a 5 V	3.3 V a 5 V	3.3 V a 6 V	3.3 V a 5 V	3 V a 5.5 V
IDD	1200 uA	170 uA	10 mA	200 uA	4 mA
Interfaz	I2C	Analógica	Analógica / PWM	I2C	Analógica
Precio ⁶ [USD]	\$ 11,9*	\$ 19,9**	\$ 16**	\$ 36**	\$ 11,6*

Tabla 5: Comparación de sensores cardiacos.

En contraste con la fotoplestimografía (**PPG**) donde la medición se hace en un solo punto, el método de electrocardiograma (**ECG**) no es práctico y por lo tanto se descarta como opción. Como se puede ver en la **Tabla 5** el sensor MAX30102 (**Figura 7**) es uno de los más

⁶ Precios tomados de: *mercadolibre.com.ar (dólar oficial al día 30/10/23), **mouser.com.

económicos, es uno de los que menos consume (dentro de los PPG) y es el único que además permite medir el porcentaje de oxigenación en la sangre, de forma que es elegido como mejor opción para el sistema. En [DR-9] se puede ver su hoja de datos.



Figura 7: Sensor MAX30102.

Sensor de temperatura

El aumento de temperatura en los animales puede ser síntoma de intoxicación por la ingestión de hongos, o el comienzo del periodo de la lactancia y es de interés para los productores poder detectar estas situaciones con antelación.

Especificaciones que deberán contemplarse en su elección:

- Alimentación de 3.3 V a 6 V.
- Medición sin contacto.
- Interfaz I2C.
- Modo bajo consumo.
- Rango de 10 °C a 50 °C.

Para la elección del sensor de temperatura se investigaron 5 opciones disponibles en el mercado, las cuales se comparan en la **Tabla 6**.

Parámetro	Especificación	MLX90614B	Lm 35	DS18B20	DHT22	MCP9700	Unidad
Funcionamiento		Radiación	Conducción	Conducción	Conducción	Conducción	-
Alimentación	VDD	2.6 a 3.6	4 a 30	3 a 5	3.3 a 6	2.3 a 5	V
Consumo	IDD	2	0.06	1.5	1.5	0.012	mA
Sleep	Isleep	5	-	1000	50	-	uA
Rango	To	-70 a 380	-55 a 150	-55 a 125	-40 a 80	-40 a 125	°C
Presición	To	0.01	0.25	0.5	0.5	4	°C
Interfaz		SMBus / PWM	Analógica	Salida digital	Salida digital	Analógica	-
Precio⁷		\$ 16.7*	\$ 5,34**	\$ 6,7***	\$ 10,5***	\$ 0,5****	\$ USD

Tabla 6: Comparación de sensores cardiacos.

El sensor **MLX90614B** (**Figura 8**) es un termómetro infrarrojo para mediciones de temperatura por radiación. Como se puede observar en la **Tabla 6**, a pesar de ser el sensor de mayor costo, es el único que por su principio de funcionamiento permite una medición

⁷ Precios tomados de: * ebay.com, **mercadolibre.com.ar (dólar oficial al día 30/10/23), ***amazon.com, ****mouser.com.

precisa al poder discriminar entre la temperatura del animal y la ambiental. Esto es fundamental ya que el pelaje puede absorber mayor o menor cantidad de calor de acuerdo a su tonalidad y las altas temperaturas del ambiente donde pasta el animal pueden hacer que una medición por contacto no sea representativa de su verdadera temperatura corporal. Además este sensor, gracias a su encapsulado posee gran robustez y permite bajos consumos en modo sleep, por esto es elegido como mejor opción para el sistema. En **[DR-10]** se puede ver su hoja de datos y al igual que el sensor de pulso cardiaco, su factibilidad de implementación en el sistema final debe evaluarse con pruebas sobre el animal, pudiendo ser necesario tener que tomar acciones como afeitar el pelaje del mismo, ajustar la distancia óptima de medición y el coeficiente de emisividad.



***Figura 8:** Sensor de temperatura MLX90614B.*

Unidad de medición inercial

La función principal del sensor de movimiento es determinar la dirección de desplazamiento del animal. Con esta información se puede por un lado tomar decisiones sobre cuál de los laterales del animal hay que estimular y por el otro cuando dejar de hacerlo.

A continuación se definen las especificaciones que debe cumplir la elección de la unidad de medición inercial (**IMU**) teniendo en cuenta relevamientos previos de alternativas comerciales y considerando los requerimientos funcionales antes presentados:

Especificaciones que deberán contemplarse en su elección:

- Alimentación de 3.3 V a 6V.
- 9 ejes.
- Interfaz I2C / SPI.
- Modo bajo consumo.
- Bajo costo.

Para la elección del sensor de movimiento se investigaron 5 opciones disponibles en el mercado, las cuales se comparan en la **Tabla 7**.

Parámetro	IAM-20680	IIM-42652	ICM-20948	ICM-20600	LSM6DSO	Unidad
Empaquetado	16-LGA	14-LGA	24-QFN	14-LGA	14-LGA	-
Ejes	6	6	9	6	6	-
Alimentación	1,71 a 3,6	1,71 a 3,6	1,71 a 3,6	1,71 a 3,45	1,71 a 3,6	V
Corriente Giroscopio	1600	850	1230	1080	550	uA
Corriente acelerómetro	57	350	68.9	40		
bajo consumo	6	10	8	6	3	uA
Interfaz	I2C,SPI	I3C,I2C,SPI	I2C,SPI	I2C,SPI	SPI / I ² C & MIPI I3CSM	-
Precio ⁸	\$ 31,2*	\$ 61,2*	\$ 14,9*	\$ 40*	\$ 11,9*	\$ USD

Tabla 7: Comparación sensores acelerómetros.

Como se puede ver en la **Tabla 7**, el sensor ICM-20948 (**Figura 9**) es el único que posee 9 ejes es decir que integra un magnetómetro. La forma más sencilla para determinar la dirección de desplazamiento es midiendo el campo magnético terrestre y es por esto que se elige este sensor para el sistema. El mismo puede ser conseguido a través de proveedores como Mouser. En **[DR-11]** se puede ver su hoja de datos.

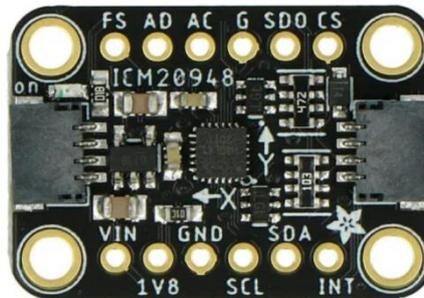


Figura 9: Módulo ICM20948.

2.6 Módulo Procesamiento

El módulo de procesamiento constará de un microcontrolador que realizara las funciones de transmisión, recepción y procesamiento de las mediciones de los sensores y **GNSS**.

A continuación se definen las especificaciones que debe cumplir la elección del módulo de procesamiento dada las interfaces de comunicación que son necesarias para la comunicación con los sensores y módulos seleccionados anteriormente así como también teniendo en cuenta relevamientos previos de alternativas comerciales y considerando los requerimientos funcionales antes presentados:

⁸ Precios tomados de: *mouser.com.

Especificaciones que deberán contemplarse en su elección:

- Alimentación 3.3 V a 6 V.
- Poseer modos de operación de bajo consumo.
- Poseer I/O Analógicas y Digitales.
- Poseer arquitectura de 32bits.
- Poseer interfaz UART, SPI, I2C, SMBus.

Elección de microcontrolador:

Para la elección del microcontrolador se investigaron algunas opciones dentro de las familias PIC y ARM Cortex de fabricantes como STM y Microchip, las cuales se pueden ver en la **Tabla 8**.

Fam.	MCU	PINS	I/O Pins	Program Memory [KB]	Data memory [KB]	Low Power	VDD [V]	Freq. [MHz]	Interface	ADC	DAC
PIC	PIC32MX170F256x	28/44	21/35	256+3	64	Sleep and Idle	2.3 a 3.6	50	2xUSART, 2xSPI, Smbus, 2xI2C(soportar SMBus)	10 bits-13/10 ch	-
STM	STM32F103xx	64/100/144	51/80/112	256/384/512	48/64	Sleep, Stop y Standby	2 a 3.6	72	5xUSART, 5xUART, 3xSPI(2 I2S), 2xI2C(SMBus/PMBus), 2xI2C(), CAN(2.0B), SDIO, USB 2.0	3x12 bits - 16/21 ch	2x12 bits - 2 ch
	STM32L072xx	32/48/49/64/100	25/40/51/84	64/128/192	20	Standby, Stop	1.65 a 3.6	32	4xUSART, UART, (4(1)/6)xSPI, (2/3)xI2C(2 con SMBus/PMBus), USB 2.0	12 bits - 10/13/16 ch	2x12 bits - 2 ch
SAM	SAML21x	32/48/64	25/37/51	32/64/128/256/	8/16/32	Idle, Standby, Backup, and Off Sleep	1.62 a 3.63	48	6 SERCOM: USART, UART, SPI, I2C, SMBus, PMBus, and LIN	12 bits - 10/14/20 ch	2x12 bits - 2 ch

Tabla 8: Comparación de microcontroladores.

La mayoría de los microcontroladores en la **Tabla 8** cumple con los requerimientos propuestos sin embargo durante esta investigación se encontraron algunos SiP (System in Package) que integran estos mismos microcontroladores además de un transceptor **LoRa SX1276**, todo en un mismo encapsulado. Las ventajas principales de estos últimos se encuentran en que ya tienen resuelta la conexión con el módulo transceptor y muchas veces

se los puede encontrar integrados en módulos con alimentación individual y conectores de RF. Además estos módulos poseen los pads expuestos lo cual facilita el trabajo de soldado en un **PCB** a diferencia de los microcontroladores investigados que poseen empaquetados del tipo **LQFP**, **UFQFPN**, **WLCSP**, **LFBGA** (excepto el **PIC** el cual posee un empaquetado fácil de soldar como el **SOIC**). Frente a estas ventajas se analizaron los módulos **CMWX1ZZABZxxx**, **EESAM R34/R35** y **WLR089U0** y sus características fueron comparadas en la **Tabla 9**.

MCU										PECIO ⁹ \$ USD
Módulo	Chipset	CPU	Interfaz	RAM [KB]	FLASH [KB]	CLOCK [MHz]	DIG I/O	ANLOG INPUT	VDD [V]	
CMWX1ZZA BZ-xxx	STM32L072/82	ARM Cortex-M0	I2C, SPI, UART, USB	20	192	32	18		3 a 3.6	\$ 17,7*
EESAM R34/R35	SAML21	Cortex® - M0+	5 SERCOM (USART,I2C, SPI)	8/16/32	64/128/256	48	27		1.8 a 3.6	\$ 39,2**
WLR089U0	SAML21	ARM Cortex -M0+	USB, 4xSERCOM: (USART,I2C,SPI,LIN)	32 + 8	256	48	23	1	3.3 a 5	\$ 51**

Tabla 9: Módulos MCU + LoRa.

Como se puede ver en la **Tabla 9** el módulo **CMWX1ZZABZ** es el más conveniente para el sistema por su precio sin embargo es difícil el acceso a sus hojas de datos y como ventaja los módulos **WLR089U0** y **EESAM R34/R35** pueden ser adquiridos en Argentina a través del distribuidor “Electrónica ELEMÓN”. Esta empresa integra al **SAM R34/R35** (**Figura 10**) en una placa de desarrollo llamada carrier la cual es muy útil para el armado de un prototipo inicial. Es por esto que se elige a este último como mejor opción para el sistema. Como se mencionó anteriormente, este cuenta con un transceptor **SX1276**, mismo transceptor que fuera seleccionado en la sección: **2.3 Módulo Comunicación**. En **[DR-12]** se puede ver su hoja de datos.



Figura 10: Modulo EESAMR34/R35.

⁹ Precios tomados de: *mouser.com, ** elemon.com.ar.

La placa carrier puede verse en la **Figura 11**, y será utilizada para el desarrollo del prototipo inicial. En **[DR-13]** se puede ver el esquemático del mismo.



Figura 11: Placa Carrier EESAMR35.

2.7 Módulo Alimentación

Panel solar

Para que el sistema tenga independencia energética, el mismo contará con baterías que serán re-cargadas por un panel solar siendo de esta forma totalmente autónomo.

A continuación se definen las especificaciones que debe cumplir la elección del panel solar teniendo en cuenta relevamientos previos de alternativas comerciales y considerando los requerimientos funcionales del sistema antes presentados:

Especificaciones que deberán contemplarse en la elección del Panel Solar:

- Voltaje de salida entre 5 V y 12 V.
- Capacidad de 200 mA o más.
- Superficie¹⁰ menor a 155 cm².
- Temperatura de funcionamiento entre -20 °C y 40 °C.
- Poseer alta eficiencia.

Existen diversos tipos de paneles solares como los termodinámicos, térmicos y fotovoltaicos, el presente trabajo se centrará en este último.

Un **panel solar fotovoltaico** (o módulo solar) es un conjunto de celdas interconectadas que a través del efecto fotovoltaico genera electricidad a partir de la luz solar. Silicio cristalino y arseniuro de galio son la elección típica de materiales para las celdas solares. Las células de silicio por ser menos costosas que las de galio son más comúnmente empleadas en los paneles fotovoltaicos y estas se dividen en tres tecnologías de fabricación (Diaz T., Carmona G., 2010):

¹⁰ Se toma como referencia el área de un rectángulo con dimensiones: 11 cm x 15 cm.

- 1) Células de silicio monocristalino están constituidas por un único cristal de silicio. Este tipo de células presenta un color azul oscuro uniforme y es visible la interconexión de las mismas. Su rendimiento en laboratorio es del 24%.
- 2) Células de silicio policristalino (también llamado multicristalino) están constituidas por un conjunto de cristales de silicio, por lo que su rendimiento (20% en laboratorio) es algo inferior al de las células monocristalinas. Se caracterizan por un color con distintos tonos azules.
- 3) Las células de silicio amorfo poseen un color uniforme (marrón) son menos eficientes (16% en laboratorio) que las células de silicio cristalino pero también menos costosas.

Dado que los paneles solares de silicio son significativamente más económicos que los de galio y que dentro de este grupo los monocristalino y policristalinos poseen más eficiencia en convertir la radiación solar en energía eléctrica, es que se investigaron 4 opciones comerciales de los mismos. En la **Tabla 10** se comparan sus características importantes como PP (potencia pico), IMP (corriente pico), tensión en el punto de máxima Potencia (VMP), ISC (corriente circuito abierto), VOC (tensión a circuito abierto). Para esta investigación se descartó cualquier opción por alguno de los siguientes motivos:

- Cuya corriente de carga fuera menor o igual a 200 mA.
- Que una de sus dimensiones supere los 14 cm de longitud.
- Que las características presentadas en la publicación del proveedor fueran escasas o incongruentes con las especificadas en la descripción del producto.
- No tener stock en ninguna publicación.

Distribuidor	Marca	Modelo	Temp.	PP	IMP	VMP	ISC	VOC	Dimensiones	Tecnología	Precio \$ USD
Digikey	Voltaic Systems	P124	-40 °C a 85 °C	1.22 W	200 mA	6.07 V	220 mA	7.09 V	113x66 mm	mono	\$ 14
		P126	-	2.37 W	330 mA	7,28 V	360 mA	8,51 V	112x136 mm	mono	\$ 24.9
	Sparkfun	PRT-13781	-	2.27 W	378 mA	6 V	-	7 V	135x112x5 mm	mono	\$ 33
Aliexpress [DR-14]	-	CNC136X110-6	-	2 W	333 mA	6 V	372 mA	7.3 V	136x110 mm	poli	\$ 9,2

Tabla 10: Comparación de paneles solares.

Como se puede ver en la **Tabla 10** el panel solar modelo **CNC13x110-6** a pesar de tener menor eficiencia que el resto por ser policristalino tiene muy buena corriente de pico **IMP**, es el más económico y tiene dimensiones similares al resto, por lo tanto este es elegido para el sistema. En la **Figura 12** se puede ver el mismo.



Figura 12: panel solar CNC113x110-6.

Batería

La generación de energía eléctrica del panel solar dependerá de la radiación solar, la cual no será constante en el tiempo ya que varía en función de la estación del año, hora del día, condiciones climáticas, ángulo de incidencia de los rayos solares, temperatura y humedad ambiental. Debido a esto es necesario utilizar una batería como elemento de almacenamiento de energía que asegure al sistema condiciones de alimentación de forma invariante en el tiempo. La batería acumulará energía cuando la demanda energética del sistema sea menor a la producida por el panel solar y entregará energía al sistema en caso contrario.

Consideraciones que deben contemplarse en la elección de la batería:

- Liviana para ser transportada por el animal.
- Bajo costo.
- No representar riesgo para el animal.
- Vida útil de al menos 2 años.
- Capacidad suficiente para alimentar el sistema.
- Voltaje nominal mayor a 3.3 V.

Una batería es un dispositivo que a través de una reacción electroquímica de reducción-oxidación es capaz de generar energía eléctrica. Estas se pueden clasificar en:

Batería primaria: una vez que se descarga no se puede recargar mediante la aplicación de una corriente. Normalmente se conocen como pilas y no se usan en el campo fotovoltaico.

Batería secundaria: Acumulador que, después de una cierta descarga, puede recibir una recarga hasta su capacidad total.

Dentro del grupo de las baterías secundarias podemos encontrar distintas tecnologías de fabricación, a continuación se presentan algunas de las principales:

Baterías de Níquel Cadmio (NiCd): Su electrodo positivo está constituido de hidróxido de níquel mientras que el negativo de cadmio [DR-21]. Se puede recargar muchas veces y su uso es cada vez menor debido a su efecto memoria y a que el cadmio es un agente muy

contaminante. Este tipo de baterías deben ser descargadas totalmente para evitar el efecto memoria [DR-18]. En la **Tabla 17** se pueden ver sus características de funcionamiento [DR-19], [DR-20], [DR-21], y a continuación en la **Tabla 11** se pueden ver sus ventajas y desventajas [DR-19], [DR-20], [DR-21].

NiCd	
Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Carga rápida. 2. Permite carga lenta. 3. Capacidad de descarga buena entre -20°C a 60°C. 3. Baja variación de voltaje en la descarga inclusive con corrientes elevadas. 4. Relativamente económicas. 5. Buena densidad de energía. 6. Excelentes capacidades de suministro de potencia. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Carga 0°C a 45°C. 2. Posibilidad de escape de gases a temperaturas menores a 0°. 3. Susceptible a sobre cargas repetidas. 4. Susceptible a sobre descargas. 5. Susceptible a altas corrientes de descarga. 6. Amenaza medioambiental (Cadmio, altamente tóxico) 6. Efecto memoria. 7. Auto descarga alta.

Tabla 11: Ventajas y desventajas de las baterías NiCd.

Baterías de Níquel Hidruro metálico (**NiMH**): tienen un rendimiento similar a las de NiCd, siendo la principal diferencia que las primeras utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de aleación de hidruro metálico [DR-22]. Poseen mejor autonomía y son más ligeras que las NiCd. Tienen mediana vida útil y poseen una mayor capacidad de carga (entre dos y tres veces más que una de NiCd del mismo tamaño y peso) y un menor efecto memoria. Por el contrario, pueden presentar una mayor tasa de auto descarga que las NiCd [DR-18].

En la **Tabla 17** se pueden ver sus características de funcionamiento [DR-19], [DR-22], [DR-23] y a continuación en la **Tabla 12** se pueden ver sus ventajas y desventajas [DR-20], [DR-23].

NiMH	
Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Buena densidad de energía (mayor que equivalente en NiCd). 2. Tecnología libre de cadmio (mucho menos contaminante). 3. Carga rápida. 4. Buen rango de temperatura de descarga: -10°C < T < 45°C. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Costo elevado. 2. Sensibles a sobrecargas. 3. Sensibles a descargas completas. 4. Dificultad de fabricación. 5. Auto descarga alta. 6. Posible escape de gases para 0°C > T > 45°C. 7. Eficiencia de carga baja a -10°C > T > 40°C. 8. Susceptibles a altas corrientes de descarga durante la carga. 9. No es posible una carga lenta. 10. Posibilidad de corto circuito o aumento de la resistencia interna al final de su vida útil.

Tabla 12: Ventajas y desventajas de las baterías NiMH.

Baterías de Níquel Hierro (**NiFe**): Esta batería utiliza hidróxido de níquel como cátodo, hierro como ánodo e hidróxido de potasio como electrolito. Tiene una tolerancia muy alta a la sobrecarga, la sobre descarga y cortocircuitos. Puede funcionar igual de bien aunque no la

carguemos durante un largo período. Debido a su gran peso, esta batería se utiliza en aquellas aplicaciones en las que el peso de la batería no importa, por ejemplo, en sistemas de energía solar o sistema de energía eólica como respaldo. Fueron diseñadas para sustituir a las baterías de Plomo-Ácido, su durabilidad y la vida útil de la célula de níquel-hierro son mucho mayores que la de una batería de ácido de plomo pero aun así, la batería de níquel-hierro ha perdido su popularidad debido a su alto costo de fabricación [DR-24].

En la **Tabla 17** se pueden ver sus características de funcionamiento [DR-24], [DR-20] y a continuación en la **Tabla 13** se pueden ver sus ventajas y desventajas [DR-20].

NiFe	
Ventajas	Desventajas
1. Extrema durabilidad 2. Relativa tolerancia al abuso físico y operacional: - Sobrecarga. - Exceso de descarga. - Cortocircuitos. - Circuito abierto durante largos periodos.	1. Alta variabilidad con la temperatura. 2. Retención de carga pobre. 3. Baja densidad de potencia.

Tabla 13: Ventajas y desventajas de las baterías NiFe.

Batería Níquel hidrogeno **NiH₂**: Se diferencia de una batería de Níquel Hidruro Metálico (NiMH) por el uso de hidrógeno en forma gaseosa. Esta proporciona una buena energía específica y ciclo de vida muy largo. Las celdas pueden tolerar la sobrecarga, la inversión accidental de polaridad y la presión de hidrógeno en la celda proporciona una buena indicación del estado de carga. Sin embargo, la naturaleza gaseosa del hidrógeno significa que la eficiencia de volumen es relativamente baja para una celda IPV (recipiente de presión individual), y la alta presión requerida hace que los recipientes a presión sean de alto costo [DR-25].

En la **Tabla 17** se pueden ver sus características de funcionamiento [DR-20] y a continuación en la **Tabla 14** se pueden ver sus ventajas y desventajas [DR-20].

NiH	
Ventajas	Desventajas
1. Ciclo de vida extremadamente largo. 2. Bajo mantenimiento. 3. Alta fiabilidad.	1. Costo elevado.

Tabla 14: Ventajas y desventajas de las baterías NiH.

Baterías **Lithium-Ion**: el material más utilizado para el cátodo es el grafito mientras que para el ánodo se suele utilizar alguno de los siguientes: óxido de litio cobalto, fosfato de litio cobalto u óxido de litio [DR-20]. Su costo de producción es alto y esto se refleja en el precio, sin embargo, su ciclo de vida es elevado. Estas baterías no requieren mantenimiento y tienen auto descarga muy baja. Por otro lado, son muy delicadas y su estructura es frágil por lo que requieren un circuito de seguridad para la carga y descarga. Este circuito limita el voltaje

máximo que puede alcanzar cada celda durante la carga y también limita el voltaje mínimo de éstas durante la descarga [DR-22].

A continuación en la **Tabla 15** se pueden ver sus ventajas y desventajas [DR-20].

Li-ion	
Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Alta densidad de energía. 2. Alta eficiencia. 3. Carga rápida. 4. Liviana. 5. Baja auto descarga. 6. Alta capacidad de descarga. 7. Alta tensión por celda. 8. Bajo efecto de memoria. 9. Tamaño pequeño. 10. Sin mantenimiento. 11. No emiten gases en durante la carga. 12. No requieren ventilación. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inflamables. 2. Susceptible a sobre descargas y sobrecargas. 3. Costosas. 4. Susceptible a bajas y altas temperaturas. 5. Vida máxima de 3 años. 6. Costo Alto. 7. Requieren circuitos de protección de carga y descarga.

Tabla 15: Ventajas y desventajas de las baterías Li-ion.

Baterías de plomo ácido: Estas utilizan un ánodo de plomo (Pb), un cátodo de óxido de plomo (PbO₂) y electrolito de ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Según el tipo de electrolito utilizado, las baterías de plomo ácido, pueden ser [DR-27]:

- De electrolito inundado o ventiladas (**VLA**) donde los electrodos se encuentran sumergidos en exceso de electrolito líquido.
- Selladas o reguladas por válvula (**VRLA**), donde el electrolito se encuentra inmovilizado en un separador absorbente o en un gel.

Dentro de las de electrolito inundado o **VLA** podemos encontrar distintos grupos [DR-18], [DR-20]:

Baterías de ciclo profundo o tracción: Estas baterías están sujetas a una constante y relativamente pequeña descarga que durante largos periodos de tiempo puede significar un alto grado de descarga. Requieren cargas de 8 a 16 horas y se caracterizan por tener electrodos muy gruesos, rejillas pesadas y exceso de material activo.

Baterías de arranque iluminación y encendido (SLI): Se caracterizan por ser baterías capaces de descargar el máximo de corriente posible en un corto espacio de tiempo manteniendo un alto voltaje. Tienen que ser capaces de aguantar muchas descargas incluso con cambios fuertes de temperatura para poder cumplir su tarea principal, que es arrancar un motor. En general tienen una baja resistencia interna.

Baterías estacionarias: Las baterías estacionarias están constantemente siendo cargadas y se debe tener cuidado de evitar que se sequen. El electrolito y el material de la rejilla del electrodo están diseñados de forma que se minimice la corrosión.

Dentro de las selladas o reguladas por válvula (**VRLA**) dos tipos principales los de consistencia de Gel y los AGM [DR-18], [DR-20].

Baterías de Gel. En estas baterías, el ácido es en forma de gel. Su gran ventaja es que ya no hay líquido que se puede perder, son cerradas y funcionan en cualquier posición. Son más resistentes a bajas temperaturas, la vida útil es mucho mayor que la vida de las baterías líquidas y son las menos afectadas ante descargas profundas. Las desventajas son una resistencia interna poco más alta que reduce el flujo máximo de la corriente, son algo más delicadas para cargar y tienen un precio mayor. Estas baterías se usan frecuentemente en la industria y las telecomunicaciones.

Baterías tipo AGM. En estas baterías, el ácido está fijado en fibras de vidrio. Son cada vez más usadas en aplicaciones solares y eólicos. Sus ventajas además de su resistencia a climas fríos, es una auto descarga mínima y la eficiencia más alta de todas las baterías de plomo ácido (hasta 95%). Tienen una baja resistencia interna que permiten corrientes altas. Su desventaja, es el precio más elevado y vulnerabilidad algo más alta a descargas profundas.

En la **Tabla 17** se pueden ver sus características de funcionamiento [DR-20], [DR-27] y a continuación en **Tabla 16** se pueden ver las ventajas y desventajas de las baterías de plomo ácido [DR-18], [DR-20], [DR-22]:

Plomo ácido	
Ventajas	Desventajas
1. Precio bajo. 2. Baja auto descarga. 3. Robustas frente a bajas temperaturas.	1. Baja densidad de energía. 2. Baja eficiencia. 3. Carga lenta. 4. Pesadas. 5. Tensión de células media. 6. Requiere mantenimiento (VLA). 7. Emiten gases durante la carga (VLA). 8. Requieren de ventilación (VLA). 9. Sulfatación (VLA). 10. Susceptible a sobre carga y sobre descarga. 11. Amenaza medioambiental (plomo y ácido sulfúrico).

Tabla 16: Ventajas y desventajas de las baterías de plomo ácido.

Baterías plomo-ácido: dentro de esta tecnología, se descarta como opción a ser utilizadas en este sistema las del grupo VLA debido a la necesidad de mantenimiento y de ventilación de las mismas por el escape de gases durante la carga y descarga. Dentro del grupo VRLA la mejor opción para el sistema son las baterías AGM ya que son más adecuadas, en comparación a las de Gel, para entregar altas corrientes en intervalos pequeños de tiempo [DR-28]. Sin embargo debido a su peso y volumen también se descartan para el sistema.

Batería de Níquel: se descarta esta tecnología ya que la principal ventaja (su bajo costo) se ve afectada por requerir al menos tres celdas en serie para alcanzar la tensión adecuada de alimentación para el sistema. Además, poseen auto descarga muy grande lo que puede generar problemas de abastecimiento de energía para el sistema.

A continuación en la **Tabla 17** se comparan las características de funcionamiento de las distintas tecnologías de baterías antes mostradas:

Tecnología	Tensión por celda	Capacidad	Ciclo de vida	Tiempo de recarga	Auto descarga	Eficiencia	Temperatura de descarga	Temperatura de carga
Ni-Cd	1.2 V	50 a 80 Wh/Kg	> 500	1 hora	20%	60 a 70 %	-20 a 65 °C	0 a 45 °C
Ni-Mh	1.2 V	60 a 120 Wh/kg	300 a 600	2 a 4 horas	20%	65 a 85 %	-10 a 45 °C	0 a 40 °C
Ni-Fe	1.2 V	30 a 50 Wh/Kg	2000 a 4000	7 horas	20 a 40 %	65 a 85 %	-10 a 45 °C	-
Ni-H2	1.4 V	64 Wh/Kg	1500 a 6000	-	Muy alta	65 a 85 %	0 a 50 °C	-
Ion Litio	3.6 V	110 a 160 Wh/kg	3000 (100%) > 20000 (20 a 40%)	2 a 4 horas	6 %	89 %	-10 a 60 °C	0 a 45 °C
SLI	2 V	35 Wh/Kg	200 a 700	8 a 16 horas	menor a 5%	75 a 85 %	-40 a 55 °C	
Ciclo profundo	2 V	25 Wh/Kg	1500	6 a 12 horas	menor a 5%	75 a 85 %	-20 a 40 °C	
Estacionaria	2 V	10 a 20 Wh/Kg	-	8 a 16 horas	menor a 5%	75 a 85 %	-10 a 40 °C	

Tabla 17: comparación de características funcionales de las distintas tecnologías de baterías.

Batería de Litio: Se considera que esta tecnología es la mejor opción para el sistema ya que su alta densidad de energía y tensión por celda permiten que una sola celda sea suficiente para alimentar el sistema. En la **Tabla 18** se pueden ver distintas opciones de baterías con esta tecnología disponibles en el mercado que cumplen con los requerimientos propuestos antes mencionados:

Distribuidor	Fabricante	Modelo	Capacidad [mAh]	Voltaje nominal [V]	Vmax de carga [V]	Vmax de descarga [V]	I _{max} de carga	I _{max} de descarga continua	Temp. Carga [°C]	Temp. Descarga [°C]	Precio ¹¹ [USD]
DigiKey	GlobTek, Inc	603450	2000/2200	3.7	4.2	3	0.5 C	1 C	0 a 45	-20 a 60	\$ 17,2*
		BL2200F6034501S2PPMK	2000/2200	3.7	4.2	3	1 C	1 C	0 a 45	-20 a 60	\$ 19,3*
		GP404852 (1ICP4/45/47)	1200	3.7	4.2	3	1 C	1 C	0 a 45	-20 a 55	\$ 16*
Mercado libre	MOTOMA	LCR18650P 2500mAh	2500	3.7	4.2	3	1 C	8 C	0 a 45	-20 a 60	\$ 15**
		LCR26650 5000mAh	5000	3.7	4.2	3	0.5 C	1 C	0 a 45	-20 a 60	\$ 34,2**

Tabla 18: Baterías de li-Ion disponibles en el mercado.

¹¹ Precios tomados de: *digikey.com y **tiendaxellex.com.ar (dólar oficial al día 30/10/23).

Como se puede ver en la **Tabla 18**, la batería **LCR18650P 2500mAh** es la más barata, se encuentra entre las de mayor capacidad y puede ser conseguida en Argentina, por lo tanto esta es la elegida para el sistema. En la **Figura 13** se puede ver la misma y su hoja de datos en **[DR-15]**.



Figura 13: Batería LI-ion LCR18650P.

El ciclo de carga de una batería de litio requiere una fase inicial de carga donde la corriente se incrementa de forma constante en el tiempo hasta que esta alcanza la tensión máxima de carga. Una vez alcanzada esta tensión se entra en la siguiente fase donde la carga es a tensión constante y para la cual la corriente de carga decrece en el tiempo hasta un determinado porcentaje de la capacidad nominal de la batería. Esta última por lo general es la misma corriente que se emplea antes de la primera fase de carga en caso de que la batería esté por debajo de cierto nivel máximo de tensión de descarga y se aplica durante el tiempo necesario para que la tensión de la misma alcance dicho nivel para luego continuar con la fase de corriente constante. Este ciclo de carga debe ser respetado ya que la tecnología de construcción así lo requiere y debe ser realizado dentro del rango de temperatura adecuado para la batería. El no cumplimiento de estos dos requisitos puede ocasionar el incendio y/o explosión de la misma. A continuación en la **Figura 14** se ilustra el ciclo de carga antes explicado:

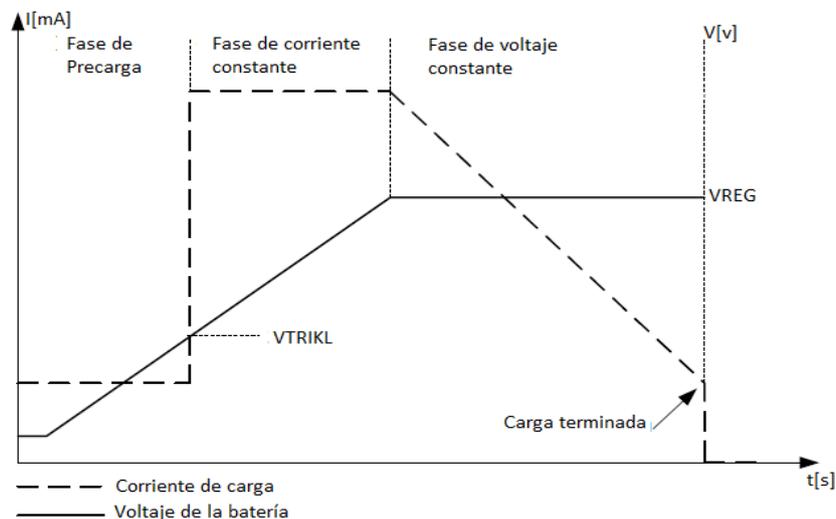


Figura 14: Ciclo de carga batería de litio.

Existen distintos circuitos integrados IC capaces de proporcionar el ciclo de carga adecuado para las baterías de litio, a continuación se mencionan los requerimientos a tener en cuenta para la elección de este integrado basados en las especificaciones de la batería así como también el panel solar seleccionados para el sistema:

Especificaciones que deberán contemplarse en la elección del IC de carga:

- Carga automática.
- Bajo costo.
- Medir temperatura de carga de la batería.
- Vmax de descarga 3 V.
- Vmax de carga 4.2 V.
- Corriente de carga 330 mA.
- Corriente inicio y finalización C/10.
- Bajo costo.

Elección de IC de carga:

Para la elección del IC de carga se investigaron algunas opciones disponibles en el mercado las cuales se pueden ver en la **Tabla 19**.

	TP4056	CN3065	FP8102	LTC1733	LTC4054	MCP73837	ME4057
Tecnología	Li-ion	Li-ion, Li Polymer	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Li-ion/Li-Polymer	Li-ion
Cantidad de celdas	1	1	1	1	1	1	1
Empaquetado	SOP-8	DFN-8	SOP8/MSOP8	MSOP-10	5 pines SOT-23	DFN-10 y MSOP-10	SOP-8
Aplicación	USB y AC/DC	USB, solar	USB y AC/DC	otro	USB	USB y AC/DC	USB y AC/DC
Disipador	Y	Y	Y	N	N	Y	Y
Protección de carga inversa	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Corriente/cte y voltaje/cte	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Arranque suave	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Temperatura interna	N	Y	Y	Y	Y	N	Y
Temperatura batería	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y
Recarga automática	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Corriente de carga MAX	1 A	1 A	1 A	1.5 A	800 mA	1000 mA	1000 mA
Voltaje de regulación (precisión)	4.2 V (1.5%)	4.2 V (1%)	4.2 V (1%)	4.2 V (1%)	4.2 V (1%)	4.2 V (0.5%)	4.2 V (1%)
Umbral de carga lenta	2.9 V	3 V	2.9 V	2.48 V	2.9 V	2.9 V	2.9 V
Corriente de carga lenta	C/10						
Terminación de carga							

VCC	4 V a 8 V	4.4 V a 6 V	4.25 V a 5.5 V	4.5 V a 6.5 V	4.25 V a 6.5 V	4 V a 8 V	4 V a 6.5 V
ICC (typ.)	150 uA	650 uA	-	1 mA	300 uA	1900 uA	150 uA
	55 uA	3.5 uA	55 uA	-	200 uA	110 uA	55 uA
	55 uA	3 uA	55 uA	900 uA	25 uA	0.6 uA	55 uA
IBAT	-2.5 uA	-3.5 uA	-2.5 uA	-1 uA	-2.5 uA	-6 uA	-2 uA
Precio ¹² [USD]	\$ 1.04*	\$ 3.08*	\$ 2.45*	\$ 4.92*	\$ 2.18*	\$ 2.82*	\$ 0.92*

Tabla 19: Comparación de I_c de carga.

Como se puede observar en la **Tabla 19** el integrado CN3065 si bien no es el más económico es el único que posee el voltaje adecuado de descarga para la batería elegida (V_{max} de descarga = 3V) y es el único diseñado para aplicaciones solares al poseer un ADC (Convertor Analógico Digital) de 8bits que permite ajustar automáticamente la corriente de carga basada en la capacidad de salida de la fuente de alimentación que en este caso se tratará de un panel solar. Además posee bajos consumos de corriente en modo standby, shutdown y sleep, y posee medición de temperatura tanto de la batería como la propia del integrado. El mismo se puede ver en la **Figura 15** y su hoja de datos en [DR-16].

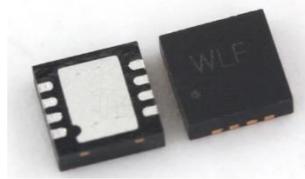


Figura 15: Cargador Li-ion CN3065.

Regulador de Tensión

En la **Tabla 20** se puede observar los rangos de alimentación de cada subsistema.

Subsistema	Modelo	VCC
GNSS	Módulo GY-NEO6MV2	3.3 a 5 V
MCU + LoRa	EESAM R34/R35	1.8 a 3.6 V
Buzzer	AI-1027-TWT-5V-2-R	3 a 7 V
Ritmo cardíaco	Módulo MAX30102	3.3 a 5.5 V
Electro shock	TW-DC-DP	2.8 a 3.6 V
Temperatura	MLX90614B	2.4 a 3.6 V
IMU	Módulo ICM20948	3.3 a 5 V

Tabla 20: Rango de alimentación de cada subsistema.

Como se puede ver en la **Tabla 20** una tensión adecuada y estándar para cada subsistema es 3.3 V. Eligiendo esta tensión para el sistema y al tener una alimentación mixta que consta tanto del panel solar de 6 V (ver VMP del panel CNC136X110-6 en **Tabla 10**) como de la

¹² Precios tomados como referencia de: *Aliexpress por lotes de 5 unidades.

batería con una tensión que variará desde los 3 a 3.7 V (ver batería LCR18650P **Tabla 18**) se deberá implementar un regulador que permita aumentar la tensión de **3 V** a **3,3 V** y bajarla de **6 V** a **3,3 V**. Si bien en este punto no se tiene un valor de consumo energético exacto se espera que un regulador con capacidad de entregar **500 mA** o más permita satisfacer las necesidades energéticas basadas en que el módulo de mayor consumo es el de alta tensión con **364mA** (en condiciones de operación constante) **[DR-8]**.

Especificaciones que deberán contemplarse en la elección del regulador:

- Tensión de salida 3.3 V
- Tensión de entrada de 3 a 6 V
- Capacidad mayor o igual a 500 mA

Los reguladores de tensión son circuitos electrónicos cuya función es proporcionar una tensión estable a su salida independientemente de la corriente de salida y de la tensión de entrada. Existen distintos tipos de reguladores:

- Zener.
- Serie.
- Monolítico.
- Conmutados.
- Convertidores DC-DC.

El regulador zener, utiliza un diodo zener en paralelo con la carga y una resistencia R en serie a la entrada como se puede ver en la **Figura 16**. Al aumentar la tensión de entrada y suponiendo que la carga es constante, la corriente por el diodo aumenta pero la tensión se mantiene constante e igual a la tensión de ruptura V_d , lo mismo sucede en caso contrario siempre que la tensión aplicada al diodo sea mayor a la tensión V_d . La resistencia R se elige de tal forma de limitar la corriente máxima que circulará por el zener cuando la tensión de entrada sea máxima.

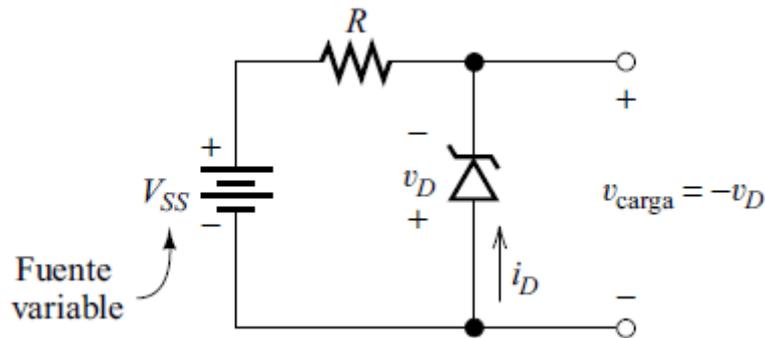


Figura 16: Circuito regulador de tensión con diodo zener.

Las desventajas que presentan el regulador anterior son que tiene baja eficiencia por la resistencia en serie y está limitado a aplicaciones de baja potencia por el zener. Los reguladores lineales o serie **Figura 17** solucionan estos problemas. Estos constan de un transistor BJT de potencia que opera en la región lineal conectado en serie entre la tensión no regulada y la carga. Al disminuir la tensión V_o , como la tensión del diodo es constante, la tensión V_{BE} del transistor aumenta al igual que la corriente de salida del transistor compensando esta caída de tensión. En caso contrario, si aumenta la tensión V_o , disminuye la tensión V_{BE} disminuyendo la corriente de salida del transistor manteniendo de esta forma la tensión de salida constante ante cambios de tensión en la entrada o consumos de corriente en la carga. Este regulador sigue teniendo una baja eficiencia, de alrededor del 20%.

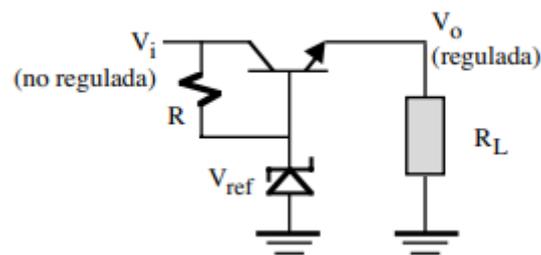


Figura 17: Regulador lineal.

Un variante del regulador serie con BJT es el regulador serie, **Figura 18**, basado en un amplificador operacional OP que utiliza el error entre la tensión de referencia V_{ref} y la realimentación del divisor resistivo entre R_1 y R_2 para alimentar el par darlington.

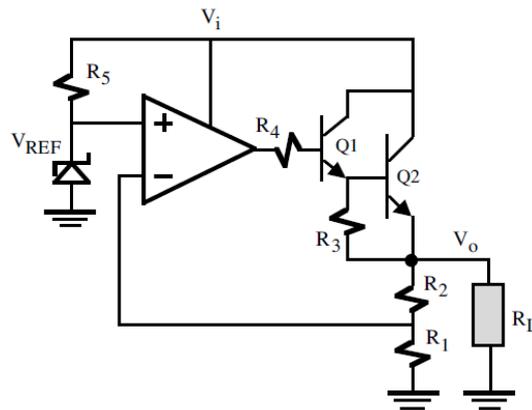


Figura 18: regulador serie con OP.

Esta configuración permite mayor potencia de salida gracias al par Darlington. La tensión de salida del circuito V_o está dada por (1):

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{REF} \quad (1)$$

Los reguladores monolíticos son circuitos integrados que contienen las etapas básicas de los reguladores lineales, como tensión de referencia, amplificador/comparador de error pero además poseen circuitos de control y de protección tanto para tensiones de entrada bajas como altas y para corriente altas tanto de entrada como de salida. Pueden tener tensiones de salida fijas positivas o negativas y configurables a través de resistencias externas. Los más comunes de tensión de salida fija poseen 3 terminales como el de la **Figura 19**, uno para la tensión de entrada no regulada V_{in} , otro para GND y otro para la tensión de salida regulada.

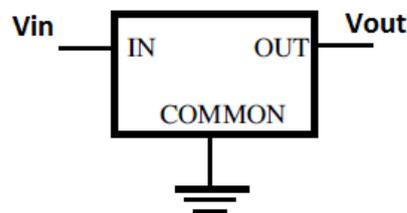


Figura 19: Regulador monolítico con salida fija.

Los reguladores de tensión con salida configurable como el de la **Figura 20** poseen una tensión fija V_{ref} entre OUT y ADJ:

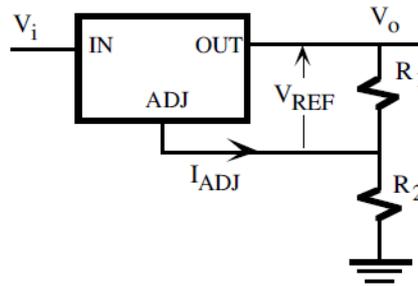


Figura 20: Regulador monolítico con salida configurable.

De esta forma con un corriente de salida fija I_{ADJ} , la tensión de salida V_o está dada por:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{REF} + I_{ADJ}R_2 \quad (2)$$

Los reguladores de conmutación comparan la tensión de salida con una tensión de referencia y en función de la diferencia de estas regulan el ciclo de trabajo de una onda cuadrada (en algunos casos se regula la frecuencia en lugar del ciclo de trabajo) que alimenta la base de un transistor (generalmente mosfet) de forma que trabaje en corte y saturación. Cuando el transistor se encuentra en saturación deja circular corriente a través de él y a través de un inductor, mientras que cuando se encuentra en corte la energía almacenada en el inductor se transfiere a un capacitor de salida. Un esquema básico de lo mencionado anteriormente se puede observar en la **Figura 21**.

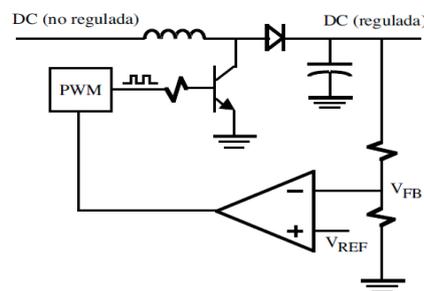


Figura 21: Esquema básico de regulador de conmutación.

A diferencia de los reguladores lineales, al operar el transistor en la región de corte o saturación, los reguladores de conmutación alcanzan grandes eficiencias del orden del 85% o mayores. Otra ventaja es que pueden ser configurados como buck (tensión de salida menor que el de entrada) o como boost (tensión de salida mayor que el de entrada) lo cual no es posible con los reguladores lineales. Como desventaja se tiene el ruido generado por conmutación del transistor entre corte y saturación.

Los reguladores Flying Capacitor utilizan una red de capacitores los cuales mediante conmutadores, generalmente MOS, son cargados en bloques que se conectan secuencialmente de forma tal que las tensiones en los capacitores se sumen. Su funcionamiento puede ser explicado con el circuito básico de la **Figura 22**. Cuando S1 y S2 se encuentran en estado ON, C1 se carga al potencial VCC. Si luego de esto ambos interruptores pasan al estado OFF la tensión en C2 pasa a ser 2VCC y por lo tanto se obtiene a la salida el doble de tensión que el de entrada. Este tipo de reguladores tiene como desventaja su baja potencia, pobre regulación y tensión limitada.

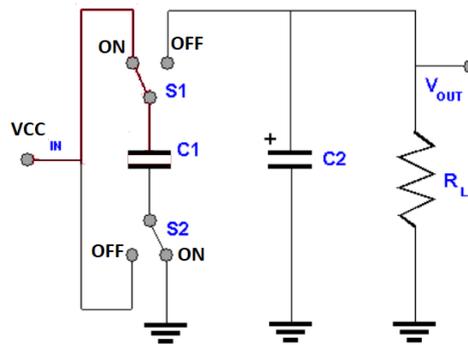


Figura 22: Regulador Flyng capacitor.

Como se mencionó anteriormente los reguladores tipo buck-boost son los más adecuados para implementar en el sistema debido a su mayor eficiencia sobre los lineales y por su capacidad de manejar mayores potencias que los flying capacitor. La configuración buck boost permitirá que el regulador sea alimentado tanto por el panel solar como por la batería mientras que a su salida proporcionará la tensión regulada adecuada para alimentar a los subsistemas. En la **Tabla 21** se muestran 5 opciones evaluadas de las disponibles en el mercado:

Características	ISL9120IRTNZ	MP5461	LTC3441	TPS63060DSC	MP28160
Entradas	1	2	1	1	1
Frecuencia de switching	-	1.8 MHz	1 MHz	2.4 MHz	1.8 MHz
Buck-boost	Automático	Seleccionable	Automático	Automático	Automático
Modulación	PFM	PFM/PWM	PWM	PWM	PFM/PWM
Forced Bypass	Y	N	N	N	N
Automatic Bypass	(1% a 2%)	N	N	N	N
Soft start	Y	Y	Y	Y	Y
Iout MAX.	800 mA	500 mA	1.2 A	1.3 A	500 mA
Vin	1.8 V a 5.5 V	2.5V a 5.5V \ 4.2V a 5.5V	2.4 V a 5.5 V	2.5 V a 12 V	2.5 V a 5.5 V
Vout	3.3 V	3.3 V	2.4 V a 5.25 V	2.5 V a 8 V	3.3 V
Empaquetado	12-TQFN	CSP-12	12-DFN	10-WSON	CSP-12
Eficiencia	96%	93%	92%	90%	93%

Quiescent current	41 uA	260 µA	40 uA	60 uA	280 uA
Protección de sobre temperatura	Y	Y	Y	Y	Y
Protección de sobre y baja tensión	Y	Y	N	Y	Y
Bloqueo por bajo voltaje	Y	Y	N	Y	Y
Protección de sobre corriente	Y	Y	Y	Y	Y
Exactitud de voltaje de salida	-3% a 4%	±1.5%	-	0.5%	±1.5%
Ivin	55 uA	-	900 uA	-	-
ISD	1 uA	5 µA	1 uA	2 uA	10 uA
I_BY P	3.5 uA	-	-	-	-
Precio ¹³ [USD]	\$2.38*	\$2,33*	\$9,6*	\$2,7*	\$1.6*

Tabla 21: Comparación de reguladores buck-boost disponibles en el mercado.

El integrado **ISL9120IRTNZ** cambia automáticamente entre buck y boost, posee función de bypass cuando la tensión de entrada está próxima a los 3.3 V, requiere mínimos componentes externos (un inductor y dos capacitores), su eficiencia es la mejor tanto para grandes cargas como para pequeñas y presenta los menores consumos tanto en modo shutdown como de quiescent current. Estas ventajas hacen que sea elegido para ser utilizado en el sistema, en la **Figura 23** se puede ver el mismo y su hoja de datos en **[DR-17]**.

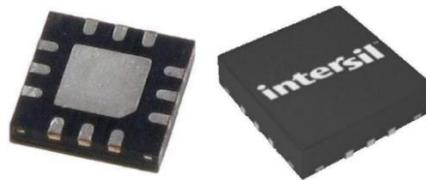


Figura 23: regulador buck-boost ISL9120IRTNZ.

¹³ Precios tomados de: *digkey.com

Capítulo 3: Desarrollo de subsistemas

En este capítulo se desarrollarán todo los subsistemas, las conexiones eléctricas, el PCB y se mostrará el prototipo realizado.

3.1 Alimentación

El diagrama eléctrico del cargador de batería se realizó siguiendo el circuito de aplicación típica dada por el fabricante en la hoja de datos del cargador de batería Li-ion CN3065. Este se puede ver en la **Figura 24**.

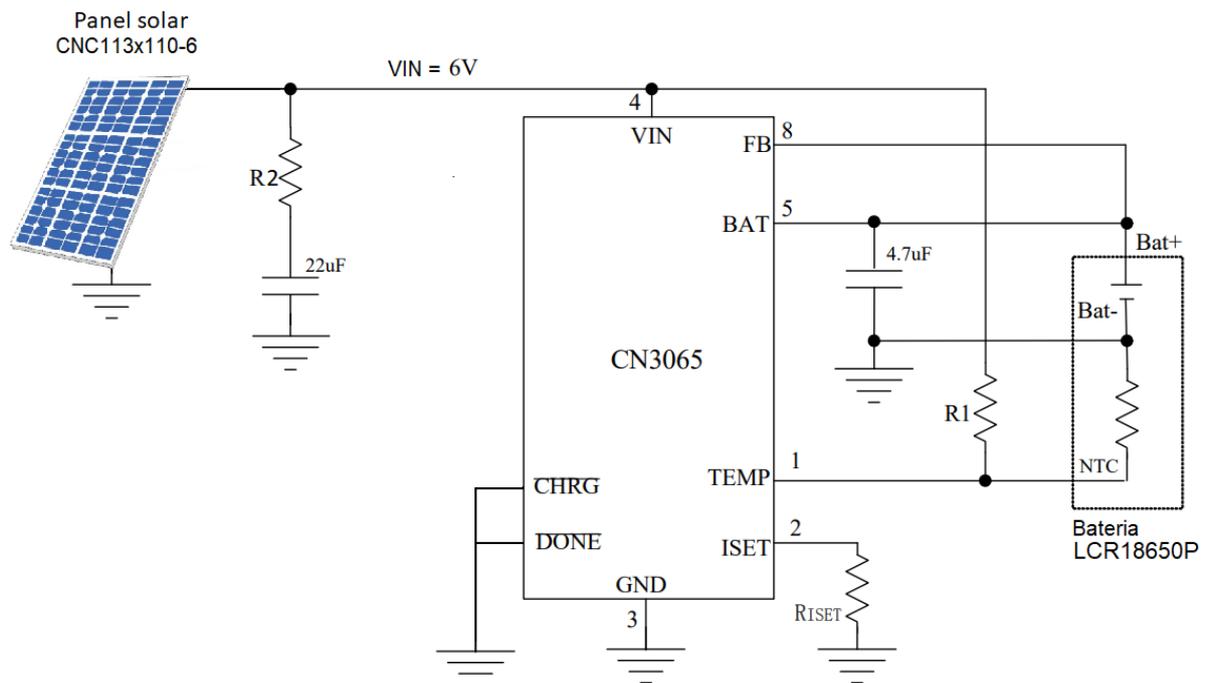


Figura 24: Circuito de carga para la batería.

La resistencia R1 forma un divisor resistivo con el termistor NTC de forma que la tensión en TEMP (PIN 1 del integrado) sea menor al 46% de VIN cuando la temperatura en la batería no supere los 45°C. Esta es la temperatura máxima de carga que recomienda el fabricante de la batería de LI-ion seleccionada LCR18650. Cuando la tensión en TEMP es mayor al 46% de VIN, se detiene la carga de la batería actuando como protección de la misma y contra incendio. Se eligió un termistor NTC de 1000 kΩ a 25°C con coeficiente de $\beta=4608$ K el cual presenta una resistencia dada por (3) a 45°C:

$$R_{45^{\circ}C} = 1000K\Omega * e^{\beta\left(\frac{1}{273,15+45} - \frac{1}{273,15+25}\right)} \approx 378 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

Conociendo el valor de resistencia del termistor a 45°C se determinó R1 de (4), (5) y (6):

$$0,46 * V_{IN} = \frac{R_{45^{\circ}C} * V_{IN}}{R_{45^{\circ}C} + R1} \quad (4)$$

$$R1 = \frac{R_{45^{\circ}C}}{0,46} - R_{45^{\circ}C} \quad (5)$$

$$R1 \approx 442 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

La resistencia $R2 = 2 \Omega$ limita la corriente inicial en el capacitor de $22 \mu\text{F}$, de esta forma se evita que se generen picos de tensión producidos por la energía acumulada en la inductancia del cableado que va desde el panel hacia el integrado. Si bien la inductancia depende del largo del cable y en este caso el cable será de poca longitud, el fabricante recomienda en la nota de aplicación **[DR-29]** colocar una resistencia del orden de los 0,5 a 2Ω . El panel solar puede presentar baja o alta impedancia dependiendo si se encuentra en la región de voltaje o de corriente constantes respectivamente. Algunos cargadores como el LTC4162 **[DR-30]** exigen a los paneles solares la máxima corriente llevándolos a la región de corriente constante. Para tales casos la resistencia $R2$ en serie con el capacitor de $22 \mu\text{F}$ forma un filtro RC que permite mantener una impedancia constante a baja frecuencia permitiendo de esta forma que el lazo de regulación de voltaje sea estable y evitando restablecimientos de bloqueo por bajo voltaje. En el caso particular del regulador CN3065 al poseer un ADC de 8 bits puede ajustar la corriente de carga automáticamente basado en la capacidad de salida de la fuente de alimentación, por lo que es ideal para ser utilizados para aplicaciones con paneles solares.

La resistencia R_{iset} se determina mediante (9) donde la corriente pico (IMP) es dada por el panel solar (ver panel CNC136X110-6 **Tabla 10**).

$$R_{iset} = \frac{1800 \text{ V}}{IMP} \quad (7)$$

$$R_{iset} = \frac{1800 \text{ V}}{333 \text{ mA}} \quad (8)$$

$$R_{iset} \approx 5600 \Omega \quad (9)$$

Los componentes del circuito de carga de batería se pueden ver en la **Tabla 22**:

Componentes	Fabricante	Modelo	Proveedor	Descripción
Panel solar	-	CN113x110-6	Aliexpress	Panel solar 6 V, 333 mA
Cargador	Consonance	CN3065	Aliexpress	Cargador de Li-ion
R1	Vishay	CRCW1206442KFKEA	Mouser	Resistencia 442 K Ω , SMD 1206
R2	Panasonic	ERJ-8BQF2R0V	Mouser	Resistencia 2 Ω , SMD 1206
RISSET	Vishay	TNPW12065K56BEEN	Mouser	Resistencia 5600 Ω , SMD 1206

C1	KYOCERA AVX	1206YD226MAT2A	Mouser	Capacitor 22 uF, 16 V, cerámico, SMD 1206
C2	KYOCERA AVX	1206YC475K4T2A	Mouser	Capacitor 22 uF, 16 V, cerámico, SMD 1206
NTC	Semitec	105NT-4-R025H46G	Mouser	1000 kΩ, β= 4608 K

Tabla 22: Componentes del circuito cargador de batería.

3.1.1 Regulador de tensión

El diagrama eléctrico del regulador de tensión se realizó siguiendo el circuito de aplicación típica dada por el fabricante en la hoja de datos del regulador buck-boost ISL9120IRTNZ [DR-17]. Este se puede ver en la **Figura 25**.

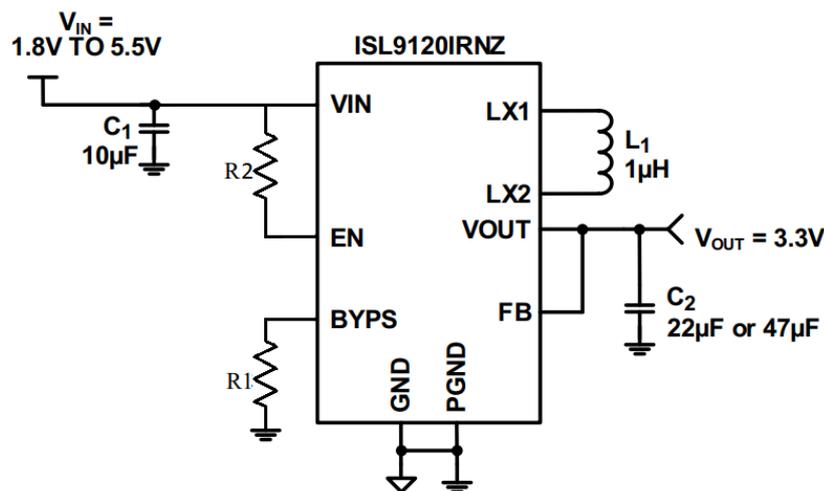


Figura 25: Circuito de regulación de voltaje.

Se conecta el pin EN (ENABLE) a HIGH para habilitar al regulador y se pone el pin BYPS (BYPASS) a LOW para deshabilitar la función de forced bypass de esta forma el integrado funciona como un regulador Buck-Boost (en caso contrario, no hay regulación de tensión entre entrada y salida). Para ambas configuraciones se elige un valor alto de resistencias R1 y R2 para minimizar los consumos. Como este modelo entrega una tensión fija de 3,3 V se conecta el pin FB directamente al pin VOUT.

Los componentes del circuito de regulación de tensión se pueden ver en la **Tabla 23**:

Componentes	Fabricante	Modelo	Proveedor	Descripción
Regulador	Renesas	ISL9120IRTNZ	Mouser	Regulador buck-boost
C1	KYOCERA AVX	1206YD106KAT2A	Mouser	Capacitor cerámico 10 uF, X5R, 16 V, SMD 1206
C2	KYOCERA AVX	CM316X5R226M16AT	Mouser	Capacitor cerámico 22 uF, X5R, 16 V, SMD 1206

L1	Bourns	SRP1038WA-1R0M	Mouser	Inductor 1uH, blindado, 26 A
R1	KOA Speer	HV73V2BTDD105J	Mouser	Resistencia 1 MΩ, smd 1206, 5%
R2	KOA Speer	HV73V2BTDD105J	Mouser	Resistencia 1 MΩ, smd 1206, 5%

Tabla 23: Componentes para el circuito de regulación.

El sistema debe poder alimentarse siempre que sea posible del panel solar y cuando no lo sea, tendrá de respaldo la batería. De esta forma el regulador de tensión se conecta al panel solar y a la batería a través del MOSFET **MOS1** de canal P y del diodo **DSH1** como se muestra en la **Figura 26** (acorde a la nota de aplicación AN1149 de Microchip [DR-31]).

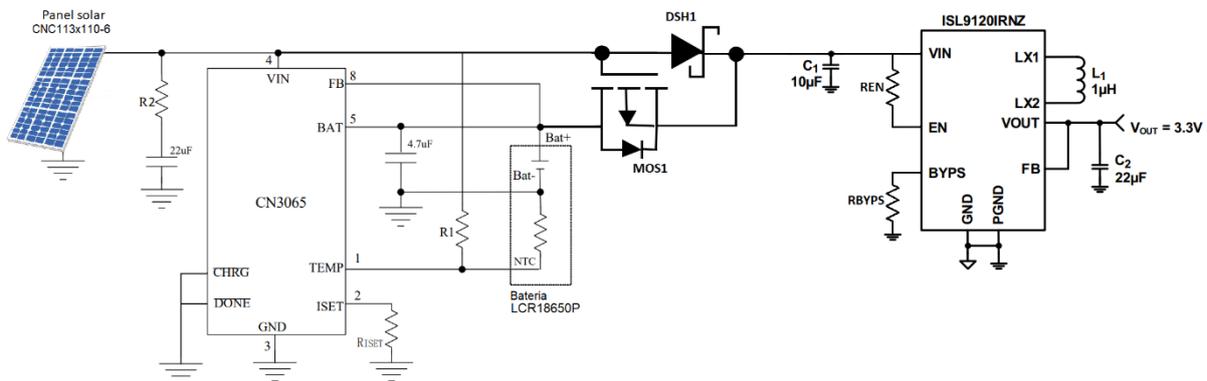


Figura 26: Conexión del cargador de batería y el regulador de tensión.

El MOSFET **MOS1** de la **Figura 26** permite que el panel solar sea la fuente de energía por defecto y habilita como segunda opción a la batería cuando la capacidad del panel no es suficiente para energizar el sistema. El diodo evita que haya una corriente inversa desde la batería al panel solar y es elegido para minimizar la corriente de fuga y la caída de tensión en directa. En la **Figura 27** se simula lo explicado anteriormente: como se puede ver cuando la tensión del panel es máxima (Caso 1) **MOS1** no conduce mientras que cuando está por debajo de 2.2 V (Caso 2), **MOS1** conduce y la batería energiza el sistema.

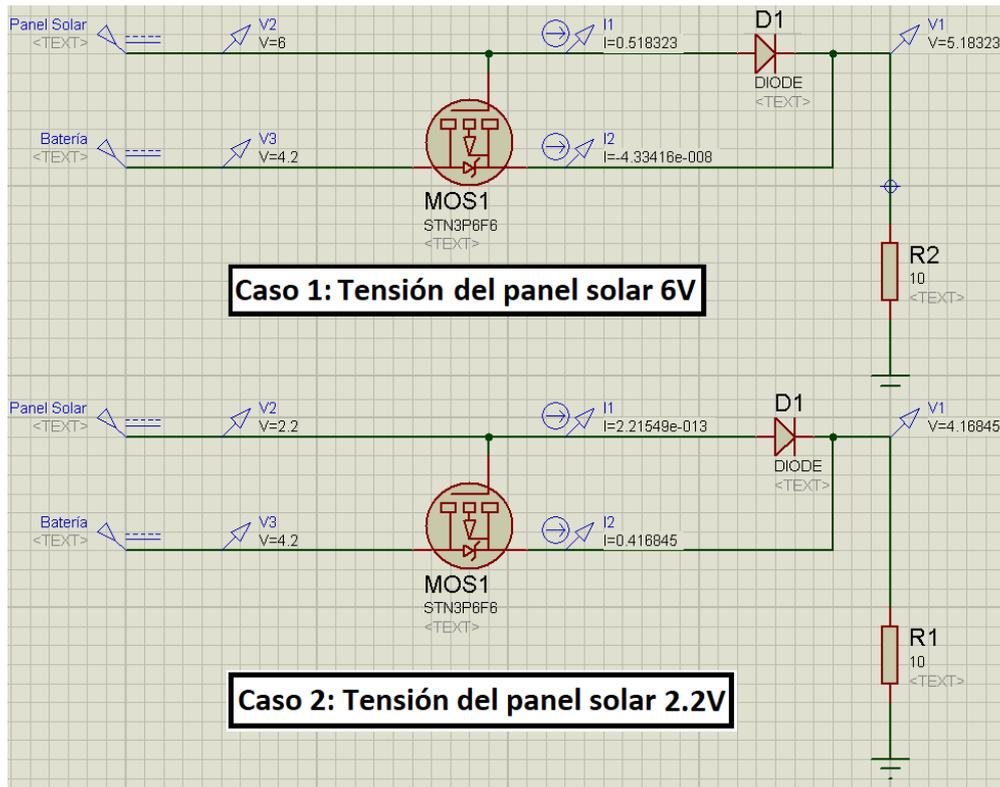


Figura 27: Simulación, cambio de fuente de alimentación.

Los componentes necesarios para cambiar entre una fuente de alimentación y la otra se muestran en la **Tabla 24**:

Componentes	Fabricante	Modelo	Proveedor	Descripción
MOS1	STMicroelectronics	STN3P6F6	Mouser	MOSFET, canal P 60 V, 0.13 Ohm 3 A
DSH1	Diodes Incorporated	PD3S230HQ-7	Mouser	Diodo Schottky, IF 2 A, VR 30 Vrrm, IFSM 30 A, VF 0.6

Tabla 24: componentes para intercambio de fuente de alimentación.

3.2 Procesamiento

El diagrama eléctrico del módulo procesamiento se realizó en base a la hoja de datos del módulo EESAMR34 y de la placa carrier del mismo fabricante. El mismo se puede ver en la **Figura 28**:

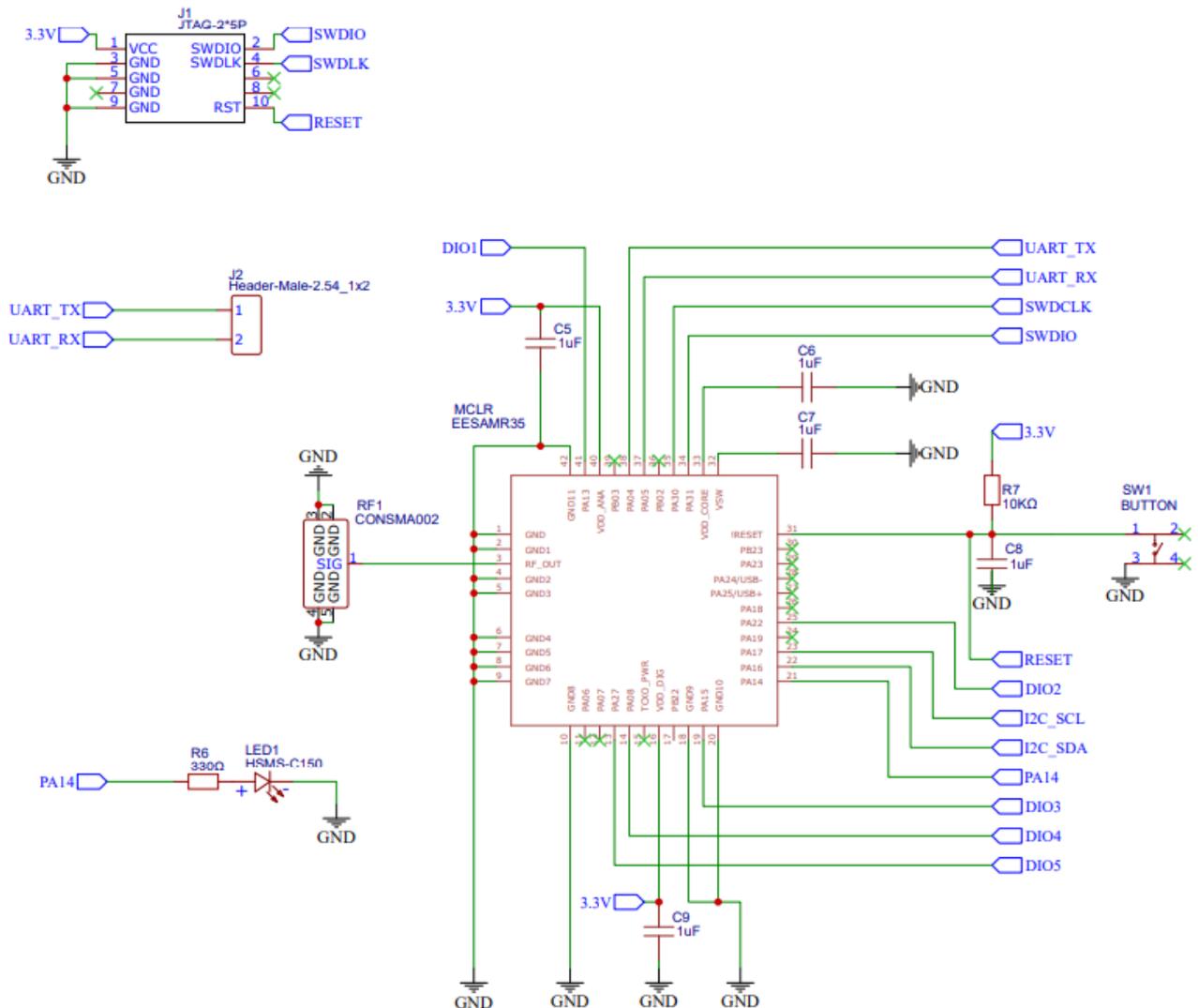


Figura 28: Modulo de procesamiento.

El header J1 se utiliza para la programación del micro controlador mientras que el header J2 está pensado como interfaz de depuración a través de un puerto serie. El LED con etiqueta LED1 es de propósito general y puede ser utilizado para indicar que el microcontrolador esta energizado o parpadear cuando se reciben datos por UART, SPI o I2C. El botón SW1 se utiliza como reset del microcontrolador. Las líneas con etiquetas UART_TX, UART_RX, I2C_SCL y I2C_SDA son utilizadas para la comunicación con los sensores, las conexiones con estos pueden verse en la **Figura 29**. Las restantes líneas con etiquetas DIO1, DIO2, DIO3, DIO4 y DIO5 se utilizan para el accionamiento de los actuadores, en las **Figura 30** y **Figura 31** se pueden ver las conexiones de los mismos.

3.3 Sensores

En la **Figura 29** se muestra el diagrama eléctrico del módulo de sensores, en el mismo se representa los módulos de pulso cardiaco (**MAX30102**), temperatura (**MLX90614**), GNSS (**GY-GPS6MV2**), IMU (**ICM-20948**)

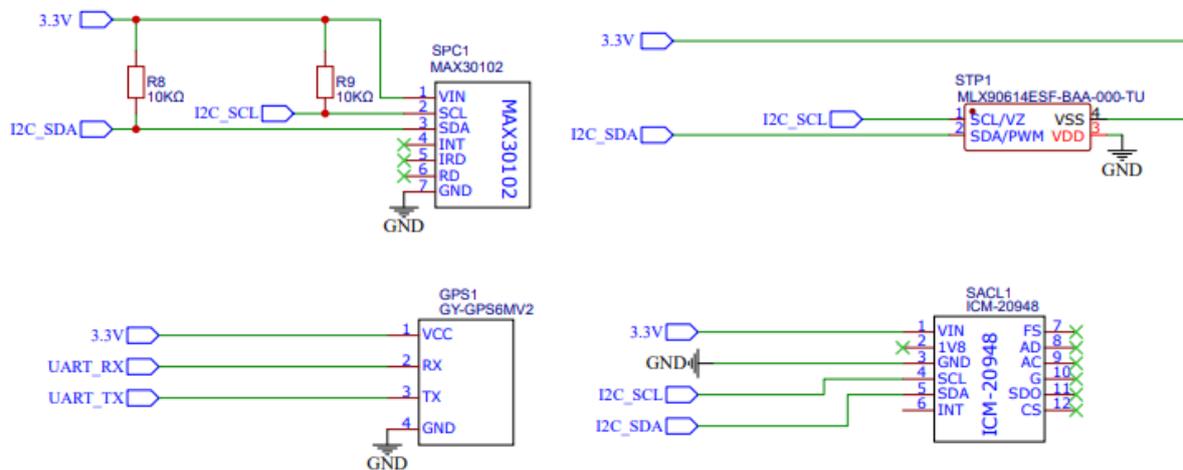


Figura 29: Conexión de sensores.

3.4 Actuadores

3.4.1 Actuadores Aversivos

En la **Figura 30** se muestra el diagrama eléctrico de los actuadores aversivos:

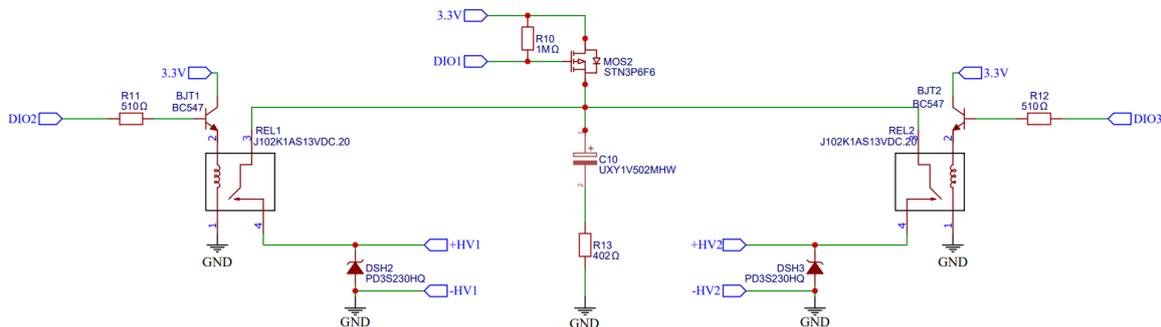


Figura 30: Actuadores Aversivos.

El capacitor **C10** de la **Figura 30** se utiliza para alimentar los módulos de alta tensión permitiendo que el pico de corriente que debe entregar el panel solar o en su defecto la batería, sea suave. El MOSFET **MOS2** de canal P se mantiene como una llave abierta y solo se cierra cuando el PIN **DIO1** cambia de estado de alta impedancia al de LOW. Esto último sucede por un periodo de 20 s, tiempo que le lleva al capacitor cargar la energía suficiente para una descarga eléctrica (de 20 ms de duración), generada por alguno de los módulos de alta tensión los cuales se sueldan a los pads representados con las etiquetas **±HV1** y **±HV2**.

Una vez que el capacitor se carga, el MOSFET **MOS2** deja de conducir (es decir **DIO1** pasa a estado LOW) y en un instante posterior se acciona el relé 1 (**REL1**) o el relé 2 (**REL2**) dependiendo si se requiere que el estímulo eléctrico sea aplicado en el lateral derecho del cuello del animal o el izquierdo. Para poder accionar los relés se utilizan los transistores **BJT1** y **BJT2** operando en saturación, el diodo en paralelo a cada módulo de alta tensión sirve para descargar cualquier posible energía inductiva acumulada en los módulos. Considerando un tiempo de descarga de 20 ms, una alimentación con 3,3 V (se considera despreciable la tensión entre VDS de los MOSFET) y una corriente¹⁴ de 364 mA se tiene que la energía que debe acumular el capacitor está dada por (10):

$$E = P * t = I * V * t = 364 \text{ mA} * 3,3 \text{ V} * 20 \text{ ms} = 24 \text{ mJ} \quad (10)$$

Por lo tanto la capacidad de C10 se determina como (11) y (12):

$$\frac{1}{2} C_{10} V^2 = 24 \text{ mJ} \quad (11)$$

$$C_{10} \approx 5 \text{ mF} \quad (12)$$

La resistencia R13 limita la carga del capacitor para no exigir que el panel solar o batería suministren la energía necesaria para una descarga eléctrica de forma instantánea. De esta forma teniendo una disponibilidad de descarga eléctrica cada $\tau = 20 \text{ s}$, la resistencia **R13** se calcula como (13) y (14) donde 10τ representa la carga del capacitor en un 99.3%.

$$10 * \tau = 10 * R13 * C_{10} = 20 \text{ s} \quad (13)$$

$$R13 = \frac{20 \text{ s}}{10 * 5 \text{ mF}} \approx 400 \Omega \quad (14)$$

La resistencia R11 y R12 se calcula como (15) para tener una corriente inicial en la base de los transistores BJT1 y BJT2 de aproximadamente 5mA lo que produce que los mismos trabajen en saturación con una tensión VCE de aproximadamente 0,25 V.

$$R_{11-12} = \frac{3,3 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{I_{Sat}} = \frac{3,3 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{5 \text{ mA}} \approx 510 \Omega \quad (15)$$

3.4.2 Actuadores sonoros

En la **Figura 31** se muestra el diagrama eléctrico de los actuadores sonoros:

¹⁴ Esta es la corriente media del módulo de alta tensión como se puede ver en [DR-8].

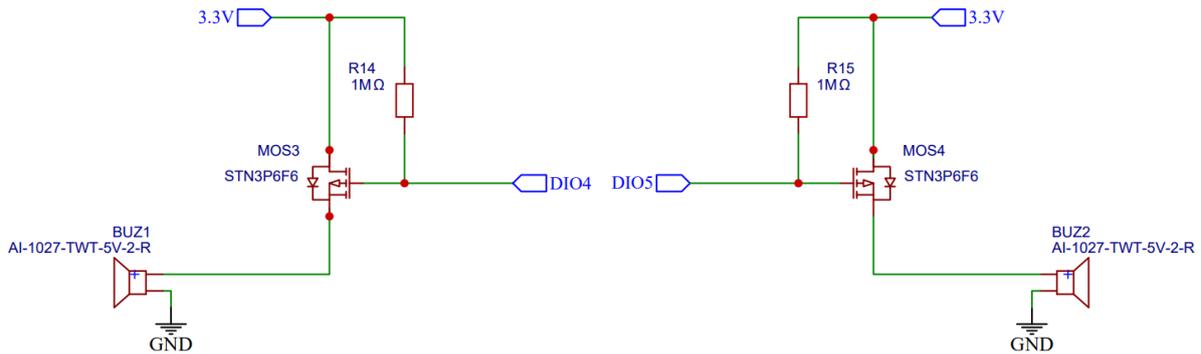


Figura 31: Actuadores sonoros.

Los buzzers BUZ1 y BUZ2 de la **Figura 31** se accionan mediante los MOSFET MOS3 y MOS4 los cuales funcionan como una llave abierta que solo se cierra cuando el PIN DIO4 o DIO5 cambia del estado de alta impedancia al de LOW. Las resistencias R14 y R15 se eligen de valores altos (1 MΩ) para minimizar los consumos debido a las corrientes de fugas.

La lista completa con los componentes utilizados en los módulos de procesamiento, sensores y actuadores se puede ver en la **Tabla 25**:

Componentes	Descripción	Fabricante	Modelo	Proveedor
J1	Pines Header 2*5, 1.27 mm	Harwin	M50-3500542	Mouser
J2	2 pines header 2,54 mm	Chip Quik	HDR100IMP40M-G-V-TH	Mouser
RF1	Conector SMA, angulo recto para PCB	Linx Technologies	CONSMA002	Mouser
LED1	Led naranja	Broadcom / Avago	HSMD-C150	Mouser
MCLR	Microcontrolador con transceptor LoRa	Elemon	EESAMR34/35J18XX/CT	Elemon
SW1	SWITCH PUSH BUTTON 12 VDC 1 VA	TE Connectivity / Alcoswitch	FSM2JSMAATR	Mouser
C5,C6,C7,C8,C9	Capacitor 1 uF, smd 1206, 25 V	Vishay / Vitramon	VJ1206Y105KCXAT	Mouser
C10	Capacitor electrolítico 5 mF, 35 V	Nichicon	UXY1V502MHW	Mouser
R6	Resistor 330 Ω, smd 1206	Vishay / Thin Film	PHPA1206E3300BST1	Mouser
R7,R8,R9	Resistor 10 kΩ, smd 1206	IRC / TT Electronics	WIN-T1206LF-03-1002-B	Mouser

R11,12	Resistor 510 Ω , smd 1206	Vishay / Dale	CRCW1206510RJNEAIF	Mouser
R10,R14,R15	Resistencia 1M Ω , smd 1206	KOA Speer	HV73V2BTDD105J	Mouser
R13	Resistencia 402 Ω , smd 1206	Vishay / Dale	CRCW1206402RFKEAC	Mouser
BJ1, BJ2	Transistor BJT 547, 100mA	onsemi / Fairchild	BC547B	Mouser
MOS2,MOS3,MOS4	MOSFET, canal P 60 V, 0.13 Ohm 3 A	STMicroelectronics	STN3P6F6	Mouser
DSH2,DSH3	Diodo schottky, Vf = 0,6 V, If = 2, Vbr= 30 V	KYOCERA AVX	1206YD106KAT2A	Mouser
REL1,REL2	Relé SPST N.O., 3 VDC, .2 W	CIT Relay and Switch	J102K1AS13VDC.20	DigiKey
SPC1	Sensor de pulso cardiaco	DFRobot	SEN0344	Mouser
STP1	Sensor de temperatura	Melexis	MLX90614ESF-BAA- 000-TU	Mouser
SACL1	Sensor acelerómetro	Adafruit	4554	Mouser
SACL1	Módulo de alta tensión	TIANWANG	TW-G-AF-DP	Alibaba
GPS1	Módulo GNSS	-	GY-GPS6MV2	Alibaba

Tabla 25: Componentes de los subsistemas Procesamiento, sensores y actuadores.

3.5 PCB

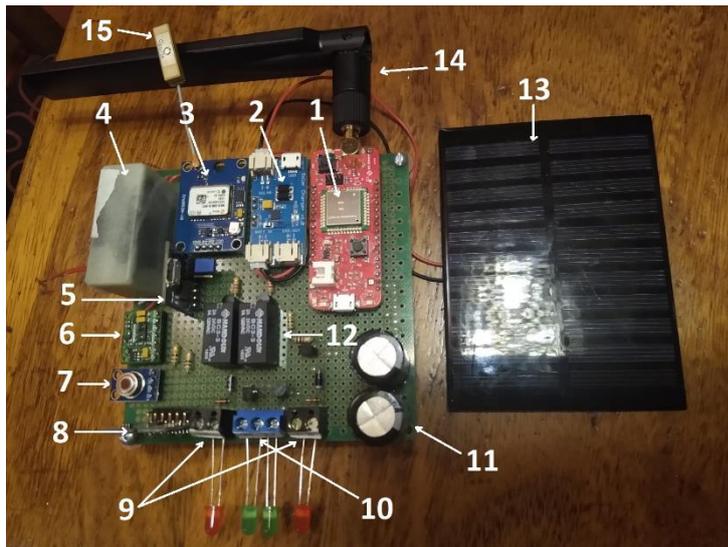
Con el esquemático eléctrico finalizado se procedió al diseño del PCB el cual se puede ver en la **Figura 32** (cara TOP) y **Figura 33** (cara BOTTOM). El mismo fue realizado de forma online con la herramienta Open Source EASYEDA, la cual permite realizar esquemáticos y PCB con la contribución de uno de los mayores distribuidores de componentes electrónicos en China; LCSC componentes, el fabricante líder mundial de PCB; JLCPCB y más de 3 millones de usuarios en todo el mundo. El nombre **PASTOR E** fue el utilizado en la presentación de concurso **IB50K**.

En cuanto a las consideraciones para el diseño del PCB y elección de los componentes pasivos se siguieron las siguientes reglas:

- Los capacitores se C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9 se localizan lo más cerca de los integrados y se unen a GND con la conexión lo más corta posible y en la capa de componentes para evitar problemas causados por las altas corrientes de conmutación que fluyen a través de las vías del PCB.
- EL NTC y la batería se colocan juntos alejados del PCB y soldado a pads sobre el mismo.
- Las pistas se hacen lo más anchas posibles para permitir disipar calor teniendo en cuenta la capacidad de fabricación de empresas locales. Las pistas que transportan corriente grande se diseñan en función de la potencia que transportan y se minimizan la longitud de los lazos de retorno para reducir el ruido radiado.
- Se agregan vías siempre que sea posible para mejorar el rendimiento térmico y que la impedancia del plano de GND sea uniforme para minimizar diferencias de potencial debido a las corrientes que circulan por el mismo.
- El pad en la parte de debajo de los integrados de carga de batería y regulación de tensión se suelda a ground con la mayor área posible con el fin de mejorar la disipación de calor.
- Tamaño de componente resistivos y capacitivos 1206 para facilitar el soldado manual de los mismos.
- Se eligen condensadores de entrada y salida de cerámica tipo X5R, de 16V con ESL y ESR bajos como recomienda el fabricante de cada integrado.
- Se elige un inductor con corriente de saturación mayor a 2A, bajo DCR para proveer buena eficiencia y del tipo blindado para reducir el ruido radiado.
- La pista que conecta e terminal de la antena con el transceptor se realiza de una longitud $\frac{\lambda}{4}$ y de un ancho adecuado para adaptar la impedancia y evitar reflexiones.

3.6 Prototipo

Debido a que el laboratorio de electrónica de la universidad no dispone de la posibilidad de realizar compras al exterior se decidió no realizar la construcción del PCB por la falta de algunos componentes. En su lugar, para las pruebas funcionales finales, se sustituye el mismo por una placa perforada y se construye el prototipo utilizando todos los módulos comerciales disponibles, el mismo puede verse en la **Figura 34**. Como se puede apreciar el prototipo permite validar la funcionalidad de todos los módulos seleccionados exceptuando la unidad de medición inercial (reemplazado por Pmod NAV TDK de 9 ejes **[DR-33]**) y el conversor buck-boost. Sin embargo el **IMU** empleado posee la misma interfaz de comunicación y es de 9 ejes por lo que permite una validación de conceptos. En cuanto al regulador buck boost, no tendrá validación funcional en el presente documento, no obstante la misma puede realizarse fácilmente con la utilización de la placa comercial de evaluación ISL9120IIX-EVZ la cual tiene como propósito la evaluación de las características de rendimiento del regulador en cuestión.



Referencias:

1. MCU + LoRa: EESAMR35.
2. Cargador Li-ION: CN3065.
3. GPS: NE06MV2.
4. Módulo de alta tensión: TW-DC-DP.
5. Conversor UART a USB.
6. Sensor de pulso cardíaco: MAX30100.
7. Sensor de temperatura: MLX90614.
8. IMU de 9 ejes: PmodNAV.
9. Borneras para actuadores sonoros.
10. Borneras para actuadores de alta tensión.
11. Capacitores 2200uF.
12. Relés 3V
13. Panel Solar 110x80mm.
14. Antena SMA 915MHz.
15. Antena GPS.

Figura 34: Prototipo con módulos comerciales.

Capítulo 4: Programación

En este capítulo se realiza la programación del sistema y se demuestra la funcionalidad de código realizado.

4.1 Entorno de programación

Para la programación del sistema se utilizó el entorno de desarrollo de Microchip Studio, partiendo del uso de ejemplos extraídos de Microchip **ASF** (Advanced Software Framework) la cual proporciona una amplia gama de funciones y componentes para el desarrollo de aplicaciones para microcontroladores. ASF se basa en un modelo de capas para organizar y proporcionar acceso a las diferentes características y periféricos del microcontrolador. Principalmente se utilizó la capa de drivers que proporciona controladores de periféricos de bajo nivel para la comunicación directa con los periféricos del microcontrolador, como **UART**, **SPI**, **I2C**, **ADC**, etc. Estos controladores permitieron simplificar la configuración y el uso de los periféricos, al ofrecer una interfaz de programación coherente y abstracta.

Para cargar el software en el chip ESAMR35 se utilizó la placa de programación **ATMEL ICE** **Figura 35**.



Figura 35: Placa ATMEL ICE.

4.2 Sensor Temperatura

La lectura de temperatura se realiza mediante la comunicación I2C entre el módulo de procesamiento **EESAMR35** y el sensor de temperatura **MLX90614**. La **Figura 36** resume las operaciones necesarias para obtener los datos del sensor:

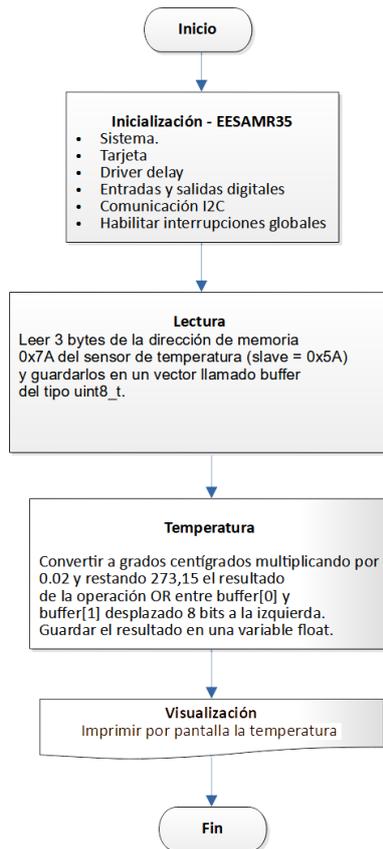


Figura 36: Diagrama de flujo - Lectura de temperatura.

El paso a paso del diagrama de la **Figura 36** es explicado con más detalle a continuación:

1. Realizar todas las inicializaciones correspondientes: sistema, tarjeta, driver delay, entradas, salidas, comunicación I2C y habilitar las interrupciones globales.
2. Realizar una operación de escritura indicando ID del slave (ID slave = 0x5A), dirección de memoria RAM a leer (Temperatura objeto = 0x7A o temperatura ambiente = 0x6A) y la cantidad de bytes que se escriben en esta operación (Cantidad de bytes =1).
3. Realizar una operación de lectura indicando ID del slave (ID slave = 0x5A), dirección donde se guardaran los datos (variable vector tipo uint8_t con longitud igual a 3) y cantidad de bytes a leer (es necesario leer 3 bytes).
4. Procesar los datos leídos extrayendo los dos primeros bytes y convirtiendolos a °C tal como se realiza a continuación, donde buffer es el vector declarado en el paso anterior:

```
float temp = ((uint16_t)buffer[0] | (uint16_t)(buffer[1] << 8)) * 0.02 - 273.15;
```

Una vez realizados los pasos anteriormente descriptos, la temperatura puede ser visualizada imprimiéndola por pantalla como se muestra en la **Figura 37** donde se puede ver la temperatura medida a través de un dedo índice a una distancia de 2 cm del sensor.

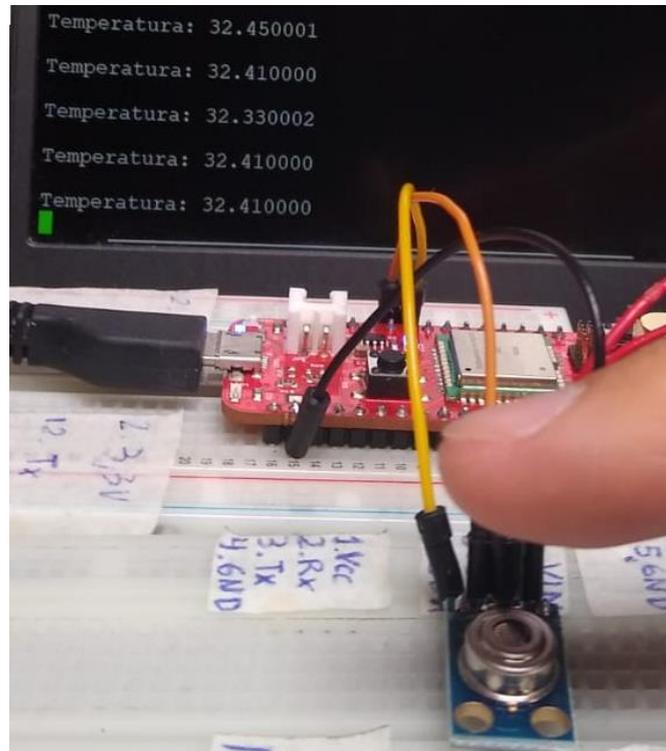


Figura 37: Medición de temperatura.

Las conexiones entre la placa carrier y el sensor se pueden ver en la **Tabla 26**.

Sensor MLX90614 [DR-10]	Carrier EESAMR35 [DR-13]
VIN	PIN 2 (JP1)
GND	PIN 15 (JP1)
SCL	PIN 3 (JP3)
SDA	PIN 4 (JP3)

Tabla 26: Conexiones placa Carrier / MLX90614.

4.3 Sensor Cardíaco

La lectura de pulso cardíaco se realiza mediante la comunicación I2C entre el módulo de procesamiento **EESAMR35** y el sensor **MAX30100**. La **Figura 38** resume las operaciones necesarias para obtener los datos del sensor:

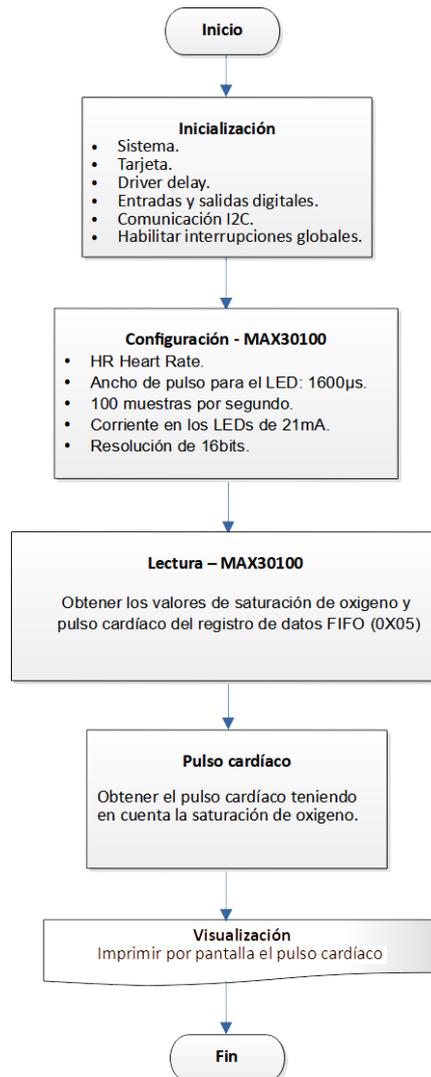


Figura 38: Diagrama de flujo - Lectura de pulso cardíaco.

El paso a paso del diagrama de la **Figura 38** es explicado con más detalle a continuación:

1. Realizar todas las inicializaciones correspondientes: sistema, tarjeta, driver delay, entradas, salidas, comunicación I2C y habilitar las interrupciones globales.
2. Configurar el sensor MAX30100 como HR Heart Rate escribiendo el valor 0x02 en el registro 0x06. Indicar la dirección de slave como 0x57.
3. Realizar una lectura del registro SpO2 Configuración (0x07) y guardar el valor del mismo en una variable del tipo uint8_t. Realizar una operación AND con este valor y 0xFC para limpiar los dos bits menos significativos, con este resultado realizar una operación OR con 0x03. Finalmente escribir el ultimo resultado en el registro SpO2 Configuration

(0x07). De esta forma se configura un ancho de pulso para el LED de 1600µs, en caso de querer otro ancho reemplazar el valor 0x03 por otro indicado en: Table 5. LED Pulse Width Control **[DR-32]**.

4. Realizar una lectura del registro SpO2 Configuration (0x07) y guardar el valor del mismo en una variable del tipo uint8_t. Realizar una operación AND con este valor y 0XE3 para limpiar los bits 2, 3 y 4. Con este resultado realizar una operación OR con (0x01<<2). Finalmente escribir el ultimo resultado en el registro SpO2 Configuration (0x07). De esta forma se configura 100 muestras por segundo, en caso de querer otra tasa de muestreo, reemplazar el valor 0X01 por otro indicado en: Table 4. SpO2 Sample Rate Control **[DR-32]**.
5. Realizar una escritura en el registro LED Configuration (0x09) con el resultado de la operación (0x06 << 4) | 0x06 para configurar una corriente en los LEDs de 21mA. En caso de querer configurar otra corriente reemplazar en la operación 0x06 por otro valor indicado en Table 6. LED Current Control **[DR-32]**.
6. Configurar el bit 6 del registro SpO2 Configuration (0x07) en 1 para una resolución de 16bits necesaria para cuando el ancho del pulso en los LEDs es de 1600us. Para esto, primero leer el valor del registro y con este realizar la operación OR (0x01<<). Finalmente reemplazar el resultado de la operación anterior en el registro indicado.
7. Leer y guardar los valores del puntero de escritura (0x02) y de lectura (0x04) en dos variables del tipo uint8_t. Realizar la resta del puntero escritura y lectura, realizar tantas lecturas de la FIFO (0x05) como el resultado de la resta anterior multiplicado por 4 y almacenar los valores leídos en un vector uint16_t buffer [4]. Formar el valor de pulso cardiaco (irValue) y el valor de saturación de oxígeno (redValue) como se muestra a continuación:

```
uint16_t irValue = (buffer[i * 4] << 8) | buffer[i * 4 + 1];  
uint16_t redValue = (buffer[i * 4 + 2] << 8) | buffer[i * 4 + 3];
```

8. Obtener el pulso cardiaco de la siguiente forma¹⁵:

```
float pulseRate = 60.0 / ((float)irAverage / (float)amplitude);
```

Una vez realizados los pasos descriptos anteriormente, el pulso cardiaco puede ser visualizado por pantalla como se muestra en la **Figura 39** donde se puede ver la medida en pulsación por minuto realizada a través de un dedo índice apoyado sobre el sensor.

El pulso cardiaco debe obtenerse realizando un procesamiento adecuado de la señal que permita encontrar los máximos a partir de un umbral el cual puede variar en el tiempo y que además permita filtrar ruido en las mediciones. Así mismo puede requerir de un constante

¹⁵ Donde IrAverage es el promedio entre irValue + redValue y amplitud es igual a redValue - irValue

ajuste de la intensidad de los leds que permita compensar el efecto de los cambios de presión entre el sensor y el cuerpo del animal. Este procesamiento queda fuera del alcance de este documento sin embargo el promedio empleado entre los valores de pulso cardiaco y saturación de oxígeno dan un valor aproximado y permite validar conceptualmente la funcionalidad del sensor. Las conexiones entra la placa carrier y el sensor se pueden ver en la **Tabla 27**.

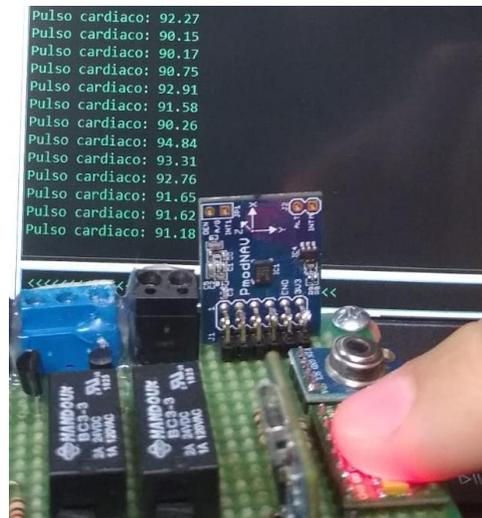


Figura 39: Medición de pulso cardiaco.

Sensor MAX30100 [DR-32]	Carrier EESAMR35 [DR-13]
VIN	PIN 2 (JP1)
GND	PIN 15 (JP1)
SCL	PIN 3 (JP3)
SDA	PIN 4 (JP3)

Tabla 27: Conexión placa Carrier / MAX30100.

4.4 Unidad de medición inercial

Para poder determinar la dirección de desplazamiento del animal se obtendrá la lectura del magnetómetro mediante la comunicación I2C entre el módulo de procesamiento **EESAMR35** y el sensor **PmodNAV**. La **Figura 40** resume las operaciones necesarias para obtener los datos del sensor:

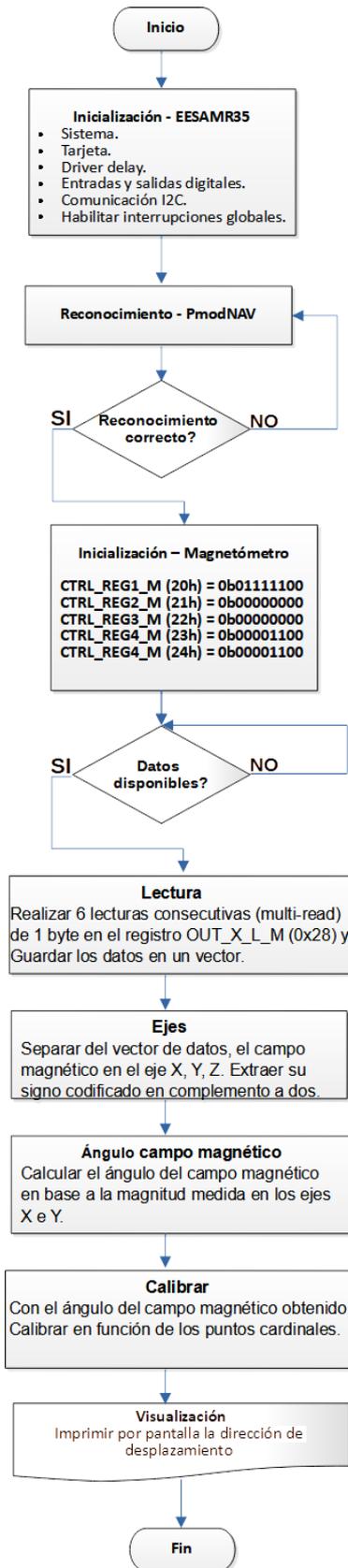


Figura 40: Diagrama de flujo - Lectura magnetómetro.

El paso a paso del diagrama de la **Figura 40** es explicado con más detalle a continuación:

1. Realizar todas las inicializaciones correspondientes a: sistema, tarjeta, driver delay, entradas, salidas, comunicación I2C y habilitar las interrupciones globales.
2. Realizar la inicialización del sensor PmodNAV:
 - Leer del slave con dirección 0x1E (magnetómetro) el registro WHO_AM_I_M (0x0F) y guardar el valor en la variable uint8_t mTest.
 - Leer del slave con dirección 0x6B (acelerómetro y giróscopo) el registro WHO_AM_I_M (0x0F) y guardar el valor en la variable uint8_t xgTest.
 - Realizar la siguiente operación $(xgTest \ll 8) | mTest$ y verificar que el resultado sea distinto de la operación. $(0x68 \ll 8) | 0x3D$. Si se cumple lo anterior continuar con el paso N° 3, caso contrario verificar conexiones y el código.
3. Realizar la inicialización del magnetómetro:
 - Escribir en el registro CTRL_REG1_M (0x20) del slave con dirección 0x1E (magnetómetro), con el resultado de la variable tempRegValue luego de las siguientes operaciones (Self-test : disable, data rate higher than 80Hz: disable: output data rate: 80Hz, mode operation: Ultra-high performance, Temperature compensation: disable):

```
uint8_t tempRegValue =0;
tempRegValue |= ( 3 & 0x3) << 5;
tempRegValue |= ( 7 & 0x7) << 2;
```
 - Escribir en el registro del CTRL_REG2_M (0x21) del slave con dirección 0x1E (magnetómetro), el valor 0x00 (Full-scale :± 4 gauss, Reboot memory content: normal mode, Configuration registers and user register reset function: default).
 - Escribir en el registro del CTRL_REG3_M (0x22) del slave con dirección 0x1E (magnetómetro), el valor de la variable tempRegValue luego de las siguientes operaciones (Low-power mode: default, SPI Serial Interface mode: SPI only write, Operating mode: Continuous-conversion):

```
tempRegValue = 0;
tempRegValue |= ( 0 & 0x3);
```
 - Escribir en el registro del CTRL_REG4_M (0x23) del slave con dirección 0x1E (magnetómetro), el valor de la variable tempRegValue luego de las siguientes operaciones (Big/Little Endian data selection: Lsb, Z-axis operative mode: Ultra-high performance) :

```
tempRegValue = 0;
tempRegValue |= ( 3 & 0x3) << 2;
```

- Escribir en el registro del CTRL_REG5_M (0x24) del slave con dirección 0x1E (magnetómetro), el valor 0x00 (Block data update for magnetic data: continuous update, FAST_READ: disable).
- 4. Leer el registro STATUS_REG_M (0x27) del slave con dirección 0x1E (magnetómetro), y guardar el valor en la variable `uint8_t status`. Luego realizar sobre está la siguiente operación: $((status \& (1 \ll 3)) \gg 3)$. Si el resultado es 1 (X, Y and Z-axis new data available), entonces continuar con el paso N° 5, caso contrario repetir este paso hasta que haya un dato disponible.
- 5. Realizar 6 lecturas consecutivas (multi-read) de 1 byte en el registro OUT_X_L_M (0x28) del slave con dirección 0x1E (magnetómetro). Guardar estos valores en cada posición de la variable `uint8_t read[6]`.
- 6. Extraer de la variable `read` anterior, la magnitud del campo magnético (codificada en complemento a 2) en los ejes x,y,z de la siguiente forma:

```
uint16_t mx = (read[1]<<8) | read[0];  
uint16_t my = (read[3]<<8) | read[2];  
uint16_t mz = (read[5]<<8) | read[4];
```

- 7. Pasar los valores anteriores a variables float con signo y escalarlos por factor de corrección estándar igual a 0.00014 de la siguiente forma:

```
float mmx= 0.00014*complementoAdos(mx);  
float mmy= 0.00014*complementoAdos(my);  
float mmz= 0.00014*complementoAdos(mz);
```

- 8. Calcular el ángulo entre las magnitudes `mmy` y `mmx` de la siguiente forma:

```
float angulo = mmy/mxz;  
float anguloRad = atan(angulo);
```

- 9. Como la función `atan` solo devuelve valores entre -90° y $+90^\circ$ será necesario utilizar una brújula de mano para calibrar con funciones condicionales el punto cardinal hacia el cual apunta uno de los ejes del sensor en función de la lectura del mismo. A continuación se muestra un ejemplo acorde a los valores interpretados la dirección Norte:

```
float anguloDeg = anguloRad*180/3.14159265;  
if ((338 < anguloDeg && anguloDeg < 360) || 0 < anguloDeg && anguloDeg < 3 ) {  
    char puntoCardinal[] = "N";  
    printf("Punto cardinal: %s\n",puntoCardinal);  
}
```

Una vez realizados los pasos descriptos anteriormente, la dirección de desplazamiento puede ser visualizada por pantalla como se muestra en la **Figura 41** donde se muestra que la misma es correcta empleando una brújula de mano. Los pasos anteriores son equivalentes

para la lectura del acelerómetro y giróscopo solo debe hacerse un cambio en la dirección del slave y en la de los registros de control.

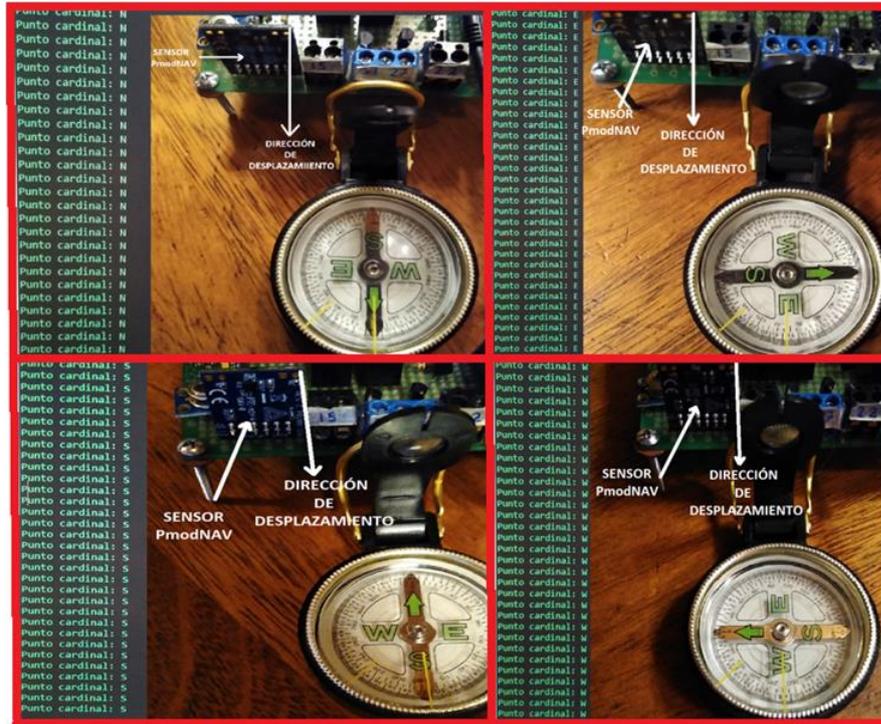


Figura 41: Medición del magnetómetro.

La conexiones entra la placa carrier y el sensor se pueden ver en la **Tabla 28**.

Sensor PmodNAV [DR-33]	Carrier EESAMR35 [DR-13]
VIN	PIN 2 (JP1)
GND	PIN 15 (JP1)
SCL	PIN 3 (JP3)
SDA	PIN 4 (JP3)

Tabla 28: Conexión placa Carrier / PmodNAV.

4.5 GNSS

Para poder determinar ubicación geográfica del animal se obtendrá la lectura del GNSS mediante la comunicación UART entre el módulo de procesamiento **EESAMR35** y el sensor **NEO6MV2**. La **Figura 42** resume las operaciones necesarias para obtener los datos del sensor:

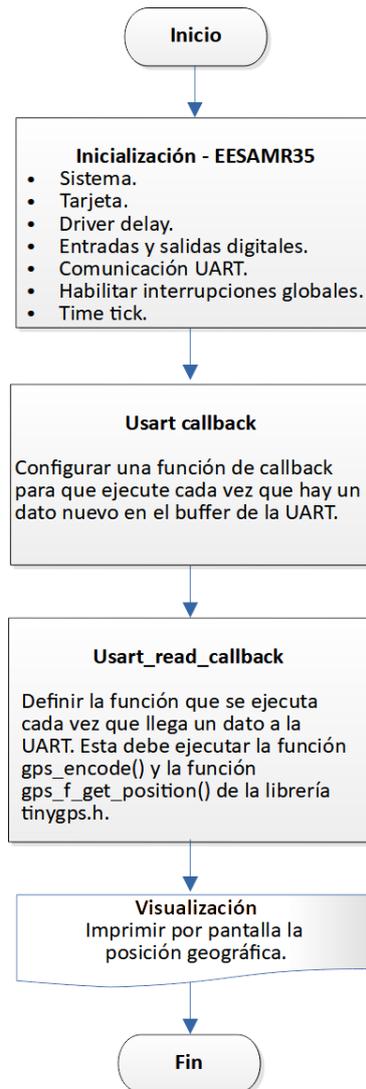


Figura 42: Diagrama de flujo - Lectura GNSS.

El paso a paso del diagrama de la **Figura 42** es explicado con más detalle a continuación:

1. Realizar todas las inicializaciones correspondientes a: sistema, tarjeta, driver delay, entradas, salidas, comunicación UART y habilitar las interrupciones globales.
2. Configurar la función usart callback para que ejecute la función usart_read_callback() de la siguiente forma:

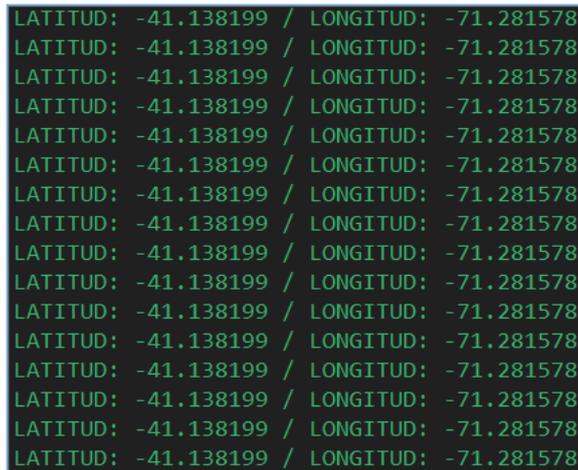
```
usart_register_callback(&usart_instance, usart_read_callback, USART_CALLBACK_BUFFER_RECEIVED);  
usart_enable_callback(&usart_instance, USART_CALLBACK_BUFFER_RECEIVED);
```

3. Inicializar time tick con la función time_tick_init() de la librería time_tick.h.
4. Definir una variable volátil char GPS.

5. Utilizar la función `usart_read_job` de la librería `usart_interrupt.h`.
6. Definir la función `usart_read_callback` la cual se ejecutara asincrónicamente cada vez que haya un dato disponible en la UART. Esta función debe entregar cada nuevo dato distinto '\n' (almacenado en GPS) a la función `gps_encode()` de la librería `tinygps.h`. Si el nuevo valor es '\n' el mismo entregarse a la función `gps_encode` y luego debe ejecutarse la función `gps_f_get_position()` también de la librería `tinygps.h`. A continuación se muestra un ejemplo de lo explicado:

```
string=GPS;
float longitud;
float latitud;
unsigned long age;
if(string!='\n'){
    gps_encode(string);
}
if(string=='\n'){
    gps_encode(string);
    gps_f_get_position(&latitud, &longitud, &age);
}
}
```

Una vez realizados los pasos descriptos anteriormente, la posición geográfica puede ser visualizada por pantalla como se muestra en la **Figura 43**.



```
LATITUD: -41.138199 / LONGITUD: -71.281578
```

Figura 43: Lectura GPS.

Si colocamos estas coordenadas en google map, podemos ver en la **Figura 44** que la posición obtenida tiene una precisión muy cercana a la declarada por el fabricante (2,5m).



Figura 44: Precisión del módulo GNSS.

Las conexiones entra la placa carrier y el sensor GNSS se pueden ver en la **Tabla 29**.

Módulo GNSS NEO6MV2 [DR-1]	Carrier EESAMR35 [12]
VIN	PIN 2 (JP1)
GND	PIN 15 (JP1)
RX	PIN 12 (JP1)
TX	PIN 2 (JP3)

Tabla 29: Conexión placa Carrier / GNSS.

4.6 Actuadores

Para poder accionar los distintos actuadores se deben cambiar los estados de las GPIO correspondientes. La **Figura 45** resume las operaciones necesarias para realizar el accionamiento de los actuadores:

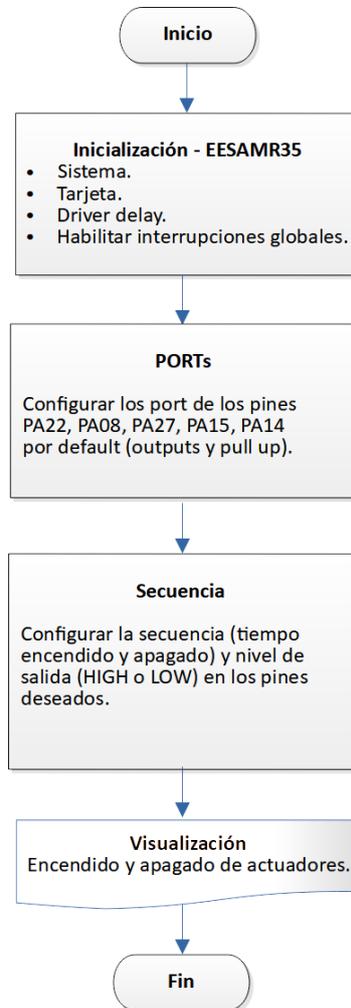


Figura 45: Diagrama de flujo – Accionamiento de actuadores.

El paso a paso del diagrama de la **Figura 45** es explicado con más detalle a continuación:

1. Realizar todas las inicializaciones correspondientes a: sistema, tarjeta, driver delay, entradas, salidas y habilitar las interrupciones globales.
2. Crear una variable estructura del tipo port_config llamada config_port_pin.
3. Entregar la variable a la función port_get_config_defaults() para que inicialice todos los campos de la estructura por defecto.
4. Definir el campo direction como salida con la palabra PORT_PIN_DIR_OUTPUT.
5. Configurar los pines correspondientes a PA14, PA15, PA22, PA08 y PA27 (Cargador de capacitores, Modulo de alto voltaje izquierdo, Modulo de alta tension derecho, buzzer izquierdo y buzzer derecho respectivamente) con la informacion guardada en config_port_pin de la siguiente forma:

```
port_pin_set_config ( PIN_PA22 , &config_port_pin );  
port_pin_set_config ( PIN_PA08 , &config_port_pin );  
port_pin_set_config ( PIN_PA27 , &config_port_pin );  
port_pin_set_config ( PIN_PA15 , &config_port_pin );  
port_pin_set_config ( PIN_PA14 , &config_port_pin );
```

6. Para accionar un módulo de alta tensión poner el pin correspondiente a PA14 en HIGH durante 20 s. Luego pasar el mismo a LOW y poner el pin PA15 o PA22 en HIGH durante 20 ms según se quiera realizar una descarga eléctrica en lado izquierdo del animal o del derecho. Transcurrido el tiempo indicado volver al estado de LOW el pin utilizado.
7. Para accionar un módulo sonoro, pasar al estado HIGH durante 1 s el pin PA08 o PA27 según se quiera accionar el buzzer en el lado izquierdo del animal o el del derecho. Transcurrido el tiempo indicado volver al estado de LOW el pin utilizado.

En la **Figura 46** se utilizan leds en cada uno de los pines y se accionan uno por uno para demostrar el funcionamiento del código anterior. Así mismo para demostrar que es posible activar el módulo de alta tensión con esta tensión, en la **Figura 47** se muestra una descarga eléctrica entre los terminales de salida del mismo.

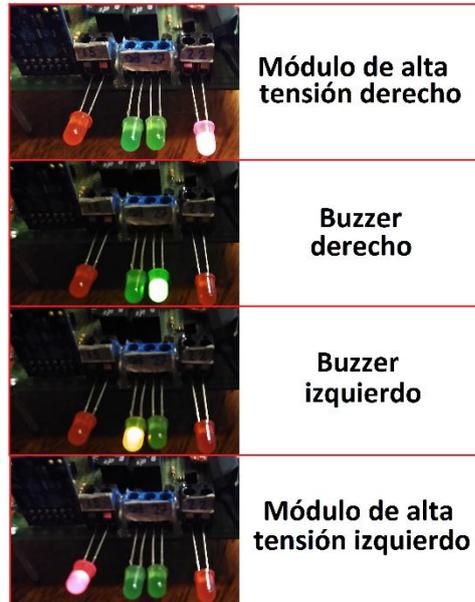


Figura 46: Accionamiento de actuadores.

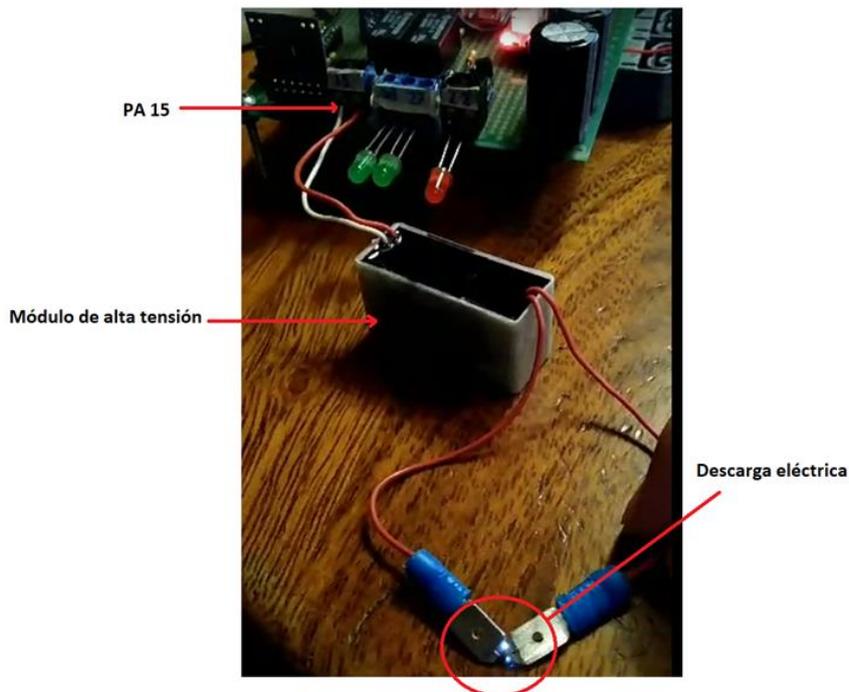


Figura 47: Modulo de alta tensión.

4.7 Recepción LoRa.

Para poder programar el transceptor en modo recepción se deben configurar los registros del mismo. La **Figura 48** resume las operaciones necesarias para realizar esto:

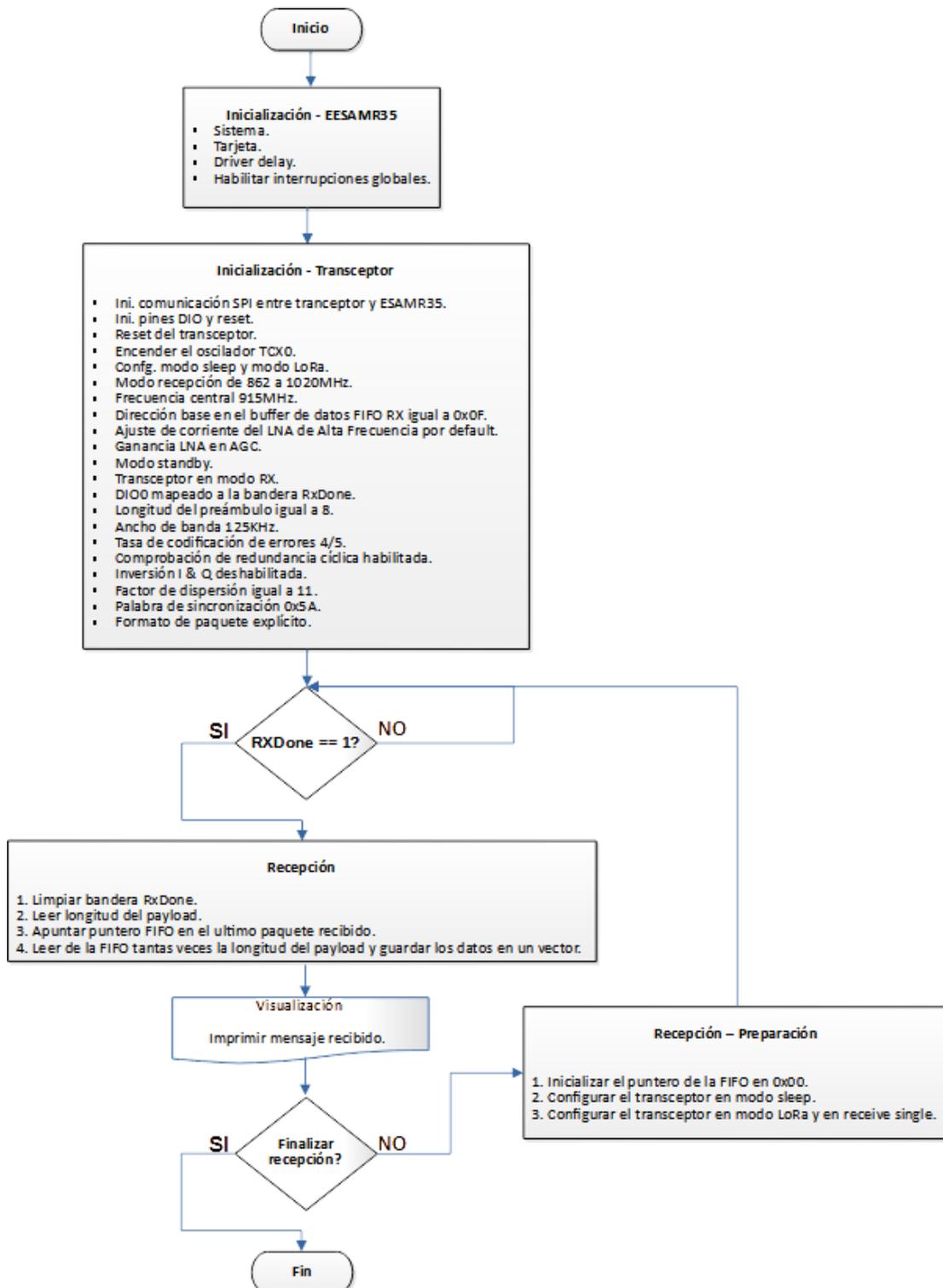


Figura 48: Diagrama de flujo – Recepción LoRa.

El paso a paso del diagrama de la **Figura 48** es explicado con más detalle a continuación:

- 1 Realizar todas las inicializaciones correspondientes a: sistema, tarjeta, driver delay, entradas, salidas y habilitar las interrupciones globales.
- 2 Ejecutar la función HAL_Radiolnit() de la librería radio_driver_hal.h la cual se obtiene de Microchip ASF. Esta función se encarga de inicializar la comunicación SPI entre el microcontrolador ESAMR35 y el transceptor así como configurar los pines DIO y reset.
- 3 Hacer un reset del transceptor mediante la ejecución de la función RADIO_Reset() de la librería radio_driver_hal la cual se obtiene de Microchip ASF.
- 4 Energizar el Oscilador de cristal con compensación de temperatura TCXO con la ejecución de la función HAL_TCXOPowerOn() de la librería radio_driver_hal.
- 5 Configurar el transceptor en modo sleep (bit Mode = 000) y LoRa (bit LongRangeMode = 1) escribiendo el valor 0x08 en el registro RegOPMode (0x01) con la función RADIO_RegisterWrite de la librería radio_driver_hal.
- 6 Configurar el PIN PA13 en alto con la función HAL_EnableRFCtrl(RFO_HF, RX) de la librería radio_driver_hal. De esta forma el transceptor se configura en modo recepción para la banda de recepción 1 de 862 a 1020 MHz.
- 7 Configurar la frecuencia central en 915MHz escribiendo en los registros RegFrFmsb (0x06), RegFrFmsb (0x07) y RegFrFmsb (0x08) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
- 8 Configurar la dirección base en el búfer de datos FIFO para el demodulador RX en 0x00 escribiendo en el registro RADIO_RegisterWrite (0x0F) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
- 9 Configurar el ajuste de corriente del LNA de alta frecuencia por default escribiendo 0x00 en los bits LnaBoostHF del registro RegLna (0x0C) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
- 10 Configurar la ganancia del LNA en modo AGC escribiendo 0x04 en los bits en el registro RegModemConfig3 (0x26) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
- 11 Configurar el transceptor en modo standby manteniendo en lora escribiendo solamente los bits Mode en 001 del registro RegOpMode (0x01) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
- 12 Manteniendo la Configuración anterior del registro RegOpMode (0x01) escribir los bits Mode en 101 para configurar el transceptor en modo RX.
- 13 Escribir en el registro 0x40 el valor 0x00 para que el mapeo en DIO0 sea la bandera RxDone.
- 14 Configurar la longitud del preámbulo en 8 símbolos escribiendo 0x08 en el registro RegPreambleMsB (0x20) y 0x00 en el RegPreambleLsb (0x21).

- 15 Configurar el ancho de banda en 125 khz configurando los bits Bw del registro RegModemConfig1 (0x1D) en 0111.
- 16 Configurar la tasa de codificación de errores en 4/5 configurando los bits CodingRate del registro RegModemConfig1 (0x1D) en 001.
- 17 Configurar el bit RxPayloadCrcOn del registro RegModemConfig2 (0x1E) en 1 para habilitar la comprobación de redundancia cíclica CRC
- 18 Deshabilitar la inversión I & Q escribiendo el bit InvertIQ RX del registro RegInvertIQ (0x33) en 0 y 0X1D en el registro RegInvertIQ2 (0x3B).
- 19 Configurar el factor de dispersión en 11 escribiendo los bits SpreadingFactor del registro RegModemConfig2 (0x1E) en 1011.
- 20 Configurar la palabra de sincronización en 0X5A escribiendo este valor en el registro RegSyncWord (0x39).
- 21 Configurar el formato de paquete en modo explícito poniendo en 0 el bit ImplicitHeaderModeOn del registro RegModemConfig1 (0x1D).
- 22 Leer el bit RxDone del registro RegIrqFlags (0x12). Si el valor es 1 seguir los siguientes pasos:
 - Limpiar la bandera RxDone escribiendo un 1 en el bit RxDone del registro RegIrqFlags (0x12).
 - Guardar en una variable tipo int la longitud del payload leyendo el registro RegRxBnBytes(0x13).
 - Configurar el puntero de dirección de interfaz SPI en búfer de datos FIFO con la dirección de inicio (en búfer de datos) del último paquete recibido RegFifoRxCurrentAddr (0x10) escribiendo esta última en el registro RegFifoAddrPtr (0x0D).
 - Leer el registro RegFifo (0x00) la cantidad de veces igual a la longitud del payload.
 - Inicializar el registro RegFifoAddr Ptr (0x0D) en 0x00.
 - Configurar el transceptor en modo sleep (bit Mode = 000) en el registro RegOPMode (0x01).
 - Escribir el valor 0x86 en el registro RegOpMode (0x01) para configurar el transceptor en Lora mode y en receive single (RXSINGLE).
- 23 Realizar el paso 22 cuantas veces sea necesario.

La funcionalidad del programa realizado que sigue los pasos anteriores es demostrada en la **Figura 49** donde se muestra el mensaje que recibe el collar el cual es transmitido por un módulo de desarrollo LoRa marca TTGO. Este mensaje mantiene un mensaje fijo: "Prueba: EESAMR35 modo receptor" y otro que varía con el tiempo y representa el número de paquete transmitido. Como puede verse, todos los paquetes son recibidos sin pérdidas.

```
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 1
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 2
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 3
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 4
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 5
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 6
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 7
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 8
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 9
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 10
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 11
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 12
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 13
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 14
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 15
Prueba: EESAMR35 modo receptor
Paquete transmitido: 16
```

Figura 49: Mensajes recibidos en EESAMR35.

En la **Figura 50** se puede ver al transmisor y receptor realizando la comunicación. Para poder lograr esta comunicación se debe configurar el LoRa TTGO en modo transmisor con los mismos parámetros programados en el EESAMR35, estos son:

- Frecuencia central 915 MHz.
- Ancho de Banda 125 kHz.
- Coding Rate 4/5.
- CRC habilitado
- Inversion I & Q deshabilitado.
- Longitud del preambulo 8
- Factor de dispersion 11
- Palabra de sincronización 0x5A.

Extensivas pruebas se hicieron con otras combinaciones de parámetros LoRa sin embargo las listadas anteriormente, fueron las que dieron mejores resultados. Las mismas sirvieron también para comunicar la estación base con el collar.



Figura 50: Comunicación LoRa con EESAMR35 como Rx.

4.8 Transmisión LoRa.

Para configurar el transceptor en modo transmisor se deben configurar los registros del mismo, la **Figura 51** resume las operaciones necesarias para realizar esto:

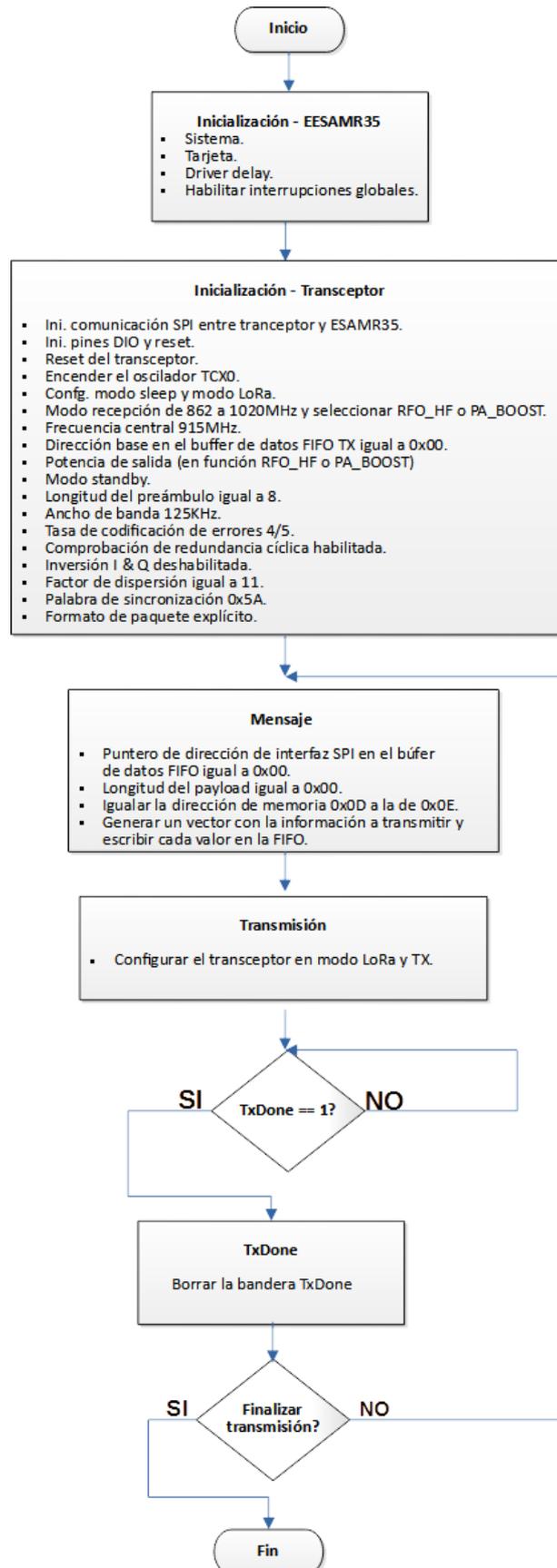


Figura 51: Diagrama de flujo – Transmisión LoRa.

El paso a paso del diagrama de la **Figura 51** es explicado con más detalle a continuación:

1. Realizar todas las inicializaciones correspondientes a: sistema, tarjeta, driver delay, entradas, salidas y habilitar las interrupciones globales.
2. Ejecutar la función HAL_Radiolnit() de la librería radio_driver_hal.h la cual se obtiene de Microchip ASF. Esta función se encarga de inicializar la comunicación SPI entre el microcontrolador ESAMR35 y el transceptor así como configurar los pines DIO y reset.
3. Hacer un reset del transceptor mediante la ejecución de la función RADIO_Reset() de la librería radio_driver_hal la cual se obtiene de Microchip ASF.
4. Energizar el Oscilador de cristal con compensación de temperatura TCXO con la ejecución de la función HAL_TCXOPowerOn() de la librería radio_driver_hal.
5. Configurar el transceptor en modo sleep (bit Mode = 000) y LoRa (bit LongRangeMode = 1) escribiendo el valor 0x08 en el registro RegOPMode (0x01) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
6. Configurar el PIN PA13 en alto con la función HAL_EnableRFCtrl(RFO_HF, TX) de la librería radio_driver_hal . De esta forma el transceptor se configura en modo transmisión para la banda 1 de 862 a 1020 MHz y rango de potencia desde -4 to +15dBm. También se puede elegir un rango de potencia mayor de +2 to +17dBm con HAL_EnableRFCtrl(PA_BOOST, TX).
7. Configurar la frecuencia central en 915MHz escribiendo en los registros RegFrFmsb (0x06), RegFrFmsb (0x07) y RegFrFmsb (0x08) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
8. Configurar la dirección base en el búfer de datos FIFO para el modulador TX en 0x00 escribiendo en el registro RegFifoTxBaseAddr (0x0E) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
9. Configurar la potencia de salida escribiendo el valor deseado (hasta 14dBm para PA_HF o PA_LF y hasta 20dBm para PA_HP) en los bits OutputPower del registro RegPaConfig (0x09). Así mismo el bit PaSelect de este registro debe mantenerse en 0 para RFO (hasta 14dBm) o en 1 para PA_BOST (hasta 20dBm).
10. Configurar el transceptor en modo standby manteniendo en lora escribiendo solamente los bits Mode en 001 del registro RegOpMode (0x01) con la función RADIO_RegisterWrite() de la librería radio_driver_hal.
11. Configurar la longitud del preámbulo en 8 símbolos escribiendo 0x08 en el registro RegPreambleMsB (0x20) y 0x00 en el RegPreambleLsb (0x21).
12. Configurar el ancho de banda en 125 kHz configurando los bits Bw del registro RegModemConfig1 (0x1D) en 0111.
13. Configurar la tasa de codificación de errores en 4/5 configurando los bits CodingRate del registro RegModemConfig1 (0x1D) en 001.

- 14 Configurar el bit RxPayloadCrcOn del registro RegModemC onfig2 (0x1E) en 1 para habilitar la comprobación de redundancia cíclica CRC
- 15 Deshabilitar la inversión I & Q escribiendo el bit InvertIQ RX del registro RegInvertIQ (0x33) en 0 y el valor 0X1D en el registro RegInvertIQ2 (0x3B).
- 16 Configurar el factor de dispersión en 11 escribiendo los bits SpreadingFactor del registro RegModemConfig2 (0x1E) en 1011.
- 17 Configurar la palabra de sincronización en 0X5A escribiendo este valor en el registro RegSyncWord (0x39).
- 18 Configurar el formato de paquete en modo explícito poniendo en 0 el bit ImplicitHeaderModeOn del registro RegModemConfig1 (0x1D).
- 19 Configurar el transceptor en standby y en LoRa escribiendo 0x81 en el registro RegOpMode(0x01).
- 20 Inicializar el puntero de dirección de interfaz SPI en búfer de datos FIFO en la dirección 0x00 escribiendo este valor en el registro RegFifoAddr Ptr (0x0D).
- 21 Inicializar la longitud del payload escribiendo 0x00 en el registro RegPayloadLength (0x22).
- 22 Copiar la dirección base de escritura en el búfer de datos FIFO para el modulador TX guardada en el registro RegFifoTxBaseAddr (0x0E) y escribirla en el registro RegFifoAddrPtr (0x0D).
- 23 Guardar el mensaje en un vector del tipo char y escribir cada valor del vector en el registro RegFifo(0x00).
- 24 Configura el transmisor en modo LoRa y en TX escribiendo el valor 0x83 en el registro RegOpMode (0x01).
- 25 Esperar hasta que parezca la interrupción de la transmisión completa de la carga es decir que el bit TxDone del registro RegLrqFlags (0x12) sea igual a 1.
- 26 Limpiar el bit TxDone del registro RegLrqFlags (0x12) re escribiendo un 1 en este bit.
- 27 Repetir desde el paso 19 cuantas transmisiones sean necesarias.

La funcionalidad del programa que sigue los pasos anteriores, es demostrada en la **Figura 52** donde se muestra el mensaje que recibe un LoRa TTGO. El mensaje enviado por el collar contiene latitud y longitud separadas por una coma y el pulso cardiaco junto con la temperatura separados por un salto de línea.

```

Received packet:
-41.138248,-71.281570  Latitud, Longitud
84                    Pulso Cardíaco
37.0                  Temperatura
] Transmisión 1

Received packet:
-41.138248,-71.281570  Latitud, Longitud
82                    Pulso Cardíaco
36.9                  Temperatura
] Transmisión 2

Received packet:
-41.138248,-71.281570  Latitud, Longitud
85                    Pulso Cardíaco
36.7                  Temperatura
] Transmisión 3

Received packet:
-41.138248,-71.281570  Latitud, Longitud
85                    Pulso Cardíaco
36.6                  Temperatura
] Transmisión 4

Received packet:
-41.138248,-71.281570  Latitud, Longitud
81                    Pulso Cardíaco
36.5                  Temperatura
] Transmisión 5

Received packet:
-41.138248,-71.281570  Latitud, Longitud
85                    Pulso Cardíaco
36.4                  Temperatura
] Transmisión 6
    
```

Figura 52: Mensaje recibido en LoRa TTGO.

En la **Figura 53** se puede ver al transmisor (collar) y receptor (LoRa TTGO) realizando la comunicación.

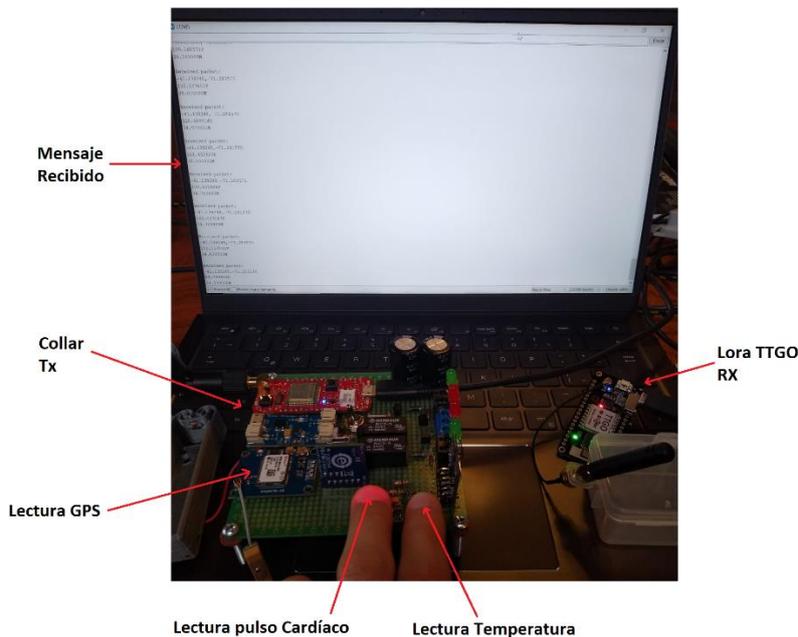


Figura 53: Comunicación LoRa con EESAMR35 como Tx.

Para poder lograr esta comunicación se debe configurar el LoRa TTGO en modo receptor con los mismos parámetros LoRa programados en el EESAMR34, estos son:

- Frecuencia central 915 MHz.
- Ancho de Banda 125 KHz.
- Coding Rate 4/5.
- CRC habilitado

- Inversión I & Q deshabilitado.
- Longitud del preambulo 8
- Factor de dispersión 11
- Palabra de sincronización 0x5A.

La frecuencia central (915 MHz) y ancho de banda (125 MHz) configuradas en esta sección y la sección **4.7 Recepción LoRa**, fueron verificadas por medición en las **Figura 54** y **Figura 55** respectivamente. La potencia medida en la **Figura 54** es de 14,29 dBm mientras que la pérdida del cable a 915 MHz es de **1,76 dB** es decir que la potencia en los terminales de la antena es de 16 dBm. La potencia configurada fue de 17dBm, por lo tanto existe una pérdida de 1 dB que puede deberse a la desadaptación total desde el módulo EESAMR35 hasta los terminales de antena.

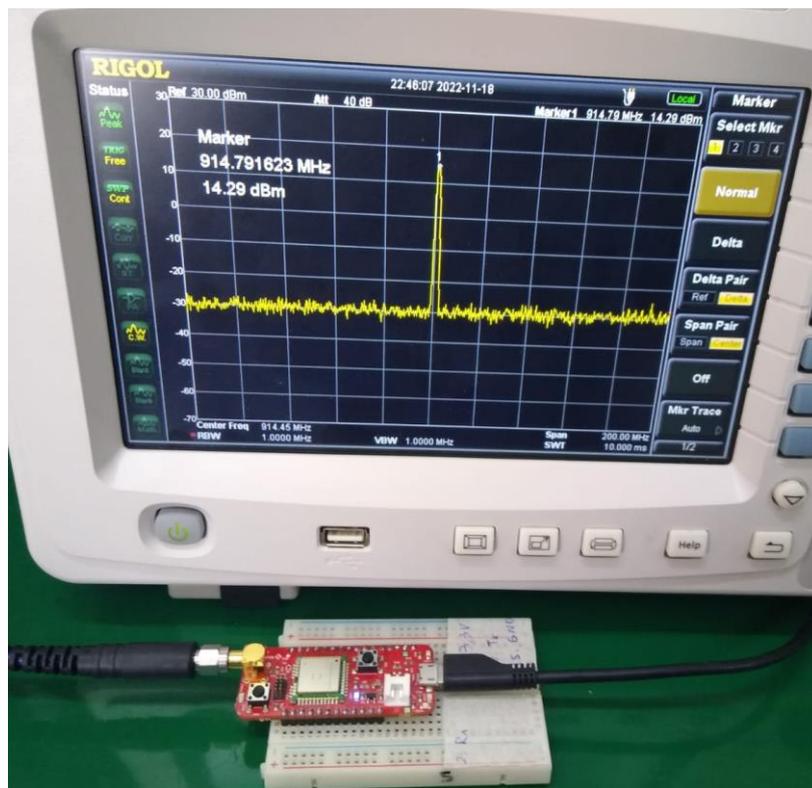


Figura 54: Frecuencia central 915 MHz.

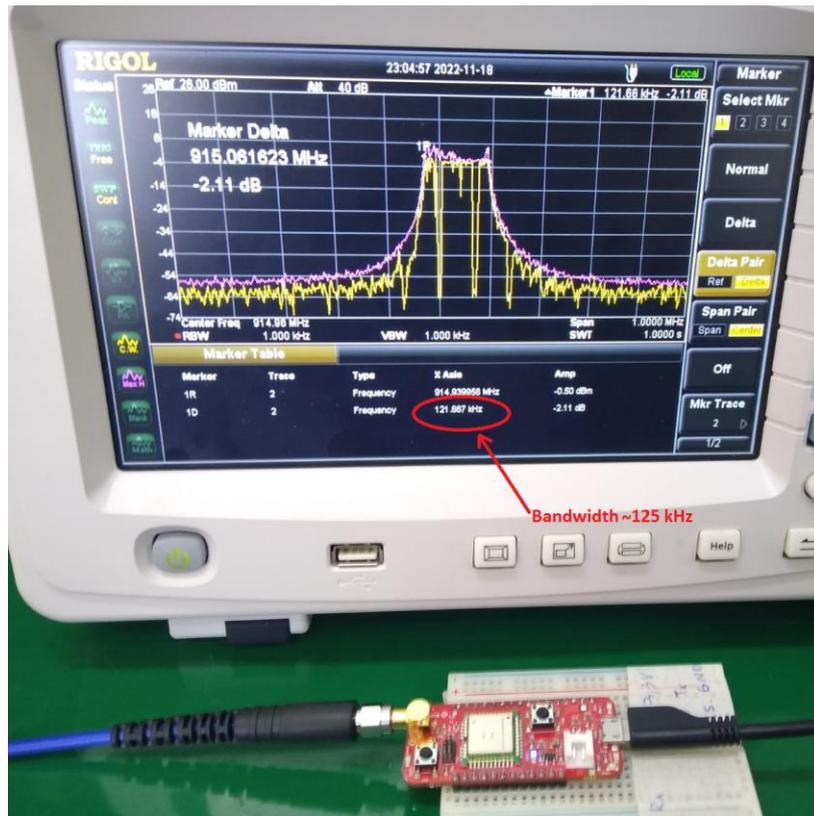


Figura 55: Ancho de banda medido ~ 125 kHz.

Si aproximamos el entorno en el cual operará el sistema al de un área suburbana / rural, entonces se puede emplear la curva de Okumura-Hata (Hata, 1980) para calcular la máxima distancia a la cual se puede realizar un enlace entre el collar y la estación base como se muestra en la **Figura 56**.

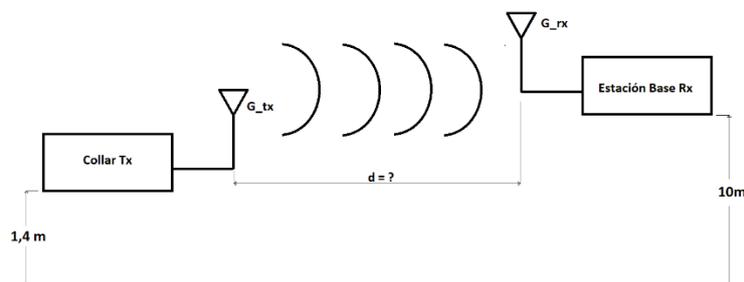


Figura 56: Enlace entre collar y estación base.

La máxima distancia teórica es aproximadamente **2.4 km** como se muestra en la curva de la **Figura 57** extraída de la calculadora online de CIRCUIT DESIGN, INC [DR-34] al utilizar los siguientes parámetros:

- Potencia de salida en el collar: **16 dBm** (obtenida en la **Figura 54** teniendo en cuenta pérdida del cable).
- Sensibilidad del receptor: **-111 dBm [DR-4]**.
- Ganancia de la antenas: G_{Tx} y G_{Rx} iguales de **2.15 dBi** (dipolo de media onda).
- Relación de onda estacionaria (VSWR): **1.5** (para ambas antenas).

- Altura collar: **1,4 m** (altura promedio de una vaca).
- Altura estación base: **10 m** (ubicada en una torre).

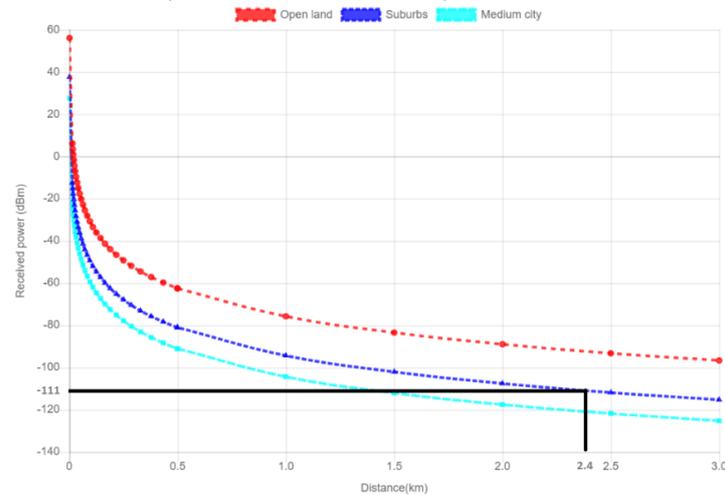


Figura 57: *Máxima distancia de enlace para $P_{out} = 16\text{dBm}$.*

El gráfico de la **Figura 57** muestra los casos “open land” y “medium city” que podrían tomarse como límites siendo la curva de “suburbs” (azul) la más similar al entorno donde operará el sistema. Si configuráramos el transceptor en la máxima potencia de salida (**19 dBm [DR-4]** contemplando pérdida por desadaptación) obtendríamos una distancia máxima teórica de **2,8 km**. Sin embargo hay que considerar que la potencia de ruido en el ambiente puede ser mayor a **-111 dBm** a la frecuencia de interés, por lo que estas distancias pueden ser aun menores.

Capítulo 5: Funcionalidad

En este capítulo se describe conceptualmente como el sistema es capaz de mantenerse en un perímetro virtual y cómo es el protocolo de comunicación con la estación base.

5.1 Definición de perímetro

Cuando el sistema es encendido por primera vez se configura en modo receptor hasta que percibe a la estación base. En este momento se establece la comunicación entre las dos partes, por un lado el collar recibe una petición de reconocimiento la cual es tratada cambiando a modo transmisor e enviando un ID único dentro del mismo. La estación base recibe este ID y responde con 4 puntos (A, B, C y D) formados cada uno por latitud y longitud. Estos puntos forman un perímetro virtual como el de la **Figura 58**.

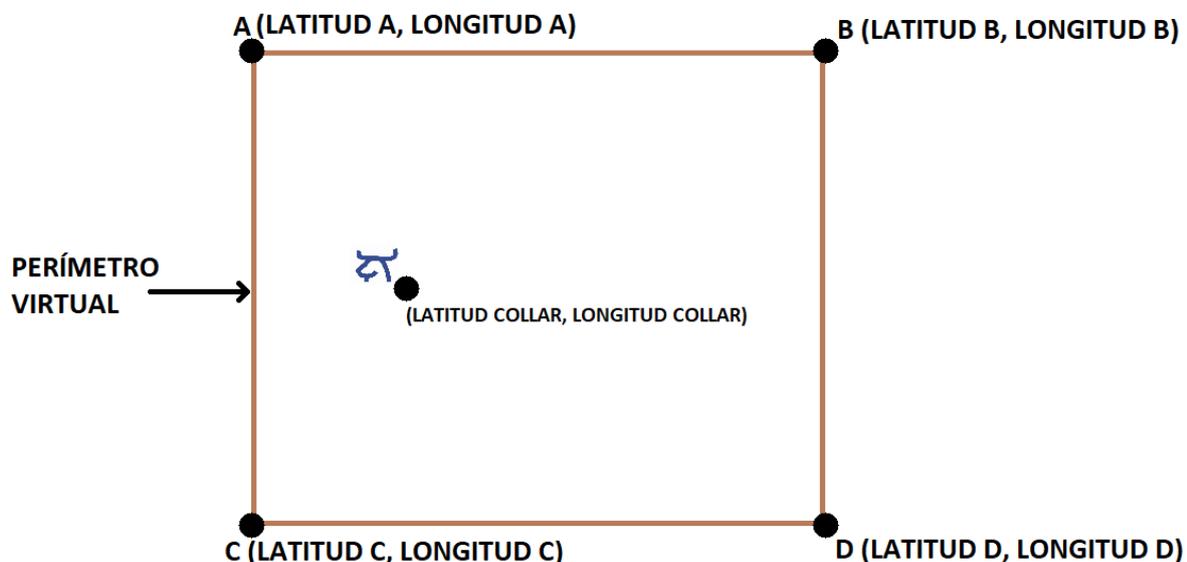


Figura 58: Definición de perímetro virtual

Con el perímetro virtual delimitado, el collar utiliza la posición geográfica formada por **LATITUD COLLAR**, **LONGITUD COLLAR** la cual es brindada por su propio **GNSS** para determinar si se encuentra dentro o fuera del mismo. Para asegurar esto, la **LATITUD COLLAR** debe ser menor a las **LATITUDES A, B** y mayor a las **LATITUDES C, D** mientras que **LONGITUD COLLAR** debe ser mayor a **LONGITUD A,C** y menor a **LONGITUD B, D**.

Las latitudes y longitudes son medidas como se muestra en la **Figura 59** y la estación base debe definir siempre las **LATITUDES A, B** mayores a las **LATITUDES C, D** y las **LONGITUDES A, C** menores a las **LONGITUDES B, D**. Además, los puntos **C, A** y **D, B** deben estar alineado de sur a norte y los puntos **A, B** y **C, D** de oeste a este. Si la configuración del campo no permite esto último, se podrá hacer una rotación del plano en un ángulo que debe ser proporcionado por la estación base **Figura 60**. Esto es fundamental para

tomar la decisión correcta sobre qué lado del animal debe ser estimulado en función de la dirección de su desplazamiento.

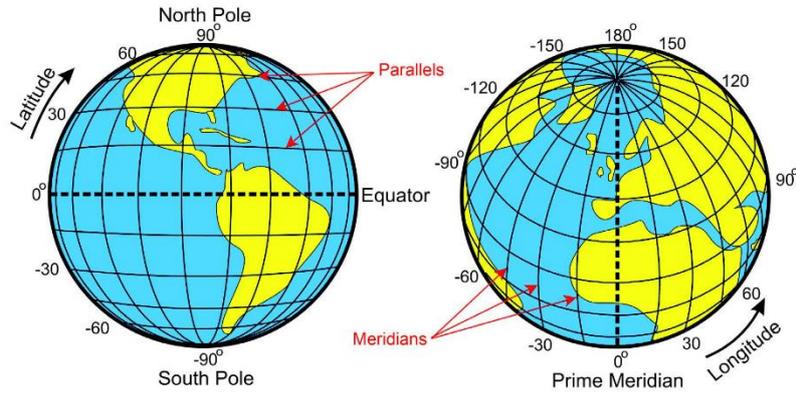


Figura 59: Definición de Latitud y Longitud – extraído de internet.

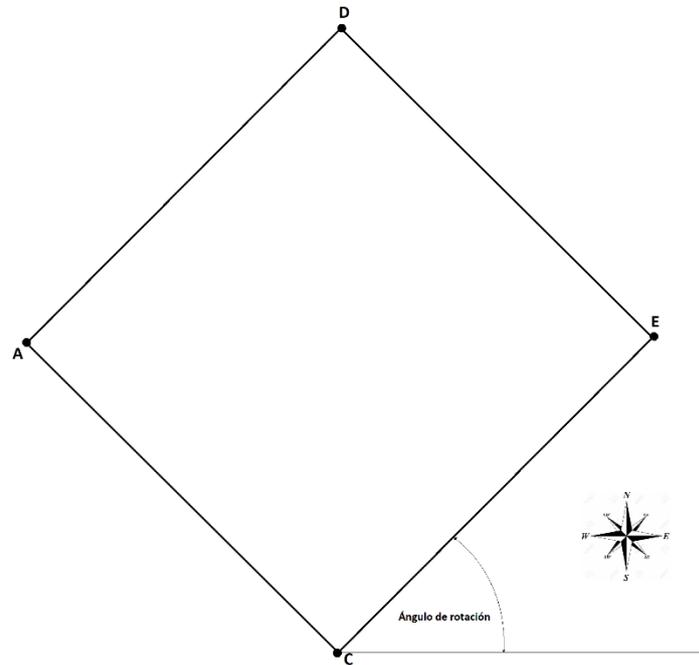


Figura 60: Angulo de rotación.

5.2 Actuadores

Los actuadores se accionaran acorde la zona en la que se encuentre el animal. Se tomará como regla de base los siguientes escenarios:

- 1) Si el animal se encuentra en la zona “segura” (Pintado de verde en la **Figura 61**) no se accionará ningún actuador. Esta zona inicia a 20 m de distancia de cualquiera de los bordes del perímetro virtual.
- 2) Si el animal se encuentra en la zona de “alerta sonora” (pintada de naranja en la **Figura 61**) se acciona uno de los buzzer dependiendo de su dirección de desplazamiento. Esta zona está comprendida entre los 10 m y 20 m de distancia del perímetro virtual.
- 3) Si el animal se encuentra dentro de la zona de “descarga eléctrica” (pintada de rojo en la **Figura 61**) se acciona uno de los módulos de alta tensión dependiendo de su dirección de desplazamiento. Esta zona está comprendida desde el perímetro virtual hasta la zona de “alerta sonora”.

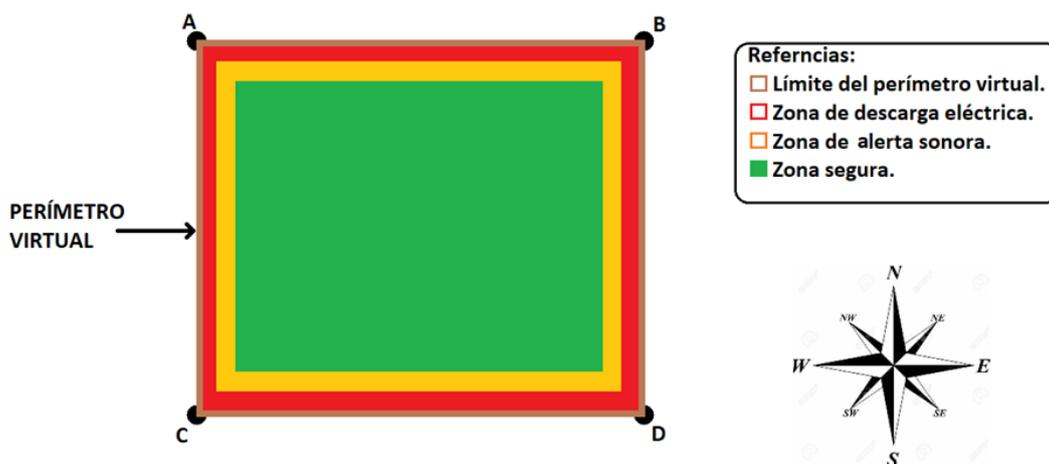


Figura 61: Definición de zonas de pastura.

- 4) Las zonas de alerta tendrán un máximo de 5 estímulos cada una, es decir que si luego de ocurrir los 5 estímulos el animal no cambia su comportamiento, los estímulos cesarán. Para este caso, se apelará a no continuar con la aplicación de estímulos, de forma de no perjudicar en exceso el bienestar del animal, y que el mismo probablemente volverá a la zona segura por sus propios medios donde se espera que se encuentren la mayor cantidad de miembros del rebaño teniendo en cuenta el comportamiento típico de los mismos.
- 5) Si un animal traspasa la zona de “alerta sonora” y continúa con su intención de acceder a la zona de “descarga eléctrica” pero el estímulo eléctrico impide esto, el permanecer en la zona de “alerta sonora” no implicará nuevos estímulos sonoros. Solo se permitirá la aplicación de nuevos estímulos sonoros luego de que el animal vuelva a la zona segura e intente retornar a la zona de “alerta sonora”.
- 6) Si el animal intenta una vez entrar en la zona de descarga eléctrica, luego vuelve a la zona de alerta sonora e intenta acceder nuevamente a la zona de descarga eléctrica, continuará recibiendo estímulos eléctricos hasta un máximo de 5. Estos 5 estímulos se renuevan luego de que el animal vuelva a la “zona segura”.

- 7) Si el animal se encuentra por cualquier motivo fuera del perímetro virtual no recibirá ningún tipo de estímulo. La estación base deberá emitir en este caso una alerta de animal prófugo cuando sea notificado por el collar.
- 8) La decisión de aplicar los estímulos del lado derecho o del izquierdo del animal está definida por la dirección de su desplazamiento, la cual es medida con el magnetómetro. Si el animal se desplaza de forma perpendicular hacia cualquiera de los laterales del perímetro entonces se aplica un estímulo del lado izquierdo para que la rotación del animal sea siempre en sentido horario tal como se muestra en la **Figura 62**. Si la dirección de desplazamiento es **NE, SE, SW** o **NW** en los laterales **AB, BD, DC** o **AC** respectivamente, el estímulo también será en el lado lateral izquierdo para que la rotación sea horaria. Por el contrario si la dirección de desplazamiento es **NW, NE, SE** o **SW** en los laterales **AB, BD, DC** o **AC** respectivamente el estímulo será del lado derecho para que la rotación sea anti horaria. Los estímulos se dejan de aplicar una vez que se detecta que la dirección de desplazamiento es paralela al borde más cercano del perímetro es decir **E** o **W** para el lateral **AB** o **DC** y **N** o **S** para el lateral **AC** o **BD**.

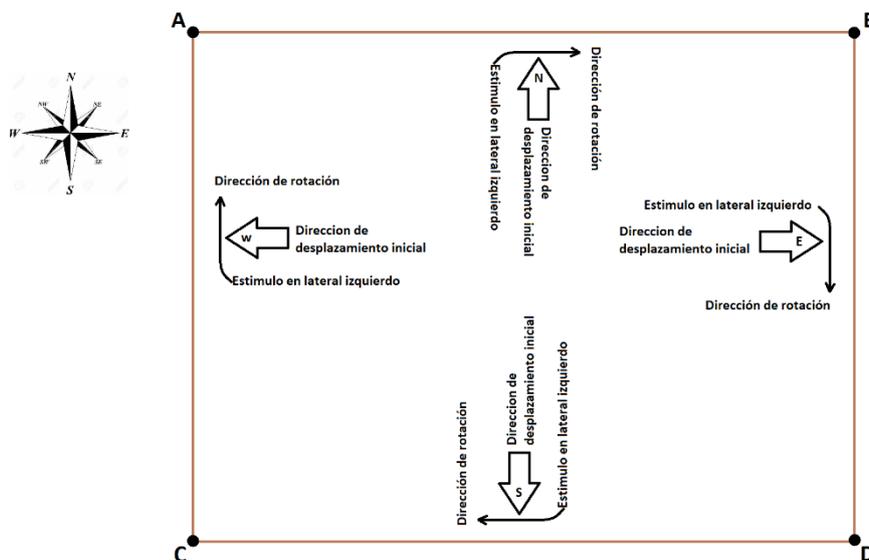


Figura 62: Aplicación de estímulo en el lateral izquierdo.

5.3 Adquisición de datos.

Se adquirirán datos acorde a los siguientes escenarios como regla de base:

- 1) **GNSS:** Si el animal se encuentra dentro de las zonas de alerta sonora o descarga eléctrica, los datos **GPS** serán adquiridos de forma constante. Si el animal se encuentra dentro de la zona segura la adquisición de la posición será cada vez más frecuente en función de la cercanía a las zonas de exclusión, siendo como mínimo una adquisición cada 20 minutos.
- 2) **Temperatura:** La temperatura corporal se tomará cada 20 minutos.

- 3) **Pulso cardiaco:** La frecuencia cardiaca será medida cada 20 minutos.
- 4) **Dirección:** La dirección de desplazamiento solo es medida cuando el animal se encuentra en alguna de las zonas de alerta.

5.4 Comunicación.

El collar se comunicará con la estación base acorde a los siguientes escenarios como regla de base:

- 1) **Comunicación inicial:** El collar espera que la estación base defina los límites del perímetro virtual.
- 2) En periodos fijos de 20 minutos para transmitir posición, temperatura y pulso cardiaco. Si el animal se encuentra prófugo podrá emitirse una alerta instantánea.

Capítulo 6: Consumo energético.

En este capítulo se realizan mediciones de consumo energético de cada subsistema poniendo especial atención en el módulo de alta tensión.

6.1 Mediciones

Para poder determinar si la capacidad energética del panel solar es suficiente para alimentar el sistema, se midió con un amperímetro el consumo del sistema en cada modo de operación. En la **Figura 63** se muestra la configuración de medición mientras que en la **Tabla 30** se muestran los resultados.

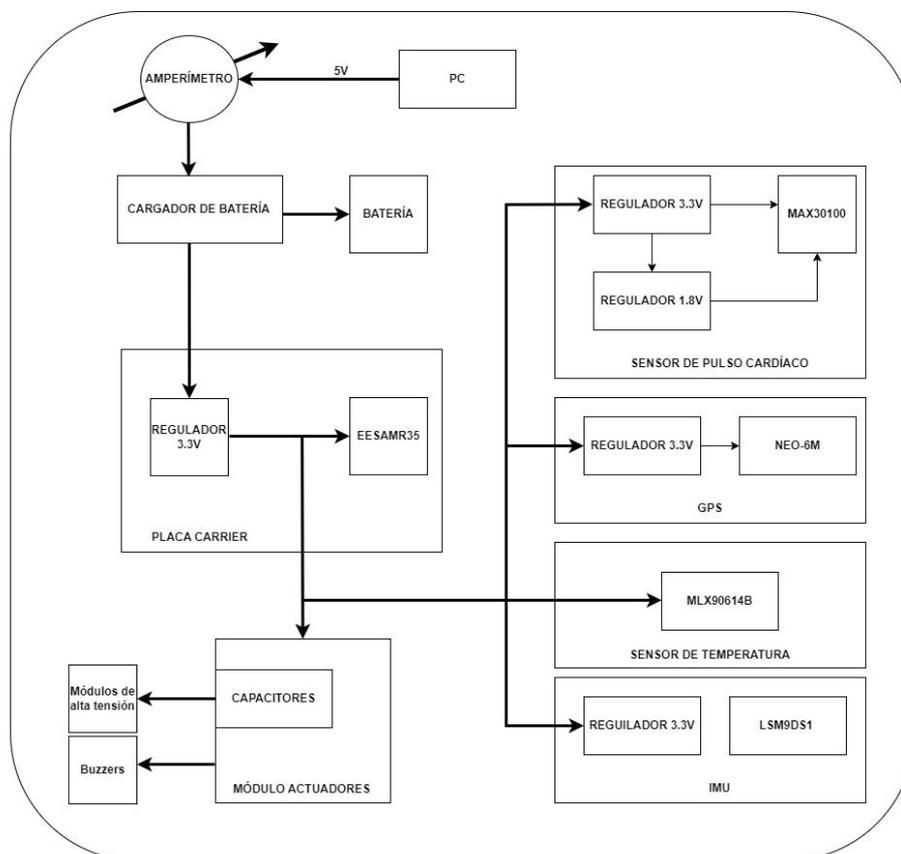


Figura 63: Diagrama de medición de consumos.

Operación	Consumo IVrms [mA]
Temperatura	55
Cardíaco	63
Magnetómetro	52
Descarga eléctrica	213
Buzzer	60
Transmisión LoRa	99
Recepción	54
GNSS	59
Cargador de batería	3

Tabla 30: Consumos medidos.

A continuación se listan las condiciones bajo las cuales se obtuvieron las mediciones de consumo:

- **Temperatura:** Solo el sensor de temperatura **MLX906114** se mantuvo operativo. Durante su funcionamiento se adquirió la temperatura de una persona a través de su dedo índice.
- **Pulso cardíaco:** Solo el sensor **MAX30100** se mantuvo operativo. Durante su funcionamiento se adquirió el pulso cardíaco de una persona a través de su dedo índice.
- **Magnetómetro:** Solo el sensor **PmodNav** se mantuvo operativo. Durante su funcionamiento se adquirió el punto cardinal hacia el cual apuntaba el sensor.
- **Descarga eléctrica:** Solo un módulo de alta tensión **TW-DC-DP** se mantuvo operativo. Durante su funcionamiento se produjo una descarga eléctrica ininterrumpida, es decir que la energía fue provista en todo momento por la fuente de alimentación y no por los capacitores.
- **Buzzer:** Solo un buzzer se mantuvo operativo. Durante su funcionamiento se produjo la emisión sonora ininterrumpida.
- **Transmisión:** Solo se mantuvo el transceptor operativo, en modo transmisión y con una potencia de salida de 17 dBm. Durante su funcionamiento, se transmitieron paquetes con toda la información relevante como datos GPS, pulso cardíaco y temperatura (un total de 35 bytes: 11 para longitud, 11 para latitud, 5 para temperatura, 5 para pulso cardíaco, 3 para comas y saltos de línea).
- **Recepción:** Solo se mantuvo el transceptor operativo en modo recepción continua. Durante su funcionamiento, se recibieron paquetes con la información equivalente a 4 puntos geográficos (latitud y longitud) que forman un perímetro virtual de 4 lados (un total de 96 bytes).
- **GNSS:** Solo se mantuvo el módulo **GNSS** operativo. No se detectó cambios de consumo antes ni después de la adquisición de datos GPS.
- **Cargador de batería:** Solo se energizó el cargador de batería **CN3065** sin una carga asociada. El consumo registrado se debe a un led de status en la placa y a corrientes de fuga.

Si bien parece que el mayor consumo está dado por el módulo de alta tensión, la energía para alimentar a estos proviene de los capacitores. De esta forma para poder cargar los capacitores como peor caso en $t = 0s$ el panel solar deberá entregar una corriente dada por (16) donde I_0 es la corriente inicial (peor caso) en los capacitores y $R_{13} = 402 \Omega$, es la resistencia utilizada para limitar la carga de los capacitores determinada en el **Capítulo 3**.

$$I_0 = \frac{3,3V}{R_{13}} \approx 8 \text{ mA} \quad (16)$$

Por lo expresado en (16) podemos ver que el módulo de alta tensión no representa el mayor consumo y entonces el peor consumo será de 99 mA y se da en la transmisión LoRa. El consumo del módulo de alta tensión en este caso es menor al valor de 364mA utilizado en el capítulo 3. Esto se debe a que en este caso se está alimentando al módulo con menos de 3.3 V al utilizar transistores BJT y diodos, a diferencia del prototipo final desarrollado en el capítulo 3 el cual solo emplea un mosfet.

Si analizamos el caso en el cual estamos transmitiendo y además se tiene que cargar la batería, para poder asegurar que el panel solar puede proveer de energía suficiente al sistema, se debe limitar la corriente de carga en el módulo cargador de batería a 234 mA ya que la que la capacidad del panel solar a circuito cerrado es 333 mA (ver IMP en **Tabla 10**). Para lograr esto la resistencia R_{ISET} (**Figura 24**) debe ser de 8,2 kohm (valor comercial) y no 5600 Ω como fue calculado en el **Capítulo 3**. Finalmente con este ajuste el valor de la resistencia podemos asegurar que teóricamente el panel solar está correctamente dimensionado para proveer de energía al sistema **final** siempre y cuando las condiciones climáticas sean las mismas que usó el fabricante del panel para caracterizarlo energéticamente. En la práctica podría ser difícil que se den estas condiciones todo el tiempo por lo tanto habrá periodos en los que será necesario proveer energía por medio de la batería.

Por último, si pensamos un caso hipotético (ver **Tabla 31**) en el cual el animal se encuentra en la cercanías de un límite virtual y necesitamos el módulo **GNSS** funcionando todo el tiempo, que por hora se producen: 10 alertas sonoras, 10 descargas eléctricas y 3 transmisiones con la información del pulso cardíaco, temperatura y datos **GPS**, entonces la batería de seleccionada de 2500 mA podría dar alimentación continua por 41,8 horas (ver **Tabla 32**).

Dispositivo	Consumo [mA]	Tiempo encendido [s]	Accionamiento por hora	Consumo [mAh]
GNSS	59	3600	Continuo	59
Magnetómetro	52	1	20	0,29
Buzzer	60	1	10	0,17
Descarga eléctrica	213	0,02	10	0,01
Pulso cardíaco	63	2	3	0,11
Temperatura	55	2	3	0,09
Transmisión	99	1,81 ¹⁶	3	0,1
Total				59,8

Tabla 31: Caso hipotético de peor consumo.

Disponibilidad por batería [h]	41,8
Disponibilidad por panel solar [h]	De acuerdo a las horas de sol

Tabla 32: Disponibilidad del sistema en peor caso hipotético.

¹⁶ El tiempo de transmisión fue estimado con la calculadora online lora developers de semtech [DR-35]

El caso hipotético establecido anteriormente no tiene ninguna correlación con el comportamiento animal por lo que la cantidad de alertas cuando se está en las cercanías podrían ser en mayor o menor medida. Sin embargo el consumo está dominado por el módulo GNSS por lo que este escenario no se encuentra muy lejos de la situación más desfavorable.

6.2 Módulo de alta tensión

La **Figura 65** y la **Figura 66** muestran el setup de medición para el módulo de alta tensión donde se usó una punta de alta tensión para medir la tensión de salida del módulo, una punta de corriente para medir la corriente de entrada a la entrada del módulo y una punta de osciloscopio para medir la tensión antes y después del diodo D1. Como en esta prueba no se intenta demostrar que los capacitores acumulan la energía suficiente para una descarga eléctrica, el transistor BJT1 siempre se mantienen en saturación y se abre el circuito de carga de capacitores con la llave SW1. De esta forma el módulo de alta tensión se alimenta directamente por la fuente de alimentación en periodo de 2 segundos y luego se desenergiza por otros 2 segundos.

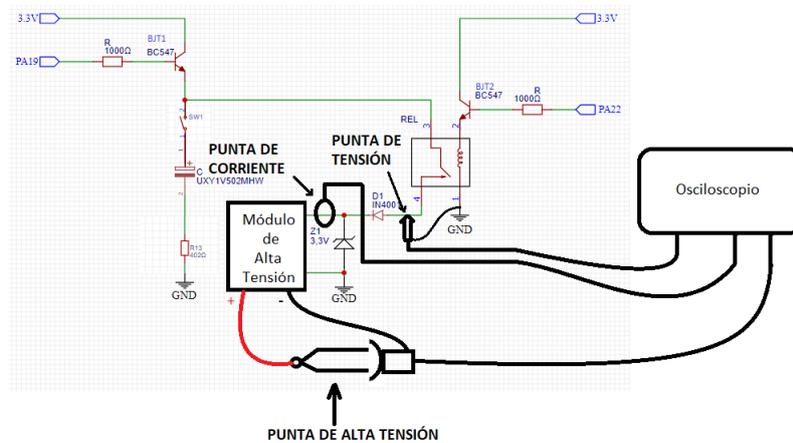


Figura 64: Esquema de medición de módulo de alta tensión.

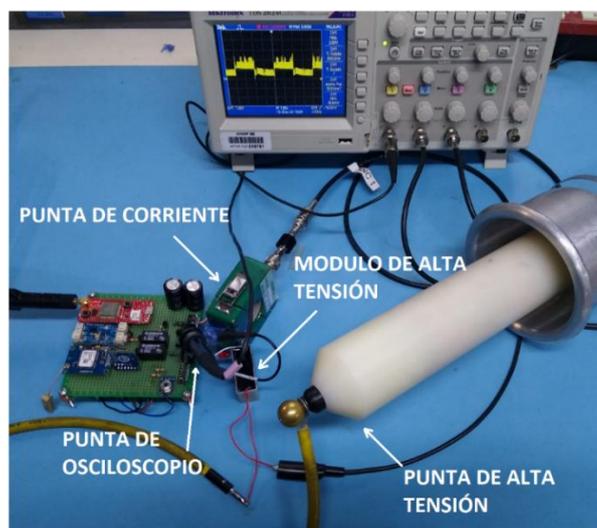


Figura 65: Setup de medición de módulo de alta tensión.

La **Figura 66** muestra la tensión de salida del módulo. Como se puede ver la forma de onda es un pulso cuadrado con un periodo de aproximadamente 2 segundos y una tensión de 1,92 kV.

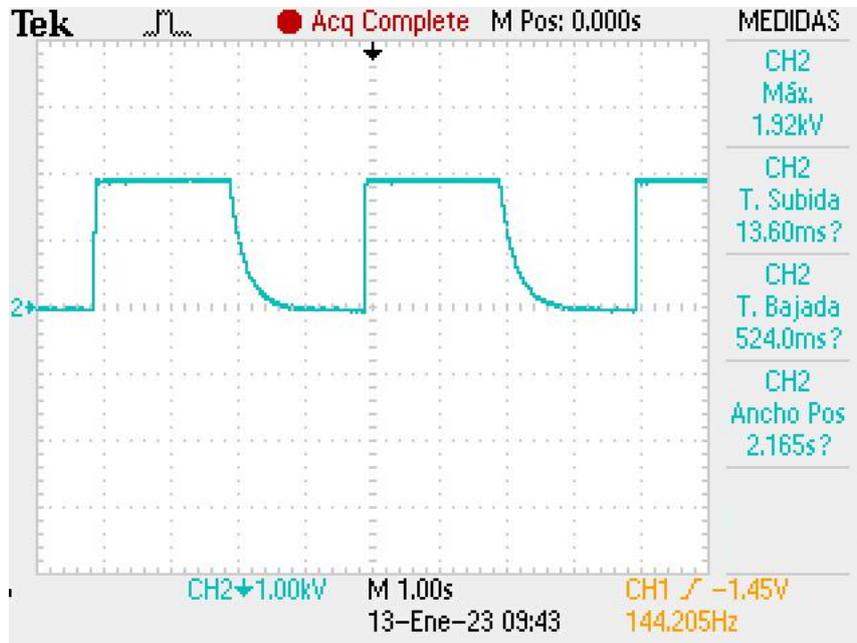


Figura 66: Tensión de salida – Módulo de alta tensión

La **Figura 67** muestra la corriente a la entrada del módulo de alta tensión:

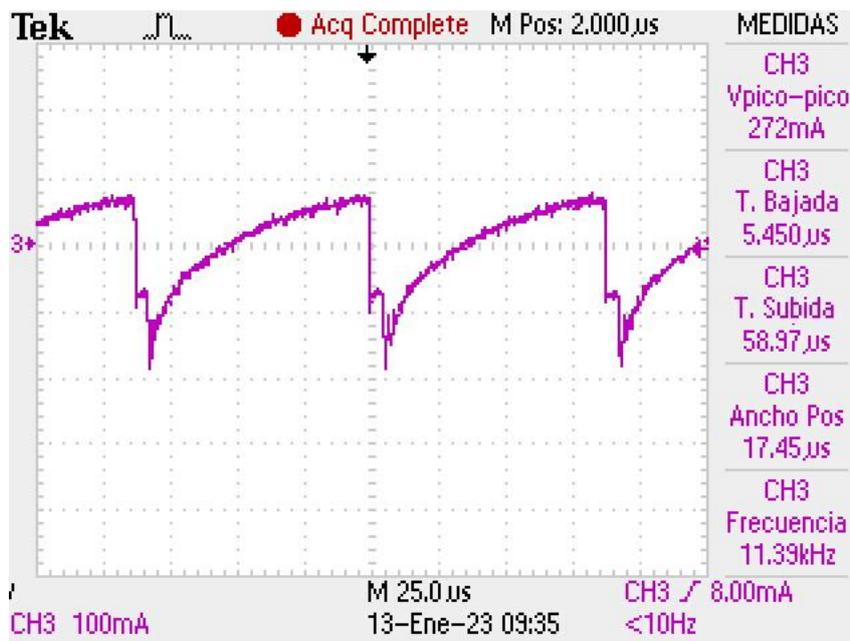


Figura 67: Corriente a la entrada del módulo de alta tensión.

La tensión medida antes del diodo D1 (**Figura 64**) se puede ver en **Figura 68** mientras que la tensión medida luego del diodo se puede ver en la **Figura 69**. Como se puede ver en estas dos últimas figuras, el diodo D1 impide que los picos de tensión a la entrada del módulo de

alta tensión (generados por su propio funcionamiento) lleguen al sistema de alimentación e impide que se propaguen por los demás subsistemas.

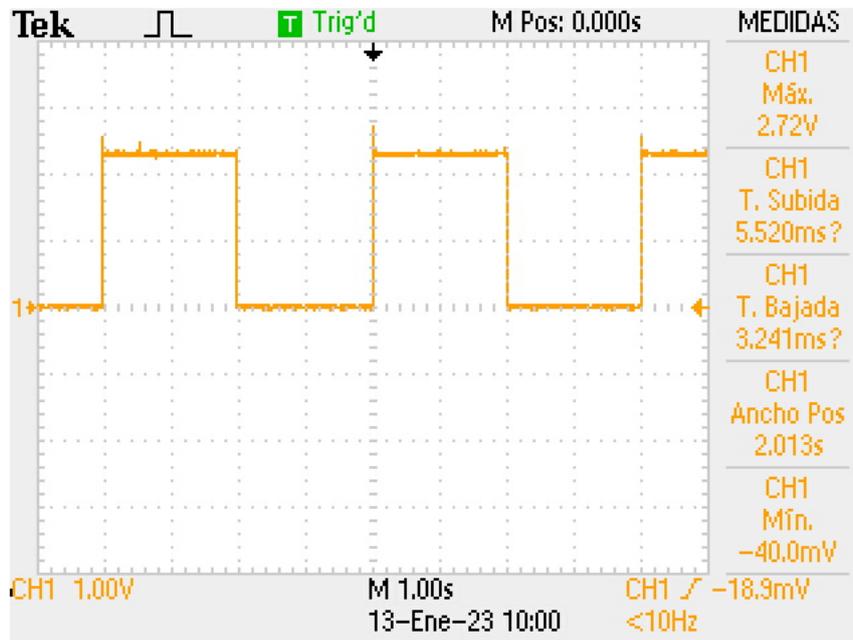


Figura 68: Tensión medida antes del diodo D1.

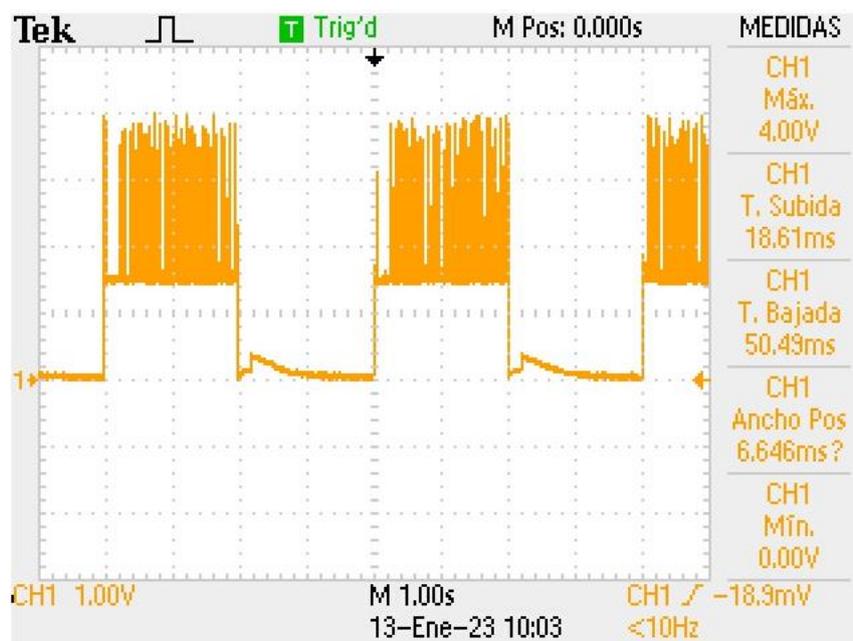


Figura 69: Medición del diodo después de diodo D1.

Como se puede ver en la **Figura 69** el diodo zener (**Figura 64**) limita los picos de tensión a 4 V, esto era de esperarse ya que el diodo zener disponible para realizar pruebas era de 4 V. Por otro lado la alimentación del módulo es 1,6 V en lugar de 3.3 V debido a la caída de tensión en el diodo D1 (0,7V) y el empleo de un transistor BJT (con una tensión VCE

apreciable) en lugar de un mosfet como se pensó para el prototipo final en el **Capítulo 3**. Sin embargo, sin el empleo de este diodo zener, los picos de tensión a la entrada del módulo pueden llegar hasta 12 V como se muestra en la **Figura 70**. En este caso, el módulo de alta tensión fue alimentado en forma directa por medio de una fuente de 3 V.

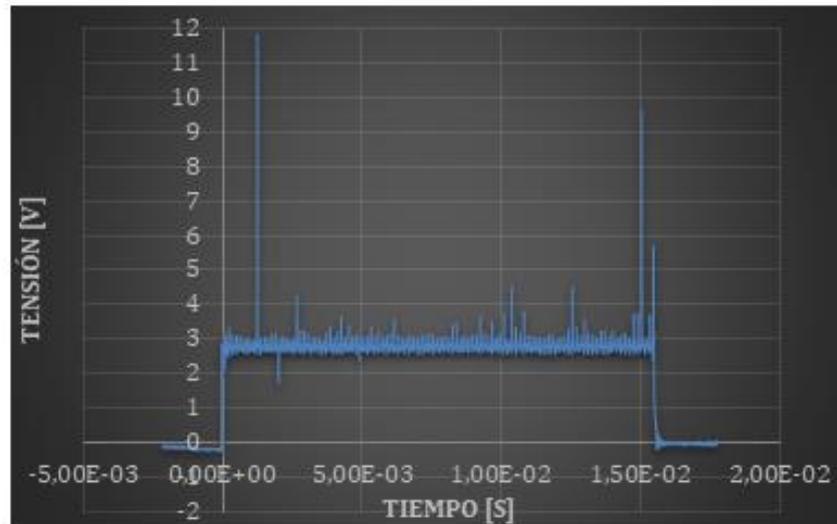


Figura 70: Picos de tensión a la entrada del módulo de alta tensión sin diodo zener.

Capítulo 7: Conclusiones

En este capítulo se enumeran los objetivos cumplidos y se plantean los pasos a seguir para la continuación del desarrollo del sistema.

7.1 Objetivos cumplidos

A continuación se listan los logros alcanzados:

1. Se realizó un estudio de publicaciones acerca del tema que permitió formar una idea conceptual del sistema y así poder definir requerimientos básicos de diseño.
2. Se realizó una extensiva búsqueda de componentes y se eligió la opción que mejor cumplía con los requerimientos propuestos para cada caso.
3. Se logró diseñar los distintos subsistemas empleando la totalidad de los componentes seleccionados exceptuando el IMU: ICM20948 y el regulador de tensión: ISL9120IRTNZ.
4. Se logró diseñar el esquemático completo y PCB.
5. Se programaron todos los subsistemas correctamente.
6. Se realizaron pruebas funcionales de transmisión y recepción LoRa, lectura de datos **GPS**, temperatura, pulso cardiaco, campo magnético y el accionamiento de actuadores sonoros y de descara eléctrica.
7. Se emplearon conceptos de programación en C, electrónica analógica y radio frecuencia los cuales fueron aprendidos durante la carrera y también se fueron adquiriendo a lo largo del desarrollo del proyecto.

7.2 Pasos siguientes

A continuación se listan los pasos siguientes para el desarrollo del sistema:

1. Pruebas funcionales en campo sobre animales a cargo de un profesional del cuidado animal. Se debe verificar la efectividad de los actuadores y la factibilidad de obtener los parámetros biométricos con los sensores presentados. Además se debe evaluar el protocolo de comunicación con la estación base.
2. Ajustes necesarios tras pruebas en campo.
3. Fabricación del producto final en PCB implementando el IMU: ICM20948 y el regulador de tensión: ISL9120IRTNZ.
4. Certificaciones para su comercialización.

Capítulo 8: Fuentes

8.1 Bibliografía

Distel, R.A., 2013. Manejo del pastoreo en pastizales de zonas áridas y semiáridas

Anderson, D.M., Hale, C.S., 2001. Animal control system using global positioning and instrumental animal conditioning.

C. Umstatter; "The evolution of virtual fences: A review"; Computers and Electronics in Agriculture 75, 2011.

P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck (Eds.); "Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems"; Springer, 2017.

Bavera, G. A., 2009; Cursos de Producción Bovina de Carne, FAV UNRC: ALAMBRADO ELÉCTRICO. https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/instalaciones/03-alambrado_electrico.pdf

Muminov, D Na, C. Lee, H Kyu Kang, H Seok Jeon., (2019) "Modern Virtual Fencing Application: Monitoring and Controlling Behavior of Goats Using GPS Collars and Warning Signals"

Senasa; Manual de bienestar animal: https://www.produccion-animal.com.ar/etologia_y_bienestar/bienestar_en_general/62-Bienestar_animal.pdf

S. M. López Silva, M. L. Dotor, J. P. Silveira, R. Giannetti y L. Herrera., (2009) "Fotopletismografía por reflexión con LEDs infrarrojos para evaluar órganos y tejidos intra-abdominales: estudio inicial en cerdos".

Diaz T.,Carmona G. 2010. "Instalaciones Solares Fotovoltaicas".,McGraw-Hill.

Hata, M., 1980. "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services".

8.2 Referencias

- [DR-1] [NEO-6 DataSheet \(GPS.G6-HW-09005\).pdf \(u-blox.com\)](#)
- [DR-2] Resolución del Ministerio de Modernización N° 581/18 (2018): [res581MM.pdf \(enacom.gob.ar\)](#)
- [DR-3] Resolución N° 4653/19 (2019)
- [DR-4] Semtech; SX1276/77/78/79 -137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/800242/SEMTECH/SX1279.html>
- [DR-5] [puiaudio.com/product/indicators/ai-1027-twt-5v-2-r](#)
- [DR-6] Resolución-25-2013-SENASA - Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria | [SENASA](#)
- [DR-7] Twstung; datasheet TW-DC-DP: [TW-DC-DP Boost Step-up Power Module High-voltage Converter Generator-Jiangsu Tianwang Solar Technology Co., Ltd \(twstungun.com\)](#)
- [DR-8] Video demostrativo (TW-DC-DP): https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-wholesale-Stable-Remote-control-mousetrap_1600697146268.html?spm=a2700.wholesale.0.0.7abb612eL8Opwi
- [DR-9] Maxim integrated; MAX30102 datasheet, (2018): [MAX30102--High-Sensitivity Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health \(maximintegrated.com\)](#)
- [DR-10] Melexis; MLX90614 datasheet, (2006): [Digital Non-Contact Infrared Thermometer \(MLX90614\) #Melexis](#)
- [DR-11] TDK invenSense; ICM-20948 datasheet, (2021): [ds-000189-icm-20948-v1.5.pdf \(tdk.com\)](#)
- [DR-12] EESAMR34/35 datasheet: [Datasheet - Google Drive](#)
- [DR-13] Placa carrier EESAMR34/35 schematic [Esquemático Carrier EESAMR34-35 - Google Drive](#)
- [DR-14] Publicación panel solar CNC136X110-6: [Panel Solar de 6V con cable de 30 100 200CM, Mini Sistema Solar DIY para batería, cargador de teléfono celular de 0,6 W 1W 1,1 W 2W 3W 3,5 W 4,5 W 6W 10W|Piezas y accesorios de energía solar| - AliExpress](#)
- [DR-15] Hoja de datos Batería LI-ion LCR18650P: [LCR18650P.pdf \(motomaargentina.com.ar\)](#)
- [DR-16] Hoja de datos cargador de batería Li-Ion CN3065: [CN3065 pdf, CN3065 Description, CN3065 Datasheet, CN3065 view :: ALLDATASHEET :::](#)
- [DR-17] Hoja de datos regulador Buck-boost: [ISL9120IR Datasheet \(renesas.com\)](#)
- [DR-18] [https://www.renova-energia.com/categoria-producto/baterias-de-ciclo-profundo/\(todas\) New Technology Batteries Guide: NIJ Guide 200-98 | National Institute of Justice \(ojp.gov\)](https://www.renova-energia.com/categoria-producto/baterias-de-ciclo-profundo/(todas) New Technology Batteries Guide: NIJ Guide 200-98 | National Institute of Justice (ojp.gov))
- [DR-19] <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>
- [DR-20] https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9360/Anexos_Sebasti%C3%A1n_Bardo.pdf
- [DR-21] <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Panasonic%20Batteries%20PDFS/Ni%20Cd%20Catalog%202002-03%20v1.pdf>
- [DR-22] <https://core.ac.uk/download/pdf/87655074.pdf>
- [DR-23] https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/downloads/files/id_ni-mh_1104_e.pdf
- [DR-24] <https://www.electronicafacil.top/bateria/funcionamiento-y-caracteristicas-de-la-bateria-de-niquel-hierro-o-de-la-bateria-edison/>
- [DR-25] [Batería de níquel-hidrógeno HistoriayCaracteristicas \(hmong.es\)](#)
- [DR-26] https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/downloads/files/panasonic_li-ion_handbook.pdf
- [DR-27] <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1536/MANUAL%20DE%20B%C3%9ASQUEDA%20R%C3%81PIDA%20PARA%20BATER%3%8DAS.pdf?>
- [DR-28] <https://www.victronenergy.com.es/upload/documents/Datasheet-GEL-and-AGM-Batteries-ES.pdf>
- [DR-29] <http://www.consonance-elec.com/en/static/upload/file/20220402/1648909611124500.pdf>
- [DR-30] [LTC4162-L \(Rev A\) \(analog.com\)](#)
- [DR-31] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01149c.pdf>
- [DR-32] Hoja de datos MAX30100: [MAX30100.pdf \(analog.com\)](#)
- [DR-33] Hoja de datos IMU: https://digilent.com/reference/media/reference/pmod/pmod-interface-specification-1_2_0.pdf

34. [DR-34] [Okumura-Hata curve calculation tool | technical tools | CIRCUIT DESIGN, INC. \(cdt21.com\)](#)
35. [DR-35] <https://www.semtech.com/design-support/lora-calculator>