



## MONITORIZACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS VÍA LORA

BENJAMÍN MUÑOZ MARQUÉS  
MAURO BROTONS GARCÍA

ENERGY STUDENT

FLORIDA UNIVERSITARIA  
FEBRERO, 2024

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Abstract . . . . .	2
<b>2. Espectro y radiación electromagnéticos</b>	<b>3</b>
2.1. Frecuencias ultra altas . . . . .	4
2.1.1. Absorción . . . . .	4
2.1.2. Atenuación . . . . .	4
2.1.3. Polarización . . . . .	5
2.1.4. Dispersión troposférica . . . . .	5
2.1.5. Reflexión . . . . .	6
2.1.6. Refracción . . . . .	6
2.1.7. Difracción . . . . .	7
<b>3. Tecnología LoRa</b>	<b>8</b>
3.1. Chirp . . . . .	8
3.2. Decodificación LoRa . . . . .	10
3.3. Sincronización de datos Tx-Rx LoRa . . . . .	11
3.4. Módulo LoRa SX1278 . . . . .	12
3.5. Especificaciones técnicas LoRa SX1278 . . . . .	15
<b>4. Diseño eléctrico del transmisor</b>	<b>17</b>

4.1.	Panel solar . . . . .	18
4.1.1.	Materiales tipo n y tipo p . . . . .	18
4.2.	Controlador TP4056 . . . . .	19
4.2.1.	Especificaciones técnicas TP4056 . . . . .	19
4.2.2.	Esquema eléctrico del TP4056 . . . . .	20
4.3.	Batería Li-Ion 18650 . . . . .	21
4.3.1.	Especificaciones técnicas 18650 . . . . .	21
4.4.	Elevador de tensión MT3608 . . . . .	22
4.4.1.	Elevador de tensión . . . . .	22
4.4.2.	Especificaciones técnicas MT3608 . . . . .	22
4.4.3.	Esquema eléctrico del MT3608 . . . . .	23
4.5.	Sensor BME280 . . . . .	25
4.5.1.	Esquema eléctrico del BME280 . . . . .	26
4.6.	Sensor de corriente ACS712 . . . . .	28
4.6.1.	Esquema eléctrico del ACS712 . . . . .	29
4.7.	Sensor de voltaje . . . . .	30
4.8.	Esquema eléctrico del transmisor LoRa . . . . .	31
4.8.1.	Cálculo de consumo . . . . .	33
<b>5.</b>	<b>Radio enlace LoRa</b>	<b>35</b>
5.1.	Prueba nº1: Potenciómetro-Led . . . . .	37
5.1.1.	Transmisor (Tx) . . . . .	37
5.1.2.	Receptor (Rx) . . . . .	39
5.1.3.	Resultados prueba nº1 . . . . .	40
5.2.	Prueba nº2: Alcance . . . . .	41
5.2.1.	Transmisor (Tx) . . . . .	43
5.2.2.	Receptor (Rx) . . . . .	44

5.2.3. Resultados prueba nº2 . . . . .	45
5.3. Prueba nº3: BME280 . . . . .	47
5.3.1. Transmisor (Tx) . . . . .	48
5.3.2. Receptor (Rx) . . . . .	49
5.3.3. Resultados prueba nº3 . . . . .	51
<b>6. Futuras mejoras</b>	<b>52</b>
<b>7. Conclusiones y perspectivas</b>	<b>54</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>56</b>
<b>Apéndice A. TP4056</b>	<b>57</b>
<b>Apéndice B. MT3608</b>	<b>61</b>
<b>Apéndice C. LORA SX1278</b>	<b>69</b>

# Índice de Tablas

3.1. Especificaciones técnicas 18650. . . . .	15
4.1. Especificaciones técnicas TP4056. . . . .	19
4.2. Especificaciones técnicas 18650. . . . .	21
4.3. Especificaciones técnicas MT3608. . . . .	22
4.4. Especificaciones técnicas BME280. . . . .	25
4.5. Principales características del sensor ACS712. . . . .	28
5.1. RSSI a 20 m. . . . .	45
5.2. RSSI a 100 m. . . . .	46
5.3. RSSI a 500 m. . . . .	46

# Índice de Figuras

2.1.	Nomenclatura de frecuencias . . . . .	3
2.2.	Dispersión troposférica. . . . .	5
2.3.	Reflexión de una onda. . . . .	6
2.4.	Refracción de una onda. . . . .	6
2.5.	Difracción de una onda. . . . .	7
3.1.	Up-Chirp y Down-Chirp . . . . .	8
3.2.	Comparación del factor de propagación LoRa: 7 - 12. . . . .	9
3.3.	Discontinuidad en el Chirp. . . . .	10
3.4.	Correlación LoRa. . . . .	13
3.5.	Lora sx1278. . . . .	13
3.6.	Módulo Lora sx1278. . . . .	14
4.1.	Corte transversal de una célula fotovoltaica. . . . .	18
4.2.	Chip TP4056. . . . .	19
4.3.	Esquema eléctrico TP4056. . . . .	20
4.4.	Batería 18650. . . . .	21
4.5.	Esquema eléctrico MT3608. . . . .	23
4.6.	Sensor BME280. . . . .	25
4.7.	Esquema eléctrico BME280. . . . .	26
4.8.	Módulo BME280. . . . .	27

4.9. sensor ACS712. . . . .	28
4.10. Esquema eléctrico ACS712. . . . .	29
4.11. Divisor de tensión. . . . .	30
4.12. Esquema eléctrico transmisor LoRa. . . . .	31
4.13. Montaje del circuito del transmisor LoRa. . . . .	32
5.1. Esquema eléctrico transmisor. . . . .	38
5.2. Esquema eléctrico receptor. . . . .	40
5.3. Esquema eléctrico receptor y montaje nº3. . . . .	47
5.4. Resultados en LCD. . . . .	51

# Capítulo 1

## Introducción

En todas las instalaciones de energías renovables, se necesita un estudio previo del entorno. En el caso de la energía solar, se estudia la cantidad de radiación solar que percibe una superficie. En la energía eólica, se estudia el comportamiento generalizado del viento en una zona. En la energía hidráulica, se estudia la fuerza con la que actúa el agua sobre un caudal determinado.

En este proyecto vamos a diseñar una estación portable y modular, que sea de fácil instalación para poder realizar el estudio previo para estas 3 tecnologías. De esta manera, ubicando varias estaciones en una zona, podemos verificar cual es la más adecuada para la instalación.

Además, se va a utilizar la tecnología LoRa para enviar los datos de la estación portable a un gateway, que será el encargado de subir los datos a la nube en tiempo real. De modo que todo quedará registrado. Ese registro de datos se usará para determinar que zona es la óptima para la instalación. Tras este estudio el módulo se quedará fijo con la instalación para enviar los datos de producción energética al nodo LoRa.

Por lo tanto, el sistema, lee datos meteorológicos en diferentes ubicaciones, los cuales son enviados al nodo central o Gateway.

## 1.1. Abstract

In all renewable energy installations, a prior environmental study is required. In the case of solar energy, the amount of solar radiation that a surface receives is studied. In the case of wind energy, the generalized behavior of the wind in a zone is studied. In the case of hydroelectric energy, the force with which the water acts on a given flow is studied.

In this project, we will design a portable and modular station that is easy to install in order to carry out the preliminary study for these 3 technologies. In this way, by placing several stations in a zone, we can verify which is the most suitable for the installation.

In addition, LoRa technology will be used to send the data from the portable station to a gateway, which will be responsible for uploading the data to the cloud in real time. This way, everything will be recorded. This data record will be used to determine which zone is the optimal one for the installation. After this study, the module will remain fixed with the installation to send the energy production data to the LoRa node.

Therefore, the system reads meteorological data in different locations, which are sent to the central node or Gateway.

# Capítulo 2

## Espectro y radiación electromagnéticos

La radiación electromagnética son las ondas, o en vista de la noción de la dualidad de la relación entre la partícula y la onda, los fotones del campo electromagnético que se propagan a través del espacio llevando la energía electromagnética. Por su frecuencia y longitud de onda, la radiación electromagnética está clasificada según la frecuencia de oscilación.

Según la definición de la Unión internacional de telecomunicaciones (UIT), el espectro radioeléctrico por sí cuenta con un gran rango de frecuencias como se muestra en la figura (2.1).

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
3	ULF	300-3 000 Hz	Ondas hectokilométricas	B.hkm
4	VLF	3-30 kHz	Ondas miramétricas	B.Mam
5	LF	30-300 kHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300-3 000 kHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3-30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30-300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300-3 000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3-30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30-300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12		300-3 000 GHz	Ondas decimilimétricas	B.dmm
13		3-30 THz	Ondas centimilimétricas	B.cmm
14		30-300 THz	Ondas micrométricas	B.µm
15		300-3 000 THz	Ondas decimicrométricas	B.dµm

Figura 2.1: Nomenclatura de frecuencias<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones (pag.2). Unión internacional de Telecomunicaciones.

## 2.1. Frecuencias ultra altas

La tecnología LoRa trabaja a una frecuencia ultra alta (UHF) que van desde  $378 \sim 512$  MHZ la más baja, hasta  $764 \sim 870$  MHZ la más alta. A diferencia de la radiación electromagnética en otros rangos de frecuencia, las ondas de radio en la banda UHF sólo viajan mediante la propagación del campo visual y mediante la reflexión del suelo y otros obstáculos.

Por otro lado, la propagación de las ondas electromagnéticas está expuesta a varios fenómenos que la afectan como son: absorción, atenuación, polarización, dispersión, reflexión, refracción y difracción.

### 2.1.1. Absorción

La intensidad del campo electromagnético disminuye en los medios de transmisión, como la atmósfera de la Tierra, debido a la absorción y dispersión de la energía electromagnética.

La absorción es el proceso por el cual la energía electromagnética es transferida a otra forma de energía, como el calor. La dispersión es el proceso por el cual la energía electromagnética se desvía de su trayectoria original.

En la atmósfera de la Tierra, la absorción de la energía electromagnética se produce debido a que la atmósfera está compuesta por átomos y moléculas de sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Deteriorando la señal al absorber, poco a poco, parte de la energía de una onda electromagnética que viaja de un lugar a otro. Las moléculas del aire absorben la energía electromagnética de las frecuencias más bajas, como las ondas de radio de baja frecuencia. Por lo tanto, la intensidad de las ondas de radio de baja frecuencia disminuyen más rápidamente que la intensidad de las ondas de radio de alta frecuencia.[\[12\]](#)

Los filtros ópticos y de fotografía también utilizan la absorción para reducir la intensidad de la luz visible. Los filtros para gafas de sol, por ejemplo, absorben la luz ultravioleta que es dañina para los ojos. Los filtros de densidad neutra absorben parte de la luz visible para reducir el brillo.

### 2.1.2. Atenuación

Es un fenómeno que tiene por efecto la pérdida de energía de una señal debido a la distancia. A medida que la onda se aleja de la fuente, las ondas se alejan cada vez más entre sí, por tanto la cantidad de ondas por unidad de área es menor, por lo cual se puede decir que no se pierde o se disipa potencia, la onda solo se extiende sobre un área mayor, disminuyendo la densidad de potencia conforme aumenta la distancia. Por tal razón, para que la señal llegue con la suficiente energía es necesario el uso de amplificadores o repetidores.

### 2.1.3. Polarización

Las ondas electromagnéticas están polarizadas de forma que al propagarse las oscilaciones de los campos eléctrico y magnéticos, se mantienen en un plano determinado para cada uno.

La polarización viene dada por la posición del plano de variación del campo eléctrico. Algunas transmisiones se producen con polarización horizontal: el campo eléctrico varía en un plano paralelo al suelo. Otras están polarizadas verticalmente e incluso nos podemos encontrar con ondas polarizadas de forma circular o elíptica. Estos dos últimos modos de polarización se producen cuando el campo eléctrico varía alternativamente en los planos horizontal y vertical.<sup>[2]</sup>

Una antena polarizada de manera horizontal no puede recibir ondas polarizadas de manera vertical.

### 2.1.4. Dispersión troposférica

La dispersión troposférica es un fenómeno aprovechable que permite la propagación de ondas de radio más allá del horizonte radioeléctrico. Se produce por la interacción de las ondas de radio con las irregularidades de la atmósfera, como las nubes, las gotas de lluvia y las partículas de polvo.

Las irregularidades de la atmósfera actúan como pequeños espejos, que reflejan las ondas de radio en todas direcciones. Esto permite que las ondas de radio se propaguen a través de la atmósfera y lleguen a receptores que están más allá del horizonte.<sup>[8]</sup>

La figura (3.4) muestra cómo se produce la dispersión troposférica. Las ondas de radio emitidas por la antena de transmisión (TX) se propagan a través de la atmósfera. Las irregularidades de la atmósfera reflejan las ondas de radio en todas direcciones. Las ondas de radio reflejadas llegan a la antena de recepción (RX), que las convierte en una señal eléctrica.

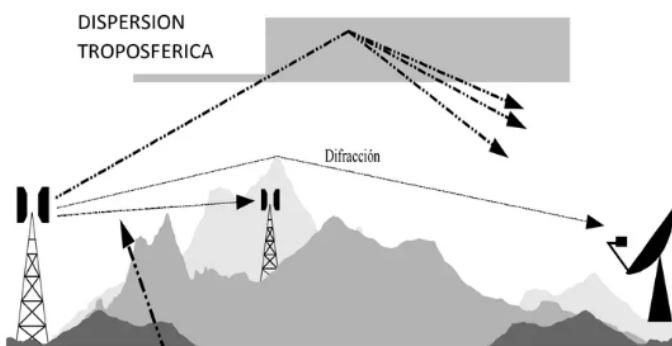


Figura 2.2: Dispersión troposférica.

Sin embargo, este fenómeno presenta una dependencia de la temperatura y humedad del aire contenido en la tropósfera, siendo estos valores no constantes.

### 2.1.5. Reflexión

La reflexión de una onda sucede cuando al estar viajando esta por un medio se encuentra con otro y este último medio hace que retroceda la onda regresando por el medio del cual provenía. [9]

En la figura (3.3) vemos como la onda incidente se encuentra con el medio 2, el cual expulsa la onda con el mismo ángulo de llegada pero en el plano contrario a este.

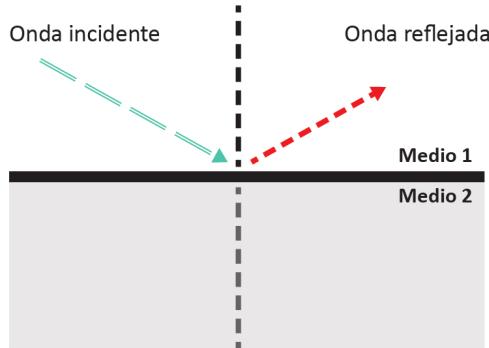


Figura 2.3: Reflexión de una onda.

### 2.1.6. Refracción

La refracción sucede cuando una onda viaja por un medio y se encuentra repentinamente con otro medio y lo atraviesa. Además, siempre que exista una refracción de la onda electromagnética, tendremos una reflexión de energía sobre la superficie de separación, por lo cual, la energía de la onda refractada será menor que la de la incidente.[9]

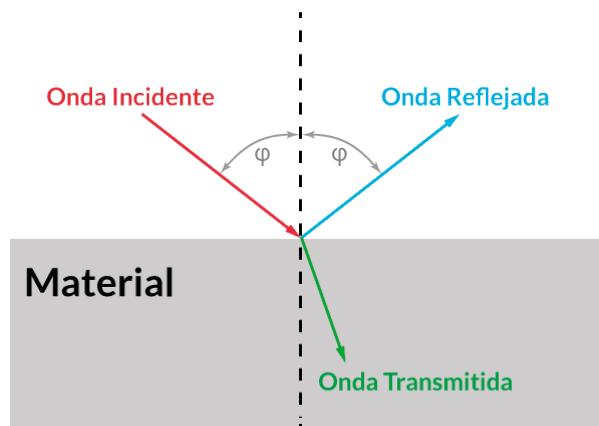


Figura 2.4: Refracción de una onda.

La ley de Snell rige los fenómenos de refracción. Esta establece que la relación entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción es igual a la relación inversa de los índices de refracción de ambos medios.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

### 2.1.7. Difracción

La difracción tiene lugar cuando las ondas que se propagan encuentran un obstáculo, por ejemplo un orificio, cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda de las ondas incidentes. Las ondas se propagan entonces como si el orificio se convirtiera en un centro emisor y penetran tras el orificio en lo que debería de ser una "zona de sombra" si su comportamiento fuera como el de un chorro de partículas. Según Huygens este comportamiento puede explicarse si suponemos que el propio orificio se convierte en fuente secundaria de ondas.[\[6\]](#)

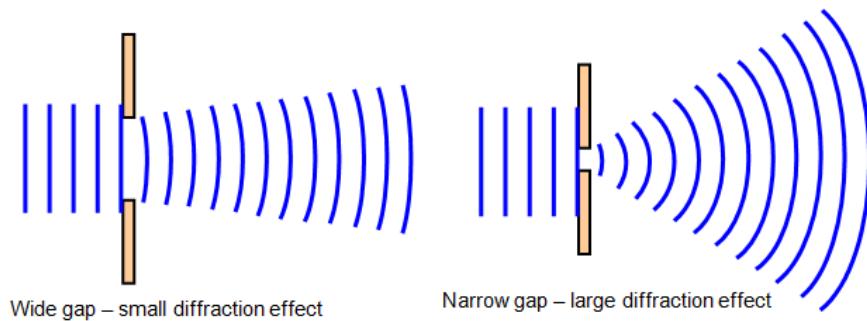


Figura 2.5: Difracción de una onda.

Como vemos en la figura (2.5) la onda de la izquierda se encuentra con un obstáculo cuya apertura es mayor a la longitud de onda. Este objeto se convierte en un nuevo centro emisor de la onda. Sin embargo, la onda de la derecha choca contra un obstáculo cuyo orificio es de un tamaño similar al de la longitud de onda (o menor). En este caso las ondas se difractan y se propagan detrás de él (Principio de Huygens).

# Capítulo 3

## Tecnología LoRa

LoRa (Long Range) es una técnica de modulación en espectro ensanchado derivada de la tecnología existente “Chirp Spread Spectrum” (CSS). En las radiocomunicaciones, se tiene un transmisor que envia datos y un receptor que lee esos datos. Para transmitir un dato del punto A a un punto B, se hace a través de un medio (el aire). El cual tiene atenuaciones, distorsiones en el canal y ruido. Cuando el dato llega al punto B, el receptor tiene que ser capaz de decodificar la señal que ha viajado por el aire. Pero primero ¿Qué es un chirp?

### 3.1. Chirp

Un chirp es una señal que varía en frecuencia de manera lineal en función del tiempo o de otra variable independiente. LoRa utiliza el chirp para cada símbolo modulado. Como vemos en la figura (3.1), existen los Up-Chirps, los cuales aumentan su frecuencia con respecto al tiempo, y los Down-Chirps, que disminuyen su frecuencia con respecto al tiempo.

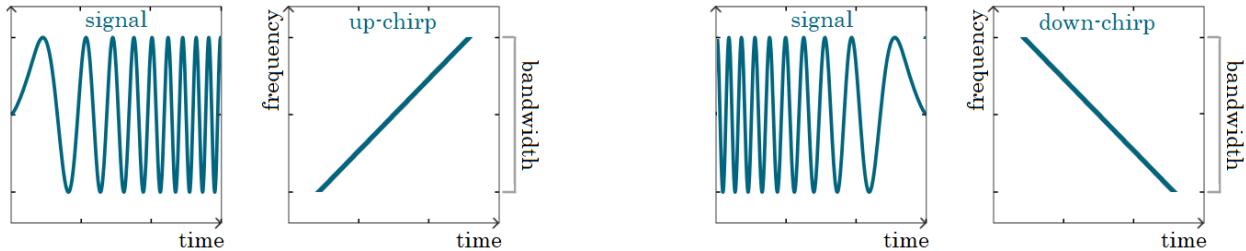


Figura 3.1: Up-Chirp y Down-Chirp

Dependiendo de como se configure la señal, el factor de propagación (SF) puede ser de 7 a 12. Esto es importante ya que dependiendo del SF que se configure, podremos enviar más o menos cantidad de simbolos en el mismo periodo de tiempo. Siendo s la cantidad de simbolos que podemos enviar en cada periodo, se tiene la siguiente formula:  $s=2^{SF}$ . Es decir, con un SF = 7 tendríamos la capacidad de enviar 128 símbolos ( $2^7$ ). De 0 a 127.

El ancho de banda indica cuánta frecuencia ocupa una señal en el espectro (medido en kHz). Un ancho de banda más alto permite ocupar más espectro, lo que resulta en una mayor resolución pero sacrifica alcance debido a la susceptibilidad a la atenuación e interferencias.

La tecnología LoRa utiliza frecuencias bajas (433 a 915 MHz), lo que le da un alcance de hasta 10 km (en condiciones ideales) debido a la longitud de onda más larga. Cuanto menor sea la frecuencia, mayor será la propagación a través de obstáculos debido a la mayor longitud de onda, como indica la fórmula:  $\lambda = \frac{c}{f}$ , donde c es la velocidad de la luz en el vacío y f es la frecuencia de la onda.

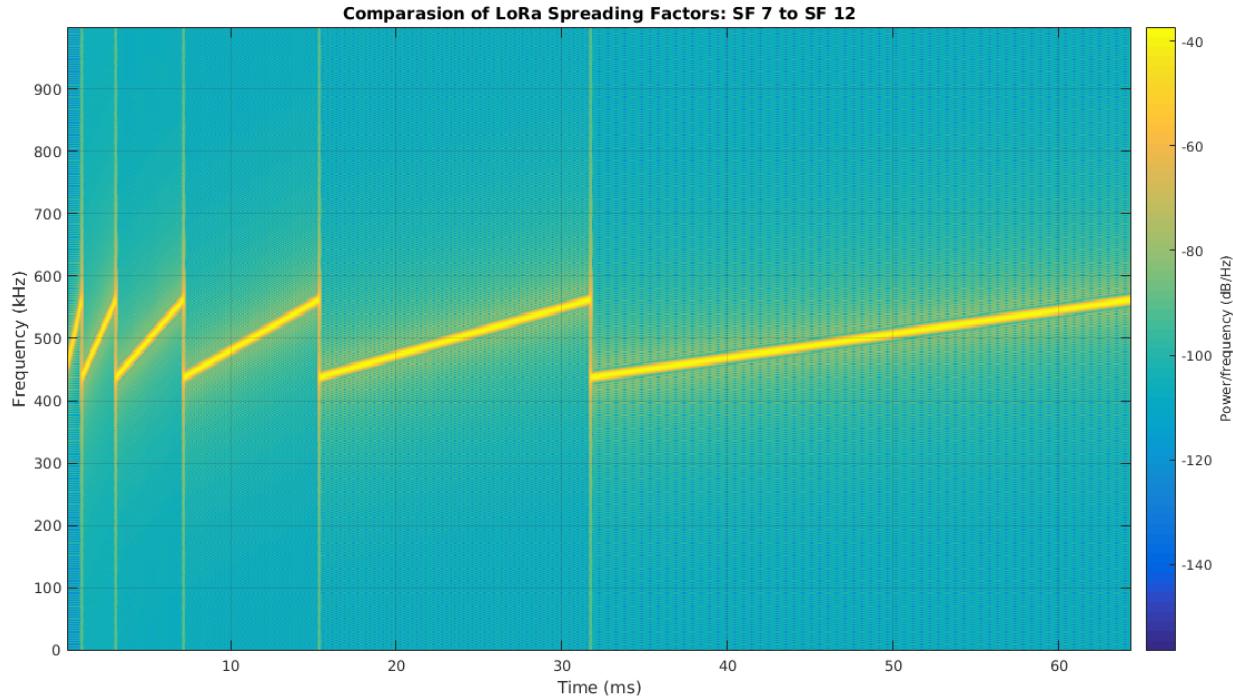


Figura 3.2: Comparación del factor de propagación LoRa: 7 - 12.

En este punto es de lógica pensar que cada símbolo representa una combinación de frecuencias distintas en un periodo  $T$ . Entonces, ¿cómo hace LoRa para decodificar esta información?

## 3.2. Decodificación LoRa

En la investigación que hizo Lorenzo Vangelista el año 2017 sobre el funcionamiento de la tecnología LoRa, se muestra una descripción matemática de cómo formular cada símbolo como una función de  $s$ . [11]

$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \cdot e^{j2\pi((s(nT_s)+k) \bmod 2^{SF})} \frac{k}{2^{SF}} \quad (3.1)$$

En la ecuación (3.1) vemos que  $T_s$  es la duración del símbolo, que es el tiempo total que tarda en transmitirse uno.  $T$  es la duración de la muestra, por lo que un símbolo será  $2^S$  elevado a  $SF$  por  $T$ . La continuación de la ecuación tiene una función exponencial. Esto es debido a que queremos transformar un Chirp en una onda sinusoidal. La ecuación que se toma de referencia es la ecuación de Euler para exponentiales complejas.

$$e^{jwt} = \cos(wt) + j \sin(wt) \quad (3.2)$$

Continuando con la ecuación (3.1), se observa que el argumento de la función exponencial contiene el número de símbolos, que sabemos que varía de 0 a 127 ( $SF=7$ ). Además,  $k$  incrementa en cada muestra, lo que aumenta la frecuencia instantánea. Por último, el operador de módulo hace que la frecuencia instantánea retroceda a la frecuencia más baja cuando llega a  $2^{SF}$ . Que hace que simbolo salte de su máxima frecuencia a su mínima. (ver figura 3.3)

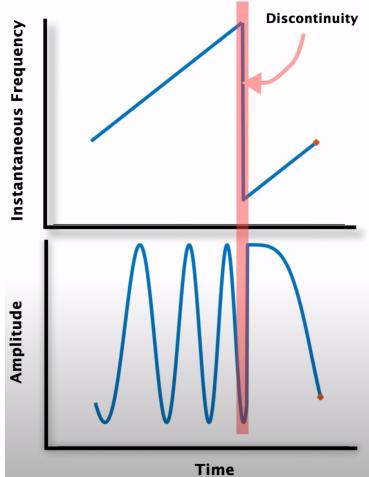


Figura 3.3: Discontinuidad en el Chirp.

Para la decodificación de la señal se utiliza el principio matemático de la correlación. En el contexto de la tecnología LoRa, la correlación es una medida matemática que describe cómo dos señales están relacionadas entre sí. Cuando el receptor LoRa recibe una señal,

realiza un proceso de correlación entre la señal recibida y los patrones de duración de pulsos que tiene en su memoria local.

El receptor compara la duración de los pulsos de la señal recibida con los diferentes patrones de duración de pulsos que conoce. Este proceso implica calcular la similitud o 'correlación' entre la señal recibida y cada símbolo posible en su conjunto de referencia. Una vez que se ha identificado el símbolo óptimo, el receptor decodifica ese símbolo para obtener la información transmitida.

Sobre el papel, esta serie de comparaciones constantes con cada símbolo es ineficiente. Por eso, en el documento L.Vangelista [11] se habla sobre una implementación computacional eficiente, que utiliza LoRa, para resolver este problema. Se trata de sincronizar la entrada de símbolos al receptor.

### 3.3. Sincronización de datos Tx-Rx LoRa

Primero, el receptor debe saber cuándo ha llegado una trama y, segundo, debe alinear los símbolos entrantes con el algoritmo que utiliza para realizar la verificación de similitud.

Lo que hace LoRa es crear un preámbulo de  $x$  Up-Chirps para indicarle al receptor que se está iniciando una comunicación. Además, la cantidad de chirps iguales que se envían en el preámbulo indica la cantidad de símbolos que se van a enviar. Por ejemplo, si se envía el símbolo 22 diez veces, quiere decir que a partir del último 22 se van a enviar 10 símbolos de datos. Si resulta que el primer símbolo después del preámbulo es un 22 no resulta ningún problema. Para que esto no ocurra, cuando el preámbulo finaliza el transmisor añade 2 Down-Chirps.

Hasta ahora, se había explicado cómo el dispositivo utiliza la correlación para comprobar las similitudes de la muestra con cada una de las funciones para ese factor de propagación particular. La ecuación de inicio que relaciona esta comprobación es la siguiente:

$$\sum_{k=0}^{2^{SF}-1} r(nT_s + kT) \cdot c^*(nT_s + kT) \quad (3.3)$$

La ecuación (3.3) representa la multiplicación de la señal recibida por el conjugado complejo de los símbolos básicos. La variable  $r$  representa la señal recibida,  $n$  representa el número de símbolos,  $T_s$  representa el intervalo de símbolos y  $k$  representa el índice del símbolo. Dicha ecuación se utiliza para la demodulación de cada símbolo que lee el receptor. Para ello necesitamos convertir el Chirp a la banda base compleja. Esto se puede hacer multiplicando la señal por el conjugado complejo de los símbolos básicos. El conjugado complejo de un símbolo básico es simplemente la versión de ese símbolo con la fase invertida.  $z' = a - bi$ .

Convenientemente, el conjugado complejo de un Up-Chirp es un Down-chirp. Lo que agilita el proceso de correlación.

Si modificamos la ecuación (3.1) añadiendo un signo negativo al coeficiente de la potencia de la función exponencial, obtenemos el conjugado complejo de la función exponencial.

$$c^*(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \cdot e^{-j2\pi(s(nT_s)+k \bmod 2^{SF})} \frac{k}{2^{SF}} \quad (3.4)$$

A continuación, se añade a la ecuación ‘k-k’, lo cual nos será útil en el siguiente paso.

$$c^*(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \cdot e^{-j2\pi(s(nT_s)+k \bmod 2^{SF})} \frac{k}{2^{SF}} \quad (3.5)$$

Ahora sacamos el término k para manejarlo en su propia exponencial, elevado al cuadrado.

$$c^*(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \left( e^{-j2\pi \frac{k^2}{2^{SF}}} \right) \cdot e^{-j2\pi(s(nT_s)+k \bmod 2^{SF}) - k} \frac{k}{2^{SF}} \quad (3.6)$$

El término encuadrado es el Down-Chirp base. Entonces, podemos cancelar las k y nos queda una ecuación que su resultado es un onda sinusoidal. Donde la variable afecta a la frecuencia de la onda.

Con la ecuación (3.6) se monta la versión más eficiente del receptor. Mediante esta ecuación, realizamos la comparación de la onda electromagnética que nos llega con nuestra base de datos, la cual está guardada en binario. Por lo tanto, para traducir la onda, hay que hacer la transformada de fourier. Justamente la ecuación (3.6) es la que usa el receptor para convertir las ondas en bits.

Una vez se han traducido las ondas, simplemente hay que descifrar la onda que nos ha llegado con la base de datos. En la siguiente imagen vemos como se comprueban 3 muestras de onda, hasta que se encuentra la que más se asemeja. El color naranja sería la onda que le llega al receptor. Mientras que el color azul serían las ondas que está comparando. Obviamente de las tres que vemos la que más se asemeja es la tercera, que sería el numero 113.

## 3.4. Módulo LoRa SX1278

Para el desarrollo del proyecto se ha escogido el módulo LoRa SX1278. Este dispositivo es un transceptor de radiofrecuencia de espectro ensanchado de largo alcance (LoRa). El cual ha sido diseñado por la empresa Semtech Corporation.

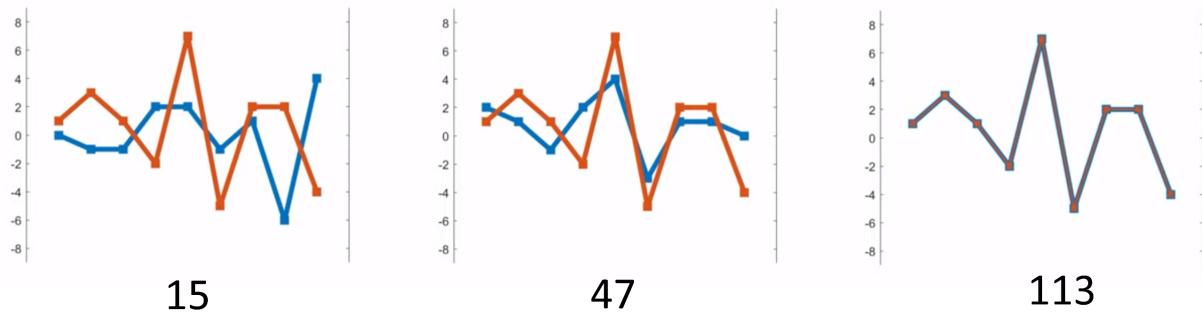


Figura 3.4: Correlación LoRa.



Figura 3.5: Lora sx1278.

Se utilizarán dos SX1278 idénticos al de la figura (3.6) para el montaje. Uno para transmitir información y otro para recibirla.



Figura 3.6: Módulo Lora sx1278.

### 3.5. Especificaciones técnicas LoRa SX1278

A continuación se muestran las especificaciones técnicas extraídas del datasheet de semtech [1] y el fabricante, que en este caso es AI-Thinker. Cuyo datasheet se encuentra en el apéndice C.

Característica	Valor
Potencia de transmisión	+18dBm - 10mW
Sensibilidad de recepción	-148dBm
Rango de frecuencia	410 MHz a 525 MHz
Modo de modulación	LoRa
Ancho de banda	125 kHz - 250 kHz
Factor de dispersión	7-12
Tasa de datos	0.3 kbps - 37.5 kbps
Tasa de codificación	4/5, 4/6, 4/7, 4/8
Optimizador de baja tasa de datos	Sí
Longitud del preámbulo	8-64 bits
Encabezado	0-255 bytes
Longitud de la carga útil	0-255 bytes
CRC	Sí
Período de transmisión	100 ms - 65535 ms
Duración de la recepción	10 ms - 65535 ms
Período de recepción	100 ms - 65535 ms
Consumo de corriente (Transmisión)	120 mA
Consumo de corriente (Recepción)	1,8-14 mA
Interfaz	SPI

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas 18650.

- **Potencia de transmisión:** Es la potencia máxima que el módulo puede transmitir. En el caso del SX1278, es de +20 dBm, lo que equivale a 10 mW.
- **Sensibilidad de recepción:** Es la potencia mínima que el módulo puede recibir. En el caso del SX1278, es de -148 dBm, lo que equivale a una potencia de -148 microvatiois.
- **Rango de frecuencia:** Es la banda de frecuencia en la que el módulo puede operar. En el caso del SX1278, es de 410 a 525 MHz.
- **Modo de modulación:** Es la técnica utilizada para transmitir datos. En el caso del SX1278, se utiliza la modulación LoRa, que es una técnica de espectro ensanchado que permite alcanzar distancias de hasta 10 km en condiciones ideales.
- **Ancho de banda:** Es el ancho de la señal transmitida. En el caso del SX1278, el ancho de banda es ajustable de 125 a 250 kHz.

- **Factor de dispersión:** Es un parámetro que determina la forma de la señal transmitida. En el caso del SX1278, el factor de dispersión es ajustable de 7 a 12.
- **Tasa de datos:** Es la velocidad a la que se transmiten los datos. En el caso del SX1278, la tasa de datos es ajustable de 0,3 a 37,5 kbps.
- **Tasa de codificación:** Es un parámetro que determina la cantidad de datos redundantes que se incluyen en la señal transmitida. En el caso del SX1278, la tasa de codificación es ajustable de 4/5 a 4/8.
- **Optimizador de baja tasa de datos:** Es una función que mejora el rendimiento del módulo a bajas tasas de datos. En el caso del SX1278, el optimizador de baja tasa de datos está activado por defecto.
- **Longitud del preámbulo:** Es el número de bits que se transmiten antes de los datos. El preámbulo ayuda a sincronizar el receptor con el transmisor. En el caso del SX1278, la longitud del preámbulo es ajustable de 8 a 64 bits.
- **Encabezado:** Es una serie de bytes que se transmiten antes de los datos. El encabezado puede utilizarse para almacenar información sobre la trama, como el tipo de trama o la longitud de los datos. En el caso del SX1278, el encabezado tiene una longitud máxima de 255 bytes.
- **Longitud de la carga útil:** Es la longitud de los datos que se transmiten. En el caso del SX1278, la longitud de la carga útil es ajustable de 0 a 255 bytes.
- **CRC:** Es un código de verificación de redundancia cíclica que se transmite al final de los datos. El CRC se utiliza para detectar errores en la transmisión. En el caso del SX1278, el CRC está activado por defecto.
- **Período de transmisión:** Es el tiempo que el transmisor tarda en transmitir una trama. En el caso del SX1278, el período de transmisión es ajustable de 100 a 65535 ms.
- **Duración de la recepción:** Es el tiempo que el receptor tarda en recibir una trama. En el caso del SX1278, la duración de la recepción es ajustable de 10 a 65535 ms.
- **Período de recepción:** Es el tiempo que el receptor pasa escuchando la señal. En el caso del SX1278, el período de recepción es ajustable de 100 a 65535 ms.
- **Consumo de corriente (Transmisión):** Es la cantidad de corriente que consume el módulo en modo de transmisión. En el caso del SX1278, el consumo de corriente es de 120 mA.
- **Consumo de corriente (Recepción):** Es la cantidad de corriente que consume el módulo en modo de recepción. En el caso del SX1278, el consumo de corriente es de 1,8 a 14 mA.
- **Interfaz:** Es el método utilizado para comunicarse con el módulo. En el caso del SX1278, la interfaz es SPI.

# Capítulo 4

## Diseño eléctrico del transmisor

El transmisor es el dispositivo encargado de enviar la información a través de la tecnología LoRa. Utilizamos el transmisor para monitorizar los valores del entorno. Para ello necesitamos un Arduino, un módulo LoRa y los sensores que leen todos los valores, según la tecnología que se vaya a instalar. Sin embargo, a la hora de diseñar van surgiendo imprevistos.

En primer lugar, el diseño se trata de una estación portable, por tanto surge el primer problema. La alimentación del circuito del transmisor. Por eso vamos a implementar un pequeño panel solar de 5v y 2,5w que suministrará corriente a todo el circuito. ¿Y cuando no haya sol? Entonces la alimentación quedará respaldada por una batería de ión de litio de 3,7v. Aunque realmente será la batería la que suministre la corriente constantemente. Para cargar la batería utilizaremos un TP4056, el cual explicaremos más adelante.

En segundo lugar, nos damos cuenta que un arduino nano tiene que ir alimentado entre los valores de 5-12v. El TP4056 entrega un máximo de 4,2 voltios, lo cual no es suficiente para el arduino. Para conseguir elevar el voltaje lo primero que pensamos fue en diseñar un circuito ‘boost converter DC-DC’. Sin embargo, ya se comercializan módulos ‘step-up’ que son baratos, de tamaño reducido y son muy eficientes. Aun así, explicaremos el comportamiento del ‘boost converter’ que hemos escogido, el MT3608.

Por último, hemos integrado el sensor BME280, que mide temperatura, humedad y presión. Este sensor también enviará los datos por LoRa y se subirán a la nube.

El esquema del circuito de potencia consta de: un panel solar, un controlador de carga de la batería ‘TP4056’, una batería batería ‘18650’, un elevador de tensión ‘MT3608’(boost converter), un Arduino Nano y un interruptor deslizante para quitar la alimentación cuando conectemos el microcontrolador por micro-USB.

Para entender como funciona cada uno de los componentes, vamos a analizarlos uno a uno.

## 4.1. Panel solar

El efecto fotoeléctrico es el fenómeno por el cual un haz de luz puede liberar electrones de un material. Este fenómeno fue descubierto por Heinrich Hertz en 1887, pero no fue explicado hasta 1905, cuando Albert Einstein propuso una explicación cuántica.

Según la explicación de Einstein, la luz se compone de cuantos de energía llamados fotones. Cuando un fotón incide en un material, puede transferir su energía a un electrón, lo que hace que el electrón salte de su órbita. Si la energía del fotón es mayor que el trabajo de extracción, el electrón podrá escapar del material y convertirse en un electrón libre.[\[10\]](#)

El efecto fotovoltaico es el fenómeno por el cual la luz puede generar electricidad en un material semiconductor. Este fenómeno se basa en el efecto fotoeléctrico, pero en lugar de utilizar un material conductor se utiliza un material semiconductor.

Los materiales semiconductores son materiales que tienen una conductividad eléctrica intermedia entre la de los conductores y la de los aislantes. Los semiconductores tienen dos tipos de portadores de carga: electrones y huecos. Los electrones son partículas cargadas negativamente, mientras que los huecos son ausencias de electrones, por lo que están cargados positivamente.

### 4.1.1. Materiales tipo n y tipo p

Un panel FV se construye a base de silicio monocristalino, uniendo materiales tipo p y tipo n, formando la unión PN.

Los materiales tipo n y tipo p son materiales semiconductores que tienen una distribución diferente de portadores de carga. El material tipo n tiene un exceso de electrones, mientras que el material tipo p tiene un exceso de huecos. El tipo p está dopada en el boro y el tipo n está dopado en fósforo.

Cuando los fotones son absorbidos por el semiconductor, transmiten sus energías a los átomos de la unión PN de tal modo que los electrones de estos átomos se liberan y crean electrones (cargas N) y huecos (cargas P). Esto crea entonces una diferencia de potencial entre ambas capas.[\[7\]](#)

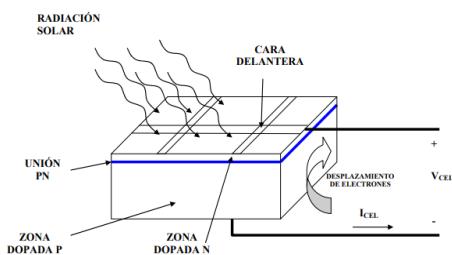


Figura 4.1: Corte transversal de una célula fotovoltaica.

## 4.2. Controlador TP4056

El chip TP4056 es un módulo de carga lineal completo de corriente y voltaje constante para baterías de litio de una sola celda de 3,7 V. Monitorizará continuamente el voltaje de la batería para garantizar que no se sobrecargue ni se descargue. El módulo requiere una fuente de alimentación de 5 V DC, en nuestro caso es un panel solar.



Figura 4.2: Chip TP4056.

### 4.2.1. Especificaciones técnicas TP4056

Los siguientes datos se han extraído del datasheet del fabricante. El cual se encuentra en el apéndice A.

Método de carga	carga lineal 1 %
Voltaje de entrada	4 - 8 V (DC)
Tensión de carga completa	4,2 V
Corriente de entrada máxima	1 A
Corriente de protección contra sobrecarga	3 A
Voltaje de protección contra sobrecarga	4,3 V $\pm$ 0,1 V
Precisión carga	1,5 A
Voltaje de batería	3,7 - 4,2 V
Voltaje de salida	4,2 V

Tabla 4.1: Especificaciones técnicas TP4056.

### 4.2.2. Esquema eléctrico del TP4056

Para que el módulo proteja por completo a la batería de Li-Ion, el chip TP4056 se monta en conjunto con el integrado DW01A y el MOSFET tipo P FS8205A. Se ha realizado el esquema del circuito del módulo TP4056 que se suele comercializar. [3]

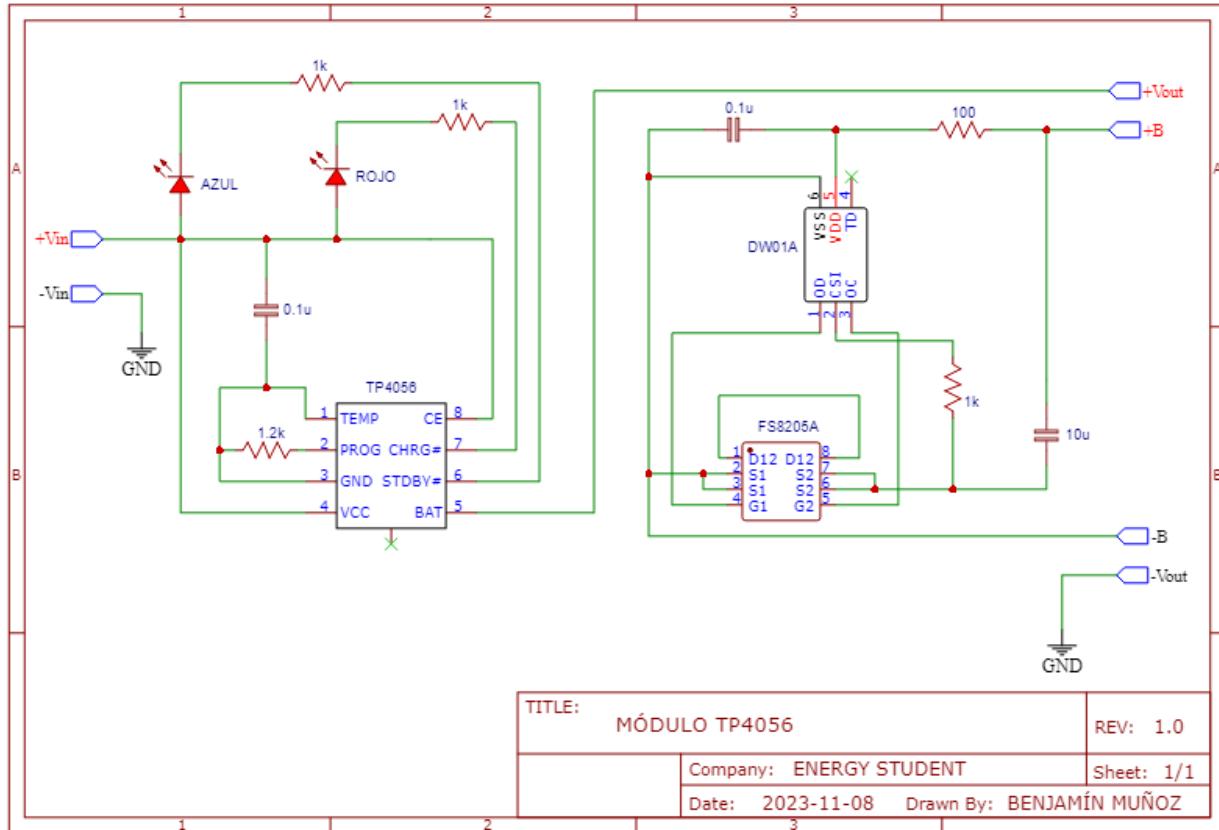


Figura 4.3: Esquema eléctrico TP4056.

El funcionamiento es el siguiente. El proceso de carga de la batería se controla mediante el integrado TP4056. La corriente de carga se ajusta conectando una resistencia de  $1,2\text{ K}\Omega$  a la terminal PROG y a GND. El CI de protección de batería DW01A se encarga de salvaguardar la batería de iones de litio contra daños o una degradación prematura debido a situaciones como la sobrecarga o la sobredescarga.

Es importante destacar que, a causa de la arquitectura interna del MOSFET tipo P FS8205A, no se requiere un diodo de bloqueo. Esto se debe a que el FS8205A impide la carga negativa del circuito de corriente, lo que mejora la eficiencia y la seguridad del proceso de carga de la batería.

### 4.3. Batería Li-Ion 18650

Las baterías 18650 son baterías de iones de litio cilíndricas que miden 18 milímetros de diámetro y 65 milímetros de largo. Son el tipo de batería recargable más común del mundo y se utilizan en una amplia gama de productos electrónicos, desde linternas y teléfonos inteligentes hasta vehículos eléctricos.

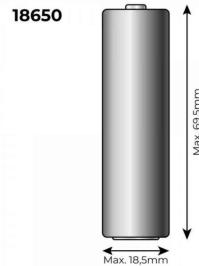


Figura 4.4: Batería 18650.

#### 4.3.1. Especificaciones técnicas 18650

A continuación se muestran las especificaciones técnicas de un tipo de batería 18650 que se suele comercializar comúnmente.

Factor de forma	18650 (1.8 cm x 6.5 cm)
Química	Iones de litio
Voltaje nominal	3,7 V
Voltaje máximo de carga	4,2 V
Voltaje mínimo de descarga	2,75 V
Capacidad nominal	2600 mAh
Corriente de carga	0,5 A
Corriente de descarga	1,5 A
Resistencia interna	16-18 mΩ
Peso	46 g
Ciclos	1500

Tabla 4.2: Especificaciones técnicas 18650.

## 4.4. Elevador de tensión MT3608

Es un módulo electrónico que se utiliza para convertir un voltaje de entrada DC más bajo en un voltaje de salida DC más alto. Es un regulador de conmutación elevador (Step-Up o Boost), lo que significa que utiliza un circuito de conmutación para generar un voltaje de salida superior al voltaje de entrada.

Para poder suministrar energía al microcontrolador se necesita elevar el voltaje de la batería. Ya que el Arduino Nano se alimenta entre 7 y 12 voltios.

### 4.4.1. Elevador de tensión

Los convertidores elevadores, o "boost converter", son una clase de fuentes de alimentación conmutadas que se utilizan para elevar un voltaje de entrada más bajo a un voltaje de salida más alto. Su funcionamiento se basa en el principio de almacenamiento de energía en un inductor y su posterior liberación en un condensador.

### 4.4.2. Especificaciones técnicas MT3608

A continuación se muestra una tabla de especificaciones técnicas extraídas del datasheet del fabricante, el cual se puede consultar en el apéndice B.

$V_{in}$	2v-24v
$V_{out}$	5v-28v
$I_{out}$	2A(MAX)
Eficiencia de conversión	<96 %
Frecuencia del switch	1,2 MHz
Onda de salida	<100 mV
Regulación de carga	$\pm 0,5\%$
Factor de regulación de voltaje	$\pm 0,5\%$
Temperatura de trabajo	-45°C +85°C
Factor de forma	37,2mm * 17,2mm * 14,0mm (L*W*H)
Peso	5 g

Tabla 4.3: Especificaciones técnicas MT3608.

#### 4.4.3. Esquema eléctrico del MT3608

La siguiente figura pertenece al esquema eléctrico del Boost Converter MT3608.

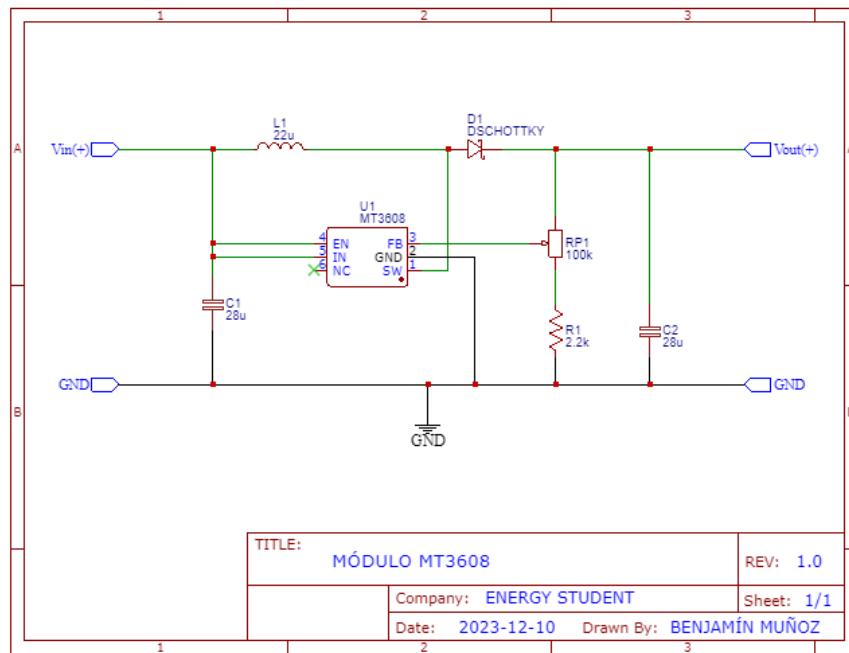


Figura 4.5: Esquema eléctrico MT3608.

A continuación se procede a explicar el funcionamiento del integrado ante este circuito: cuando el flujo de corriente se restablece, el campo magnético se descompone, lo que genera una tensión en el inductor.

El circuito de la imagen tiene los siguientes componentes:

- MT3608: es un circuito integrado regulador de voltaje conmutado. Este chip controla el flujo de corriente a través del inductor.
- $D_1$ : es un diodo Schottky que se utiliza para rectificar la señal de salida del convertidor. El diodo Schottky tiene una caída de tensión más baja que un diodo normal, lo que ayuda a aumentar la eficiencia del convertidor. Además, evita que la tensión del inductor se invierta cuando el flujo de corriente se interrumpe.
- $RP_1$ : es un potenciómetro que se utiliza para ajustar el ciclo de trabajo de la señal de conmutación del transistor. El ciclo de trabajo es la proporción del tiempo en que el transistor está encendido durante un ciclo de conmutación. Un ciclo de trabajo del 50 % significa que el transistor está encendido durante la mitad del tiempo y apagado durante la otra mitad.

- $C_1$ : es un condensadores de  $28\mu F$  que se utiliza para almacenar energía durante el tiempo en que el transistor está apagado. Esta energía se utiliza para cargar la bobina  $L_1$  durante el siguiente ciclo de conmutación.
- $C_2$ : es un condensadores de  $28\mu F$  que se utiliza para suavizar la señal de salida del convertidor. Esto ayuda a reducir el ruido y el rizado de tensión.
- $R_1$ : es una resistencia que se utiliza para limitar la corriente que fluye a través del transistor. Esto ayuda a proteger el transistor de daños.
- $L_1$ : es una bobina que se utiliza para almacenar energía durante el tiempo en que el transistor está encendido. Esta energía se libera durante el tiempo en que el transistor está apagado, lo que genera una tensión de salida constante.

Cabe destacar que en el datasheet del fabricante (apéndice B) se indica cuales son los componentes óptimos sobre los que debe ir montado el integrado MT3608. Recomienda que  $C_1$  y  $C_2$  sean de  $22\mu F$ , sin embargo, el módulo que se comercializa utiliza condensadores de  $28\mu F$ . El fabricante recomienda una bobina de  $22\mu H$ , lo cual en este caso si que incorpora.

A continuación, se explica el circuito: el voltaje de entrada se aplica al pin Vi del chip MT3608. El chip MT3608 controla el flujo de corriente a través del inductor. Cuando el flujo de corriente se interrumpe, se crea un campo magnético en el inductor. Cuando el flujo de corriente se restablece, el campo magnético se descompone, lo que genera una tensión en el inductor. La tensión del inductor se aplica al pin SW. La tensión del inductor se regula mediante el chip MT3608. La tensión regulada se aplica al pin OUT. El voltaje de salida del convertidor se puede ajustar mediante la resistencia RP. La resistencia RP se conecta en serie con el pin FB. El chip MT3608 utiliza la tensión en el pin FB para ajustar el voltaje de salida.

El interruptor SW se puede utilizar para encender o apagar el convertidor. Cuando el interruptor SW está abierto, el flujo de corriente se interrumpe y el convertidor se apaga. En el circuito de la imagen, el voltaje de entrada es de 2 a 24 voltios. El voltaje de salida se puede ajustar de 4 a 28 voltios. La corriente de salida máxima es de 2 amperios.

## 4.5. Sensor BME280

Otros parámetros importantes que debemos conocer a la hora de instalar los equipos son: la temperatura, la presión y la humedad. Estos datos son esenciales para verificar el funcionamiento de todos los componentes electrónicos que instalaremos. Ya que, en general, los datasheets de los fabricantes proporcionan un rango de parámetros sobre los que funciona el componente.

Para la lectura de estos datos hemos escogido el BME280. Este es un sensor digital de humedad, presión y temperatura que permite lecturas muy rápidas a muy bajo consumo. Lo que lo hace ideal para una aplicación donde irá alimentado con baterías. Este integrado viene en un paquete LGA con tapa metálica.



Figura 4.6: Sensor BME280.

En la siguiente tabla se proporcionan las especificaciones técnicas que encontramos en el datasheet del fabricante.[\[4\]](#)

Característica	Valor
Rango de presión	300 ~ 1100 hPa
Precisión de presión	± 1 hPa
Rango de temperatura	-40 ~ 85 °C
Precisión de temperatura	± 1.0°C
Rango de humedad	0 ~ 100 %
Precisión de humedad	± 3 %
Nivel lógico	3.3V
Consumo P,T y H (1Hz)	3.6 μA
Interfaz digital	I2C, SPI
velocidad de transmisión (SPI)	10MHz max.
velocidad de transmisión I <sup>2</sup> C	10MHz max.

Tabla 4.4: Especificaciones técnicas BME280.

El sensor BME280 integra en un solo dispositivo sensores de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, con gran precisión y bajo consumo energético. Una cosa buena de este sensor es que, además, se puede leer mediante I<sup>2</sup>C o SPI, lo que lo vuelve muy versátil para usar con nuestros micros. Básicamente mide presión atmosférica, temperatura y humedad. Además, tiene una alta precisión para convertir la presión barométrica a altitud con un error de ± 1m.

### 4.5.1. Esquema eléctrico del BME280

El BME280 se integra en el circuito de la figura (4.7), lo que le permite la comunicación con microcontroladores mediante interfaz SPI.

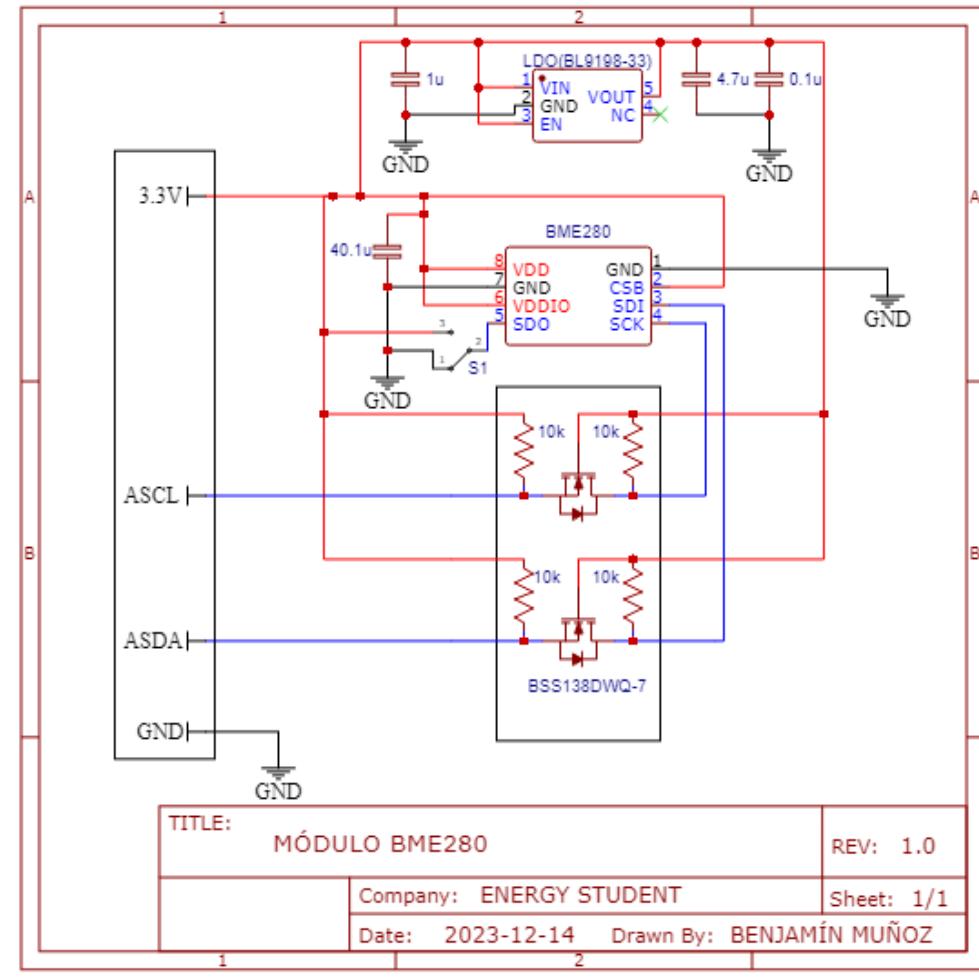


Figura 4.7: Esquema eléctrico BME280.

El funcionamiento del circuito eléctrico del BME es el siguiente:

- La fuente de alimentación proporciona energía al circuito.
- El regulador de voltaje reduce el voltaje de la fuente de alimentación a 3,3 V.
- El módulo BME280 recibe la energía de 3,3 V y la utiliza para medir la temperatura, la humedad y la presión atmosférica.

Los datos medidos por el módulo BME280 se pueden acceder a través de los pines del módulo. Los pines del módulo BME280 se pueden conectar a un microcontrolador o a otro dispositivo para que pueda procesar los datos.

En el caso específico del circuito eléctrico que se muestra en la imagen, el circuito está diseñado para funcionar con una fuente de alimentación de 5 V. El regulador de voltaje utilizado es un regulador de voltaje lineal de 3,3 V. El módulo BME280 está conectado al regulador de voltaje a través de los pines VDD y GND. Los datos medidos por el módulo BME280 se pueden acceder a través de los pines SDI, SDO, CSB y GND.

El sensor que hemos utilizado para el proyecto es el de la figura (4.8)

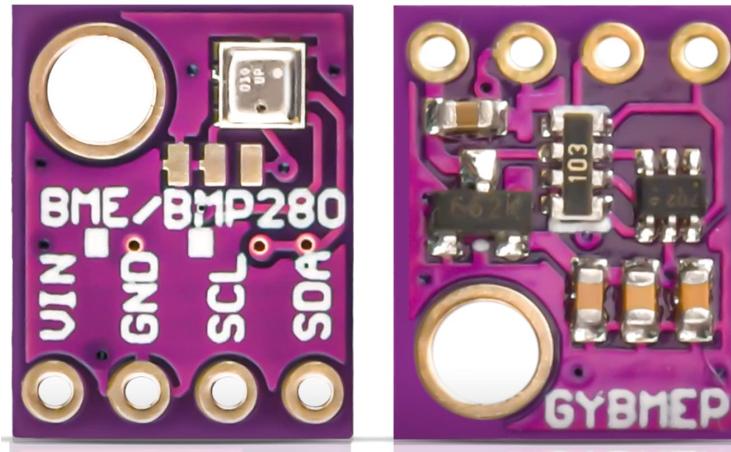


Figura 4.8: Módulo BME280.

Para más información a cerca del esquema eléctrico y su funcionamiento consultar bibliografía [5] y [4].

## 4.6. Sensor de corriente ACS712

El sensor ACS712 es un sensor de corriente de efecto Hall que se utiliza para medir corrientes continuas (DC) y alternas (AC) de hasta 50 A. El sensor convierte la información de corriente en tensión utilizando un transistor bipolar de efecto de campo (FET). El FET tiene una resistencia muy baja entre el drenaje y la fuente. Cuando la corriente de entrada fluye a través del FET, crea un campo magnético. Este campo magnético actúa sobre el núcleo del FET, lo que cambia su resistencia. El cambio en la resistencia del FET cambia la tensión entre el drenaje y la fuente. Esta tensión se aplica al pin VOUT del sensor.

El sensor ACS712 tiene una precisión de  $\pm 1,5\%$ , un tiempo de respuesta de 5  $\mu s$  y un ancho de banda de 80 kHz. El sensor está aislado galvánicamente, lo que significa que no hay contacto eléctrico entre el circuito de alimentación y el circuito de detección. Esto hace que el sensor sea seguro para su uso en aplicaciones de alta tensión.

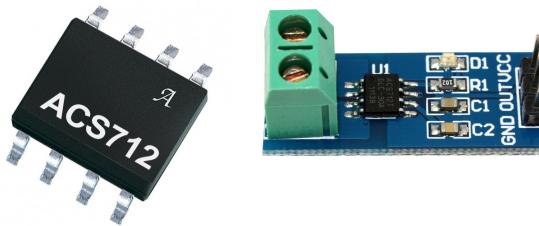


Figura 4.9: sensor ACS712.

Tabla 4.5: Principales características del sensor ACS712.

Característica	Valor
Tipo de sensor	Corriente
Rango de corriente	0 a 50 A
Principio de funcionamiento	Efecto Hall
Precisión	$\pm 1,5\%$
Tiempo de respuesta	5 $\mu s$
Ancho de banda	80 kHz
Resistencia interna	1,2 mohm
Voltaje de aislamiento	2,1 kVRMS
Voltaje de alimentación	5 V
Encapsulado	SOIC-8

### 4.6.1. Esquema eléctrico del ACS712

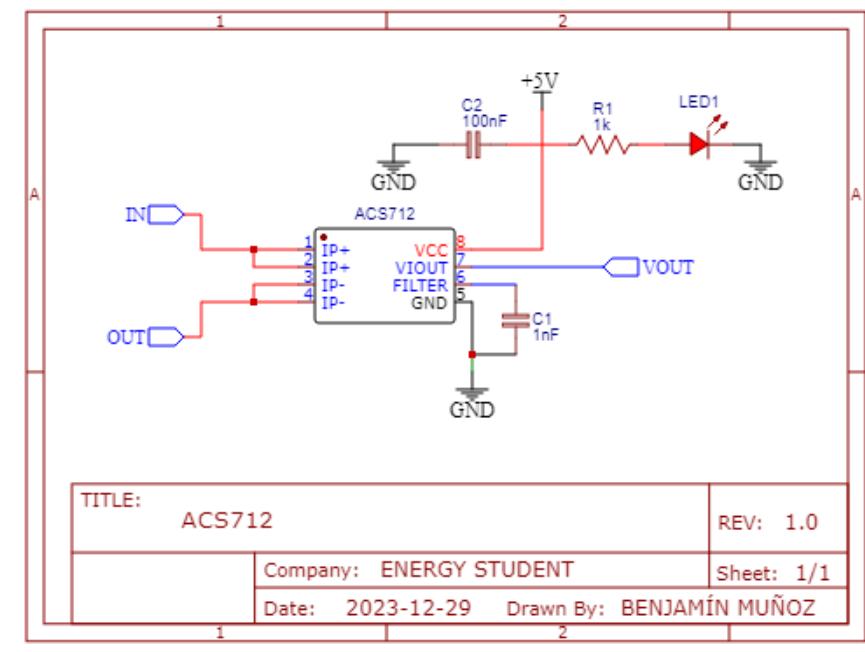


Figura 4.10: Esquema eléctrico ACS712.

El esquema eléctrico del ACS712 es relativamente sencillo.

- C1 suaviza el ruido se la señal de corriente.
- C2 minimiza el rizado de tensión al pin vcc, lo que asegura una tensión constante.
- El Led avisa de la presencia de alimentación. Además, tiene una resistencia que limita su corriente.
- El pin VOUT es la patilla de la señal analógica que se conecta al arduino.

## 4.7. Sensor de voltaje

En primer lugar pensamos en incorporar un sensor FZ0430, ya que las resistencias del divisor de tensión son muy precisas. Sin embargo, aún no tenemos claro el rango de tensiones que tendrá que medir el sensor.

Entonces, por el momento usaremos un divisor de tensión con resistencias de baja calidad. No tendrá tanta precisión pero se puede ajustar mediante programación. Al igual que el FZ0430, montaremos un divisor de tensión compuesto de  $7,5\text{k}\Omega$  conectada a GND y otra de  $30\text{k}\Omega$ .

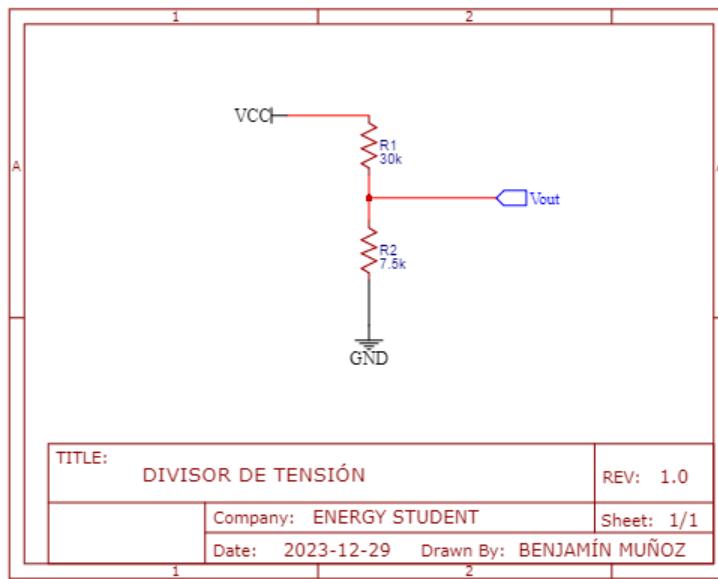


Figura 4.11: Divisor de tensión.

## 4.8. Esquema eléctrico del transmisor LoRa

Por último, el diseño finalizado de la primera versión del transmisor LoRa se muestra en la figura (4.12).

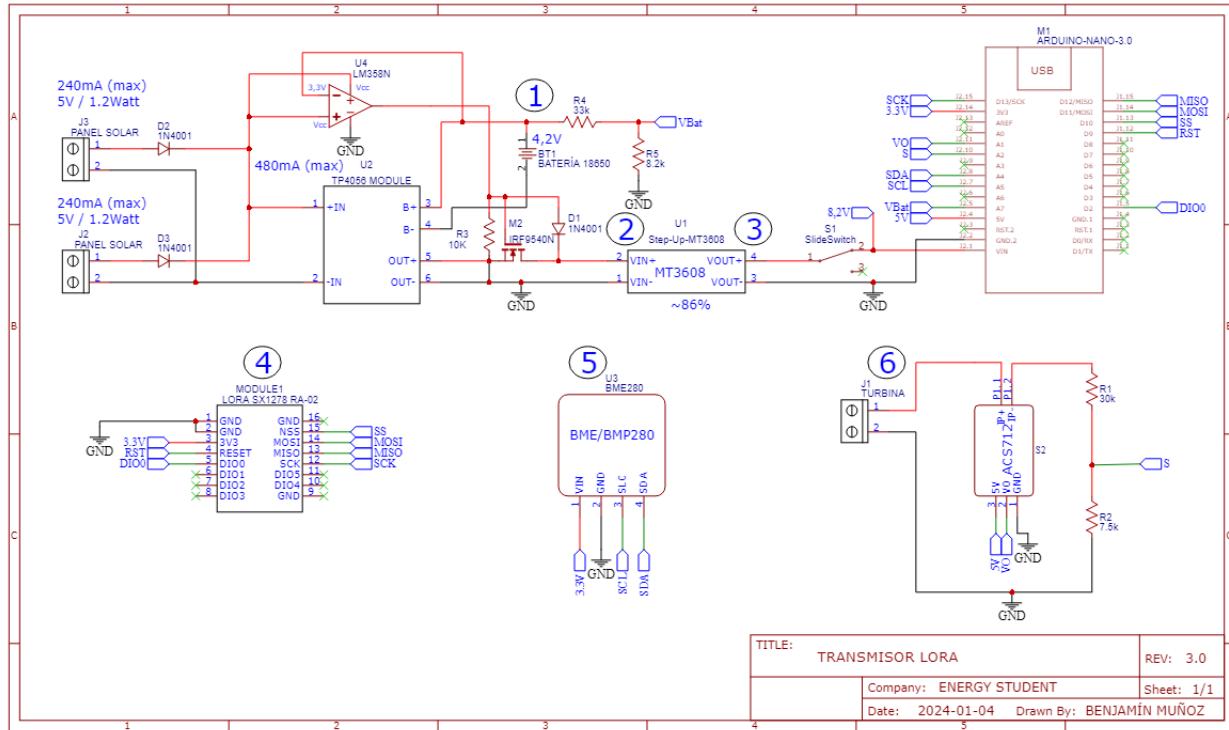


Figura 4.12: Esquema eléctrico transmisor LoRa.

El circuito es relativamente sencillo. Durante el día, el panel solar proporciona energía al circuito, mientras que por la noche la batería asume esta función. El TP4056 se encarga de regular la carga y descarga de la batería, mientras que el MT3608 mantiene un voltaje constante en la salida mediante ajustes en su ciclo de trabajo, adaptándose a posibles cambios en la entrada. Esto se logra a través de un MOSFET de tipo P.

Recientemente, hemos introducido un sistema UPS para prolongar la duración de la energía suministrada. Para lograr esto, se ha añadido un interruptor entre la salida del TP4056 y la entrada de alimentación del circuito (MT3608 en este caso). Este interruptor es un MOSFET de canal P controlado por la tensión proveniente del panel solar. Cuando el MOSFET se desactiva, la tensión del panel solar pasa a través de un diodo Schottky, polarizándose en directa. Sin embargo, si el panel solar no produce suficiente tensión, el MOSFET entra en saturación y la salida del TP4056 (que se alimenta desde la batería) suministra la energía al circuito, polarizando el diodo en inversa. Se ha incorporado una resistencia de pull-down para obtener una señal negativa en el Gate del MOSFET cuando el panel solar no está generando energía.

Además, se ha integrado un amplificador operacional entre los paneles solares y la puerta

del MOSFET. Este amplificador opera como un comparador con V+ alimentado por la tensión de los paneles y V- a tierra. Se manejan dos situaciones posibles:

1. Si la tensión generada por los paneles solares es mayor a 3,3 voltios, la entrada no inversora del amplificador operacional toma un valor más alto. Como resultado, Vout del amplificador operacional será igual a V+.
2. En cambio, si la tensión generada por los paneles solares es inferior a 3,3 voltios, la entrada inversora del amplificador operacional será más alta, llevando a que Vout sea 0 V.

Por último, el montaje del circuito se ha realizado sobre dos protoboards. Se ha utilizado cable rígido para poder manejar el orden de los cables.

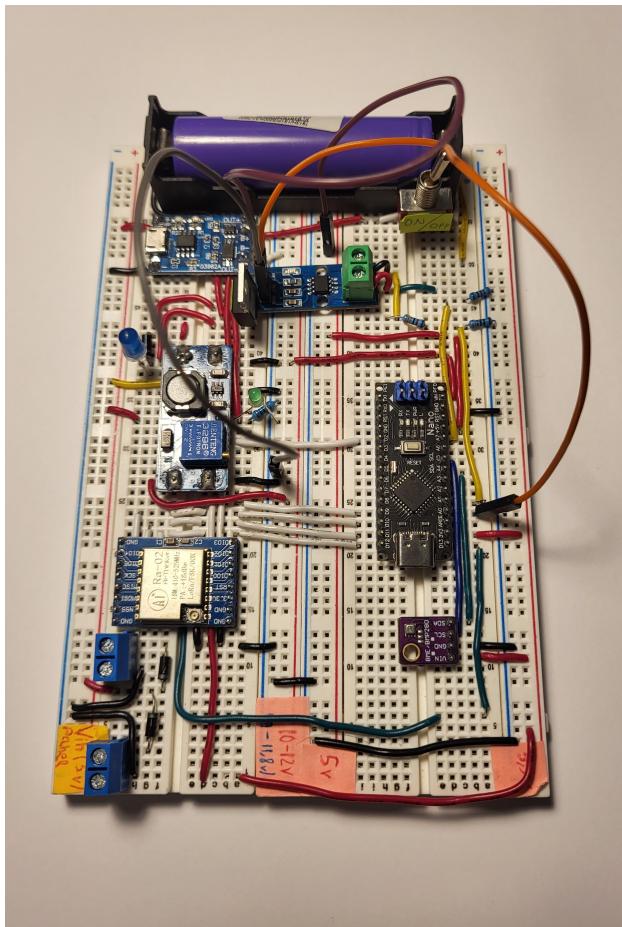


Figura 4.13: Montaje del circuito del transmisor LoRa.

### 4.8.1. Cálculo de consumo

El circuito que se ha diseñado cuenta con una capacidad de 2600mAh (según la batería). Para verificar el correcto funcionamiento del circuito y el tiempo que dura el circuito sin cargar la batería, se han medido los consumos de los componentes. Como se puede apreciar en la figura (4.12) hay numeros redondeados, indicando los puntos donde se han realizado las mediciones.

1. La batería entrega 3,3 V y 61,5 mA. Que es la demanda del circuito.
2. En la salida del TP4056 (OUT+) o entrada del MT3608 (VIN+) medimos 3,3 V y 61,5 mA, lo que suponen 0,2 W.
3. A la salida del MT3608 (VOUT+) medimos 8,2 V y 21,5 mA, aunque se observan picos de corriente de hasta 63 mA. Estos picos suceden a demanda del SX1278 cuando transmite. Con lo cual despreciaremos esos picos. Entonces se tienen 0,172 W, una perdida de potencia del 14 % con respecto a la entrada. Es decir, el MT3608 logra un rendimiento del 86 %.
4. El módulo SX1278 tiene un consumo de 120 mA en transmisión según el datasheet. Sin embargo, el programa que se ha utilizado para programar estos módulos utiliza la configuración de fábrica de los mismos. Por lo que no se utiliza el máximo potencial de los módulos, entonces consumen menos.

Para medir el consumo del módulo se ha diseñado un programa que transmite una serie de bits cada 4 segundos, durante 1 segundo. Nos sale la siguiente tabla:

Reposo	Transmisión
3,3 V	3,3 V
0,4 mA	12 mA
1.32 mW	39.6 mW
4 seg	1 seg

$$\text{Consumo promedio} = \frac{4 \times 0,4 + 1 \times 12}{5} = 2,72mA$$

Por tanto, 2,71 mAh.

5. En el BME280 medimos 3,3 V y 0,22mA.
6. En el ACS712 medimos 5v y 9,8 mA.

Ahora podemos calcular el consumo total sumando todos los consumos medidos.

$$I_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (4.1)$$

Donde:

- $I_{total}$ : es el consumo total del circuito.
- $I_i$ : es el consumo de corriente del componente i.
- n: es el número total de componentes en el circuito.

Ahora sumamos los elementos de demandan corriente como son: el SX1278, el Arduino, el BME280 y el ACS712. Despreciamos lo que puedan consumir el MT3608 y el TP4056.

$$I_{total} = 0,22 + 9,8 + 15 + 2,72 = 27,77mA \quad (4.2)$$

Para calcular cuento durará la batería sin ninguna carga, utilizamos la siguiente expresión:

$$T = \frac{C_{bateria}}{I_{total}} \quad (4.3)$$

Sustituimos,

$$T = \frac{2600mAh}{27,77mA} = 93horas \quad (4.4)$$

Cabe destacar que para alimentar el circuito estamos utilizando un usb en vez de dos paneles solares. Ya que no disponemos de 2 paneles solares que generen suficiente corriente para todo el circuito. Además, el usb entrega 5 V y 1 A, suficiente para cargar la batería rápido y alimentar el circuito a la vez.

# Capítulo 5

## Radio enlace LoRa

Como comentamos anteriormente usaremos la tecnología LoRa para enviar y recibir información desde puntos lejanos o alejados entre si sin necesidad de estar conectados por cable.

Para garantizar un correcto funcionamiento de radio enlace es necesario realizar pruebas de rendimiento. Las variables a tener en cuenta en las pruebas de LoRa son las siguientes:

- Distancia: la distancia entre los dispositivos LoRa es un factor importante que afecta al rendimiento. A mayor distancia, menor será el alcance y la velocidad de datos.
- Entorno: el entorno también afecta al rendimiento de LoRa. En entornos urbanos el alcance y la velocidad de datos pueden ser menores que en entornos rurales.
- Espectro: el espectro utilizado por los dispositivos LoRa también afecta al rendimiento. En algunos países hay restricciones sobre el uso de ciertos espectros para LoRa.

En nuestro proyecto vamos a realizar las siguientes pruebas de LoRa:

- Prueba de alcance: vamos a medir el alcance máximo de los dispositivos LoRa. Para ello, vamos a colocar los dispositivos en diferentes distancias y vamos a medir la cantidad de datos que se pueden transmitir con éxito.
- Prueba de velocidad de datos: vamos a medir la velocidad de datos máxima de los dispositivos LoRa. Para ello, vamos a transmitir un flujo constante de datos entre los dispositivos y vamos a medir el tiempo que tarda en completarse la transmisión.
- Prueba de consumo de energía: vamos a medir el consumo de energía de los dispositivos LoRa. Para ello, vamos a medir la cantidad de energía que utilizan los dispositivos durante la transmisión de datos. Estas pruebas nos ayudarán a determinar el rendimiento de los módulos LoRa y a garantizar un correcto funcionamiento de nuestro proyecto.

Para realizar dichas pruebas se tendrán las siguientes constantes:

- Antenas helicoidales de 433MHz, 3dBi de ganancia, 10w de potencia máxima y  $50\Omega$  de impedancia de entrada.
- Módulos LoRa SX1278 Ra-02.

A continuación se explicarán las pruebas realizadas en orden cronológico.

## 5.1. Prueba nº1: Potenciómetro-Led

La primera prueba consiste en una comunicación sencilla entre los dos microcontroladores. El transmisor enviará un valor de 0 a 255 en función del valor de la resistencia interna del potenciómetro. El receptor debe variar la intensidad del Led en función del valor recibido.

### 5.1.1. Transmisor (Tx)

El código del transmisor es el siguiente.

```

1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3 int pot = A0; //potenciómetro
4
5 void setup() {
6   Serial.begin(9600);
7   pinMode(pot,INPUT);
8
9   while (!Serial);
10  Serial.println("Transmisor LoRa");
11  if (!LoRa.begin(433E6)) { // o 915E6 en función de la frecuencia
12    Serial.println("Inicio de LoRa fallido!");
13    while (1);
14  }
15 }
16
17 void loop() {
18   int val = analogRead(pot);
19   LoRa.beginPacket();      //preamble LoRa
20   LoRa.print(val);        //transmisión
21   LoRa.endPacket();       //fin de transmisión
22   Serial.println(val);
23   delay(50);
24
25 }
```

Listing 5.1: Transmisor 1

El esquema eléctrico del transmisor es el siguiente.

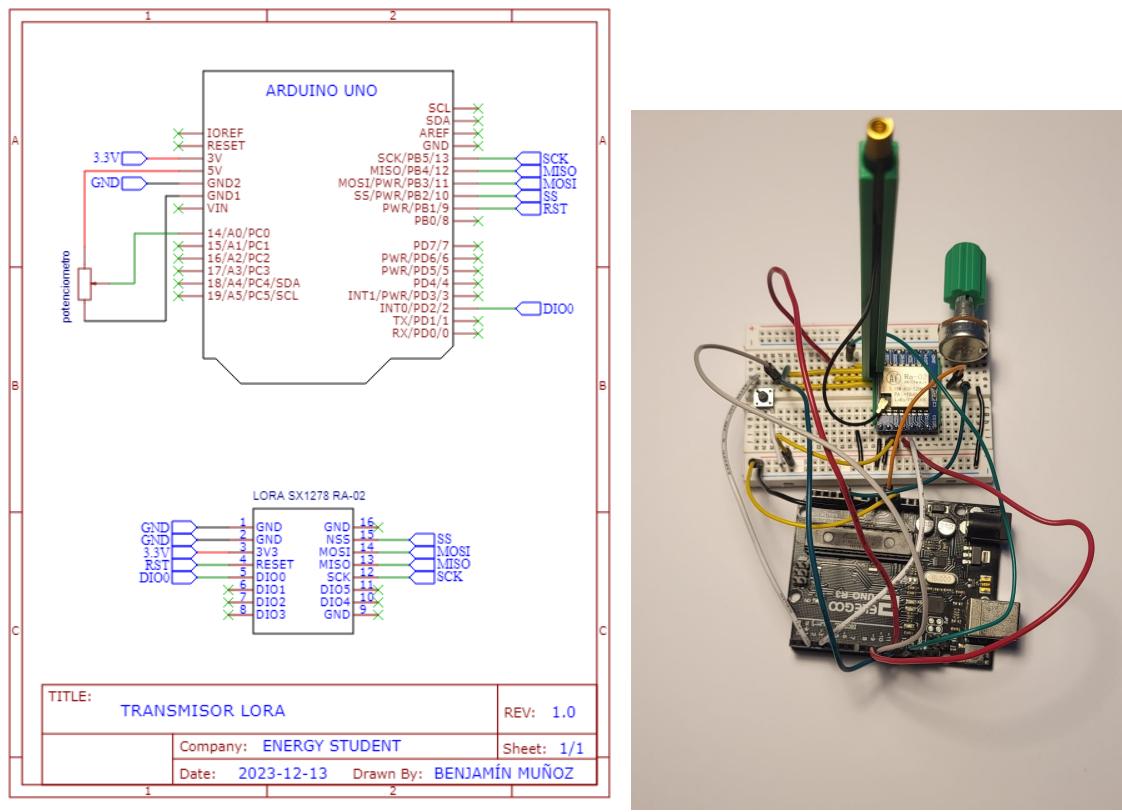


Figura 5.1: Esquema eléctrico transmisor.

### 5.1.2. Receptor (Rx)

El código del Receptor es el siguiente.

```

1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3 int LED = 3;
4 String inString = ""; // string para esperar la entrada
5 int val = 0;
6
7 void setup() {
8     Serial.begin(9600);
9     pinMode(LED,OUTPUT);
10
11    while (!Serial);
12    Serial.println("LoRa Receptor");
13    if (!LoRa.begin(433E6)) { // or 915E6
14        Serial.println("Inicio del LoRa fallido");
15        while (1);
16    }
17 }
18
19 void loop() {
20
21    // try to parse packet
22    int packetSize = LoRa.parsePacket();
23    if (packetSize) {
24        // read packet
25        while (LoRa.available())
26        {
27            int inChar = LoRa.read();
28            inString += (char)inChar;
29            val = inString.toInt();
30        }
31        inString = "";
32        LoRa.packetRssi();
33    }
34
35    Serial.println(val);
36    analogWrite(LED, val);
37 }
```

Listing 5.2: Receptor 1

El esquema eléctrico del receptor es el siguiente.

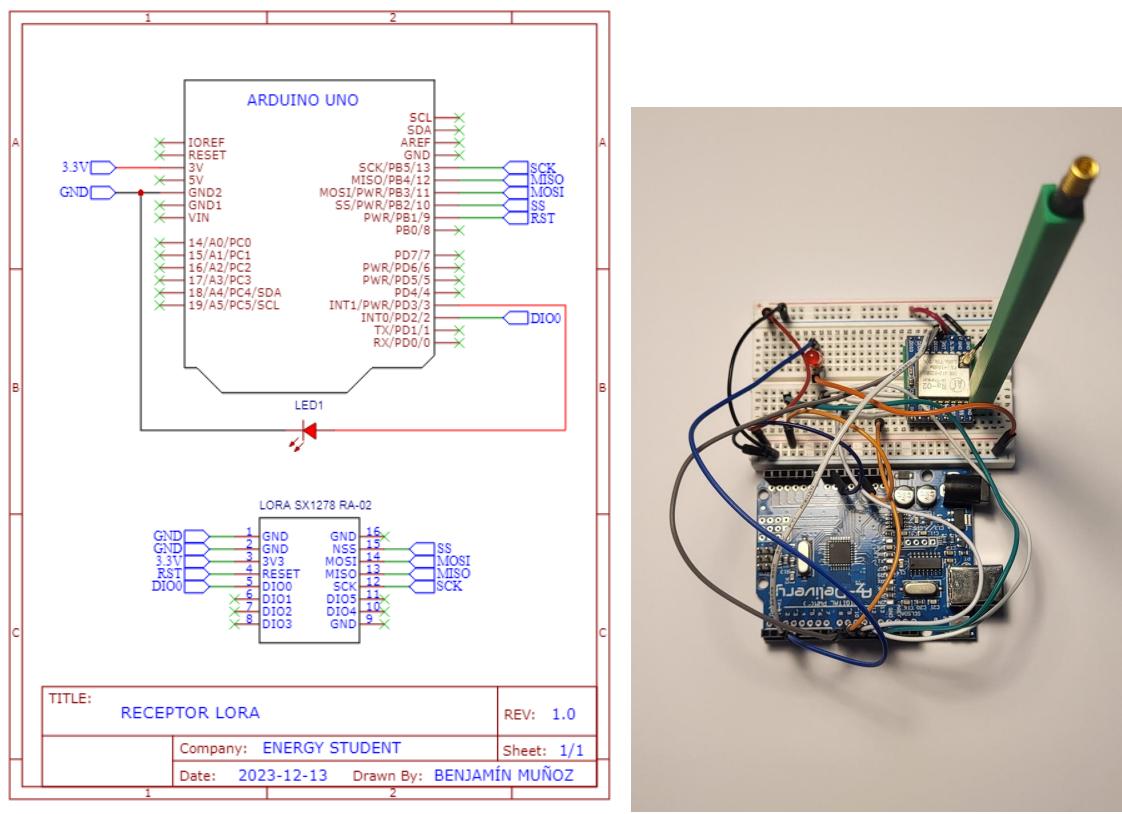


Figura 5.2: Esquema eléctrico receptor.

### 5.1.3. Resultados prueba n°1

Durante la prueba, se observó una relación directa entre el movimiento del potenciómetro y la intensidad luminosa del LED en el receptor. Estos resultados indican una comunicación efectiva y bidireccional entre el transmisor y el receptor.

## 5.2. Prueba nº2: Alcance

El alcance de los módulos LoRa se miden con el RSSI. El RSSI proporciona una medida de la potencia de la señal entrante en el puerto de entrada de RF, medida dentro del ancho de banda del receptor. Este valor es absoluto en unidades de dBm y con una resolución de 0,5 dB. La siguiente fórmula relaciona el valor del registro con el nivel absoluto de la señal de entrada en el puerto de entrada RF:

$$RssiValue = -2 \cdot RFlevel[dBm] + RssiOffset[dB]^1 \quad (5.1)$$

Para determinar, aproximadamente, cuál es la máxima distancia a la que pueden comunicarse los SX1278, se tienen que tener en cuenta otros parámetros, ya que en función del factor de dispersión (SF), del ancho de banda y de la potencia de transmisión, la distancia variará. Es por eso, que hemos diseñado un programa que varía el RSSI a medida que te alejas, debido a que la potencia de señal que le llega al receptor se atenúa. Para ello, iremos cambiando los tres parámetros mencionados hasta llenar una tabla con todas las posibles combinaciones.

Por otro lado, hay que tener en cuenta también la formula de pérdidas de propagación en espacio libre. Cuya expresión es la siguiente:

$$P_R(dBm) = P_E(dBm) + G_T(\theta, \phi)(dB) + G_R(\theta, \phi)(dB) + \underbrace{\left( -10 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \right)}_{LFREE} \quad (5.2)$$

Donde:

- $P_R$  es la potencia recibida (en dBm).
- $P_E$  es la potencia transmitida (en dBm).
- $G_T$  es la ganancia de la antena del transmisor (en dB).
- $G_R$  es la ganancia de la antena del receptor (en dB).
- $R$  es la distancia entre el transmisor y el receptor (en m).
- $\lambda$  es la longitud de onda (en m).
- $LFREE$  es la pérdida de propagación en espacio libre (en dB).

---

<sup>1</sup>Semtech Corporation. Sx1276/77/78/79 - 137 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver, March 2015.

Entonces, si sustituimos en la fórmula nos queda:

$$P_R(dBm) = 20 + 3 + 3 + 20\log\left(\frac{4\pi \cdot R}{\lambda}\right) \quad (5.3)$$

Ahora hay que verificar sustituyendo en la fórmula si  $P_R > P_S$ . Donde  $P_S$  es la sensibilidad del receptor, que según el fabricante es de -141dBm.

Suponiendo una distancia de 5 km calculamos la longitud de onda y después  $L_{FREE}$ .

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{433 \cdot 10^8} = 0,006928m \quad (5.4)$$

$$L_{FREE} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot 5 \cdot 10^3}{0,006928} \right) = 139,15dB \quad (5.5)$$

Ahora calculamos  $P_R$  sustituyendo en la fórmula. En la fórmula sustituiremos 20 dB en  $P_E$ , ya que no lo indica el fabricante así.

$$P_R(dBm) = 20 + 3 + 3 - 139,15 = -113,15dBm \quad (5.6)$$

Por tanto, se cumple que  $P_R > P_S$ , ya que  $-113,15 > -141$ . Esto nos indica que para 5 km la comunicación se realizará correctamente con visibilidad directa ya que no hemos tenido en cuenta otros factores como los que mencionamos en el capítulo 1.

A continuación se han realizado las pruebas de alcance alejando los transceptores 20, 100 y 500 metros. La potencia de transmisión se ha mantenido fija a 20 dBm en todas las mediciones.

### 5.2.1. Transmisor (Tx)

El código del transmisor es el siguiente.

```

1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3
4 #define BAND 433E6 // Frecuencia a utilizar, ajustar seg n corresponda
5 #define SF 7        // Spreading Factor (ejemplo)
6 #define BW 125E3    // Bandwidth (ejemplo)
7 #define TXPOWER 20  // Potencia del transmisor en dBm (ejemplo)
8
9 void setup() {
10   Serial.begin(9600);
11
12   while (!Serial);
13
14   Serial.println("Transmisor LoRa");
15
16   if (!LoRa.begin(BAND)) { // Inicializaci n LoRa
17     Serial.println("Inicio de LoRa fallido!");
18     while (1);
19   }
20
21   LoRa.setSpreadingFactor(SF);           // Configura Spreading Factor
22   LoRa.setSignalBandwidth(BW);          // Configura Bandwidth
23   LoRa.setTxPower(TXPOWER);             // Configura potencia del
24   transmisor
25
26 void loop() {
27   LoRa.beginPacket();
28   LoRa.print("Mensaje de prueba"); // Mensaje de prueba para enviar
29   LoRa.endPacket();
30
31   Serial.println("Mensaje enviado");
32
33   delay(5000); // Espera 5 segundos antes de enviar el siguiente mensaje
34 }
```

Listing 5.3: Transmisor 2

### 5.2.2. Receptor (Rx)

El código del receptor es el siguiente.

```
1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3
4 #define BAND 433E6 // Frecuencia
5
6 void setup() {
7     Serial.begin(9600);
8
9     while (!Serial);
10
11    Serial.println("Receptor LoRa");
12
13    if (!LoRa.begin(BAND)) { // Inicializacion LoRa
14        Serial.println("Inicio de LoRa fallido!");
15        while (1);
16    }
17 }
18
19 void loop() {
20    if (LoRa.parsePacket()) {
21        while (LoRa.available()) {
22            String receivedMessage = LoRa.readStringUntil('\n');
23            int rssi = LoRa.packetRssi(); // Intensidad de señal (RSSI)
24
25            Serial.print("Mensaje recibido: ");
26            Serial.println(receivedMessage);
27            Serial.print("RSSI: ");
28            Serial.println(rssi);
29        }
30    }
31 }
```

Listing 5.4: Receptor 2

### 5.2.3. Resultados prueba nº2

Con respecto a las mediciones realizadas en base a la señal RSSI se ha comprobado que la señal decae de forma logarítmica a medida que separan el dispositivo transmisor del receptor. A continuación, se muestra una tabla que relaciona el RSSI en función de: el factor de propagación, el ancho de banda, la potencia de transmisión y la distancia. Además, se incluye una columna para la potencia recibida teórica que se calcula mediante la expresión (5.2). En primer lugar, las combinaciones con una distancia de 20 metros.

$P_R$  es la potencia recibida calculada mediante la ecuación (5.2). Como se muestra a continuación.

$$P_R(dBm) = 20 + 3 + 3 - 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot 20}{0,006928} \right) = -65,19 dBm \quad (5.7)$$

Tabla 5.1: RSSI a 20 m.

SF	BW (kHz)	Potencia (dBm)	Distancia (m)	RSSI (dBm)	$P_R$ (dBm)
7	125 kHz	20	20	-76	-65,19
12	125 kHz	20	20	-83	-65,19
7	250 kHz	20	20	-75	-65,19
12	250 kHz	20	20	-80	-65,19
7	500 kHz	20	20	-76	-65,19
12	500 kHz	20	20	-85	-65,19

A 20 metros el RSSI que obtenemos se aleja aproximadamente 10 dBm de lo que hemos calculado. Probablemente se deba a los fenómenos de los que hablamos en el capítulo 1. Además, observamos que con un SF mayor, la señal se atenúa. Cuando teóricamente, como vimos en el capítulo 3, el SF es justamente el tiempo que está el símbolo en el aire. Por lo que debería tener una mayor resistencia al ruido cuanto mayor sea el SF.

Ahora vamos a hacer los cálculos para 100 metros.

$$P_R(dBm) = 20 + 3 + 3 - 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot 100}{0,006928} \right) = -79,17 dBm \quad (5.8)$$

A los 100 metros observamos que la potencia recibida (RSSI) es muy parecida en cualquiera de los casos.

Tabla 5.2: RSSI a 100 m.

SF	BW (kHz)	Potencia (dBm)	Distancia (m)	RSSI (dBm)	$P_R$ (dBm)
7	125 kHz	20	100	-86	-79,17
12	125 kHz	20	100	-84	-79,17
7	250 kHz	20	100	-84	-79,17
12	250 kHz	20	100	-85	-79,17
7	500 kHz	20	100	-83	-79,17
12	500 kHz	20	100	-85	-79,17

Para 500 metros los cálculos son los siguientes.

$$P_R(dBm) = 20 + 3 + 3 - 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot 500}{0,006928} \right) = -93,15 dBm \quad (5.9)$$

Tabla 5.3: RSSI a 500 m.

SF	BW (kHz)	Potencia (dBm)	Distancia (m)	RSSI (dBm)	$P_R$ (dBm)
7	125 kHz	20	500	NULL	-93,15
12	125 kHz	20	500	-87	-93,15
7	250 kHz	20	500	NULL	-93,15
12	250 kHz	20	500	-85	-93,15
7	500 kHz	20	500	NULL	-93,15
12	500 kHz	20	500	-85	-93,15

A unos 500 metros deja de recibir con un SF pequeño. Entonces se verifica que cuanto más SF más robusta es la señal. Por otro lado, es curioso que a 500 metros el RSSI marca valores más altos que los que hemos calculado.

Ahora ya sabemos que para distancias largas hay que cambiar el SF a 12, aunque suponga menos velocidad de transmisión.

### 5.3. Prueba nº3: BME280

A partir de esta prueba se utiliza el montaje de la figura (4.12) como transmisor. En esta prueba se envían los datos de temperatura, humedad y presión que lee el BME280.

Además, se actualiza el circuito del receptor y se le añade la conexión con una pantalla LCD con interfaz I<sup>2</sup>C como se muestra en la figura (5.3).

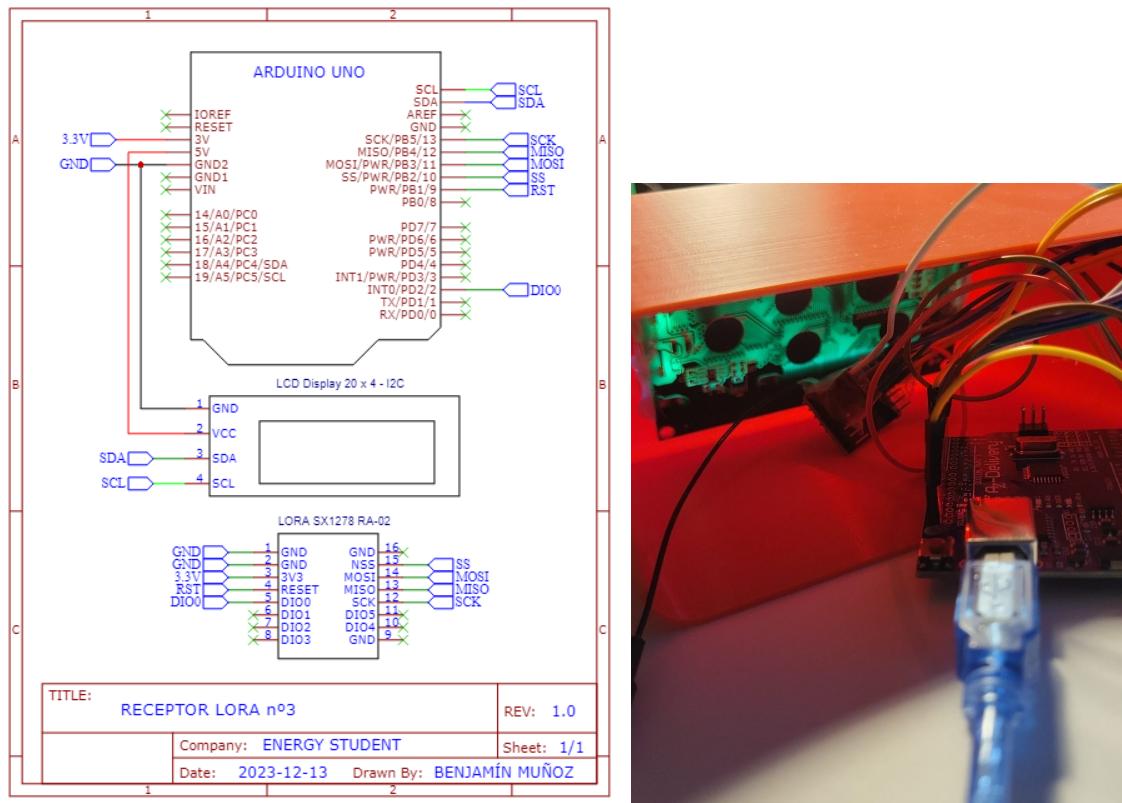


Figura 5.3: Esquema eléctrico receptor y montaje n°3.

### 5.3.1. Transmisor (Tx)

El código del transmisor es el siguiente.

```

1 #include <Wire.h>
2 #include <LoRa.h>
3 #include <Adafruit_Sensor.h>
4 #include <Adafruit_BME280.h>
5
6 Adafruit_BME280 bme; // Instancia del sensor BME280
7
8 void setup() {
9     Serial.begin(9600);
10    while (!Serial);
11
12    Serial.println("LoRa Transmisor");
13
14    if (!LoRa.begin(433E6)) { // o 915E6
15        Serial.println("Inicio de LoRa fallido");
16        while (1);
17    }
18
19    if (!bme.begin(0x76)) { // Dirección I2C por defecto
20        Serial.println("No se pudo encontrar un sensor BME280 válido");
21        while (1);
22    }
23 }
24
25 void loop() {
26    // Lectura de los datos del sensor BME280
27    float temperature = bme.readTemperature();
28    float humidity = bme.readHumidity();
29    float pressure = bme.readPressure() / 100.0F; // Convertir a hPa
30
31    // Construir la cadena de datos para enviar por LoRa
32    String data = "Temp: " + String(temperature) + "C, Humidity: " + String(
33        humidity) + "%, Pressure: " + String(pressure) + "hPa;";
34
35    Serial.println("Datos del sensor: " + data);
36
37    // Enviar datos por LoRa
38    LoRa.beginPacket();
39    LoRa.print(data);
40    LoRa.endPacket();
41
42
43    delay(5000); // Resto del tiempo total para completar el
44    intervalo de 5 segundos
45 }
```

Listing 5.5: Transmisor 3

### 5.3.2. Receptor (Rx)

El código del receptor es el siguiente.

```

1 #include <Wire.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3 #include <LoRa.h>
4
5 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // Dirección I2C y tamaño del LCD
6 bool received = false; // Variable para controlar si se recibió un
7 paquete
8
9 void setup() {
10   Serial.begin(9600);
11   lcd.init();
12   lcd.backlight();
13
14   Serial.println("LoRa Receptor");
15   if (!LoRa.begin(433E6)) { // o 915E6
16     Serial.println("Inicio del LoRa fallido");
17     while (1);
18   }
19
20   // Mostrar información fija en el LCD
21   lcd.setCursor(0, 0);
22   lcd.print("Temp: ");
23   lcd.setCursor(0, 1);
24   lcd.print("humedad: ");
25   lcd.setCursor(0, 2);
26   lcd.print("Presión: ");
27
28 void loop() {
29   if (!received) {
30     int packetSize = LoRa.parsePacket();
31
32     if (packetSize) {
33       String receivedData = "";
34
35       while (LoRa.available()) {
36         char receivedChar = (char)LoRa.read();
37
38         if (receivedChar == ';') {
39           break;
40         }
41
42         receivedData += receivedChar;
43
44       // Buscar los valores numéricos
45       int tempIndex = receivedData.indexOf("Temp:");
46       int humIndex = receivedData.indexOf("Humidity:");
47       int presIndex = receivedData.indexOf("Pressure:");

```

```
48
49     if (tempIndex != -1 && humIndex != -1 && presIndex != -1) {
50         // Actualizar los valores numéricos en la LCD
51         lcd.setCursor(8, 0);
52         lcd.print(receivedData.substring(tempIndex + 5, humIndex - 1));
53
54         lcd.setCursor(8, 1);
55         lcd.print(receivedData.substring(humIndex + 9, presIndex - 1));
56
57         lcd.setCursor(8, 2);
58         lcd.print(receivedData.substring(presIndex + 9));
59     }
60
61     Serial.println(receivedData);
62
63     received = true;
64 }
65 } else {
66     int packetSize = LoRa.parsePacket();
67
68     if (packetSize == 0) {
69         received = false;
70         delay(1000); // Espera para estabilidad
71     }
72 }
73 }
```

Listing 5.6: Receptor 3

### 5.3.3. Resultados prueba nº3

Los resultados de las pruebas con el BME280 han resultado satisfactorias. El módulo SX1278 es capaz de enviar información en strings distintos. De modo que cuando conectemos y programemos el ACS712 también funcionará. Además, la pantalla LCD de momento sirve como simulación de envío de datos a la nube.

De hecho ya hemos estado haciendo pruebas con el ACS712, pero por alguna razón no lee voltaje. Este problema lo solucionaremos más adelante.

A continuación se muestra en la pantalla LCD los valores que le llegan vía LoRa al receptor del BME280.



Figura 5.4: Resultados en LCD.

# Capítulo 6

## Futuras mejoras

El principal objetivo del proyecto era subir los datos que generaba una turbina eólica o una instalación de placas a la nube. Esta parte del proyecto, lamentablemente, no ha podido ser completada a tiempo y está contemplada como una meta para el próximo trimestre.

Por otro lado, hay una serie de mejoras que se podrían incorporar al proyecto pero que no hemos sido capaces de reproducir a causa de tiempo.

1. **Integración de Raspberry Pi Pico W:** sustituir el Arduino UNO por una Raspberry Pi Pico W, requiriendo una reestructuración completa del código para que la Raspberry Pi Pico W pueda realizar las funciones actuales del Arduino UNO en el radio enlace LoRa.  
Además de implementar un software que permita la transferencia de los datos recibidos por la Raspberry Pi Pico W hacia una plataforma de nube, facilitando así la visualización y gestión de los datos de forma remota.
2. **Integración de la Nube:** desarrollar un protocolo de comunicación y transferencia de datos eficiente entre la Raspberry Pi Pico W y la plataforma de nube seleccionada, asegurando una conexión segura y confiable.  
Implementar un sistema de visualización de datos en la nube que permita un monitoreo y análisis en tiempo real de la información recopilada por el transmisor.
3. **Desarrollo de una PCB Integral:** diseñar una PCB que integre todos los componentes del transmisor, incluyendo el Arduino Nano, para minimizar la necesidad de conexiones externas. Este diseño simplificará la construcción y reducirá el espacio necesario.
4. **Mejoras en la Eficiencia Energética:** calcular y ajustar la corriente generada por los paneles solares para garantizar un suministro óptimo y estable de energía al transmisor. Esto permitirá que el dispositivo sea "plug&play", sin requerir ajustes manuales por parte del usuario.

Investigar e implementar tecnologías o métodos adicionales que mejoren la eficiencia energética del sistema, como el uso de dispositivos de almacenamiento de energía o la optimización de la carga y descarga de la batería.

5. **Comunicación Maestro-Esclavo:** implementar una comunicación entre varios esclavos y un maestro. Donde se podrá seleccionar el esclavo para pedirle información en un momento determinado.

# Capítulo 7

## Conclusiones y perspectivas

El desarrollo y ejecución del proyecto, que involucra el diseño de un sistema de radio enlace LoRa entre un Arduino Nano y un Arduino Uno, junto con el diseño de un transmisor autosuficiente, ha proporcionado valiosas conclusiones y ha abierto nuevas oportunidades. Entre estas se destacan:

1. **Eficiencia de la Comunicación LoRa:** la implementación del sistema LoRa ha demostrado ser una solución eficiente para la transmisión de datos a largas distancias con un consumo de energía reducido, confirmando su utilidad en aplicaciones que requieren comunicación remota y de baja potencia.
2. **Importancia de la Gestión Energética:** la inclusión de dispositivos como el TP4056 y el MT3608 ha destacado la importancia crítica de una gestión energética precisa y eficiente en sistemas autónomos, asegurando una optimización adecuada de la energía y la prolongación de la vida útil de la batería.
3. **Relevancia de los Sensores Integrados:** la presencia y funcionalidad de sensores como el BME280 y el ACS712 han validado la importancia de la adquisición de datos ambientales y de corriente, proporcionando información relevante y precisa para aplicaciones específicas, como el monitoreo ambiental y el control de dispositivos.
4. **Integración y Diseño del Sistema:** la capacidad de ensamblar y coordinar todos los componentes en un transmisor funcional resalta la importancia de considerar la integración y el diseño holístico del sistema para garantizar su funcionalidad y eficiencia.

A continuación, se presentan las perspectivas para futuras mejoras y desarrollos del proyecto:

1. **Mejoras en Eficiencia y Rendimiento:** se vislumbra la posibilidad de implementar mejoras adicionales, como la optimización continua de la eficiencia energética y la capacidad de procesamiento, así como la incorporación de algoritmos avanzados para análisis de datos en tiempo real.

2. **Escalabilidad y Adaptabilidad:** la oportunidad de expandir este proyecto hacia aplicaciones más amplias y diversas mediante la integración de nuevas tecnologías, la incorporación de más sensores o la adaptación a entornos específicos de manera modular.
3. **Investigación y Desarrollo Continuo:** la exploración de nuevas tecnologías emergentes y el desarrollo de soluciones innovadoras podrían enriquecer aún más la funcionalidad y el alcance del sistema, manteniéndolo actualizado y competitivo en un entorno tecnológico en constante evolución.

# Bibliografía

- [1] Semtech Corporation. Sx1276/77/78/79 - 137 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver, March 2015.
- [2] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Propagación, 2005.
- [3] ElectroThinks. Tp4056 lithium ion cell charging module, 4 2023.
- [4] Bosch Sensortec GmbH. Bme280 datasheet, 2018.
- [5] GolamMostafa. Ch 12 - sensors, 2020. 12.2 Architecture of BME280 Sensor Module.
- [6] J. Marqués. Teoría m.a.s. y ondas.
- [7] Víctor García Pére. Seguimiento del punto de máxima potencia de un panel solar para la carga de baterías de sistemas portátiles. page 15, 2008.
- [8] Karen Santos Reyes. Dispersion troposferica, 2015.
- [9] Paul A Tipler. Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y magnetismo / luz, 2010.
- [10] Francisco Andión Uz. Física vol.2. *The bulletin of mathematical biophysics*, 2(4):486–487, 1999.
- [11] Lorenzo Vangelista. Frequency shift chirp modulation: The lora modulation investigation. *IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS*, 24, 2017.
- [12] Pablo Andres Vela Remache. Estudio y diseño de un radio enlace para transmisión de datos, e internet en frecuencia libre para la cooperativa indígena alfa y omega utilizando equipos airmax de ubiquiti. 2015.

# Apéndice A

## TP4056

## TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8

### DESCRIPTION

The TP4056 is a complete constant-current/constant-voltage linear charger for single cell lithium-ion batteries. Its SOP package and low external component count make the TP4056 ideally suited for portable applications. Furthermore, the TP4056 can work within USB and wall adapter.

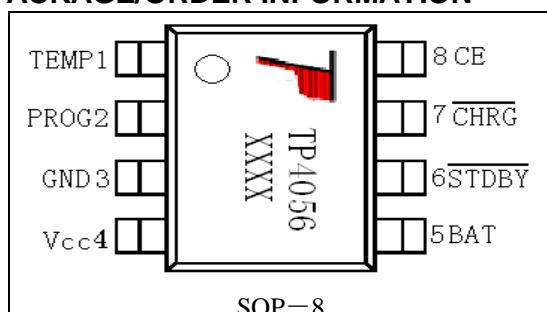
No blocking diode is required due to the internal PMOSFET architecture and have prevent to negative Charge Current Circuit. Thermal feedback regulates the charge current to limit the die temperature during high power operation or high ambient temperature. The charge voltage is fixed at 4.2V, and the charge current can be programmed externally with a single resistor. The TP4056 automatically terminates the charge cycle when the charge current drops to 1/10th the programmed value after the final float voltage is reached.

TP4056 Other features include current monitor, under voltage lockout, automatic recharge and two status pin to indicate charge termination and the presence of an input voltage.

### FEATURES

- Programmable Charge Current Up to 1000mA
- No MOSFET, Sense Resistor or Blocking Diode Required
- Complete Linear Charger in SOP-8 Package for Single Cell Lithium-Ion Batteries
- Constant-Current/Constant-Voltage
- Charges Single Cell Li-Ion Batteries Directly from USB Port
- Preset 4.2V Charge Voltage with 1.5% Accuracy
- Automatic Recharge
- two Charge Status Output Pins
- C/10 Charge Termination
- 2.9V Trickle Charge Threshold (TP4056)
- Soft-Start Limits Inrush Current
- Available Radiator in 8-Lead SOP Package, the Radiator need connect GND or impeding

### PACKAGE/ORDER INFORMATION

 SOP-8	<b>ORDER PART NUMBER</b> TP4056-42-SOP8-PP
 <b>PART MARKING</b> TP4056	

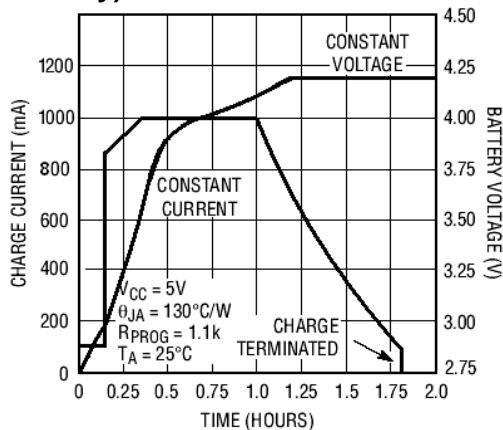
### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

- Input Supply Voltage( $V_{CC}$ ): -0.3V~8V
- TEMP: -0.3V~10V
- CE: -0.3V~10V
- BAT Short-Circuit Duration: Continuous
- BAT Pin Current: 1200mA
- PROG Pin Current: 1200uA
- Maximum Junction Temperature: 145°C
- Operating Ambient Temperature Range: -40°C~85°C
- Lead Temp.(Soldering, 10sec): 260°C

### APPLICATIONS

- Cellular Telephones, PDAs, GPS
- Charging Docks and Cradles
- Digital Still Cameras, Portable Devices
- USB Bus-Powered Chargers,Chargers

### Complete Charge Cycle (1000mAh Battery)





**TEMP(Pin 1) :Temperature Sense Input** Connecting TEMP pin to NTC thermistor's output in Lithium ion battery pack. If TEMP pin's voltage is below 45% or above 80% of supply voltage VIN for more than 0.15S, this means that battery's temperature is too high or too low, charging is suspended. The temperature sense function can be disabled by grounding the TEMP pin.

**PROG(Pin 2): Constant Charge Current Setting and Charge Current Monitor Pin** charge current is set by connecting a resistor R<sub>PROG</sub> from this pin to GND. When in precharge mode, the ISET pin's voltage is regulated to 0.2V. When in constant charge current mode, the ISET pin's voltage is regulated to 2V. In all modes during charging, the voltage on ISET pin can be used to measure the charge current as follows:

$$I_{BAT} = \frac{V_{PROG}}{R_{PROG}} \times 1200 \quad (V_{PROG}=1V)$$

**GND(Pin3): Ground Terminal**

**Vcc(Pin 4): Positive Input Supply Voltage** V<sub>IN</sub> is the power supply to the internal circuit. When V<sub>IN</sub> drops to within 30mv of the BAT pin voltage, TP4056 enters low power sleep mode, dropping BAT pin's current to less than 2uA.

**BAT(Pin5): Battery Connection Pin.** Connect the positive terminal of the battery to BAT pin. BAT pin draws less than 2uA current in chip disable mode or in sleep mode. BAT pin provides charge current to the battery and provides regulation voltage of 4.2V.

**STDBY(Pin6): Open Drain Charge Status Output** When the battery Charge Termination, the STDBY pin is pulled low by an internal switch, otherwise STDBY pin is in high impedance state.

**CHRG (Pin7): Open Drain Charge Status Output** When the battery is being charged, the CHRG pin is pulled low by an internal switch, otherwise CHRG pin is in high impedance state.

**CE(Pin8): Chip Enable Input.** A high input will put the device in the normal operating mode.

Pulling the CE pin to low level will put the TP4056 into disable mode. The CE pin can be driven by TTL or CMOS logic level.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at T<sub>A</sub>=25°C, V<sub>CC</sub>=5V, unless otherwise noted.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS	
V <sub>CC</sub>	Input Supply Voltage		●	4.0	5	8.0	V	
I <sub>CC</sub>	Input Supply Current	Charge Mode, R <sub>PROG</sub> = 1.2k StandbyMode(Charge Terminated) Shutdown Mode (R <sub>PROG</sub> Not Connected, V <sub>CC</sub> < V <sub>BAT</sub> , or V <sub>CC</sub> < V <sub>UV</sub> )	● ● ●		150 55 55	500 100 100		μA μA μA
V <sub>FLOAT</sub>	Regulated Output (Float) Voltage	0°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ 85°C, I <sub>BAT</sub> =40mA		4.137	4.2	4.263	V	
I <sub>BAT</sub>	BAT Pin Current Test condition:VBAT=4.0V	R <sub>PROG</sub> = 2.4k, Current Mode R <sub>PROG</sub> = 1.2k, Current Mode Standby Mode, V <sub>BAT</sub> = 4.2V	● ● ●	450 950 0	500 1000 −2.5	550 1050 −6	mA mA μA	
I <sub>TRIKL</sub>	Trickle Charge Current	V <sub>BAT</sub> <V <sub>TRIKL</sub> , R <sub>PROG</sub> =1.2K	●	120	130	140	mA	
V <sub>TRIKL</sub>	Trickle Charge Threshold Voltage	R <sub>PROG</sub> =1.2K, V <sub>BAT</sub> Rising		2.8	2.9	3.0	V	
V <sub>TRHYS</sub>	Trickle Charge Hysteresis Voltage	R <sub>PROG</sub> =1.2K		60	80	100	mV	
T <sub>LIM</sub>	Junction Temperature in Constant Temperature Mode				145		°C	

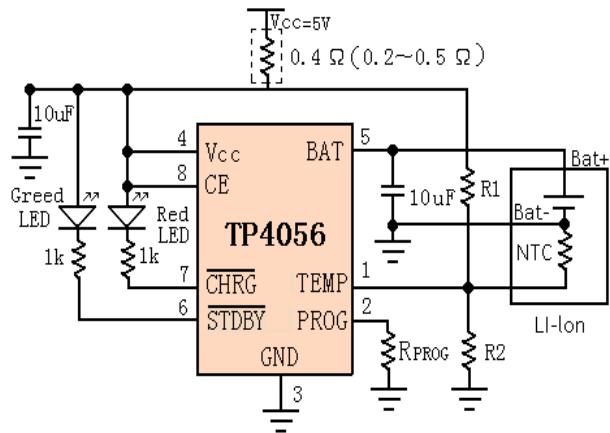
### indicator light state

Charge state	Red LED $\overline{\text{CHRG}}$	Greel LED $\overline{\text{STDBY}}$
charging	bright	extinguish
Charge Termination	extinguish	bright
Vin too low; Temperature of battery too low or too high; no battery	extinguish	extinguish
BAT PIN Connect 10u Capacitance; No battery	Greel LED bright, Red LED Coruscate T=1-4 S	

### Rprog Current Setting

RPROG (k)	I <sub>BAT</sub> (mA)
10	130
5	250
4	300
3	400
2	580
1.66	690
1.5	780
1.33	900
1.2	1000

### TYPICAL APPLICATIONS



# **Apéndice B**

## **MT3608**



**AEROSEMI**

**MT3608**

**High Efficiency 1.2MHz  
2A Step Up Converter**

## FEATURES

- Integrated 80mΩ Power MOSFET
- 2V to 24V Input Voltage
- 1.2MHz Fixed Switching Frequency
- Internal 4A Switch Current Limit
- Adjustable Output Voltage
- Internal Compensation
- Up to 28V Output Voltage
- Automatic Pulse Frequency Modulation Mode at Light Loads
- up to 97% Efficiency
- Available in a 6-Pin SOT23-6 Package

## APPLICATIONS

- Battery-Powered Equipment
- Set-Top Boxed
- LCD Bias Supply
- DSL and Cable Modems and Routers
- Networking cards powered from PCI or PCI express slots

## GENERAL DESCRIPTION

The MT3608 is a constant frequency, 6-pin SOT23 current mode step-up converter intended for small, low power applications. The MT3608 switches at 1.2MHz and allows the use of tiny, low cost capacitors and inductors 2mm or less in height. Internal soft-start results in small inrush current and extends battery life.

The MT3608 features automatic shifting to pulse frequency modulation mode at light loads. The MT3608 includes under-voltage lockout, current limiting, and thermal overload protection to prevent damage in the event of an output overload. The MT3608 is available in a small 6-pin SOT-23 package.

## TYPICAL APPLICATION

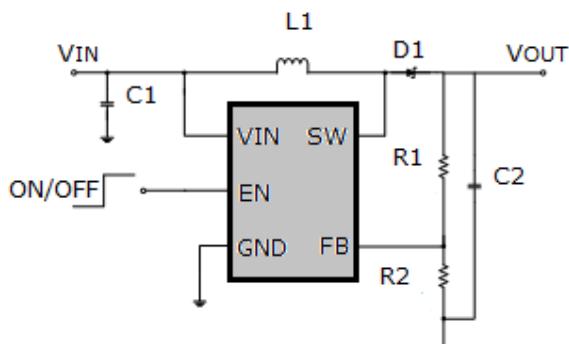


Figure 1. Basic Application Circuit

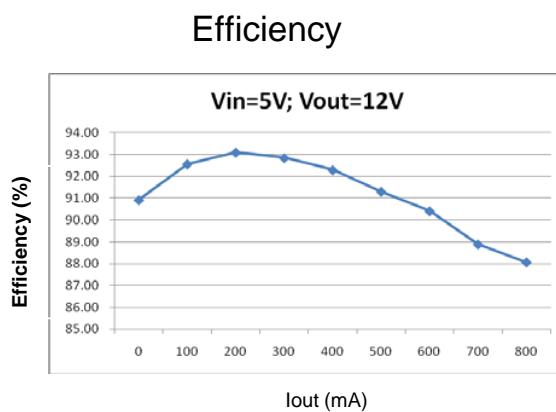


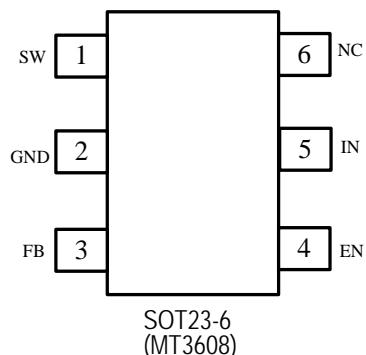
Figure 2. Efficiency Curve

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

IN, EN voltages ..... -0.3V to 26V  
 Operating Temperature..... -40°C to +85°C  
 FB Voltages .....-0.3V to 6V  
 Junction Temperature .....160°C

SW Voltage .....-0.3V to 30V  
 Storage Temperature Range -65°C to 150°C  
 Peak SW Sink and Source Current .....4A  
 Lead Temperature (Soldering, 10s) ...+300°C

## PACKAGE/ORDER INFORMATION



## PIN DESCRIPTION

PIN	NAME	FUNCTION
1	SW	Power Switch Output. SW is the drain of the internal MOSFET switch. Connect the power inductor and output rectifier to SW. SW can swing between GND and 28V.
2	GND	Ground Pin
3	FB	Feedback Input. The FB voltage is 0.6V. Connect a resistor divider to FB.
4	EN	Regulator On/Off Control Input. A high input at EN turns on the converter, and a low input turns it off. When not used, connect EN to the input supply for automatic startup.
5	IN	Input Supply Pin. Must be locally bypassed.
6	NC	NC

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

( $V_{IN}=V_{EN}=5V$ ,  $T_A = 25^{\circ}C$ , unless otherwise noted.)

Parameter	Conditions	MIN	TYP	MAX	unit
Operating Input Voltage		2		24	V
Under Voltage Lockout				1.98	V
Under Voltage Lockout Hysteresis			100		mV
Current (Shutdown)	$V_{EN}=0V$		0.1	1	$\mu A$
Quiescent Current (PFM)	$V_{FB}=0.7V$ , No switch		100	200	$\mu A$
Quiescent Current (PWM)	$V_{FB}=0.5V$ , switch		1.6	2.2	mA
Switching Frequency			1.2		MHz
Maximum Duty Cycle	$V_{FB} = 0V$	90			%
EN Input High Voltage		1.5			V
EN Input Low Voltage				0.4	V
FB Voltage		0.588	0.6	0.612	V
FB Input Bias Current	$V_{FB} = 0.6V$	-50	-10		nA
SW On Resistance (1)			80	150	$m\Omega$
SW Current Limit (1)	$V_{IN}= 5V$ , Duty cycle=50%		4		A
SW Leakage	$V_{SW} = 20V$			1	$\mu A$
Thermal Shutdown			155		$^{\circ}C$

**Note:**

- Guaranteed by design, not tested.

## OPERATION

The MT3608 uses a fixed frequency, peak current mode boost regulator architecture to regulate voltage at the feedback pin. The operation of the MT3608 can be understood by referring to the block diagram of Figure 3. At the start of each oscillator cycle the MOSFET is turned on through the control circuitry. To prevent sub-harmonic oscillations at duty cycles greater than 50 percent, a stabilizing ramp is added to the output of the current sense amplifier and the result is fed into the negative input of the PWM comparator. When this voltage equals

The output voltage of the error amplifier the power MOSFET is turned off. The voltage at the output of the error amplifier is an amplified version of the difference between the 0.6V bandgap reference voltage and the feedback voltage. In this way the peak current level keeps the output in regulation. If the feedback voltage starts to drop, the output of the error amplifier increases. These results in more current to flow through the power MOSFET, thus increasing the power delivered to the output. The MT3608 has internal soft start to limit the amount of input current at startup and to also limit the amount of overshoot on the output.

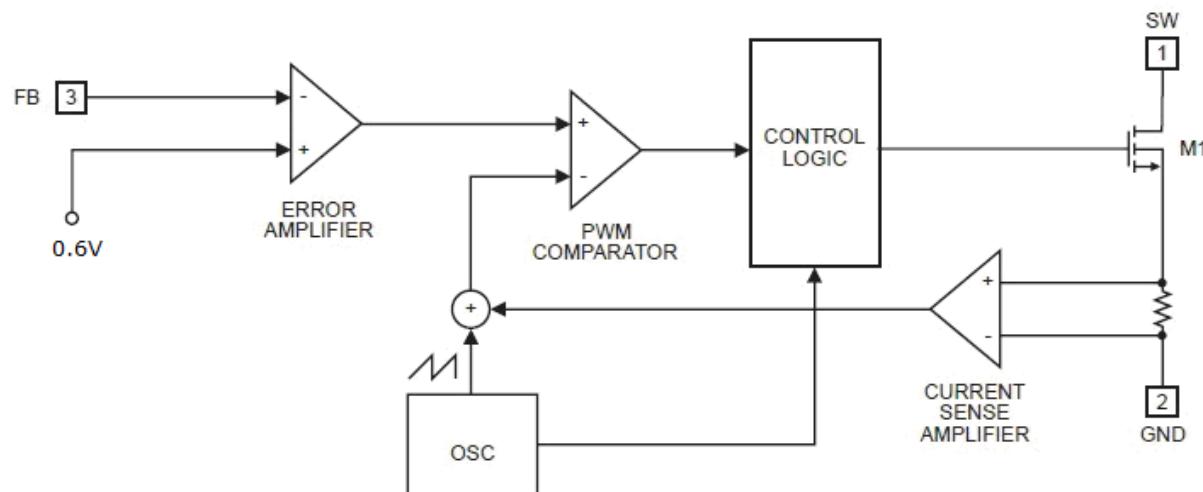
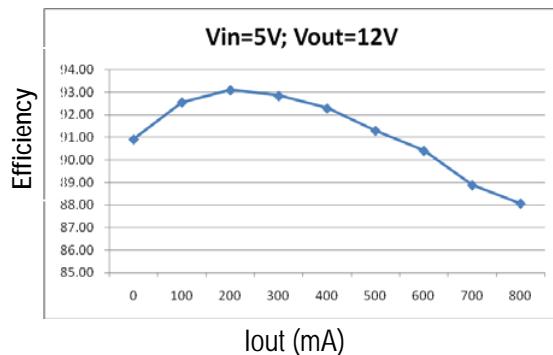


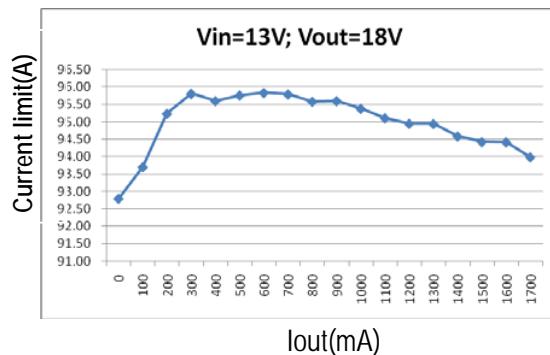
Figure 3. Functional Block Diagram

## TYPICAL OPERATING CHARACTERISTICS

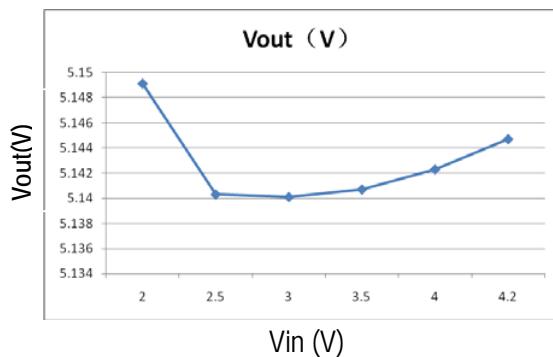
Efficiency Curve



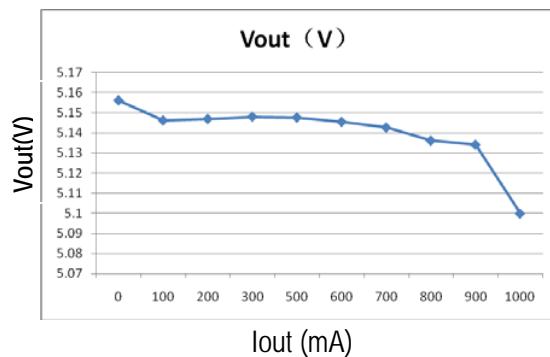
Efficiency Curve



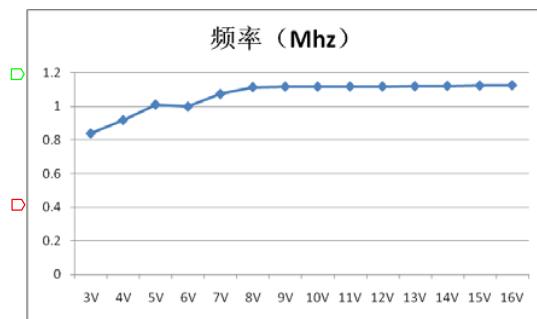
line Regulation



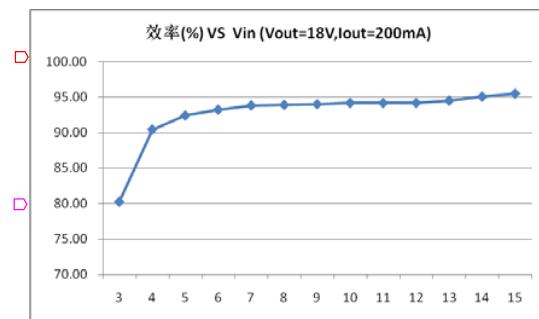
Load regulation



Freq VS Vin



Efficiency VS Vin



## APPLICATION INFORMATION

### Setting the Output Voltage

The internal reference VREF is 0.6V (Typical).The output voltage is divided by a resistor divider,R1 and R2 to the FB pin. The output voltage is given by

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

### Inductor Selection

The recommended values of inductor are 4.7 to 22 $\mu$ H. Small size and better efficiency are the major concerns for portable device, such as MT3608 used for mobile phone. The inductor should have low core loss at 1.2MHz and low DCR for better efficiency. To avoid inductor saturation current rating should be considered.

### Capacitor Selection

Input and output ceramic capacitors of 22 $\mu$ F are recommended for MT3608 applications. For better voltage filtering, ceramic capacitors with low ESR are recommended. X5R and X7R types are suitable because of their wider voltage and temperature ranges.

### Diode Selection

Schottky diode is a good choice for MT3608 because of its low forward voltage drop and fast reverse recovery. Using Schottky diode can get better efficiency. The high speed rectification is also a good characteristic of Schottky diode for high switching frequency. Current rating of the diode must meet the root mean square of the peak current and output average current multiplication as following :

$$I_D(RMS) \approx \sqrt{I_{OUT} \times I_{PEAK}}$$

The diode' s reverse breakdown voltage should be larger than the output voltage.

### Layout Consideration

For best performance of the MT3608, the following guidelines must be strictly followed.

- Input and Output capacitors should be placed close to the IC and connected to ground plane to reduce noise coupling.
- The GND should be connected to a strong ground plane for heat sinking and noise protection.
- Keep the main current traces as possible as short and wide.
- SW node of DC-DC converter is with high frequency voltage swing. It should be kept at a small area.
- Place the feedback components as close as possible to the IC and keep away from the noisy devices.

## PACKAGE DESCRIPTION

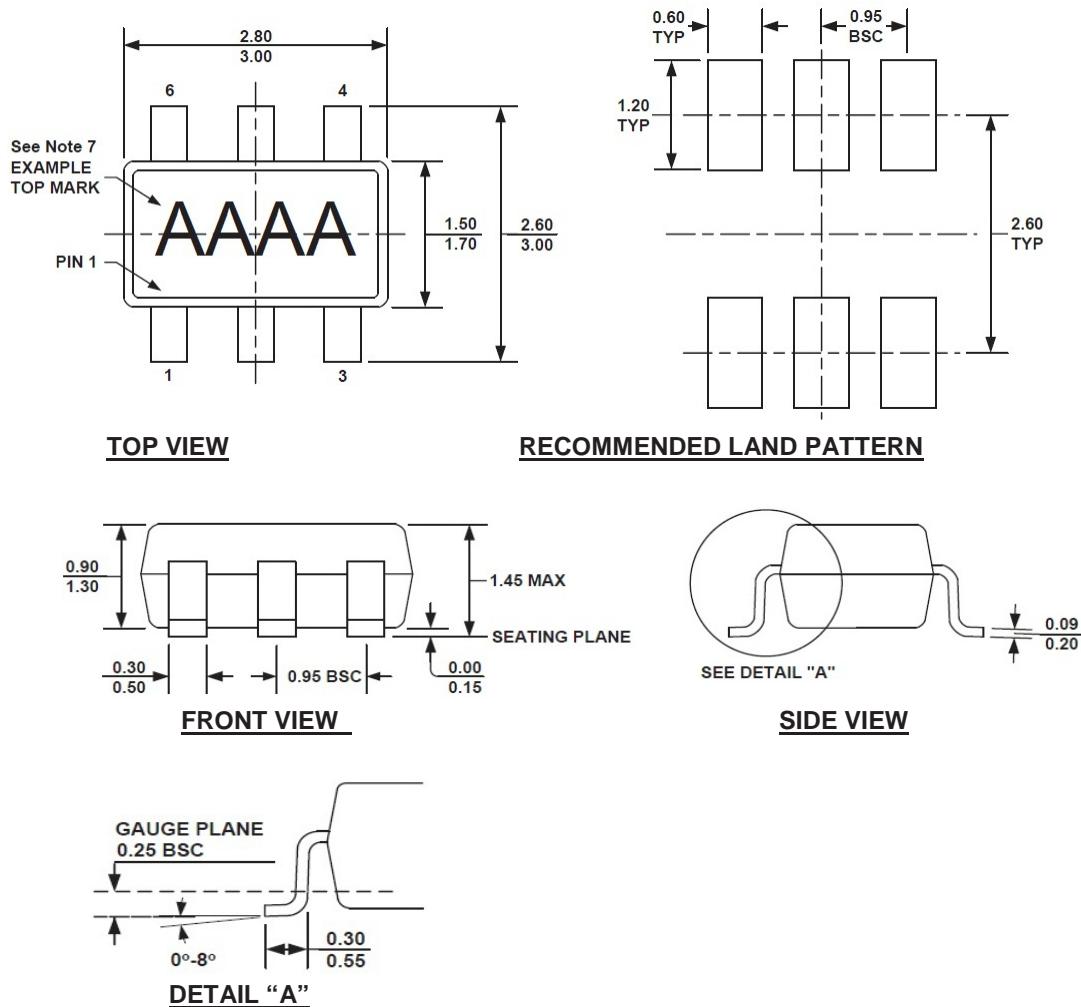


Figure 4. TSOT23-6/SOT23-6 Physical Dimensions

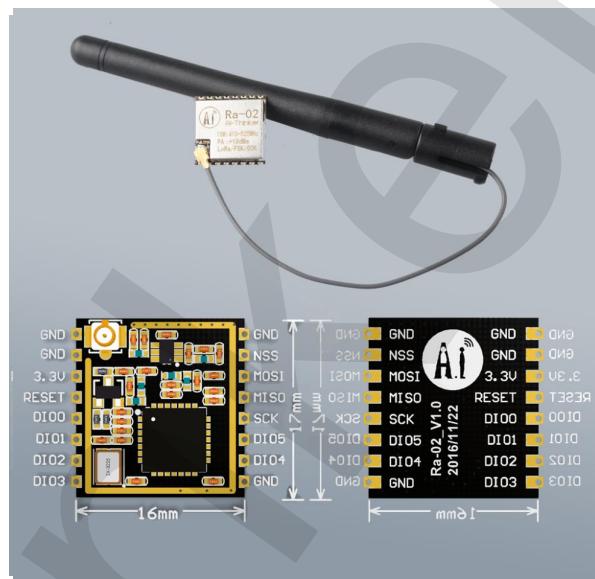
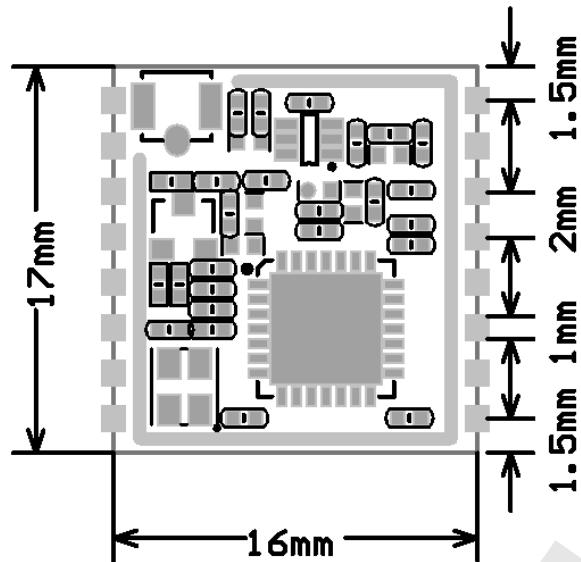
### NOTE:

- 1) ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
- 2) PACKAGE LENGTH DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH, PROTRUSION OR GATE BURR.
- 3) PACKAGE WIDTH DOES NOT INCLUDE INTERLEAD FLASH OR PROTRUSION.
- 4) LEAD COPLANARITY (BOTTOM OF LEADS AFTER FORMING) SHALL BE 0.10 MILLIMETERS MAX.
- 5) DRAWING CONFORMS TO JEDEC MO-193, VARIATION AB.
- 6) DRAWING IS NOT TO SCALE.
- 7) PIN 1 IS LOWER LEFT PIN WHEN READING TOP MARK FROM LEFT TO RIGHT, (SEE EXAMPLE TOP MARK)

# Apéndice C

## LORA SX1278

# Ra-02 LoRa Module



## Features

- LoRa™ spread spectrum modulation technology
  - Receive sensitivity as low as -141 dBm
  - Excellent resistance to blocking
  - Supports preamble detection
  - Supports half-duplex SPI communication
  - Programmable bit rate up to 300Kbps
  - Supports FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ and OOK modulation modes
  - Supports automatic RF signal detection, CAD mode and ultra high speed AFC
  - Packets with CRC, up to 256 bytes
  - Small package with double volume stamps

## Overview

Ra-02 can be used for ultra-long distance spread spectrum communication, and compatible FSK remote modulation and demodulation quickly, to solve the traditional wireless design can not take into account the distance, anti-interference and power consumption.

Ra-02 can be widely used in a variety of networking occasions, for automatic meter reading, home building automation, security systems, remote irrigation systems, is the ideal solution for things networking applications.

Ra-02 is available in SMD package and can be used for rapid production by standard SMT equipment. It provides customers with high reliability connection mode.

## Product Specifications

Module Model	Ra-02
Package	SMD-16
Size	17*16*(3.2 ± 0.1) mm
Interface	SPI
Programmable bit rate	UP to 300Kbps
Frequency Range	410-525 MHz
Antenna	IPEX
Max Transmit Power	18±1 dBm
Power (Typical Values)	433MHz: TX:93mA RX:12.15mA Standby:1.6mA 470MHZ: TX:97mA RX:12.15mA Standby:1.5mA
Power Supply	2.5~3.7V, Typical 3.3V
Operating Temperature	-30 °C ~ 85 °C
Storage Environment	-40 °C ~ 90 °C , < 90%RH
Weight	0.45g

## Receive Sensitivity

Frequency	Spread Factor	SNR	Sensitivity
433MHz	7	-7	-125
	10	-15	-134
	12	-20	-141
470MHz	7	-7	-126
	10	-15	-135
	12	-20	-141

Note: The above data are measured by the Semtech Shenzhen laboratory. The test conditions: power output 20dBm, bandwidth 125KHz.

## Contact US

Shenzhen Ai-Thinker Technology Co., Ltd

Address: 6/F, Block C2, Huafeng Industrial Park, Hangcheng Road, Bao'an Road, Baoan District, Shenzhen ,China

Website: [www.ai-thinker.com](http://www.ai-thinker.com)

Tel: 0755-29162996

E-mail: [support@aithinker.com](mailto:support@aithinker.com)