

Diseño y automatización de sistema de alimentación para animales a través de la tecnología LoRa

Lucía Francoso Fernández

Marzo 2021

Índice

Índice de figuras	4
Índice de tablas	4
1 Introducción	4
1.1 Contexto y justificación del trabajo	5
1.1.1 Ejemplo de caso de aplicación	6
1.2 Objetivos del trabajo	6
1.3 Enfoque y método seguido	7
1.4 Planificación del trabajo	7
1.4.1 Alcance	7
1.4.2 Hitos	7
1.4.3 Calendario de trabajo	7
1.4.4 Tareas y diagrama de Gantt	7
1.4.5 Riesgos e incidencias	7
1.4.6 Recursos	7
1.5 Breve resumen de productos obtenidos	7
1.6 Breve descripción de los capítulos restantes de la memoria	7
2 Estado del arte	8
2.1 Contexto actual	8
2.2 Trabajos relacionados	8
2.3 Resumen del capítulo	8
3 Diseño del sistema	9
3.1 Funcionalidades a cubrir	9
3.2 Búsqueda soluciones	9
3.2.1 Alimentación autónoma del dispositivo	9
3.2.2 Automatización y monitorización	26
3.2.2.1 Microcontrolador	26
3.2.2.2 Comunicación radio	26
3.2.2.3 Comedero	26
3.2.2.4 Bebedero	26
3.2.3 Prototipo exterior	26
3.3 Elección soluciones	26
3.3.1 Alimentación autónoma del dispositivo	26
3.3.2 Automatización y monitorización	26
3.3.2.1 Entorno Arduino	26
3.3.2.2 LoRa	28
3.3.2.3 LoRaWAN: NO VA AQUÍ, VA EN APARTADO 3.2	30
3.3.2.4 Comedero	32
3.3.2.5 Bebedero	32
3.3.3 Prototipo exterior	32

3.4	Resumen del capítulo	32
4	Prototipo y pruebas	33
4.1	Ubicación	33
4.2	Prototipo inicial	33
4.3	Prototipo definitivo	33
4.4	Pruebas	33
4.5	Comentarios sobre los resultados de las pruebas	33
4.6	Presupuesto	33
4.7	Resumen del capítulo	33
5	Conclusiones y líneas futuras	33
	Glosario	33
	Bibliografía	33
	Anexos	33
	Anexo I	33
	Anexo II	33
	Anexo III	33

Índice de figuras

1	Curva de la carga/descarga de una batería.	12
2	Comparación densidad de energía para diferentes baterías.	14
3	Curva de descarga de una celda Li-ion y una celda Ni-Cd/Ni-MH.	15
4	Capas y componentes que componen un panel solar.	16
5	Dibujo representativo del efecto fotovoltaico.	17
6	Curvas J-V e I-V de una célula fotovoltaica	18
7	Comportamiento de un panel solar formado por dos células solares idénticas.	18
8	Curva P-V de una célula solar, indicando el punto MPP.	20
9	Circuito equivalente de una célula fotovoltaica, en el caso ideal (a) y considerando pérdidas (b).	21
10	Curva J-V de una célula fotovoltaica, mostrando el efecto de aumentar o disminuir el valor de las resistencias R_s y R_p o R_{sh} (<i>shunt</i>).	22
11	Circuito equivalente de una célula fotovoltaica con un modelo de dos diodos, donde n_1 y n_2 son los factores de idealidad e I_{d1} y I_{d2} las corrientes que atraviesan cada diodo.	22
12	Variación en la curva I-V ante la radiación solar.	23
13	Variación en la curva I-V ante la temperatura ambiente	23
14	Relación entre temperatura ambiente, radiación solar, con la potencia de salida de una célula PV (14a) y temperatura de ésta (14b).	24
15	Variación de la potencia de salida de una célula PV dependiendo de la hora del día, la temperatura y la radiación solar.	25
16	Funcionamiento de nodos finales usando LoRaWAN.	30
17	Estructura general de un paquete LoRaWAN.	31
18	Estructura detallada de un paquete LoRaWAN.	32

Índice de tablas

1 Introducción

Tras finalizar los estudios de grado en ingeniería en sistemas de telecomunicaciones, se requiere como último paso para la obtención del título la elaboración del *Trabajo Fin de Grado* (TFG). El TFG como tal tiene unos objetivos claros, los cuales son demostrar que se han adquirido las competencias básicas intrínsecas al grado, y que el alumno es capaz de seguir aprendiendo a partir de los conocimientos ya obtenidos, innovar, desenvolverse ante un problema determinado y, en resumen, saber llevar a cabo una investigación o proyecto que tenga como objetivo la resolución de dicho problema.

En este documento, se recoge el proyecto realizado como TFG, el cual va en línea con la filosofía y objetivos del *Trabajo Fin de Grado* en sí mismo. Se detallará el proceso de creación de un sistema de alimentación para animales automatizado, donde se monitorizan de manera remota el estado

de los tanques de reserva de agua y pienso. Así, se pretende exponer el conjunto de elementos hardware y software que serán necesarios para monitorizar, automatizar y acceder a ciertos datos de forma remota empleando, principalmente, Arduino y LoRa.

1.1 Contexto y justificación del trabajo

Este proyecto ha sido concebido con el objetivo principal de ayudar a la preservación de la vida animal, ante el aumento de especies en extinción, sobretodo en lo que llevamos de siglo ¹, y ante el hecho de que miles de animales domésticos siguen siendo abandonados al año en España ².

Es por ello que se requiere de ayuda activa para paliar estos problemas. Las tareas de carácter solidario, en bastantes casos, no siempre cuentan con suficientes voluntarios; además, siendo un problema tan extendido y avanzado, el número de acciones que hay que llevar a cabo para aliviarlo es alto para un número limitado de voluntarios, los cuales deben incrementar considerablemente el tiempo que pasan realizando este tipo de tareas. Tanto si se trata de un refugio de animales domésticos abandonados, como de reservas naturales donde se intenta repoblar una especie, los animales dependen enteramente del trabajo de los voluntarios. Así pues, es de vital importancia la optimización de las tareas de voluntariado, su automatización e, incluso, control remoto, mediante la creación de herramientas que ayuden a reducir el tiempo que se destina a tareas rutinarias para poder utilizar ese tiempo a otras tareas (de rescate, o de financiación para el mantenimiento de las instalaciones y de los propios animales, por ejemplo).

Con el objetivo en mente de ayudar a la preservación de la fauna (y con ello, de la vida de los ecosistemas terrestres), evitando la extinción de especies y el abandono animal, se ha concebido y desarrollado este proyecto teniendo en cuenta los diferentes casos de uso (emplazamientos donde se podrá instalar el sistema, características del entorno), mejor adaptación a ellos, relación entre buenas prestaciones y bajo consumo, precio total del producto, o facilidad de uso por parte de un usuario medio. Es por ello que desde el principio se propone una serie de actuaciones a realizar, acorde a lo anteriormente mencionado, tales como:

- El diseño del sistema de alimentación será tal que el producto final pueda ser instalado no sólo en hogares, sino en sitios remotos, donde el acceso a recursos tales como la electricidad o Internet son escasos o inexistentes. Así pues, el dispositivo utilizará energía solar y baterías recargables, comunicación de bajo consumo y largo alcance y modo de ahorro de energía.
- El dispositivo final no será pesado ni voluminoso, facilitando así tanto su transporte como su manejo. No dejará al alcance del animal electrónica, de manera que evitaremos que los animales estén en contacto con ella y posibles problemas de humedad presente en el entorno; se usarán protecciones adecuadas a la calidad de los componentes del dispositivo.
- El dispositivo contará con una pantalla OLED que permitirá ver a la persona que esté físicamente delante de él si funciona correctamente. También se permitirá el acceso a datos a personas interesadas que quieran consultarlos de manera remota.

¹[National Geographic](#) , [BBC](#), [WWF](#), [Fundación AQUAE](#)

²[Fundación Affinity](#), [20 minutos](#), [La Razón](#), [RTVE](#)

1.1.1 Ejemplo de caso de aplicación

Un ejemplo de caso de aplicación sería el entorno donde se desea situar uno de estos dispositivos para validar su funcionamiento, que en este caso se trata del refugio perteneciente a la protectora Patitas Unidas Los Alcázares, situado en el término municipal de Torre Pacheco (Murcia). La elección de esta ubicación se fundamenta en una serie de razones:

- Al ser voluntaria para esta protectora, conozco bien sus necesidades, es decir, qué puede ser de utilidad para la protectora en el refugio y qué soluciones se han probado para determinados problemas que han ido surgiendo; además, conozco bajo qué condiciones climáticas es vulnerable y qué necesidades esporádicas emergen bajo dichas condiciones. Teniendo en cuenta la zona geográfica donde se ubica (Murcia), y los años de experiencia en el refugio, se ha detectado una problemática que se manifiesta durante periodos continuados de lluvias (lluvias torrenciales, DANA, gota fría), la cual consiste en la inundación de las zonas colindantes al refugio, inclusive carreteras de acceso, lo que impide llegar a él (cierre de carreteras, niveles altos de riesgo por precipitación, o el simple hecho de contar con grandes volúmenes de agua en la carretera que impiden la circulación segura por la vía). De
- Se trata de un entorno sin electricidad y sin internet. Desarrollar un proyecto y probarlo en este tipo de entorno nos ayudará a la hora de extrapolarlo a otros emplazamientos donde la ausencia de este tipo de recursos supone también una limitación y un aspecto a tener en cuenta para definir y desarrollar el proyecto en sí mismo.
- Se puede intentar establecer un enlace punto a punto, ya que se puede dejar fijo un equipo transmitiendo o recibiendo que, además, se conecte a internet (ya que es un recurso disponible) para subir los datos que reciba del otro extremo. Un equipo estará presente en el refugio y el otro en una casa con internet y electricidad; esto significa que al menos este extremo será más controlable, y será este extremo el que subirá datos a la nube. Nos tendremos que preocupar más del otro extremo, donde no tendremos electricidad ni internet y donde situaremos los sensores que recogerán datos y realizarán la automatización.

1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo fundamental del presente trabajo es el diseño de un sistema de alimentación para animales que permita la monitorización de los niveles de agua y pienso que se encuentran en depósitos de reserva, los cuales rellenan un bebedero y un comedero, respectivamente. Con ello, se pretende automatizar el proceso de alimentación de animales, además del uso de la tecnología LoRa para tener acceso al estado del sistema de forma remota. Así pues, los objetivos concretos son:

- Realizar una aproximación a la tecnología LoRa.
- Diseñar el sistema de alimentación para animales.
- Realizar tanto simulaciones para el enlace LoRa que se creará entre transmisor y receptor, como cálculos teóricos que determinen si el enlace es posible.
- Construir el prototipo y probarlo en entorno controlado y, posteriormente, en entorno real.

- Crear una plataforma de representación de datos.

1.3 Enfoque y método seguido

1.4 Planificación del trabajo

1.4.1 Alcance

1.4.2 Hitos

1.4.3 Calendario de trabajo

1.4.4 Tareas y diagrama de Gantt

1.4.5 Riesgos e incidencias

1.4.6 Recursos

1.5 Breve sumario de productos obtenidos

1.6 Breve descripción de los capítulos restantes de la memoria

2 Estado del arte

En este capítulo se va a exponer un análisis del estado del arte relativo al proyecto (tecnologías y técnicas necesarias para el diseño del sistema planteado). Este análisis se centra en la situación actual en tanto a la automatización del proceso de alimentación de animales, técnicas, sistemas y proyectos similares y conceptos introductorios a Arduino y LoRa, fundamentales para poder materializar este proyecto.

2.1 Contexto actual

Existen muchos proyectos Open Source relacionados con la alimentación automática o semiautomática de animales domésticos, principalmente gatos y perros. Sin embargo, no existen proyectos que usen LoRa como tecnología radio, sino que emplean la red local WiFi del hogar donde se sitúe el dispositivo de alimentación.

A pesar de ello, se ha visualizado este tipo de proyectos y tenido en cuenta para el desarrollo del prototipo en tanto a apariencia externa, comodidad de uso, eficiencia de los componentes, o, incluso, opciones para mover el pienso desde la reserva hasta el comedero del animal, o el agua desde la reserva hasta el bebedero.

2.2 Trabajos relacionados

2.3 Resumen del capítulo

3 Diseño del sistema

A lo largo de este capítulo se pretende mostrar los procesos de concepción, análisis e investigación llevados a cabo para la creación del primer prototipo del sistema de alimentación. Para ello, primeramente, se exponen las funcionalidades que éste debe incorporar; una vez identificadas esas funcionalidades, se presta la realización de una investigación cuyo objetivo sea la búsqueda de opciones que permitan que cada funcionalidad anteriormente expuesta pueda materializarse. Para terminar el presente capítulo, se procederá a exponer las opciones que han sido escogidas, debidamente justificadas, para el diseño del prototipo provisional del sistema de alimentación.

3.1 Funcionalidades a cubrir

Teniendo claros los objetivos que se persiguen con este proyecto, es posible definir las funcionalidades que ofrecería el sistema global que se pretende crear, ya que a partir de esta definición podremos empezar a deducir y establecer qué componentes son necesarios para llevar a cabo dichas funcionalidades.

Definimos *tres funcionalidades principales*:

1. **Alimentación autónoma del dispositivo**
2. **Automatización y monitorización.** Esta funcionalidad se compone de cuatro grandes bloques:
 - Bloque microcontrolador
 - Bloque comunicación radio
 - Bloque comedero (sensores, actuadores)
 - Bloque bebedero (sensores, actuadores)
3. **Integridad mediante prototipo exterior**

3.2 Búsqueda de soluciones para cada funcionalidad

3.2.1 Alimentación autónoma del dispositivo

Se entiende por alimentación autónoma la obtención de energía suficiente para el correcto funcionamiento de un dispositivo o un sistema, y que dicha obtención de energía se realice de manera cíclica e independiente o prácticamente independiente, es decir, no dependa de la acción y supervisión constante de una persona.

Para determinar la forma en la que alimentaremos nuestro proyecto, es imprescindible conocer bien las necesidades energéticas que lo limitarán; hay que determinar, por tanto, el consumo estimado de los componentes que conforman el proyecto. También es importante saber el tamaño y/o el destino de nuestro proyecto, para determinar si estará limitado a la hora de su transporte por una fuente de alimentación pesada, o si esta no limita en absoluto; será fundamental, además, conocer la ubicación de nuestro proyecto, es decir, si estará en el exterior o interior, si el ambiente será

excesivamente frío, cálido o húmedo.

A continuación, se mencionarán algunas soluciones para alimentación autónoma. Primero, se realizará una introducción teórica a términos y definiciones que nos permitan entender su funcionamiento; después, se presentarán opciones dentro de la categoría, haciendo énfasis en sus ventajas y desventajas, y anotando para qué proyectos es recomendable su uso. Por último, se pueden mostrar datos comparativos entre las opciones dentro de la categoría para una mejor visualización de dichas diferencias.

Baterías recargables

Términos y definiciones

Las características eléctricas de una batería definen cómo actuará en el circuito global, y las características físicas tendrán un enorme impacto en el tamaño y peso global del producto al que va a alimentar. Es por ello que, a la hora de escoger una batería, hay que tener presente los requerimientos de alimentación del proyecto, ya que ésta debe ser capaz de suministrar suficiente energía para que funcione correctamente, sin que suponga una limitación sus características físicas. Algunos parámetros que hay que comprobar son la tensión nominal, la corriente, la capacidad y el material del que está hecha la batería.

Se presenta, a continuación, una lista más extensa y explicada de los parámetros más importantes de las baterías:

- Una **celda** es un dispositivo electroquímico capaz de suministrar la energía que resulta de una reacción química interna a un circuito eléctrico externo.
Una batería se compone de una o más celdas, conectadas en paralelo o en serie para obtener la capacidad de corriente/voltaje requerida (las baterías compuestas por celdas conectadas en serie son las más comunes).
- La **resistencia en serie equivalente (ESR)** es la resistencia interna presente en cualquier celda que limita la cantidad de corriente máxima que puede entregar.
- La **capacidad**, medida en amperio-hora (Ah), de una batería (o celda) es su figura de mérito más importante: se define como la cantidad de corriente que una batería puede entregar durante 1 hora antes de que el voltaje de la batería llegue al final de su vida útil.
- La **tasa "c"** es una corriente que es numéricamente igual a la clasificación Ah de la celda. Las corrientes de carga y descarga se expresan típicamente en fracciones o múltiplos de la tasa c.
- El **MPV (voltaje de punto medio)** es el voltaje nominal de la celda y es el voltaje que se mide cuando la batería se ha descargado el 50 % de su energía total.
La oscilación de voltaje máxima y mínima del valor nominal es una consideración de diseño importante: una curva de descarga "más plana" significa menos variación de voltaje que el diseño debe tolerar.

- El *voltaje de celda medido al final de su vida útil* se llama ***EODV***, que significa *Fin de voltaje de descarga* (algunos fabricantes se refieren a esto como *EOL* o *voltaje de fin de vida útil*).
Cuando se carga al máximo, el voltaje real de la celda será más alto que el MPV. Al acercarse al punto EODV (final del voltaje de descarga), el voltaje de la celda será menor que el MPV.
- La ***densidad de energía gravimétrica*** de una batería es una medida de cuánta energía contiene una batería en comparación con su peso. Normalmente viene expresada en Watt-horas/kilogramo (Wh/kg).
- La ***densidad de energía volumétrica*** de una batería es una medida de cuánta energía contiene una batería en comparación con su volumen. Normalmente se expresa en Watt-horas/litro (Wh/l)
- Un ***cargador de voltaje constante*** es un circuito que recarga una batería obteniendo solo la corriente suficiente para forzar el voltaje de la batería a un valor fijo.
- Un ***cargador de corriente constante*** es un circuito que carga una batería al suministrar una corriente fija a la batería, independientemente del voltaje de la batería.

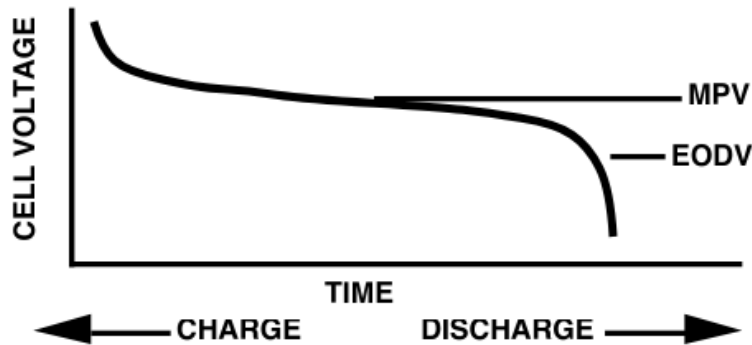


Figura 1: Curva de la carga/descarga de una batería.

Tipos de baterías recargables

Las principales baterías recargables que existen son:

1. *Lithium polymer* (LiPo). Son baterías de gran densidad de energía disponible, es decir, almacenan la mayor parte de energía para un determinado tamaño. Es por esta razón por la que los teléfonos móviles, los portátiles y otros dispositivos ligeros en peso usan baterías LiPo. Sin embargo, esta alta densidad de energía lleva consigo un coste/inconveniente, y es que son caras, y no son sólo las baterías en sí; cuando se trabaja con baterías de litio, hay que realizar una inversión para conseguir una circuitería especial que mantenga segura la batería. Por ejemplo, cuando estas cargando una batería LiPo, hay que asegurarse de que nunca se excedan los 4.2V por celda; las baterías LiPo explotarían si las sobrecargas. No solo la carga de la batería es delicada, sino que la descarga también lo es; si se descarga una batería LiPo por debajo de 3V por celda, se perderá permanentemente parte de su capacidad, e incluso pueden deformarse/hincharse. Finalmente, hay que estar pendiente constantemente de la temperatura, para evitar que la batería se sobrecaliente. A pesar de todo esto, es común usar baterías LiPo en proyectos ligeros y pequeños, siempre y cuando se tenga un buen circuito de carga, un buen circuito de descarga (que proteja a valores bajos de tensión, haciendo de corte en el mínimo de tensión de la batería) y un buen circuito de monitorización de temperatura.
2. *Lithium-ion* (Li-ion). Son muy similares a las baterías LiPo, pero a diferencia de estas, el electrodo negativo es líquido y el encapsulado y formato de presentación es totalmente diferente (las Li-ion suelen venderse sin protección y en apariencia son similares a unas pilas alcalinas AA). Una batería Li-ion almacena más potencia que las LiPo (mayor capacidad), ofrece mayores corrientes de descarga, es menos costosa de fabricar (y por tanto tienen un precio de venta más asequible), y tiene un tiempo de vida más largo (aunque con el tiempo pierde sus propiedades). Es, al igual que las LiPo, inflamable si se daña, se calienta en exceso o se sobrecarga. El empaquetado más común es el 18650, y en el mercado existen circuitos de protección varios para evitar la sobrecarga y la sobredescarga para este encapsulado en concreto, por lo que es una opción barata y sencilla para conseguir un prototipado rápido

y realizar pruebas del mismo, siempre y cuando el proyecto no exija mucha potencia; si el proyecto exigiera más tensión de la que proporciona la batería, se puede considerar obtener más unidades y realizar una configuración en serie para aumentar la tensión, o en paralelo si lo que se desea es aumentar la capacidad, o una combinación de ambas configuraciones (usando siempre un *Battery Management System* o BMS, para mantener las baterías balanceadas entre sí). Esta opción se puede considerar para baterías LiPo, pero para usuarios principiantes o poco experimentados resultará, probablemente, más complejo.

3. *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄). Son similares a las baterías LiPo, con la salvedad de que no son propensas a explosiones, como lo pueden ser las LiPo, si no se manipulan correctamente o las condiciones anteriormente mencionadas no se dan. También requieren una apropiada circuitería para cargarlas y descargarlas con cuidado, y si se comete un error se perderá permanentemente parte de la capacidad de la batería. Además, son un poco más pesadas que las baterías LiPo. Se usan normalmente en robots ligeros, herramientas eléctricas y juguetes por radio control, ya que son baterías bastante buenas entregando grandes cantidades de energía en un factor de forma pequeño y liviano.
4. *Sealed lead-acid* (SLA). Son una opción si se quiere comprar una batería no muy costosa, a la vez de evitar enfrentarnos a circuitos de protección de la batería. Estas baterías son bastante más duraderas que una batería de litio, y también son mejores para hacer frente a sobrecargas accidentales o sobredescargas. Tienen una excelente relación calidad-precio y también son el mejor tipo de batería frente a temperaturas extremas; es por esta razón que las baterías de plomo (o ácido-plomo) son la opción estándar para coches, motos, almacenamiento de energía solar y fuentes de alimentación de emergencia. El inconveniente de usar baterías de plomo es que son grandes y pesadas. No es recomendable, por tanto, usar baterías de plomo en aplicaciones portátiles.
5. Níquel-cadmio (*Nickel-cadmium*, NiCd). Los dispositivos portátiles, como los primeros teléfonos móviles, usaban baterías de níquel-cadmio. Son baterías baratas, que en teoría duran más tiempo que las baterías SLA; sin embargo, sufren el llamado efecto memoria, por lo que hay que regularmente descargarlas por completo, luego recargarlas por completo para mantener una alta capacidad, ya que, de lo contrario, estaríamos perdiendo vida útil de la batería. Así pues, en la actualidad no se suele usar este tipo de baterías, aunque se siguen vendiendo.
6. *Nickel Metal Hydride* (NiMH). Las baterías de níquel-metalhidruro o de níquel hidruro metálico tienen una mayor densidad de energía que las baterías de níquel-cadmio, en tanto a precio no son mucho más costosas y no sufren el efecto memoria. Son más grandes y pesadas que las baterías de litio, pero es bastante seguro trabajar con ellas, por lo que son las baterías más usadas por el consumidor medio en términos de pilas recargables (las encontramos en cualquier supermercado, y cargarlas es barato y simple). Hay que tener en cuenta que las baterías de NiMH, por norma general, tienen un ratio de autodescarga elevado, lo que quiere decir que a pesar de que no se esté haciendo uso de la batería, se autodescargan igualmente en un par de meses, lo que hace que no sean una buena opción para objetos de uso cotidiano (como mandos a distancia). Se recomienda que, si se necesita hacer uso de este tipo de baterías, se adquieran con bajo ratio de autodescarga (como Panasonic Eneloop), las cuales pueden resultar más baratas a largo plazo que comprar unas pilas alcalinas.

Comparativa entre tipos de baterías recargables

Densidad de energía

CELL TYPE	NI-MH	NI-CD	LI-ION
GRAVIMETRIC DENSITY (W-HR/KG)	55	50	90
VOLUMETRIC DENSITY (W-HR/L)	180	140	210

Figura 2: Comparación densidad de energía para diferentes baterías.

Al revisar los datos de la Figura 2, la ventaja de Li-Ion en densidad gravimétrica es claramente la más sorprendente, casi duplicando las cifras de Ni-Cd y Ni-MH. Esto significa que los productos que funcionan con celdas de iones de litio se pueden hacer mucho más livianos sin sacrificar el tiempo de ejecución. Alternativamente, si el peso de la batería se mantiene igual, el tiempo de funcionamiento se duplicará si se utilizan baterías de iones de litio. Este hecho explica la razón por la que Li-Ion está reemplazando rápidamente al Ni-MH en los teléfonos celulares y computadoras portátiles de primera línea.

Estabilidad de tensión o tensión de celda

La tensión proporcionada para alimentar la carga es la más importante: las baterías Ni-Cd y Ni-MH tienen una tensión por celda de 1.25V (sus tensiones de descarga se asumen por norma general idénticas).

La tensión por celda de las baterías Ni-Cd y Ni-MH son sólo una tercera parte de la tensión nominal de 3.6V proporcionada por una celda de Li-ion (Figura 3), lo que significa que se requerirían tres celdas de Ni-Cd/Ni-MH conectadas en serie para igualar la tensión de una única celda de Li-ion. Sin embargo, la Figura 3 muestra también la gran ventaja de las baterías Ni-Cd y Ni-MH: su curva de descarga es extremadamente plana, próxima a la de una batería ideal. Esta importante diferencia entre tipos de baterías significa que las celdas de Ni-Cd y Ni-MH son adecuadas para su uso con reguladores lineales, pero las baterías de Li-ion requieren convertidores reductores (*Buck converters*) para obtener una buena eficiencia de conversión de energía en la fuente de alimentación.

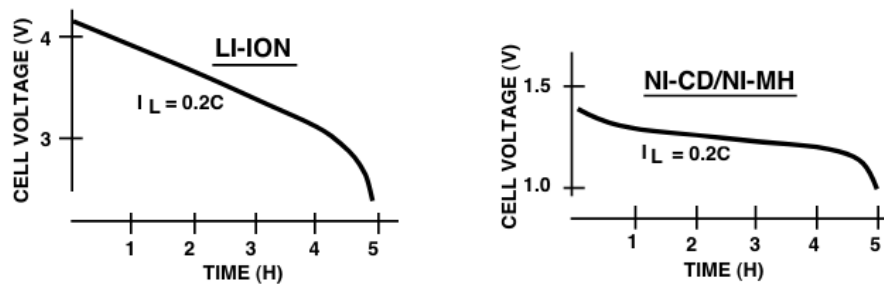


FIGURE 3. CELL DISCHARGE CURVE

Figura 3: Curva de descarga de una celda Li-ion y una celda Ni-Cd/Ni-MH.

Corriente pico

Autodescarga

Tiempo de carga

Coste

Fiabilidad

Modos de falla relacionados con la edad

Temperatura de funcionamiento

Panel solar

Un panel solar, por si solo, no realiza la tarea de alimentación autónoma. Requiere, como mínimo, de una batería donde almacenar la energía que captan, por lo que, necesariamente, habría que escoger entre algunas de las opciones planteadas en el apartado anterior. Además, una batería no irá conectada directamente al panel solar, ya que se requiere un cargador solar que haga de intermediario, por una parte, entre la batería y el panel, y por otra parte, entre la batería y el dispositivo al que alimenta dicha batería.

Aunque esto será explicado con más detalle más adelante, se considera necesario establecer desde un principio los requerimientos mínimos para poder usar un panel solar de cara a la funcionalidad de alimentación autónoma, ya que dependen del apartado que acabamos de presentar sobre baterías recargables, y estos requerimientos mínimos establecerán una base de cara a la explicación sobre sistemas fotovoltaicos más complejos.

Funcionamiento y composición de un panel solar

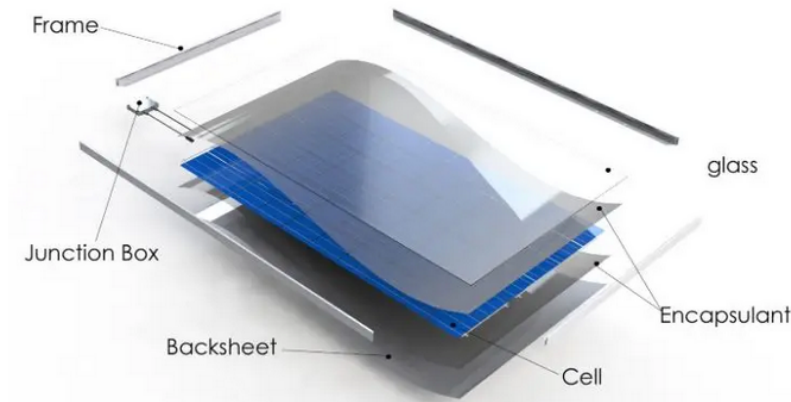


Figura 4: Capas y componentes que componen un panel solar.

Un panel solar es una agrupación de muchas células fotovoltaicas (PV) que están cubiertas con vidrio protector y unidas con un marco de metal. Es por eso que el nombre oficial de un panel solar es "módulo fotovoltaico" (*PV module*). Estas células solares fotovoltaicas están hechas de material semiconductor, generalmente silicio, que se corta en tiras muy finas.

Los paneles solares tienen muchas capas. La capa de células fotovoltaicas es donde se produce la electricidad. Otras capas, como las capas de vidrio y encapsulante, están ahí para proteger las células fotovoltaicas para que los módulos puedan producir electricidad de manera adecuada.

Cada célula fotovoltaica tiene una capa negativa y una capa positiva. La capa negativa tiene electrones adicionales y la capa positiva tiene *huecos* para esos electrones. La electricidad significa electrones en movimiento, por lo que para que un panel solar genere electricidad solo necesitamos algo de energía para hacer que esos electrones se suelten y fluyan de la capa negativa a la capa positiva.

Así pues, en resumen, la energía de los fotones del sol hace que los electrones en el lado negativo de la celda fotovoltaica se muevan (existe electricidad). Esto se llama efecto fotovoltaico.

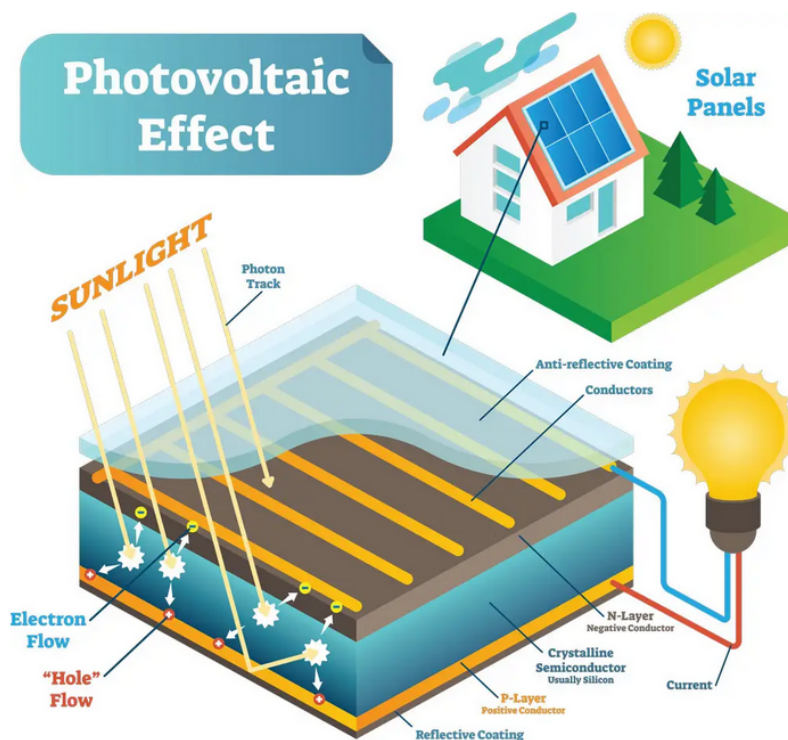


Figura 5: Dibujo representativo del efecto fotovoltaico.

Los electrones necesitan un camino a seguir y la electricidad debe estar en una forma útil. Es por ello que la ruta que creamos para los electrones (el circuito) es importante, ya que, cuando salen de la capa negativa de la celda fotovoltaica, queremos que fluyan a través de nuestras cargas (como nuestras luces y electrodomésticos, en el ejemplo del uso doméstico) para que los electrones puedan dar energía a esas cargas a medida que avanzan hacia la capa positiva de la celda fotovoltaica.

Uso en hogares de energía solar: meter aquí explicación sistema fotovoltaico

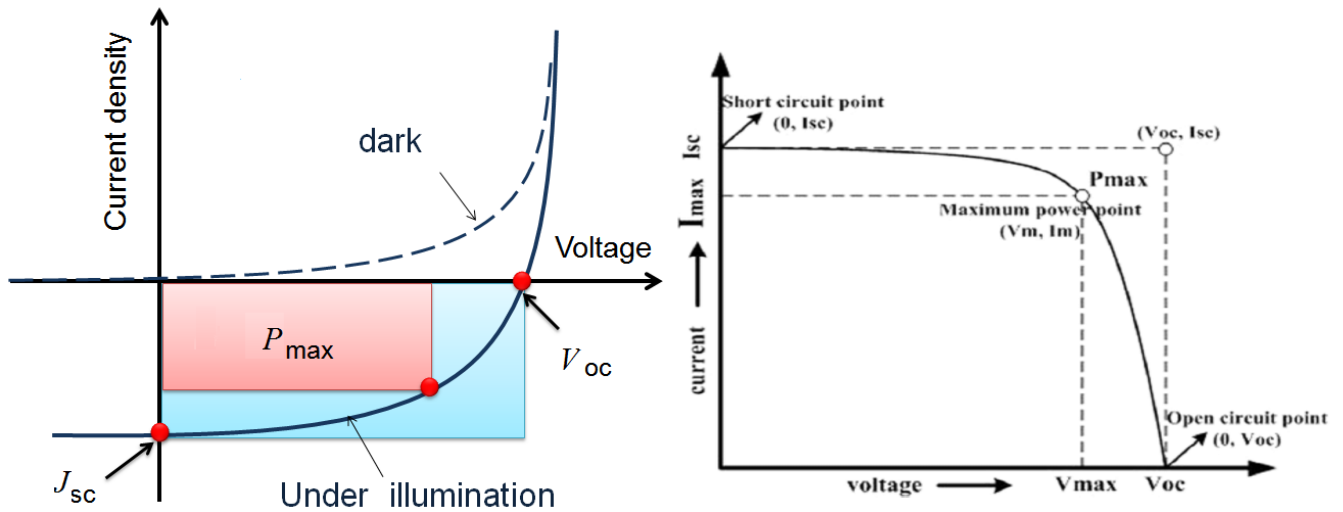
Los paneles solares producen electricidad de corriente continua (CC, DC), pero la generación de electricidad que usamos en nuestros hogares es de corriente alterna (CA, AC). Para solucionar este problema, agregamos un inversor a nuestro circuito. Luego, el inversor convierte la energía de CC en energía de CA.

El inversor es un factor clave para determinar cómo funcionan los paneles solares porque sin un inversor en nuestro sistema fotovoltaico, no podemos hacer mucho con la energía generada por los paneles solares. Esto último no aplica a nuestro caso, donde nos interesa crear un proyecto que se alimente de manera autónoma, sin uso de la electricidad disponible en el hogar; el panel solar, en este caso, recargaría una pila, y por ello necesitamos la energía DC, y no necesitamos usar un inversor a AC.

Parámetros

Los principales parámetros que se usan para caracterizar el rendimiento de las células solares son la potencia máxima P_{max} (*peak power*), la densidad de corriente en cortocircuito J_{sc} , la tensión en circuito abierto V_{oc} , y el factor de forma FF . Estos parámetros se determinan a partir de la curva J-V característica cuando la célula está iluminada, tal como se muestra en la Figura 6a. La eficiencia de conversión η se puede determinar a partir de estos parámetros.

Nótese que se menciona específicamente *parámetros de una célula solar*; un panel solar, como se ha mencionado anteriormente, consta de varias células fotovoltaicas, por lo que los parámetros especificados, en términos globales y tal como se construyen los paneles solares, influyen en las especificaciones finales del panel según el número de células del que conste (ver Figura 7).



(a) Determinación de los parámetros de una célula solar a partir de su curva J-V.

(b) Curva I-V de una célula solar.

Figura 6: Curvas J-V e I-V de una célula fotovoltaica

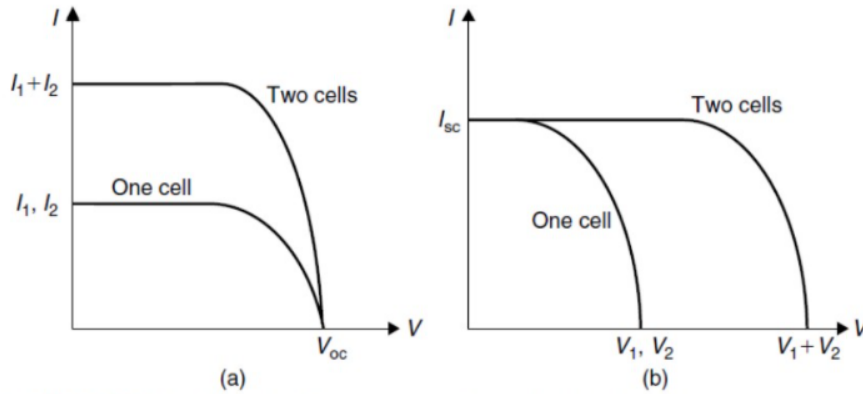


Figura 7: Comportamiento de un panel solar formado por dos células solares idénticas.

Para realizar medidas fiables y definir la curva característica J-V, se deben realizar las medidas bajo condiciones estándar de pruebas (*standard test conditions, STC*); estas son, una temperatura constante a 25°C , una irradiancia total de 1000 W/m^2 y un espectro solar de AM1.5 (sol directo y con ángulo cenital de $48,2^{\circ}$). Esto lo tendremos en cuenta si queremos comprobar que las especificaciones del producto son correctas, o por el contrario el producto viene defectuoso. En este proyecto no es prioritario el estudio profundo y comprobación exhaustiva del panel solar, por lo que no se realizarán dichas pruebas; sin embargo, sí realizaremos un estudio teórico de los parámetros que definen a una célula solar, como también lo hemos hecho de los materiales que lo componen y su funcionamiento general.

Densidad de corriente en cortocircuito

La corriente en cortocircuito I_{sc} es la corriente que fluye a través de un circuito externo cuando los electrodos de una célula solar se cortocircuitan. La corriente en cortocircuito de una célula solar depende de la incidencia del flujo de fotones sobre ella, la cual está determinada por el espectro de la luz incidente. También depende del área de la célula solar. Para eliminar la dependencia del área de la célula solar sobre I_{sc} , normalmente se usa la densidad de corriente en cortocircuito para describir la máxima corriente entregada por una célula solar. La máxima corriente que una célula solar puede entregar depende mucho de las propiedades ópticas de la célula solar, tales como la absorción en la capa absorbente y la reflexión.

Las células solares de silicio cristalino pueden entregar, bajo un espectro AM1.5, una posible densidad de corriente máxima de 46 mA/cm^2 . En las células solares de c-Si de laboratorio, las medidas de J_{sc} están por encima de 42 mA/cm^2 , mientras que las células solares comerciales tienen un J_{sc} que excede los 35 mA/cm^2 .

Tensión en circuito abierto

La tensión en circuito abierto es la tensión en la cual ninguna corriente fluye a través de un circuito externo. Es la tensión máxima que una célula solar puede entregar. V_{oc} corresponde a la tensión de polarización directa, a la cual la densidad de corriente de oscuridad compensa la densidad de corriente fotovoltaica (*fotocorriente*). Depende de la densidad de corriente de saturación de la célula solar y de la corriente fotogenerada. Mientras ésta última varía poco, la corriente de saturación puede variar en órdenes de magnitud. La corriente de saturación depende de la recombinación en la célula solar, por lo que V_{oc} es una medida de la cantidad de recombinación de la célula solar.

Las células solares de laboratorio hechas de silicio cristalino dan valores de V_{oc} de hasta 720 mV bajo condiciones AM1.5 estándar, mientras que las células solares comerciales normalmente dan valores de V_{oc} por encima de los 600 mV.

Factor de forma

El factor de forma es la relación entre la potencia máxima ($P_{max} = J_{mpp}V_{mpp}$) generada por una célula solar y el producto de V_{oc} con J_{sc} .

El subíndice *mpp* hace referencia al *punto de potencia máxima* (*maximum power point, MPP*) de la célula solar, es decir, el punto de la curva característica J-V de la célula solar al cual la célula solar ofrece su máxima potencia de salida. Para optimizar la operación de los sistemas fotovoltaicos, es muy importante que las células solares (o módulos fotovoltaicos) operen sobre el MPP. Esto se puede asegurar con un seguidor de punto de máxima potencia (*maximum power point tracking, MPPT*). Se trata de un algoritmo, el cual se usa en controladores de carga solar para extraer la máxima potencia disponible del módulo fotovoltaico bajo ciertas condiciones; dichas condiciones (se entrará más en detalle más adelante), como son la radiación solar a lo largo del día y año, la temperatura ambiente y la temperatura de la célula, afectan a la potencia máxima de salida de la misma, y es entonces cuando un MPPT actúa, haciendo operar a la célula solar al valor de tensión más eficiente, el MPP. El controlador de carga mantiene la tensión y la corriente a un nivel optimizado, donde el módulo fotovoltaico brinda la mayor cantidad de energía a la carga; es “consciente” del estado de carga de la batería y actúa en consecuencia.

El uso de un seguidor de punto de máxima potencia, sin embargo, encarece el costo total de un proyecto; si bien para aplicaciones que requieran la extracción de la máxima potencia de un panel solar (por limitaciones de espacio, por ejemplo, donde deberíamos explotar las características de los paneles que pudiéramos colocar), en el proyecto que estamos diseñando no es el caso, por lo que no usaremos herramientas de este estilo. Además, aunque pueden encontrarse o construirse de manera aislada (se trata de un convertor DC a DC), también suelen encontrarse incorporados a inversores, los cuales tampoco son necesarios, ya que no es energía solar para uso en hogar. Como anotación, existen otros controladores de carga que no son MPPT, como el PWM o *shunt controller* (regulador de carga tipo paralelo o de desviación).

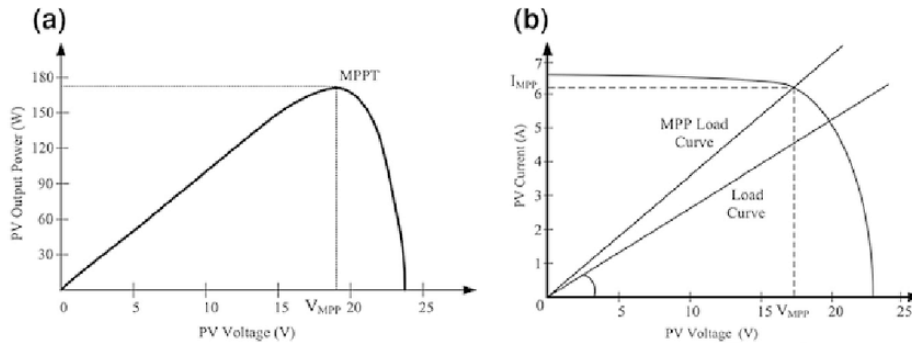


Figura 8: Curva P-V de una célula solar, indicando el punto MPP.

Por último, anotar que el factor de forma no varía tanto con V_{oc} , sino más con el material del que están hechas las células solares.

Eficiencia de conversión

La eficiencia de conversión se calcula como la relación entre la potencia potencia generada y la potencia incidente. Como vemos en la siguiente fórmula, y tal como establece su propia definición, depende de todos los parámetros anteriormente descritos:

$$\eta = \frac{P_{max}}{I_{in}} = \frac{J_{mpp}V_{mpp}}{I_{in}} = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{I_{in}} \quad (1)$$

Los parámetros externos típicos de una célula fotovoltaica de silicio cristalino son $J_{sc} \approx 35mA/cm^2$, V_{oc} hasta 0.65V y FF en el rango entre 0.75 y 0.80; esto implica que la eficiencia de conversión caiga en el rango entre 17 y 18 %.

Circuito equivalente

Una célula fotovoltaica iluminada puede comportarse como un diodo ideal, y este comportamiento puede describirse a través de un circuito equivalente simple, como el que se muestra en la Figura 9 (a). donde un diodo y una fuente de corriente están conectados en paralelo. El diodo está formado por una unión p-n.

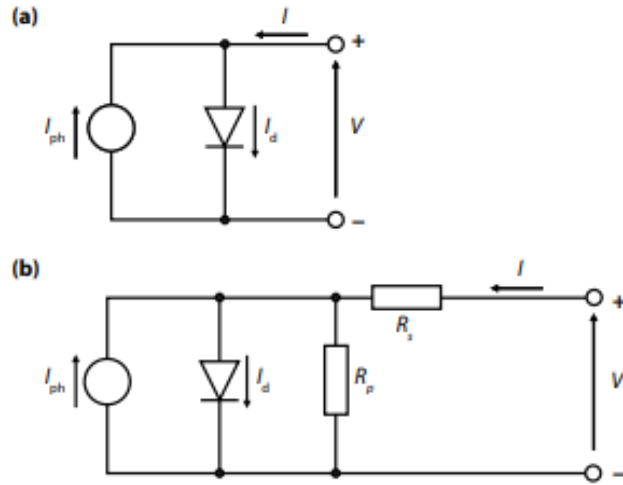


Figura 9: Circuito equivalente de una célula fotovoltaica, en el caso ideal (a) y considerando pérdidas (b).

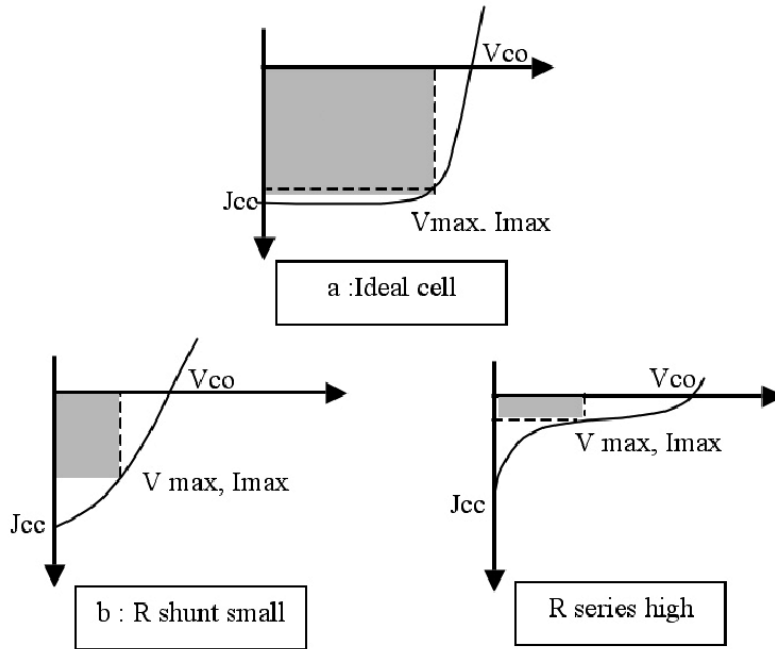


Figura 10: Curva J-V de una célula fotovoltaica, mostrando el efecto de aumentar o disminuir el valor de las resistencias R_s y R_p o R_{sh} (*shunt*).

Sin embargo, en la práctica, el factor de forma está influenciado por una resistencia en serie R_s , y una resistencia de derivación R_p . La influencia de estos parámetros en la curva característica J-V de una célula solar puede estudiarse usando el circuito equivalente mostrado en la Figura 9 (b). Además, en células solares reales, el factor de forma también está influenciado por una recombinación adicional que ocurre en la unión p-n. Este diodo no ideal se representa normalmente con un circuito equivalente formado por dos diodos, uno ideal con un factor de idealidad³ igual a la unidad, y otro diodo no ideal con un factor de idealidad mayor que uno.

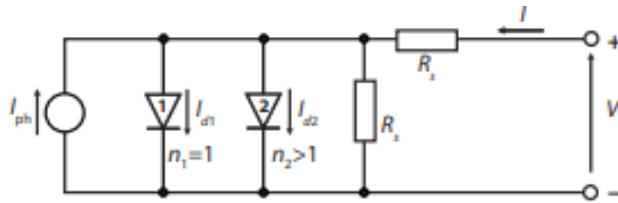
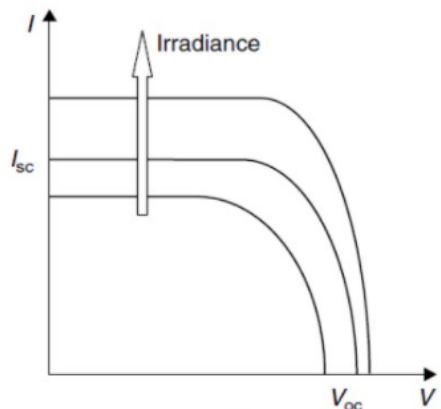


Figura 11: Circuito equivalente de una célula fotovoltaica con un modelo de dos diodos, donde n_1 y n_2 son los factores de idealidad e I_{d1} y I_{d2} las corrientes que atraviesan cada diodo.

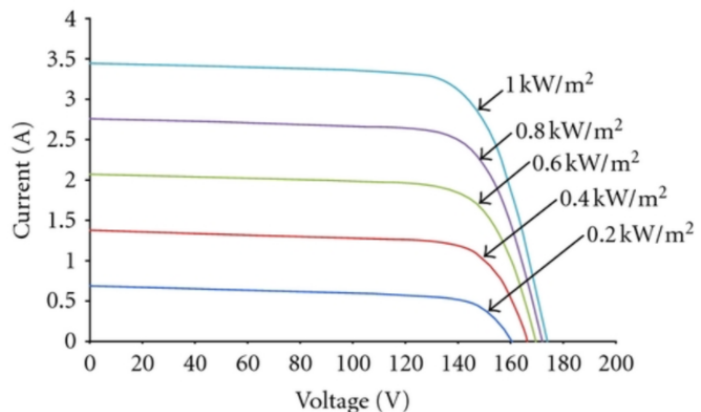
Factores principales que influyen en la potencia de salida de una célula PV

Radiación solar

³El factor de idealidad del diodo es una medida de cómo de cerca el diodo sigue la ecuación del diodo ideal.



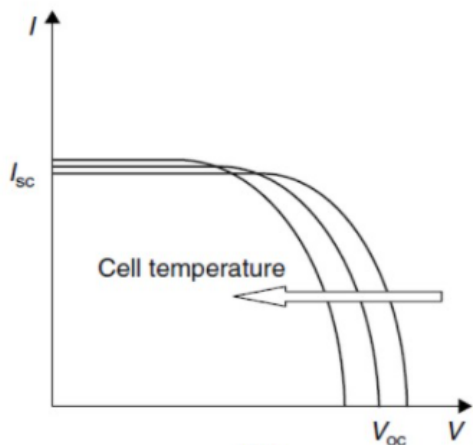
(a) Efecto general.



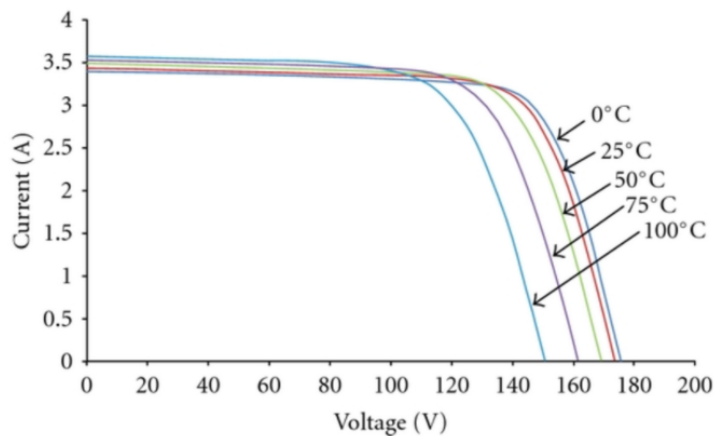
(b) Efecto según valores concretos de radiación.

Figura 12: Variación en la curva I-V ante la radiación solar.

Temperatura ambiente y temperatura de la célula



(a) Efecto general.



(b) Efecto según valores concretos de temperatura ambiente.

Figura 13: Variación en la curva I-V ante la temperatura ambiente

Nótese que en la Figura 13a se hace referencia a *temperatura de la célula* y en la Figura 13b a *temperatura ambiente*. Si bien son dos magnitudes diferentes, la temperatura ambiente tiene un efecto sobre la temperatura de la célula que puede considerarse lineal. A una temperatura ambiente de 25°C , la temperatura de una célula de silicio cristalino suele situarse en el valor de 48°C .

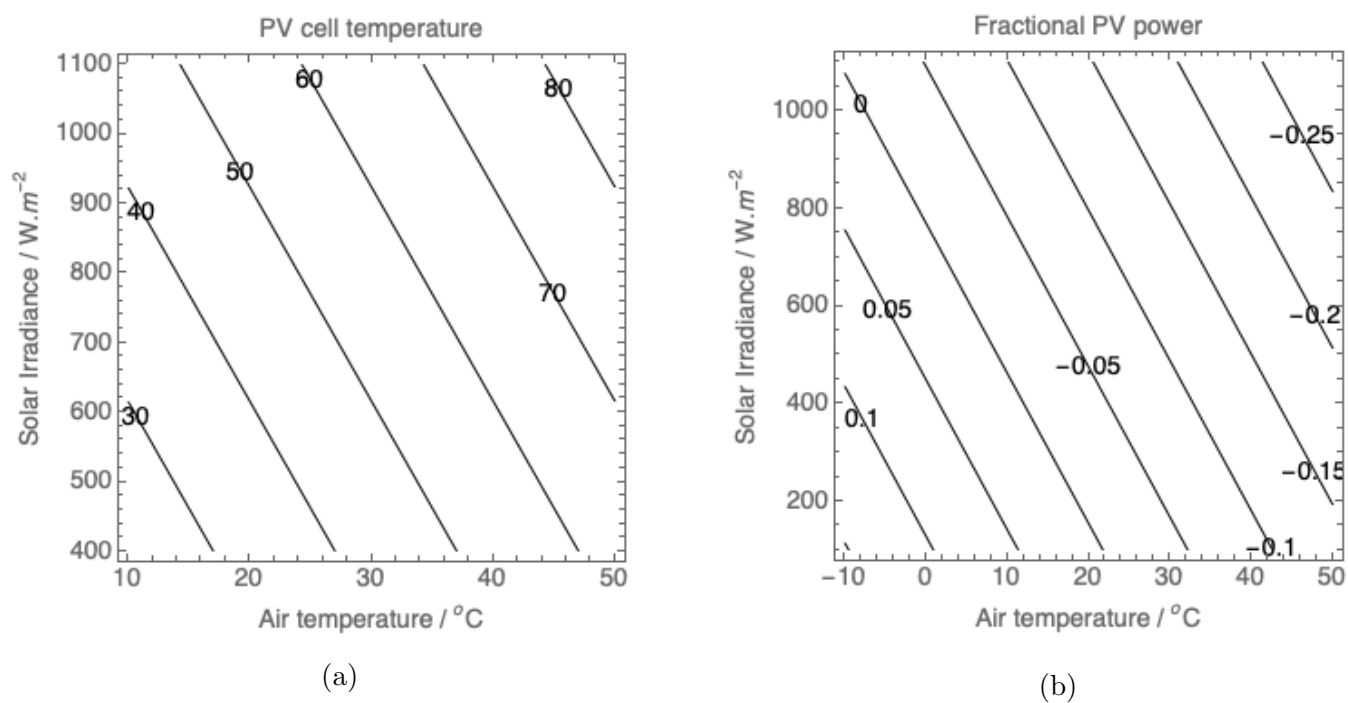


Figura 14: Relación entre temperatura ambiente, radiación solar, con la potencia de salida de una célula PV (14a) y temperatura de ésta (14b).

LEER ESTO Y COMENTAR POR AQUÍ, inclusive fórmula porque es relación lineal entre temperaturas ambiente y célula

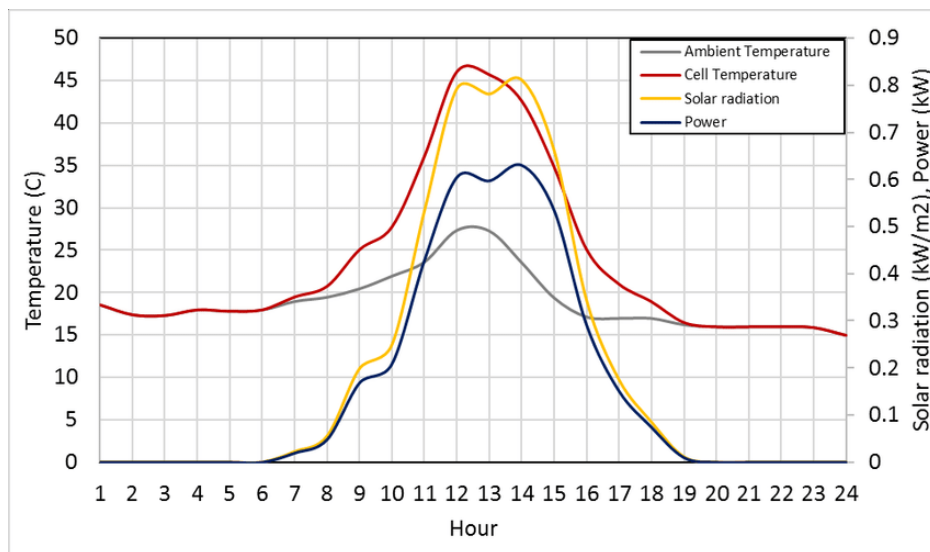


Figura 15: Variación de la potencia de salida de una célula PV dependiendo de la hora del día, la temperatura y la radiación solar.

Opciones: tipos de paneles solares

Existen diferentes tipos de células fotovoltaicas disponibles en el mercado, aunque en su mayoría están fabricadas de silicio (Si), el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (después del oxígeno), el cual es el mismo material del cual está hecha la arena. El silicio por sí mismo no es muy puro y debe ser refinado para conseguir una pureza de hasta el 99.99 % antes de que pueda usarse como material semiconductor en muchos tipos distintos de células fotovoltaicas, transistores o circuitos integrados digitales. El uso de silicio en la fabricación de células fotovoltaicas produce la típica célula fotovoltaica de color azul uniforme.

Los dos tipos principales de materiales usados para células fotovoltaicas son el silicio cristalino y los depósitos de película fina, los cuales varían entre unos y otros en términos de eficiencia en absorción de luz, eficiencia en la conversión de energía, tecnología de fabricación y coste de producción. Las células fotovoltaicas (a partir de ahora, células PV, *PhotoVoltaic*) hechas de silicio cristalino son el tipo más común de células PV que se utilizan en la actualidad y también son uno de los primeros dispositivos PV que tuvieron éxito.

Los tres tipos generales de células PV hechas de silicio son:

- Silicio monocristalino, conocido también como silicio de un único cristal, cristal de silicio único o silicio monocristal (*Mono-crystalline silicon, single-crystal silicon*).
- Silicio policristalino, conocido también como silicio de varios cristales, silicio multicristalino o silicio multicristal (*Poly-crystalline silicon, multi-crystal silicon*).
- Silicio de película fina.

Silicio cristalino (c-Si)

Célula PV de película fina

Otros tipos de células PV

3.2.2 Automatización y monitorización

3.2.2.1 Microcontrolador

3.2.2.2 Comunicación radio

3.2.2.3 Comedero

3.2.2.4 Bebedero

3.2.3 Prototipo exterior

3.3 Elección de soluciones para cada funcionalidad

3.3.1 Alimentación autónoma del dispositivo

Para conseguir el objetivo de una alimentación autónoma para el dispositivo de alimentación final que queremos crear, se ha decidido usar la siguiente combinación de componentes, explicados de manera teórica y más ampliamente en el apartado 3.2.1.

3.3.2 Automatización y monitorización

3.3.2.1 Entorno Arduino

Arduino es una plataforma de electrónica *open-source* basada en hardware y software fáciles de usar. Las placas Arduino son capaces de leer entradas (como la luz en un sensor, un dedo pulsando un botón) y convertirlas en salidas (activar un motor, apagar o encender un LED); es decir, como usuarios podemos decirle qué hacer a la placa enviándole una serie de instrucciones al microcontrolador de la placa. Para poder hacer esto último, se hace uso del lenguaje de programación de Arduino (basado en [Wiring](#)) y el software de Arduino (IDE, basado en [Processing](#)).

A lo largo de los años, Arduino ha sido el corazón de miles de proyectos, desde objetos cotidianos hasta complejos instrumentos científicos. Una comunidad mundial de creadores (estudiantes, aficionados, artistas, programadores y profesionales) se ha reunido en torno a esta plataforma de código abierto, sus contribuciones se han sumado a una increíble cantidad de conocimiento accesible que

puede ser de gran ayuda tanto para principiantes como para expertos.

Origen

Arduino nació en el Ivrea Interaction Design Institute como una herramienta fácil para la creación rápida de prototipos, dirigida a estudiantes sin experiencia en electrónica y programación. Tan pronto como llegó a una comunidad más amplia, la placa Arduino comenzó a cambiar para adaptarse a las nuevas necesidades y desafíos, diferenciando su oferta desde placas simples de 8 bits hasta productos para aplicaciones de IoT, wearable, impresión 3D y entornos integrados. Todas las placas Arduino son completamente de código abierto, lo que permite a los usuarios construirlas de forma independiente y eventualmente adaptarlas a sus necesidades particulares. El software también es de código abierto y está creciendo gracias a las contribuciones de los usuarios de todo el mundo.

Características

La principal característica de Arduino es la simplicidad para trabajar con microcontroladores. A raíz de esto, ofrece una serie de ventajas para sus usuarios, como son:

- **Es de bajo coste.** Las placas de Arduino son relativamente de bajo coste comparadas con las plataformas de otros microcontroladores. La versión más económica de un módulo Arduino puede ser ensamblada a mano, e incluso los módulos Arduino pre-ensamblados cuestan menos de 50 \$.
- **Multiplataforma.** El software de Arduino, Arduino IDE, es capaz de ejecutarse en Macintosh OSX, Windows y Linux. La mayoría de sistemas de microcontroladores están limitados a Windows.
- **Entorno de programación simple y claro.** El software de Arduino (IDE) es fácil de usar para principiantes, sin dejar de ser lo suficientemente flexible para usuarios más avanzados.
- **Software Open Source y extensible.** El software Arduino está publicado como un conjunto de herramientas open source, disponible para ser ampliada por otros programadores a través de librerías basadas en el lenguaje C++; las personas que quieran comprender los detalles técnicos pueden dar el salto de Arduino al lenguaje de programación AVR C en el que se basa. Del mismo modo, se puede agregar código AVR-C directamente en los programas Arduino si así se desea.
- **Hardware Open Source y extensible.** Los planos de las placas Arduino están publicados bajo licencia *Creative Commons*, así pues, diseñadores de circuitos experimentados pueden hacer su propia versión del módulo, extendiéndola y mejorándola. Incluso usuarios sin experiencia pueden crear una versión en protoboard del módulo para entender cómo funciona y ahorrar dinero.

Hardware: placas Arduino

Existen diferentes placas Arduino, cuya elección dependerá del objetivo que persiga nuestro proyecto y de los requerimientos y limitaciones sobre dicho proyecto.

Software: Arduino IDE

3.3.2.2 LoRa

Qué es

El término LoRa proviene de la unión de las palabras *Long* y *Range*, es decir, largo alcance, evidenciando, así, a través de su nombre una de sus principales características. Se trata de la capa física del protocolo *LoRaWAN*; es a través de esta capa que se permite el establecimiento del enlace de comunicación de largo alcance, mientras que LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red.

También se trata de una tecnología inalámbrica propiamente dicha que ofrece una transmisión de largo alcance, bajo consumo y segura para aplicaciones IoT y M2M. Se basa en la modulación de espectro ensanchado, la cual presenta características de bajo consumo como la modulación FSK pero puede ser usada para comunicaciones de largo alcance. Puede ser usada para conectar sensores, gateways, máquinas, dispositivos, animales, personas, etc. de manera inalámbrica a la nube.

Planes de frecuencia

La tecnología LoRa opera en diferentes frecuencias dependiendo de la región en la que nos encontremos, por ejemplo:

- En Norteamérica, opera en la banda de 915 MHz.
- En Europa, en la banda de 868 MHz.
- En Asia, en la banda de 865 a 867 MHz y en la banda 920 a 923 MHz, aunque es común también la banda 433 MHz.

Dado que los planes de frecuencia para LoRa varían según la región, inclusive país, es recomendable asegurarse de las regulaciones vigentes en cada país para el uso del espacio radioeléctrico. A modo resumen y como orientación inicial a este asunto, se puede consultar esta [lista de planes de frecuencia para cada país](#), elaborada por *The Things Network*.

Origen

La tecnología LoRa fue creada por una compañía francesa llamada *Cycleo*, la cual posteriormente fue adquirida por Semtech en 2012. Semtech fue el miembro fundador de *LoRa Alliance*, que actualmente es el organismo rector de LoRa Technology. LoRa Alliance es una de las alianzas tecnológicas de más rápido crecimiento. Esta asociación sin ánimo de lucro está formada por más de 500 empresas miembro, comprometidas a permitir la implementación a gran escala de redes IoT

de amplia cobertura y baja potencia (LPWAN) a través del desarrollo y la promoción del estándar abierto LoRaWAN.

Especificaciones en términos generales de la tecnología LoRa

- Órgano rector: LoRa Alliance
- Estándar: 801.15.4g
- Frecuencia: banda ISM, 868/916 MHz
- Alcance: hasta 5 km (urbano) y hasta 15 km (rural)
- Datarate: 27 kbps
- Modulación: espectro ensanchado basado en la tecnología de modulación FM
- Seguridad: CRC de 32 bits

Regulación LoRa en Europa: ERC 70-03

[ERC 70-03](#)

3.3.2.3 LoRaWAN: NO VA AQUÍ, VA EN APARTADO 3.2

A pesar de que no se va a usar LoRaWAN en este proyecto, sí que se realizó su pertinente investigación, por lo que a continuación se muestra un resumen de nociones básicas sobre LoRaWAN.

Clases de nodos finales LoRaWAN

Existe 3 clases diferentes de nodos finales en LoRaWAN, los cuales son:

- Clase A (*All*)
- Clase B (*Beacon*)
- Clase C (*Continuous*)

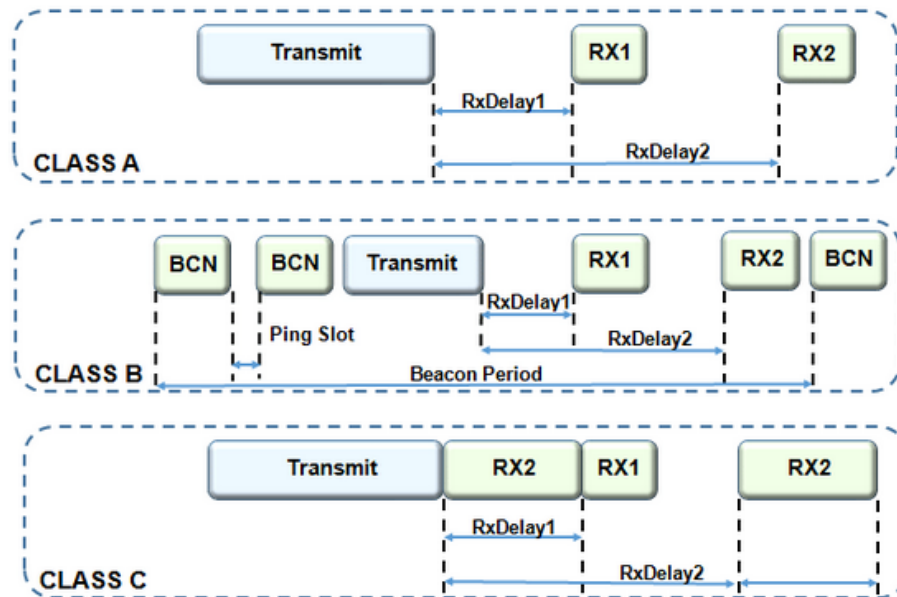


Image courtesy of ResearchGate.net

Figura 16: Funcionamiento de nodos finales usando LoRaWAN.

Estructura de un paquete LoRaWAN

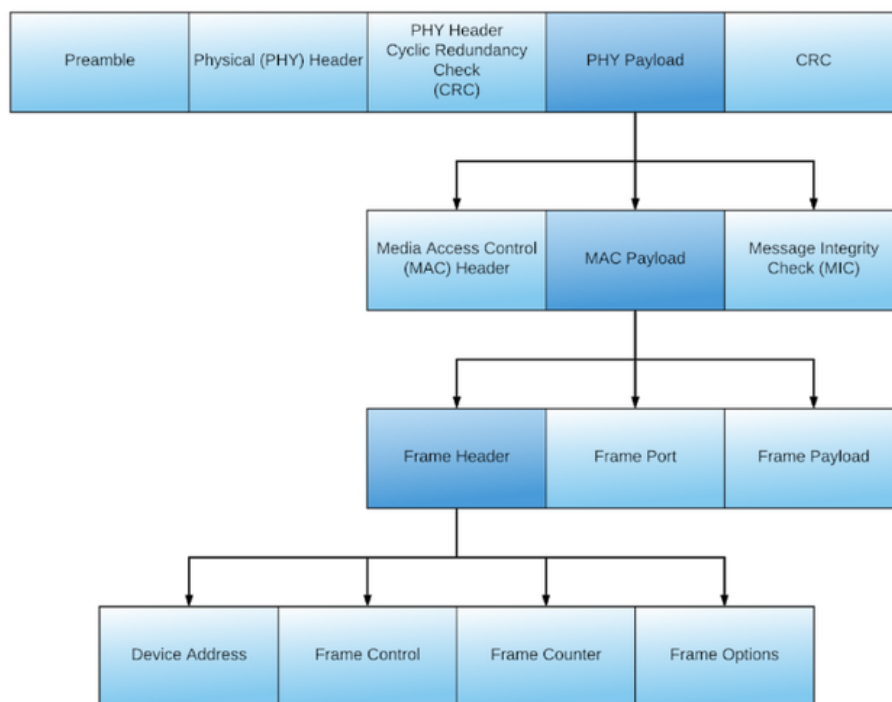


Figura 17: Estructura general de un paquete LoRaWAN.

Enhanced Detail of Physical Payload of LoRa Physical Layer Packet Format

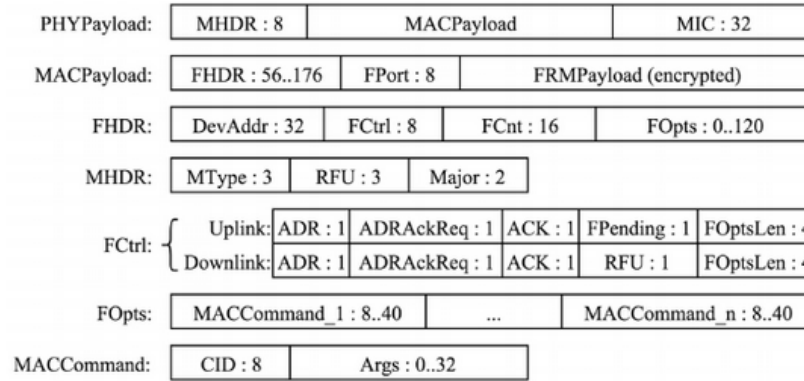


Image courtesy of ResearchGate.net

Figura 18: Estructura detallada de un paquete LoRaWAN.

3.3.2.4 Comedero

3.3.2.5 Bebedero

3.3.3 Prototipo exterior

3.4 Resumen de capítulo

En este capítulo se ha hablado de [...]. Se sacan conclusiones para la creación de un prototipo que pueda ser ejecutado y probado en el entorno objetivo.

4 Prototipo y pruebas

4.1 Ubicación

4.2 Prototipo inicial

4.3 Prototipo definitivo

4.4 Pruebas

4.5 Comentarios sobre los resultados de las pruebas

4.6 Presupuesto

Se adjunta una tabla para el desglose del presupuesto para este proyecto en el Anexo III (5).

4.7 Resumen del capítulo

5 Conclusiones y líneas futuras

Glosario

Bibliografía

Anexos

Anexo I

Anexo II

Anexo III