

CAPÍTULO 3:

INSTALACIONES

FOTOVOLTAICAS

AISLADAS

3.1. Introducción a las instalaciones fotovoltaicas

El primer módulo fotovoltaico que se fabricó fue en los Laboratorios Bell en el año 1954, con células solares que alcanzaban un rendimiento del 6% [Wikipedia.org, Dic 2010]. La industria espacial fue de las primeras que utilizó esta nueva tecnología en sus satélites y estaciones espaciales y el coste de fabricación era muy elevado.

Tras la crisis del petróleo en 1973, que provocó un aumento gigantesco del coste del barril, algunos países empezaron a invertir en otras fuentes de energía que resultaran factibles. Los nuevos métodos de obtención de electricidad preferidos eran el carbón y la energía nuclear, pero se empezó a invertir dinero en otras fuentes alternativas como las renovables.

En la década de los setenta, el coste de la generación eléctrica a partir de la energía solar era de aproximadamente \$2 el kWh. Desde entonces ha sufrido una reducción del 90%, siendo actualmente el coste de la generación eléctrica de menos de 28 céntimos de dólar el kWh [Revista "ElectroIndustria", Oct. 2007].

Esta reducción de costes se debe a la introducción de nuevos programas de subsidios que estimulan el desarrollo y la investigación de la tecnología solar, en especial la fotovoltaica. Japón fue el primer país en introducir estos programas en el 1994, ofreciendo subsidios de cerca de \$3.200 por kilovatio de potencia instalada mediante generadores fotovoltaicos. Esto provocó una caída del coste de producción y el gobierno fue retirando los subsidios hasta el 2005 conforme se abarataba el precio de los componentes fotovoltaicos [Revista ElectroIndustria, Oct. 2007].

Otros países como Alemania, España o Estados Unidos siguieron los pasos de Japón y empezaron a crear programas de subsidios similares, como el programa conocido como "feed-in tariff".

El "feed-in tariff" es una normativa que impulsa la generación de energías renovables mediante el establecimiento de una prima por la cantidad de energía inyectada a la red eléctrica proveniente de estas fuentes. Se estableció, en un principio, una tarifa mínima según el tipo de fuente energética, ubicación de la central y cantidad de energía producida, con un valor muy alto. Esto provocó un impulso de las energías renovables como la eólica o la fotovoltaica muy fuerte.

La tarifa se programó para disminuir entre un 5% y 6% cada año. Actualmente oscila entre 0,20€/kWh y 0,50€/kWh aproximadamente según las condiciones nombradas anteriormente. Aun así, el incremento de la energía fotovoltaica no solo no se ha detenido, sino que sigue creciendo de forma exponencial.

Estos programas provocaron una fuerte disminución de los precios de los sistemas fotovoltaicos, incrementando la producción de células solares de forma exponencial.

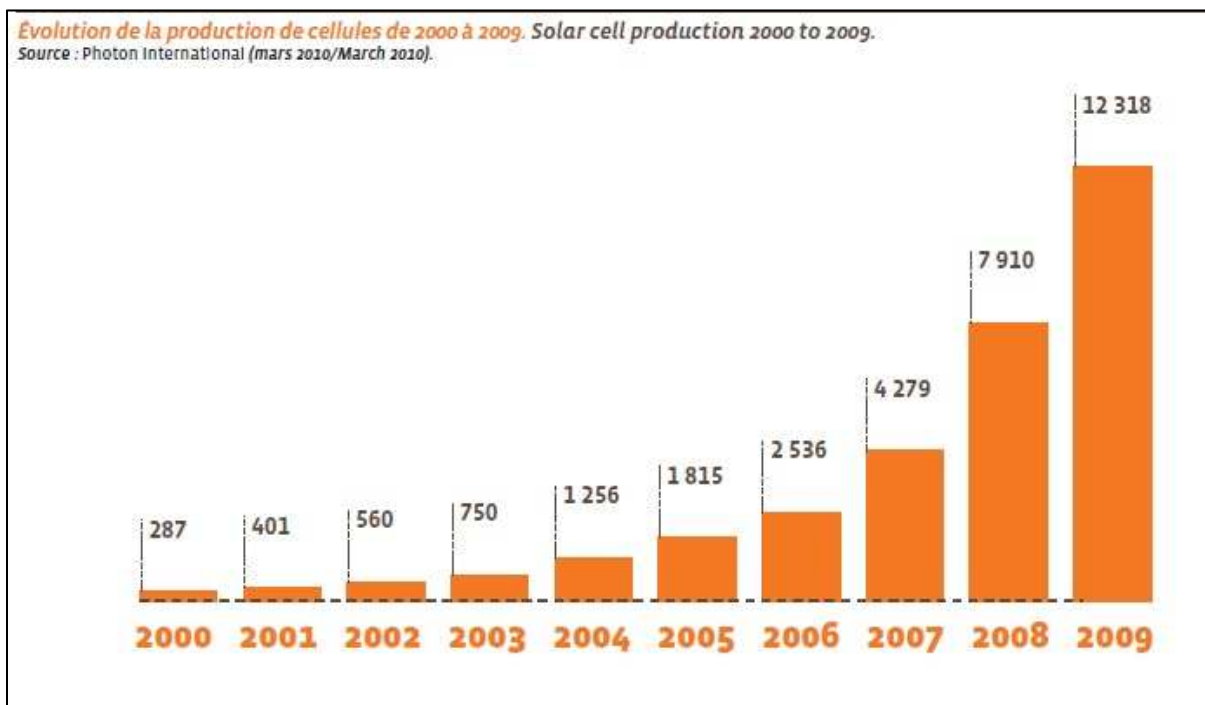


Ilustración 14. Producción mundial de células solares entre el año 2000 y el año 2009, en MWp. [Barómetro Fotovoltaico EurObserver, Abril 2010]

Année/year 2009

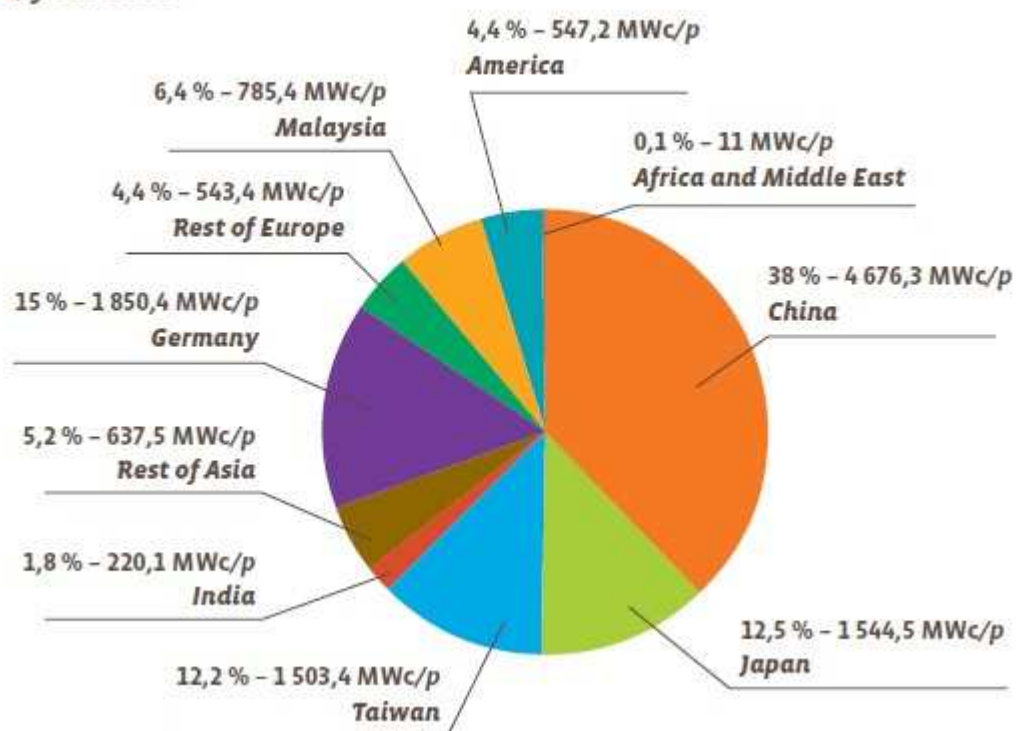


Ilustración 15. Producción mundial de células solares por países. Unidades en MWp.
[Barómetro Fotovoltaico EurObserver, Abril 2010]

Actualmente, Alemania, seguida de España, está en cabeza en la cantidad de MWp instalados en Europa. En la siguiente tabla puede verse este dato de forma aproximada en los últimos dos años.

Tabla 1. Potencia fotovoltaica instalada acumulada en la Unión Europea hasta finales de 2008 y 2009 (en MWp). [Barómetro Fotovoltaico EurObserver, Abril 2010]

Puissance photovoltaïque cumulée dans les pays de l'Union européenne en 2008 et 2009 (en MWc).*
Cumulated photovoltaic capacity in the European Union countries at the end of 2008 and 2009 (in MWp).*

	2008			2009*		
	Réseau On-grid	Hors réseau Off-grid	Total	Réseau On-grid	Hors réseau Off-grid	Total
Germany	5 979,000	40,000	6 019,000	9 785,300	45,000	9 830,300
Spain	3 402,235	18,836	3 421,071	3 500,000	20,082	3 520,082
Italy	445,000	13,300	458,300	1 019,000	13,400	1 032,400
Czech Republic	54,294	0,380	54,674	465,321	0,580	465,901
Belgium	70,870	0,053	70,923	362,970	0,053	363,023
France	82,990	20,912	103,902	268,230	21,119	289,349
Portugal	65,011	2,941	67,952	99,164	3,041	102,205
Netherlands	52,000	5,200	57,200	58,433	5,200	63,633
Greece	12,000	6,500	18,500	48,300	6,700	55,000
Austria	29,030	3,357	32,387	34,130	3,357	37,487
United Kingdom	20,920	1,590	22,510	30,920	1,690	32,610
Luxembourg	24,562	0,000	24,562	26,322	0,000	26,322
Sweden	3,079	4,831	7,910	3,579	5,131	8,710
Slovenia	1,906	0,100	2,006	8,302	0,100	8,402
Finland	0,170	5,479	5,649	0,170	7,479	7,649
Bulgaria	1,375	0,032	1,407	5,300	0,400	5,700
Denmark	2,825	0,440	3,265	4,025	0,540	4,565
Cyprus	1,586	0,571	2,157	2,695	0,633	3,328
Malta	0,238	0,000	0,238	1,527	0,000	1,527
Poland	0,179	0,832	1,011	0,179	0,832	1,011
Hungary	0,270	0,180	0,450	0,290	0,360	0,650
Romania	0,245	0,205	0,450	0,365	0,270	0,635
Ireland	0,100	0,300	0,400	0,100	0,300	0,400
Slovakia	0,046	0,020	0,066	0,176	0,020	0,196
Estonia	0,000	0,012	0,012	0,000	0,060	0,060
Lithuania	0,000	0,055	0,055	0,000	0,055	0,055
Latvia	0,000	0,004	0,004	0,000	0,004	0,004
Total EU 27	10 249,931	126,130	10 376,061	15 724,798	136,406	15 861,204

**Estimation. Estimate. Les décimales sont séparées par une virgule. Decimals are written with a comma. Source : EurObserver 2010.*

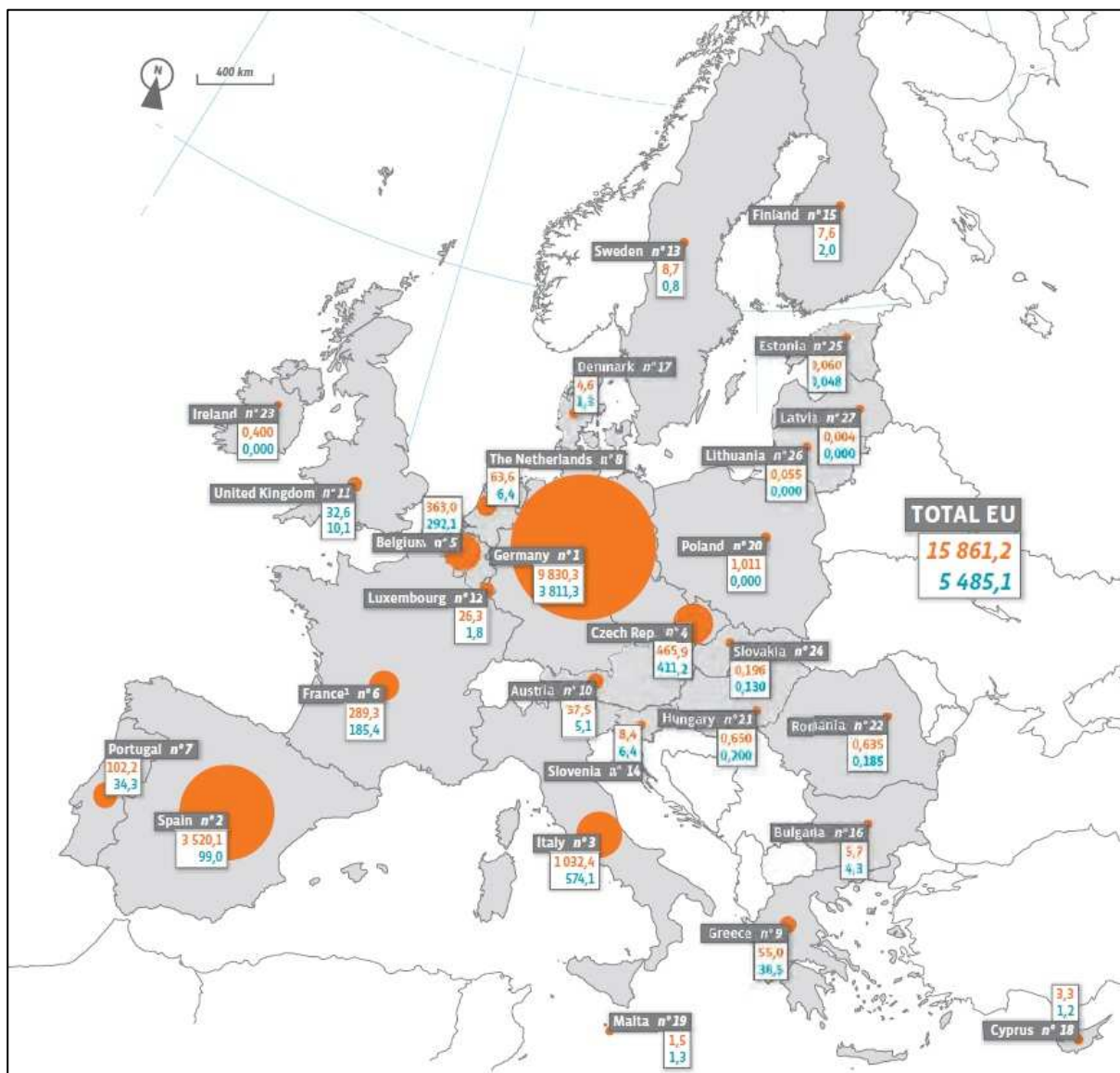


Ilustración 16. Potencia fotovoltaica instalada en la Unión Europea hasta el año 2009. En rojo se indica la potencia total instalada. En azul se indica la instalada en 2009. Unidades en MWp. [Barómetro Fotovoltáico EurObserver, Abril 2010]

Algunas de las centrales más grandes del mundo pueden encontrarse en Europa, como puede ser la central solar fotovoltaica de Amareleja (Portugal) con 46MWp iniciales o la central fotovoltaica de Rovigo (Italia) de cerca de 70MWp.



Ilustración 17a. Central fotovoltaica de Amareleja, Portugal.



Ilustración 17b. Central fotovoltaica de Rovigo, Italia.

La producción fotovoltaica sigue creciendo hoy día en todo el mundo. Es una alternativa no contaminante de las fuentes de energía fósiles actuales, requiere poco mantenimiento, los módulos fotovoltaicos pueden instalarse en casi cualquier lugar y de cualquier tamaño (incluso para dispositivos portátiles), es una tecnología segura y silenciosa, puede venderse la electricidad a una compañía eléctrica para obtener beneficios, puede ampliarse en cualquier momento añadiendo más paneles fotovoltaicos y, sobretodo, es inagotable.

A pesar de tener una gran cantidad de ventajas, los inconvenientes que frenan un desarrollo más rápido de esta tecnología son el rendimiento y el coste. La inversión inicial para instalar una central fotovoltaica es muy elevada, ya que la fabricación de los módulos fotovoltaicos es difícil y costosa. Para conseguir una gran cantidad de potencia se necesita un gran espacio de terreno porque el rendimiento de los módulos es bastante bajo. Además la producción depende de la climatología del lugar y de la época del año. Estos inconvenientes hacen que no pueda competir con las actuales fuentes de energía, pero poco a poco va abriéndose paso en el mercado energético actual.

3.2. Instalaciones fotovoltaicas

Las instalaciones fotovoltaicas se pueden separar en dos grandes grupos: las instalaciones conectadas a red y las instalaciones aisladas.

Las primeras se utilizan en lugares donde la red eléctrica es accesible. La electricidad producida se utiliza para la alimentación de cargas (en el caso de que existan) y la energía sobrante se vierte a la red. La compañía eléctrica correspondiente paga, mediante las tarifas establecidas, a los propietarios de estas instalaciones por la electricidad vertida, llegando a obtener grandes beneficios en el caso de centrales o huertas solares.

El segundo tipo de instalación se aplica en lugares donde es imposible utilizar la red eléctrica, ya sea porque no es accesible o no exista. El gran crecimiento de la tecnología fotovoltaica y la reducción de costes hacen posible que se construyan este tipo de instalaciones en países poco desarrollados. Otra ventaja de esta instalación es que puede ser construida en cualquier lugar donde llegue la radiación solar, ya sea en lo alto de una montaña, en mitad del océano o en el espacio; o incluso en dispositivos móviles como puede ser un coche o reloj.

En este proyecto se tratará únicamente con instalaciones fotovoltaicas aisladas, explicando su funcionamiento y sus principales componentes, como pueden ser los módulos PV, los controladores de carga, las baterías y los inversores.

3.2.1. Instalaciones fotovoltaicas aisladas

Como ya se ha comentado, las instalaciones solares fotovoltaicas aisladas con aquellas que no se conectan a la red eléctrica pública. Son especialmente útiles en zonas de montaña, edificios remotos, aplicaciones portátiles, aplicaciones espaciales o en la electrificación de países en vías de desarrollo.

Puede distinguirse tres tipos de instalaciones aisladas según su composición:

- Sistema de alimentación en CC: Trabajan únicamente con corriente continua. Están formados por los paneles fotovoltaicos, reguladores, un banco de baterías y la carga a alimentar.
- Sistema de alimentación en CA o mixto: La principal característica de estos sistemas es que utilizan un inversor. Pueden alimentar dispositivos mediante corriente alterna y corriente continua. Utilizan los mismos componentes que el sistema CC más los inversores.
- Sistema híbrido: Combina la producción fotovoltaica con otro sistema de producción energética como puede ser un generador diesel, un sistema eólico o un sistema de hidrógeno. Está formado por el generador fotovoltaico, un banco de baterías, reguladores, inversores (si es necesario) y un segundo generador de energía.

3.3. Las baterías

En un sistema fotovoltaico, existen muchos factores que afectan a la energía captada, como puede ser la irradiación solar (no habrá la misma irradiación por la mañana o por la tarde, si está el cielo despejado o nublado o si es verano o invierno) o la temperatura ambiente (que modifica la potencia de pico del panel).

Estas variabilidades pueden controlarse mediante el uso de la red eléctrica, donde la energía generada en exceso puede ser vertida, y a su vez, la red puede entregar energía cuando la demanda supera la producción fotovoltaica. Sin embargo, en una instalación aislada esto no es posible. En tal caso, para suministrar energía cuando los paneles no son capaces de hacerlo, se utilizan baterías recargables. Estas baterías se recargan mediante la energía captada por los paneles en periodos de alta luminosidad para que puedan ser utilizadas cuando se necesiten.

Pero para una instalación fotovoltaica aislada, no todos los tipos de baterías son útiles y hay muchas variables que afectan a su normal funcionamiento.

3.3.1. Conceptos básicos

Antes de comenzar a explicar el funcionamiento de una batería, debe diferenciarse entre una celda y la batería en sí:

Una celda es la unidad básica electroquímica que hace la función de fuente de energía eléctrica mediante la conversión de energía química. La celda está compuesta por los electrodos, unos separadores, el electrolito, el contenedor y los terminales. [Linden y Reddy, 02]

Una batería consiste en la unión eléctrica de una o varias celdas electroquímicas, en serie o en paralelo, con el fin de conseguir los niveles de tensión y corriente necesarios. Las baterías también pueden incluir visualizadores, controles u otros componentes como pueden ser fusibles o diodos. [Linden y Reddy, 02]

La conversión de energía química a energía eléctrica es producida por una reacción oxidación-reducción, también llamada *redox* [Linden y Reddy, 02]. En las baterías recargables, el proceso de recarga se realiza mediante la operación inversa. Este tipo de reacción consiste en la transferencia de electrones de un material a otro mediante un circuito eléctrico.

En las celdas electroquímicas, el electrodo que ofrece electrones al circuito eléctrico es el ánodo, el cual sufre una oxidación durante el proceso químico. En el cátodo se efectúa la reducción y recibe electrones del circuito.

El electrolito es el medio por el que se transfieren los iones en el interior de la celda, entre el cátodo y el ánodo. Suele tratarse de un líquido con sustancias disueltas que aportan conductividad iónica, sin embargo, existen baterías que utilizan un electrolito sólido que hacen la función de conductor iónico.

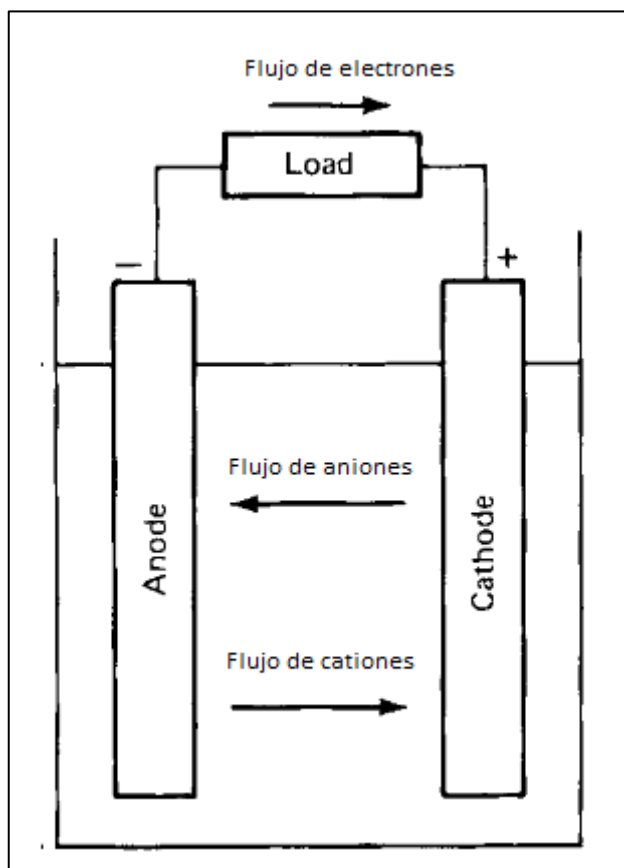


Ilustración 18. Reacción electroquímica de una celda en proceso de descarga. [Liden y Reddy, 2002, p.1.3]

Realizando combinaciones entre los materiales con los que están compuestos el ánodo y el cátodo, se obtienen tensiones y capacidades diferentes. El ánodo debe estar compuesto por un buen agente reductor como el hidrógeno, el litio o el zinc. Por el contrario, el cátodo debe tener buena conductividad iónica, sin ser conductor eléctrico ya que podría provocar un cortocircuito interno. [Linden y Reddy, 02]

Algunas celdas pueden tener respiraderos para expulsar los gases que se producen en su interior.

3.3.2. Clasificación de las celdas y las baterías

Las celdas electroquímicas y las baterías se clasifican en primarias o secundarias según si son no recargables o recargables [Linden y Reddy, 02]:

- Las baterías primarias son aquellas que no tienen la capacidad de ser recargadas eléctricamente con facilidad o eficiencia. Como ventajas, presentan una larga vida, una alta densidad de energía y poca necesidad de mantenimiento.

- Las baterías secundarias son las conocidas como baterías recargables. Una vez descargadas, mediante una corriente en sentido opuesto, pueden ser recargadas hasta alcanzar su condición inicial. Estas baterías poseen una alta velocidad de descarga, curvas de descarga más lineales y un buen funcionamiento a bajas temperaturas. Sin embargo, como inconveniente, tienen una densidad de energía menor a las primarias.

Existen otros tipos de baterías, como las baterías de reserva, utilizadas principalmente en armamento militar ya que permiten liberar una cantidad de energía enorme en muy poco tiempo, o las células de combustible, que no se tratan en este proyecto.

Los sistemas generadores de energía como los fotovoltaicos utilizan baterías secundarias o recargables, ya que la intención es recoger la energía sobrante para utilizarla cuando haga falta.

3.3.3. Clasificación de las principales tecnologías

A continuación se recogen las principales tecnologías de baterías recargables, incluyendo sus valores prácticos de tensión nominal, la energía específica (energía almacenada por quilogramo), la densidad de energía (energía almacenada por volumen), el ciclo de vida (cantidad de recargas admitidas sin deteriorar el rendimiento) y el rango de temperatura de trabajo.

Tabla 2. Tipos de baterías recargables.[Linden y Reddy, 2002, p1.13]

Tecnología	Ánodo	Cátodo	Tensión nominal (V)	Energía específica (Wh/kg)	Densidad de energía (Wh/L)	Ciclo de vida (ciclos)	Temperatura de trabajo (°C)
ácido-plomo	Pb	PbO ₂	2,0	35	70	200-1.500	-40 a 60
"Edison" (hierro-níquel)	Fe	Ni oxide	1,2	30	55	2.000-4.000	-10 a 45
Níquel-cadmio	Cd	Ni oxide	1,2	35	100	500-10.000	-50 a 60
Níquel-zinc	Zn	Ni oxide	1,6	60	120	500	-10 a 50

Tecnología	Ánodo	Cátodo	Tensi ón nomi nal (V)	Energía específic a (Wh/kg)	Densid ad de energía (Wh/L)	Ciclo de vida (ciclos)	Temperat ura de trabajo (°C)
Níquel- hidrógeno	H ₂	Ni oxide	1,2	55	60	1.500- 40.000	0 a 50
Níquel- metal hidruro	MH	Ni oxide	1,2	75	240	300- 600	-20 a 50
Plata-zinc	Zn	AgO	1,5	105	180	50-100	-20 a 60
Plata- cadmio	Cd	AgO	1,1	70	120	300- 800	-25 a 70
Zinc/cloro	Zn	Cl ₂	-	-	-	-	-
Zinc/bromo	Zn	Br ₂	1,6	70	60	-	-
Litio-ion	Li _x C ₆	Li _(1-x) CoO ₂	4,1	150	400	1.000+	-20 a 50
Litio/dióxid o de manganesio	Li	MnO ₂	3,0	120	265	-	-
Litio/disulf uro de hierro	Li(Al)	FeS ₂	1,7	180	350	-	-
Litio/mono sulfuro de hierro	Li(Al)	FeS	1,3	130	220	-	-
Sodio/sulfu ro	Na	S	2,0	170	345	-	-
Sodio/cloro de níquel	Na	NiCl ₂	2,6	115	190	-	-

3.3.4. La capacidad de las baterías

La característica eléctrica principal de las baterías es la capacidad (C). La capacidad es la cantidad de energía eléctrica que puede ser descargada de la batería en unas condiciones específicas hasta ser completamente vaciada. Se define como la corriente constante de descarga por el tiempo de descarga y tiene como unidad el Ampere-hora (Ah):

$$C = I \times t \quad (10)$$

La capacidad de una batería viene condicionada por el tamaño y el número de celdas conectadas en paralelo. También depende de otros factores externos como se verá a continuación.

3.3.5. Factores que afectan al comportamiento de la batería

El rendimiento de la batería suele ser diferente al especificado por el fabricante, ya que los datos ofrecidos por ellos, como los mostrados en la tabla anterior, son datos recogidos bajo unas condiciones estandarizadas de test. Si durante la práctica las condiciones son diferentes, como la temperatura ambiente o el tipo de descarga llevada a cabo (intermitente o continua), el rendimiento cambiará.

1. Nivel de tensión

Existen distintos tipos de tensión en una batería, como la tensión de circuito abierto, que es el nivel de tensión ofrecido sin conectar ninguna carga a la salida, o la tensión final, que es la tensión de la batería al final de una descarga. Estas tensiones se dan según el uso que se esté dando de la batería, de una determinada condición o de si está cargada o descargada.

Cuando una celda o batería está descargada, su tensión es menor a la teórica. La diferencia es causada por las pérdidas producidas por la resistencia de la celda y la polarización de los materiales activos durante la descarga. La tensión también decrece durante la descarga a la vez que la resistencia de la celda aumenta debido a los factores mencionados o al incremento de la corriente de descarga entre otros.

La energía específica que es liberada por la batería en la práctica, también es menor a la teórica debido a que la tensión media durante la descarga es menor y que la batería nunca se descarga a cero volts y no llega a utilizarse toda la capacidad disponible de Amperes-hora.

2. Consumo de corriente

La figura 6 muestra las curvas de descarga típicas de una batería según se aumenta la corriente de consumo. Para un consumo de corriente extremadamente bajo (curva 2), la descarga puede aproximarse a la tensión y capacidad teóricas. Incrementando el consumo (curvas 3-5), la tensión de descarga disminuye y la pendiente de la curva se vuelve más pronunciada, además de reducir la durabilidad y la capacidad de amperio-hora suministrada.

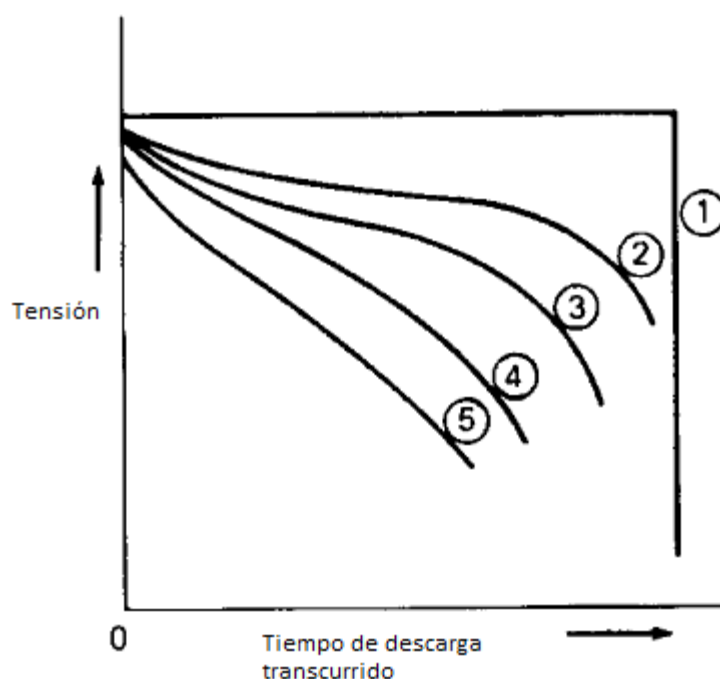


Ilustración 19. Niveles de tensión característicos en la descarga de una batería. [Linden y Reddy, 2002, p.3.4]

En la ilustración siguiente se pueden ver los perfiles de descarga de los sistemas de baterías recargables convencionales a un ritmo de descarga de una quinta parte de su capacidad ($C/5$). Tradicionalmente, se expresa el valor de la corriente utilizada para la carga y descarga de la batería como múltiplo de la capacidad. Por ejemplo, una corriente de 200mA utilizada para cargar una celda con una capacidad de 1000mAh, será expresado como $C/5$ A o 0,2 CA.

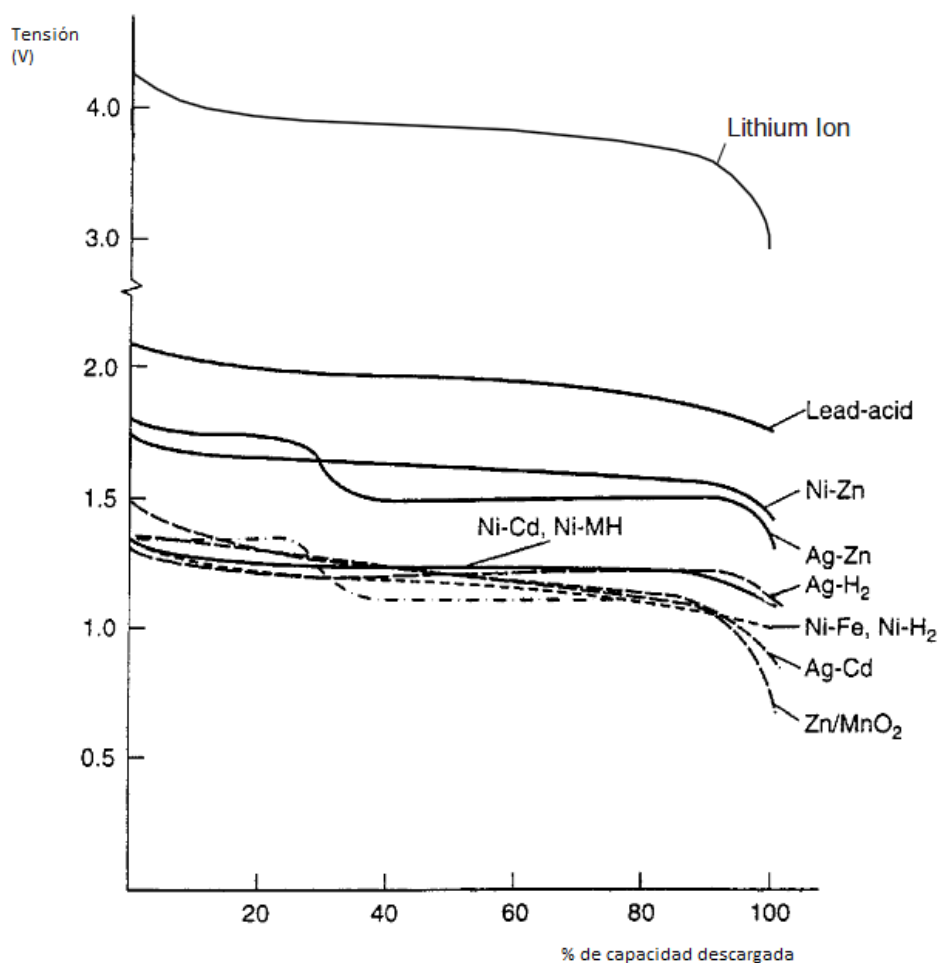


Ilustración 20. Perfiles de descarga de las baterías recargables convencionales a un ritmo de descarga del 20% de su capacidad. [Linden y Reddy, 2002, p.22.15]

Otro dato importante a tener en cuenta que ofrecen todos los fabricantes es la capacidad de la batería según las horas de descarga, expresado como C-5, C-20 o C-100. Por ejemplo, si un fabricante indica que la batería es de 150 Ah C-100, quiere decir que en 100 horas de descarga continua se suministrarán 150 Ah. La misma batería, ofrecerá menos corriente de descarga cuanto menor sea el tiempo de descarga. Cien horas de descarga correspondería a poco más de cuatro días de autonomía.

3. Método de descarga

El método con el que se realiza la descarga de una batería puede tener un efecto significativo en su rendimiento. Por esta razón, se aconseja que el método de descarga empleado en la aplicación sea el mismo que el método que se empleó durante su evaluación.

Según Linden y Reddy, existen tres métodos por los cuales se puede descargar una batería:

- Resistencia constante: La resistencia de la carga a la cual está la batería conectada permanece constante durante la descarga. De este modo, la corriente decrece proporcionalmente al decremento de tensión.
- Corriente constante: La corriente permanece constante durante la descarga.
- Potencia constante: La corriente aumenta durante la descarga a medida que la tensión disminuye.

4. Temperatura

La temperatura en la cual se está descargando la batería tiene un efecto pronunciado en su capacidad y tensión. Esto se debe al incremento de la actividad química y a la reducción de la resistencia interna de la batería con el incremento de la temperatura [Linden y Reddy, 02]. Sin embargo, las temperaturas muy altas degradan el electrolito. La siguiente figura muestra la descarga de una batería con el mismo consumo de corriente pero a temperaturas distintas. Normalmente el mejor rendimiento de una batería se obtiene a temperaturas de entre 20 y 40°C.

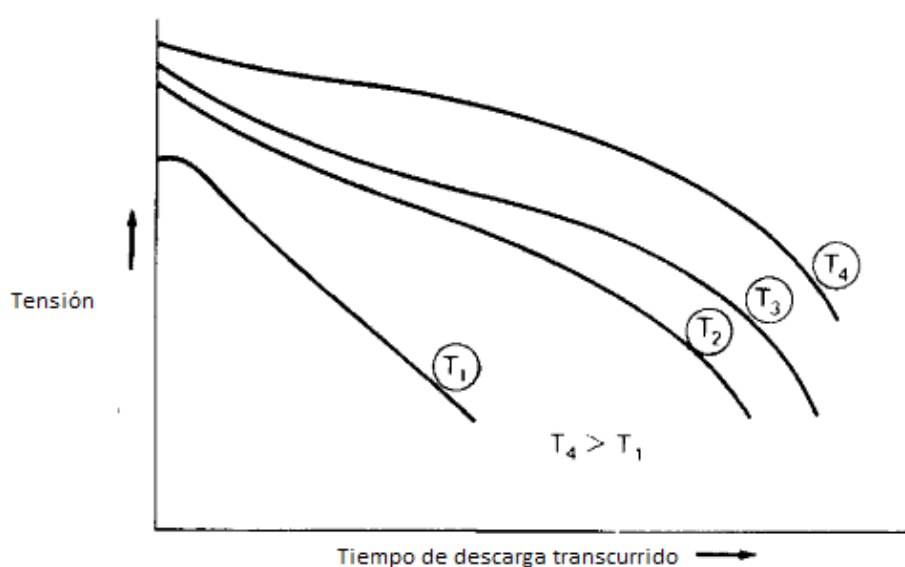


Ilustración 21. Efecto de la temperatura en la capacidad de una batería.
[Linden y Reddy, 2002, p.3.10]

Teniendo en cuenta la influencia de la temperatura, se puede obtener una gráfica del rendimiento de las diferentes tecnologías en función de la temperatura.

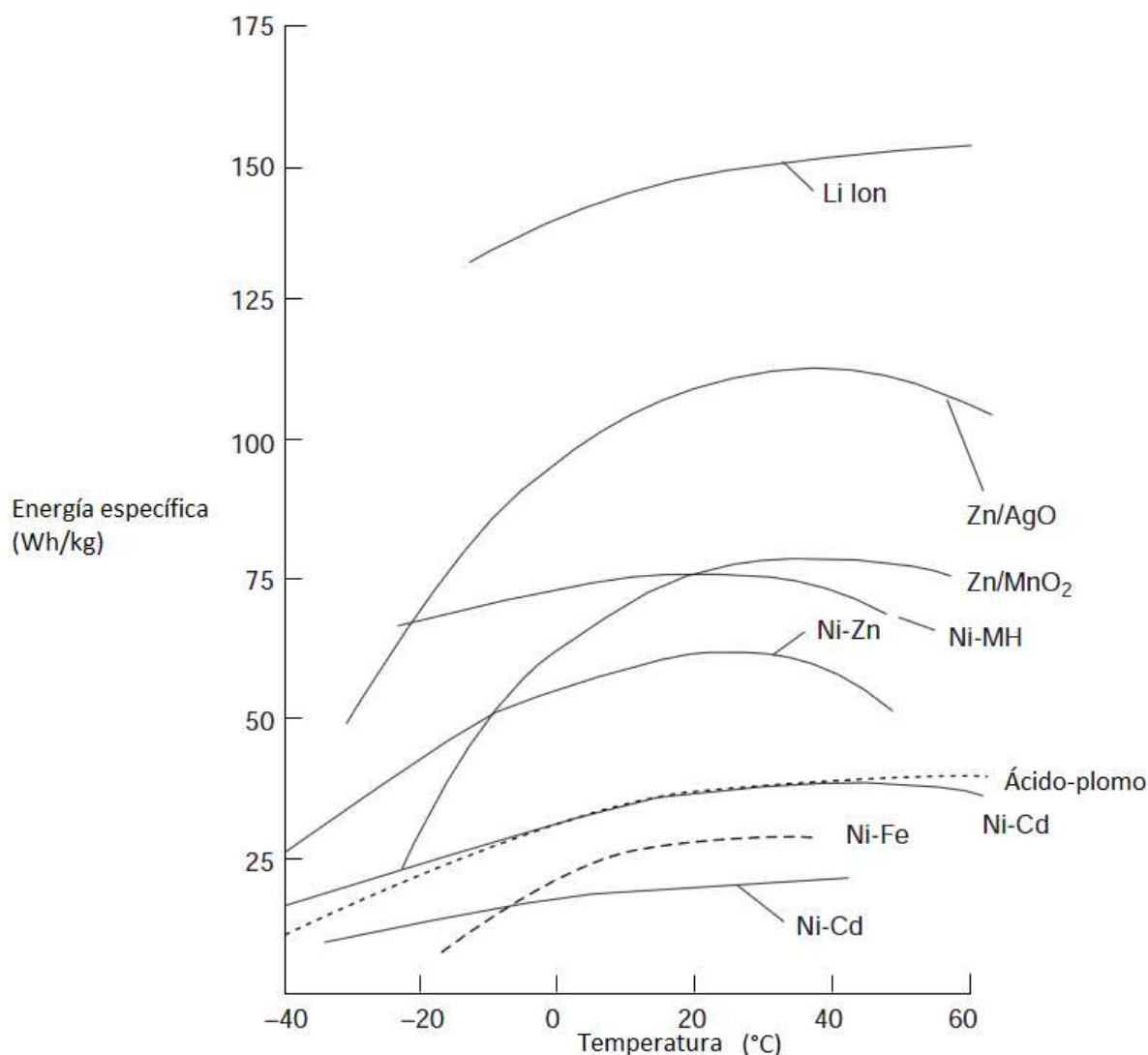


Ilustración 22. Efecto de la temperatura en algunos sistemas de baterías recargables.
[Linden y Reddy, 2002, p.22.18]

5. Edad de la batería y condición de almacenamiento

Las baterías son un producto perecedero y se deterioran a consecuencia de las acciones químicas que suceden durante el almacenamiento. El diseño, el sistema electroquímico, la temperatura y la duración del período de almacenamiento son factores que afectan a la vida del producto o a la retención de carga.

La autodescarga puede llegar a ser importante cuando la batería es almacenada por un largo periodo de tiempo.

6. Diseño de la batería

Los métodos de fabricación de las celdas y las baterías tienen una gran influencia en sus características. Además, ninguna celda es idéntica a otra, siempre hay pequeñas variaciones que a la hora de conectarlas y formar baterías, continúan estando presentes.

Los diseños de baterías que retienen el calor disipado por las celdas pueden tener un aumento de su rendimiento a bajas temperaturas. Pero por otro lado, un incremento excesivo de calor puede ser dañino para el rendimiento, vida y seguridad de la batería.

En las baterías recargables, los ciclos de carga y descarga pueden causar un desbalance en sus características. Para evitar esto, se deben controlar los límites de cada ciclo.

3.3.6. Principales consideraciones al escoger una batería

Hay que considerar numerosos factores a la hora de escoger la mejor batería para una aplicación en particular. Las características más importantes e influyentes en la decisión según Linden y Reddy (2002, p6.2) son:

1. Tipo de batería: Primera, secundaria o de reserva.
2. Sistema electroquímico: La composición de la batería que se usará, según los requisitos del sistema.
3. Tensión: Tensión nominal, tensión máxima y mínima permitidas, regulación de tensión, perfil de la curva de descarga.
4. Perfil de la carga del sistema: Corriente constante, resistencia constante, potencia constante o cargas variables.
5. Requisitos físicos: Tamaño, forma, peso, terminales.
6. Requisitos de temperatura: Rango de temperatura en el que se operará.
7. Ciclo de carga-descarga: Ciclo de trabajo, requisito de vida, disponibilidad y características de la fuente de carga, eficiencia de carga.
8. Condiciones del entorno: Vibración, aceleración, etc.; condiciones atmosféricas (presión, humedad, etc.).
9. Seguridad y fiabilidad: Variabilidad permitida, rango de fallo, uso de componentes tóxicos, liberación de gases, operación bajo condiciones potencialmente dañinas, etc.
10. Condiciones de trabajo estrictas o inusuales: Uso durante periodos de tiempo muy largos o en temperaturas extremas, alta fiabilidad en aplicaciones especiales.
11. Mantenimiento y resuministro: Facilidad de adquisición de la batería, facilidad de reemplazamiento, transporte especial.

12. Coste: Coste inicial, coste del ciclo de vida y de operación.

3.3.7. Principales tecnologías en aplicaciones fotovoltaicas

Los tipos de baterías más utilizados en aplicaciones fotovoltaicas son las de ácido-plomo, níquel-cadmio y níquel-metal hidruro. A continuación se detallan estas tres tecnologías para comparar sus ventajas e inconvenientes.

1) Baterías de ácido-plomo

La batería recargable más común en aplicaciones fotovoltaicas aisladas es la de ácido-plomo. Es la que mejor rentabilidad presenta y puede manejar corrientes de carga grandes y pequeñas con gran eficacia. La mayor ventaja de esta tecnología es su bajo coste debido a su facilidad de fabricación.

Pueden distinguirse principalmente dos grandes grupos dentro de las baterías de ácido-plomo: las ventiladas y las selladas.

- Las baterías de ácido-plomo ventiladas tienen los electrodos inmersos en el electrolito. Los gases producidos durante las reacciones químicas son expulsados a la atmósfera, lo que obliga a rellenar la batería con agua destilada periódicamente para devolver el electrolito a su estado normal.
- Las baterías ácido-plomo selladas encierran el electrolito, pero tienen una válvula que permite dejar escapar los gases si la presión es demasiado alta. Durante la recarga, la batería genera oxígeno en el cátodo que devuelve la mayor parte de los gases generados por la electrolisis de vuelta al agua de la batería. A este proceso se le llama ciclo de recombinación, y solo trabaja para ritmos de recarga moderados. Si se suministra un ritmo de carga demasiado alto, se pueden ocasionar daños internos.

Las baterías selladas más utilizadas son las baterías reguladas por válvula, conocidas en inglés por *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) o también conocidas como baterías de gel. Se han desarrollado para aplicaciones estacionarias y aplicaciones de telecomunicaciones. Este tipo de batería tiene una válvula controlada que salta a una determinada presión para liberar los gases.

Las baterías selladas necesitan muy poco mantenimiento ya que no es necesario el suministro periódico de agua destilada. Por este motivo, el electrolito no puede ser rellenado si se diera el caso, ya que está protegido por gel.

Los inconvenientes de estas baterías selladas respecto a las ventiladas es que son más caras, se degradan más rápido a altas temperaturas, requieren más control de carga y su ciclo de vida es menor.

Las ventajas e inconvenientes más destacables de las baterías de ácido-plomo son las siguientes:

Tabla 3. *Ventajas e inconvenientes de las baterías ácido-plomo. [Linden y Reddy, 2002, p.23.2]*

Ventajas	Inconvenientes
Bajo coste desde la baja hasta la alta producción.	Ciclo de vida relativamente bajo.
Disponible en gran variedad de tamaños y diseños, desde 1 Ah hasta miles.	Densidad de energía limitada (30-40 Wh/kg).
Buen rendimiento a bajas y altas temperaturas.	Los largos periodos de descarga pueden ocasionar una polarización irreversible de los electrodos (sulfatación).
Eficiencia eléctrica de más del 70%.	La liberación de hidrogeno en algunos diseños puede ocasionar una explosión.
Disponible para diseños libres de mantenimiento.	Se degradan rápidamente si se sobrecalientan.
Son de las baterías recargables más baratas.	

A continuación se expondrán algunas de las características de la batería que pueden afectar en su rendimiento en la hora de decantarse por una o por otra:

- Ciclo de vida:

El ciclo de vida de la batería tiende a ser menor que el especificado por el fabricante si no se utiliza en condiciones óptimas.

La capacidad de la batería y su vida útil también se ve reducida por el efecto de la sulfatación. La sulfatación es el crecimiento de cristales de sulfato de plomo en los electrodos después de tener la batería sometida a un largo periodo de descarga.

Las baterías ventiladas de alta gama con contenido de sulfato pueden llegar a tener más de 3000 ciclos para algunas aplicaciones industriales. Las baterías VRLA tienen una vida menor.

- Efectos de la temperatura:

La operación prolongada a temperaturas elevadas reduce la vida de las baterías. En cambio, a bajas temperaturas, las baterías presentan más longevidad, pero ven reducida su capacidad.

Las celdas VRLA se ven más afectadas por la temperatura que las celdas ventiladas. Para minimizar los efectos de la temperatura, la tensión de flotación debe ajustarse de acuerdo con la temperatura de trabajo. A una temperatura elevada, la tensión de flotación debe reducirse de la recomendada a los 25°C en 0,005 V/celda por grado Celsius. A temperaturas bajas, la tensión de flotación deberá aumentarse el mismo valor.[Linden y Reddy, 02]

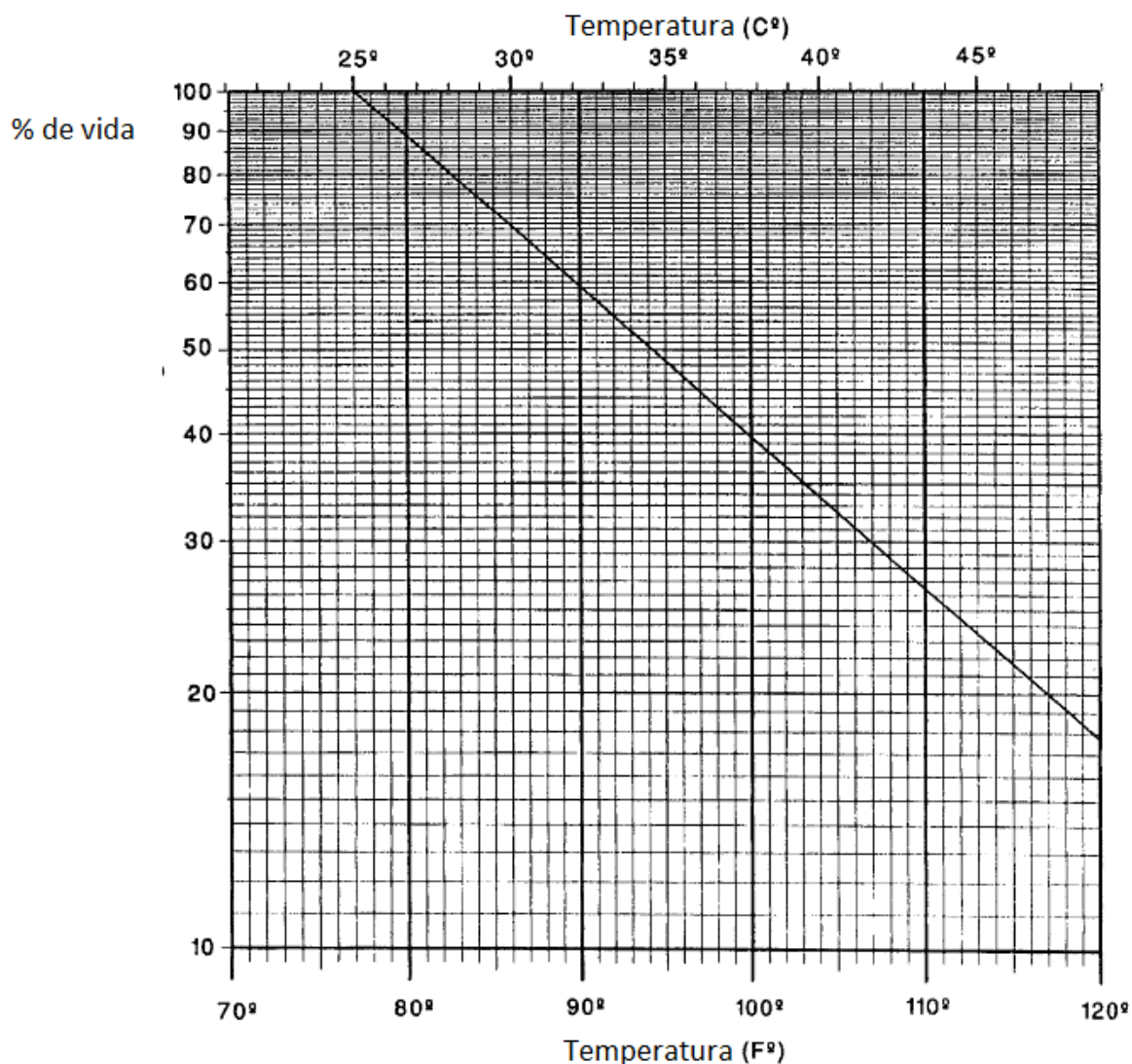


Ilustración 23. Efectos de la temperatura en la vida de una batería de ácido-plomo.
[IEEE, 1994, Anexo A]

- Autodescarga:

La autodescarga en las celdas de ácido-plomo es significativamente rápida, pero puede ser reducida mediante cambios en el diseño.

La autodescarga depende de unas reacciones químicas que tienen lugar dentro de la batería cuando esta se recarga, pero la temperatura también tiene una gran influencia.

Las baterías VRLA sufren menos autodescarga que las ventiladas, pero aproximadamente, suele ser menor al 1% de su capacidad a los 25 grados Celsius y del 2,5% a los 40 grados. [Linden y Reddy, 02]

2) Baterías de níquel-cadmio

Las baterías de níquel-cadmio son también unas de las baterías más utilizadas dado su bajo coste, ligeramente superior a las de ácido-plomo.

Estas baterías usan un electrolito de alcalino. El electrolito no forma parte de toda la reacción química de la celda, y por eso el peso específico no varía durante la carga y descarga.

Las baterías tienen una gran resistencia, operan en un rango de temperatura elevado y pueden tolerar una frecuente descarga profunda. Estas características hacen a la batería de níquel-cadmio muy ventajosa en aplicaciones que necesiten alimentación ininterrumpida.

De la misma forma que las baterías de ácido-plomo se pueden encontrar baterías de níquel-cadmio ventiladas o selladas. Las baterías selladas, en este caso, se utilizan únicamente para equipo electrónico pequeño.

Las baterías ventiladas más utilizadas son las de aglomerado de plata. Las baterías ventiladas de aglomerado de plata de níquel-cadmio se encuentran en una fase de desarrollo madura y tienen una gran densidad de energía.

Las ventajas e inconvenientes de esta tecnología son:

Tabla 4. *Ventajas e inconvenientes de las baterías de níquel-cadmio. [Linden y Reddy, 2002, p.26.1]*

Ventajas	Inconvenientes
Perfil de descarga más lineal.	Son más caras.
Buen rendimiento a altas y bajas temperaturas.	Necesita un sistema de recarga con control de temperatura para no reducir su vida.
Excelente para periodos de almacenamiento largos.	Padece un efecto memoria en la tensión en algunas aplicaciones
Sufre menos autodescarga.	La versión sellada tiene un rendimiento menor a altas temperaturas que las VRLA.
Hay versiones selladas, libres de mantenimiento.	

Como en el caso anterior, se exponen algunas de sus características que pueden afectar al rendimiento:

- Ciclo de vida:

Las celdas de níquel-cadmio aseguran un largo funcionamiento en aplicaciones de descarga profunda.

No sufre corrosión de electrodos como las celdas de ácido-plomo, por lo que siempre dispone de capacidad aunque esta se vea reducida.

Para alargar el ciclo de vida y reducir los efectos adversos de las altas temperaturas, se puede añadir hidróxido de litio en el electrolito según las indicaciones de los fabricantes.

- Efecto de la temperatura:

Todas las baterías se ven afectadas por las altas temperaturas. Sin embargo, las celdas de níquel-cadmio pueden aguantarlas mejor que otros sistemas. Por ejemplo, una celda de níquel-cadmio trabajando a 32°C ve reducida su vida un 20%, mientras que una celda de ácido-plomo sufre una reducción del 50%. [Linden y Reddy, 02]

De la misma forma, las baterías de níquel-cadmio pueden trabajar a temperaturas bajas sin sufrir grandes cambios en su capacidad.

- Autodescarga:

La autodescarga de este tipo de batería es menor que las de ácido-plomo, lo que permite dejarlas más tiempo sin mantenimiento y reduce las pérdidas si no se utilizan constantemente.

- Efecto memoria:

Ocurre en algunas aplicaciones, cuando se descarga la batería repetitivamente hasta aproximadamente la misma profundidad de descarga, y luego se recargan de forma continuada a un ritmo lento. Esto resulta en una ligera caída de tensión debido a la acumulación de cristales en el interior.

Este efecto no suele darse en ninguna aplicación industrial. La manera de contrarrestarlo es descargando la batería por completo y recargarla entera mediante una corriente constante.

El efecto memoria solo se da en baterías de níquel.

3) Baterías de níquel-metal hidruro

Las baterías selladas recargables de níquel – metal hidruro es una tecnología relativamente nueva con características similares a las de níquel-cadmio selladas. La principal diferencia es que las de metal hidruro utilizan hidrógeno, absorbido en una aleación de metal, en el electrodo negativo en lugar de cadmio.

Las baterías de metal hidruro presentan mayor densidad de energía que las de cadmio. Las características de descarga, en cambio, son muy similares. Estas baterías también necesitan un control de carga, aunque más riguroso.

En los últimos años, se han realizado mejoras en la energía específica y la densidad de energía de la batería de metal hidruro, mejorando su rendimiento y su ciclo de vida. Este hecho ha permitido que reemplace a las baterías de cadmio en ordenadores, teléfonos móviles y otras aplicaciones electrónicas similares. Sin embargo, actualmente las baterías de metal hidruro están siendo reemplazadas por las de litio-ion.

Las ventajas e inconvenientes son:

Tabla 5. *Ventajas e inconvenientes de las baterías de níquel-metal hidruro. [Linden y Reddy, 2002, p.29.1]*

Ventajas	Inconvenientes
Mayor capacidad que las baterías de cadmio.	Peor retención de carga.
Construcción sellada, no requieren mantenimiento.	Efecto memoria moderado.
Libre de cadmio, minimiza los problemas ambientales.	El coste es mucho mayor que las de cadmio.
Rápida capacidad de recarga.	
Largo ciclo de vida.	

3.4. Reguladores de carga

En las instalaciones fotovoltaicas aisladas, debe controlarse la tensión de salida del generador fotovoltaico para que pueda ser compatible con el banco de baterías. Los reguladores de carga tienen la misión de medir la tensión de la batería en todo momento y protegerla de sobrecargas además de adaptar la tensión del generador fotovoltaico a la que requiere el sistema.

Los reguladores también se encargan de evitar la descarga de la batería a través de los paneles mediante diodos o de medir los cambios de tensión provocados por la temperatura mediante un sensor de temperatura. En resumen, un buen regulador de carga alarga notablemente la vida de las baterías.

Existen reguladores reductores, elevadores y reductores-elevadores. Normalmente, los reguladores que se utilizan en instalaciones fotovoltaicas son del tipo reductor, porque reducen la tensión de entrada hasta un nivel de 12, 24 o 48 volts.

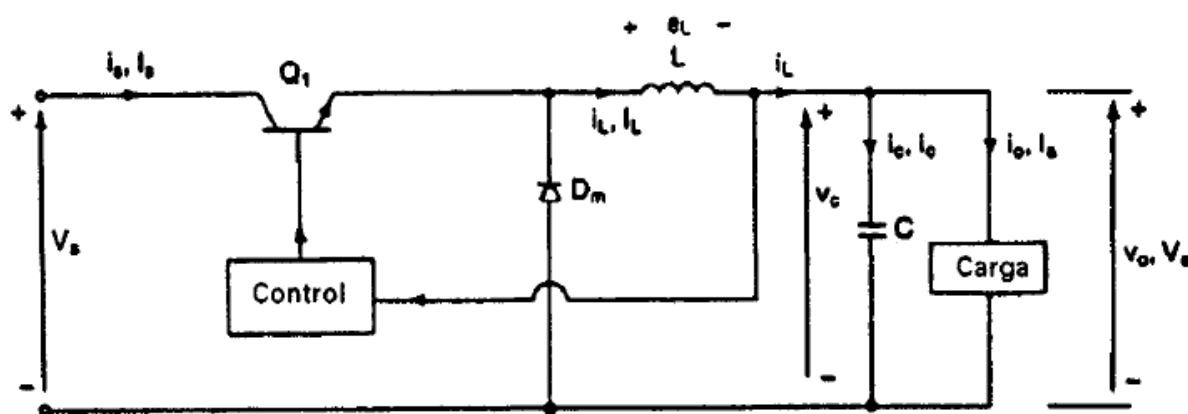


Ilustración 24. Regulador reductor mediante un BJT de potencia. [Rashid, 1995, p. 317]

El funcionamiento de un regulador reductor es el siguiente: en el primer instante de tiempo $t=0$, el transistor Q_1 está activado por medio de una señal de control y la corriente entrante pasa por el inductor, el capacitor y la carga. Cuando $t=t_1$, el transistor se desconecta y el diodo D_m empieza a conducir debido a la corriente que se descarga del inductor L , que fluye también por el capacitor y la carga. La corriente del inductor va disminuyendo hasta que vuelve a activarse el transistor Q_1 .

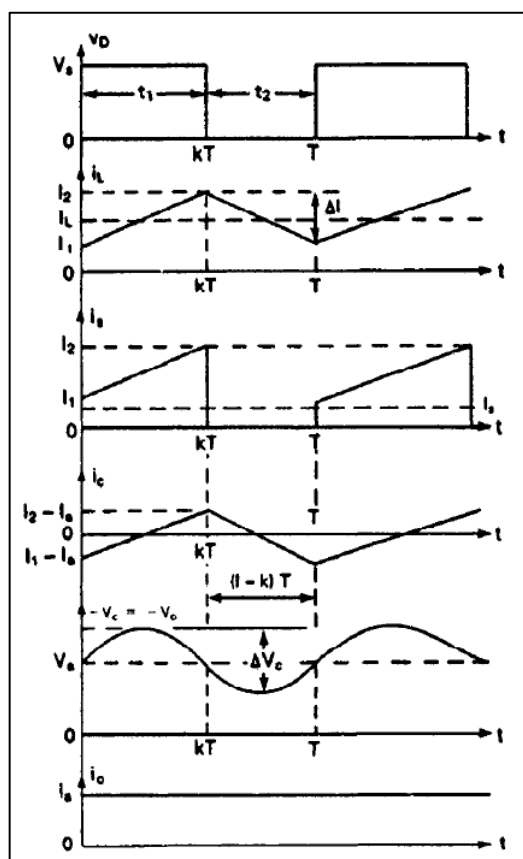


Ilustración 25. Formas de onda de un regulador reductor con BJT de potencia. [Rashid, 1995, p. 318]

En la primera forma de onda se muestra la tensión de entrada del circuito.

En la segunda forma de onda se muestra la corriente a través del inductor L .

En la tercera forma de onda se representa la corriente a través del transistor Q_1 .

En la cuarta forma de onda se puede ver la corriente a través del capacitor C .

En la quinta forma de onda se muestra la tensión del capacitor, igual a la tensión de salida. El valor medio de la componente ondulatoria es menor que la tensión de entrada.

La última forma de onda representa la corriente que pasa a través de la carga.

3.4.1. Seguidor de punto de máxima potencia MPPT

Hoy día la gran parte de los reguladores de carga incorporan un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia o conocido por sus siglas en inglés MPPT.

El MPPT es un sistema electrónico basado en un microcontrolador que varía el punto de operación eléctrico de los paneles fotovoltaicos para que puedan producir la máxima potencia posible.

Uno de los métodos más expandidos para realizar el MPPT es el "*Hill Climbing*" o "Ascenso de la Colina". Esta técnica hace variar el ciclo de trabajo del convertidor de potencia DC/DC, lo que produce un cambio en la tensión que suministra el generador fotovoltaico. Al disminuir la tensión, la corriente aumenta, pero en menor medida. Al aumentar la tensión se produce el efecto contrario. De esta forma se consigue variar la potencia de salida y poder buscar el punto máximo.

El algoritmo se basa en observar la curva de potencia del generador fotovoltaico. Se altera la tensión de funcionamiento, observando si la variación de potencia ha sido positiva o negativa. Dado el resultado, se cambia el signo de la siguiente alteración (incremento o disminución de la tensión) y se vuelve a observar la potencia. Las variaciones van minimizándose hasta que se alcanza el punto de máxima potencia y se mantiene.

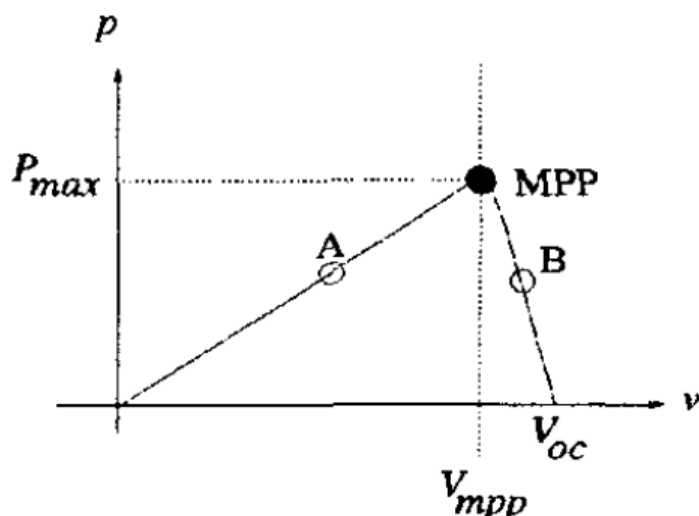


Ilustración 26. Curva característica V/P de un módulo fotovoltaico.
Variando la tensión puede encontrarse el MPP.

Existen muchos tipos de algoritmos, como por incremento de la conductancia o por lógica difusa.

3.5. Inversores

En los sistemas fotovoltaicos aislados, se utiliza la energía producida por el generador fotovoltaico y la almacenada en las baterías para alimentar cargas de corriente continua. Cuando queremos alimentar cargas de 230V en alterna deben utilizarse inversores para transformar la corriente continua en corriente alterna.

Los inversores diseñados para instalaciones fotovoltaicas aisladas normalmente tienen conversión en los dos sentidos, pudiendo convertir también la corriente alterna generada por otros sistemas en continua para ser almacenada en las baterías, en el caso de que sea necesario.

Los inversores más utilizados en fotovoltaica hoy día son los inversores de onda senoidal. Estos inversores trabajan con el principio de la modulación del ancho de pulso (PWM) y poseen un rendimiento muy elevado.

La modulación de ancho de pulso consiste en modificar el ancho de los pulsos de un tren de pulsos mediante una señal de control. La señal de control se genera comparando una señal de referencia senoidal de amplitud A_r y frecuencia f_r (que determina la frecuencia de salida del inversor) con una señal portadora triangular de amplitud A_c y frecuencia f_c . El índice de modulación es la relación entre las dos amplitudes:

$$m = \frac{A_r}{A_c}$$

(11)

Para convertir la tensión de continua a alterna se utiliza el llamado puente en H:

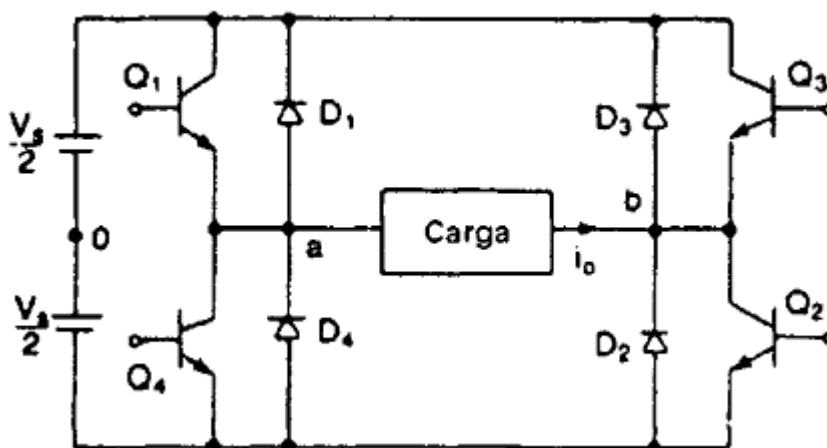


Ilustración 27. Circuito de un puente en h con transistores y diodos de retroalimentación. [Rashid, 1995, p.380]

En este circuito, los transistores funcionan como interruptores activados mediante una señal de control. Cuando Q1 y Q2 se activan, Q3 y Q4 se desactivan. Cuando Q3 y Q4 se activan, Q1 y Q2 se desactivan. Esto se hace

posible mediante un comparador. Siempre que se cumpla esta regla la corriente podrá circular hacia un sentido y el otro.

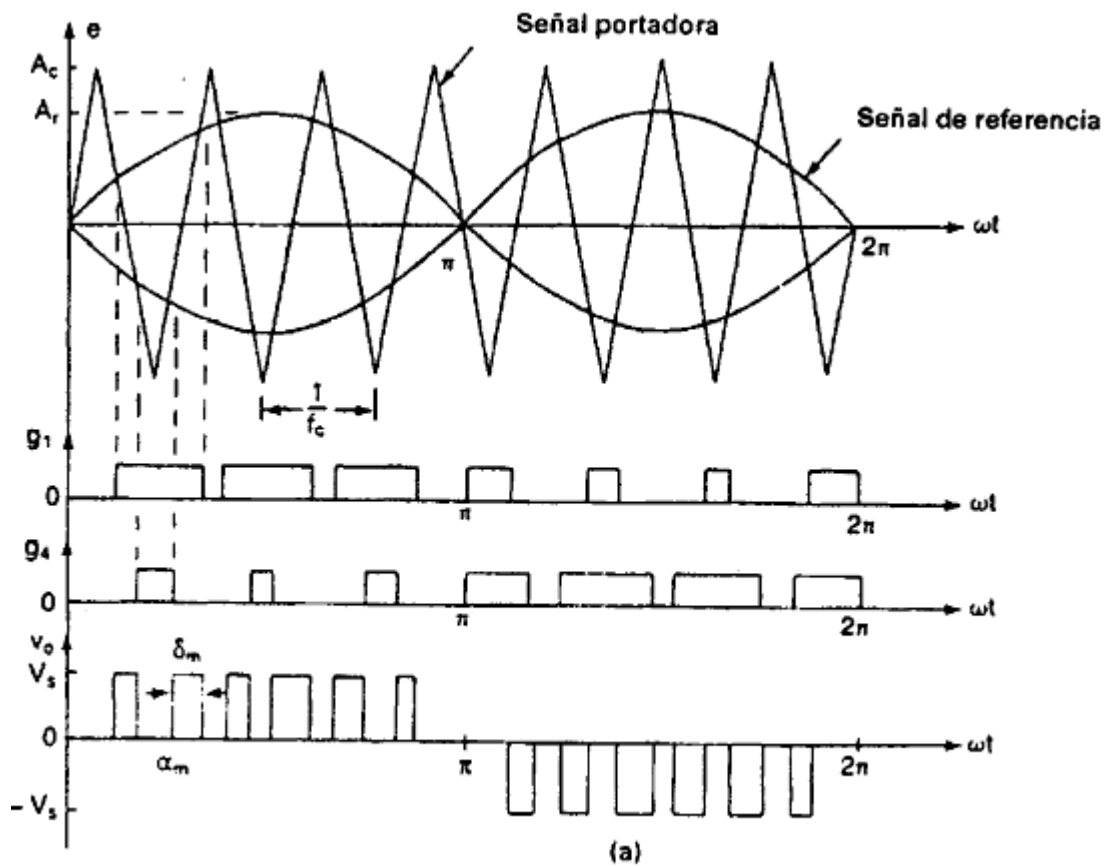


Ilustración 28. Modulación senoidal de ancho de pulso. [Rashid, 1995, p.396]

En la imagen mostrada, la tensión de salida será la diferencia entre las dos señales producidas en un sentido y otro. Dependiendo de la frecuencia y amplitud de la señal de entrada, se conseguirá una señal equivalente pero modulada en ancho de pulso.

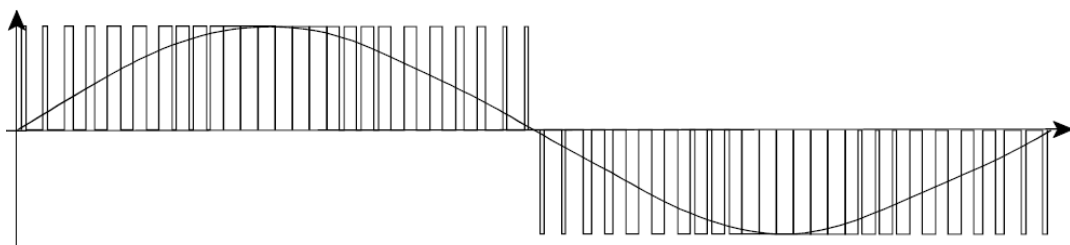


Ilustración 29. Señal modulada en ancho de pulso.

Los inversores más eficaces hoy día son los formados por transistores IGBT y PWM senoidal.

Como ya se ha comentado, los inversores para instalaciones fotovoltaicas aisladas suelen incorporar también convertidores CA/CC o rectificadores.

La función de los rectificadores es convertir la corriente alterna en corriente continua para que pueda ser utilizada por una carga CC o en baterías. Para obtener una buena señal continua, esta debe estar libre de componentes ondulatorias. Un esquema sencillo de un rectificador basado en tiristores es el siguiente:

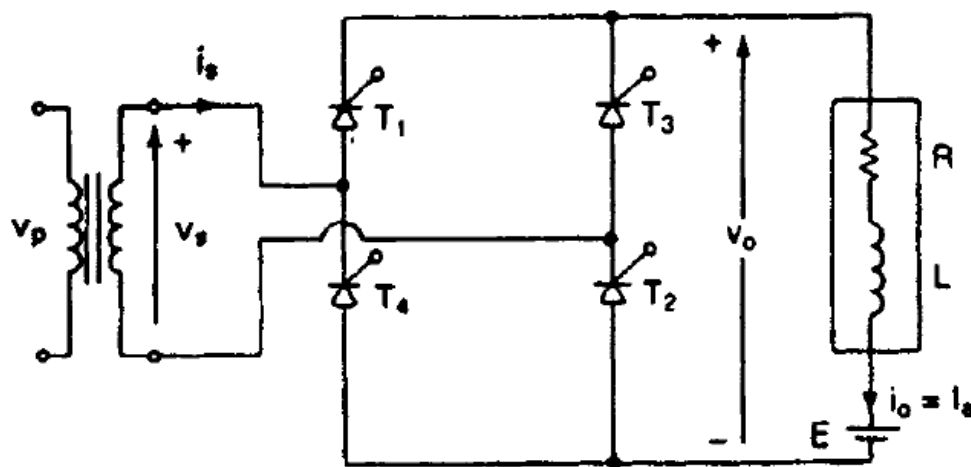


Ilustración 30. Circuito equivalente a un rectificador de onda completa mediante tiristores.[Rashid, 1995, p.158]

Durante el medio periodo positivo de una onda senoidal, los tiristores T_1 y T_4 tienen polarización directa. Durante el medio periodo negativo, los tiristores que conducen son T_3 y T_2 .

Entre α y π de ωt , la señal de entrada es positiva, tanto en tensión como en corriente (V_s y I_s) y la carga recibe potencia. Entre los periodos π y $\pi + \alpha$, la corriente de entrada I_s es positiva y la tensión de entrada V_s negativa, por lo que la carga devuelve potencia. Se repiten las mismas etapas para los tiristores T3 y T4. Esto sucede porque en el ejemplo se está utilizando una carga inductiva. Si la carga fuera puramente resistiva, la componente negativa de la tensión de salida V_o sería nula.

Si se añade un filtro capacitivo en paralelo con la carga, se obtiene una tensión de salida casi lineal.

Por último, hay inversores/rectificadores llamados gestores de red. Estos dispositivos, aparte de trabajar con conversiones de continua a alterna y viceversa, se encargan de otras funciones como pueden ser la gestión de baterías, optimización de la energía o monitorización de la instalación entre otras.

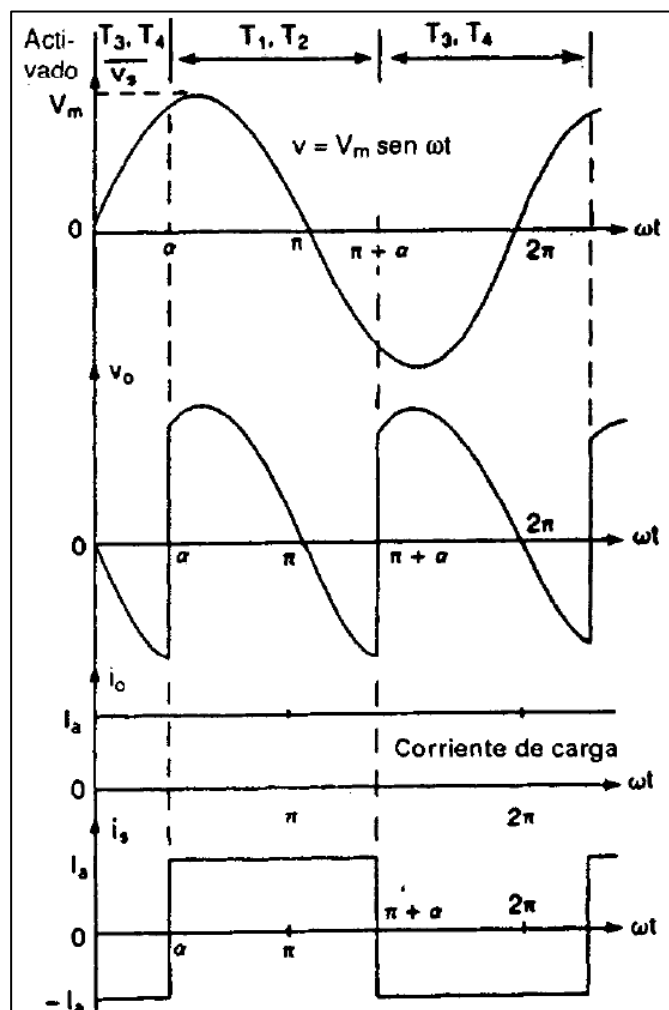


Ilustración 31. Formas de onda de un rectificador de onda completa con carga inductiva. [Rashid, 1995, p.158]