

Capítulo 3 Función de los componentes del sistema de conversión fotovoltaico

3.1 Panel fotovoltaico

El panel fotovoltaico es la columna vertebral de un sistema de conversión fotovoltaica, ya que es la parte que suministra la energía a través del Sol a todos los componentes del sistema y la carga.

La incidencia de la radiación solar muestra un comportamiento geométrico conocido y previsible a lo largo del año.

La incidencia solar sobre el panel fotovoltaico depende de múltiples factores, como diseño (como la orientación e inclinación del panel, o la ubicación de éste de tal forma que no reciba sombras a lo largo del día) y otros que escapan a toda posibilidad de control, ya que son consecuencia de la localización geográfica de la instalación y de las condiciones meteorológicas predominantes en el lugar, especialmente el valor de la irradiación solar total incidente a lo largo del año.

Lo ideal sería instalar los paneles de forma que estuviesen orientados hacia el Ecuador, es decir, hacia el sur en el Hemisferio Norte y hacia el norte en el Hemisferio Sur y dotarles de una inclinación, respecto a la horizontal, cercana a la latitud del lugar; en el caso de la Ciudad de México, serían 19° de inclinación aproximadamente.

El modo más simple y extendido de aprovechamiento de la energía radiante del Sol para generar electricidad se basa en el efecto fotovoltaico, que tiene lugar cuando la luz incide sobre un dispositivo diseñado especialmente para favorecer dicha conversión energética es la celda fotovoltaica.

Ya que una celda común entrega aproximadamente menos de 3 watts a 0.6 Volts en corriente directa; éstas deben ser conectadas en serie o en paralelo para satisfacer una carga determinada.

3.1.1 Celda fotovoltaica

Actualmente existen diferentes tecnologías de celdas solares que son:

- Silicio monocristalino
- Silicio policristalino y semicristalino
- Capa delgada
- Silicio amorfo
- Celda de multiuniones

3.1.1.1 Circuito equivalente

Las celdas están diseñadas por una unión semiconductor PN.

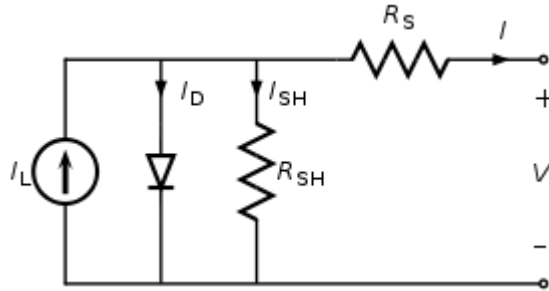


Figura 3-1 Circuito equivalente de una celda fotovoltaica

La celda fotovoltaica puede ser representada como se muestra en la Figura 3-1. Sus parámetros son los siguientes:

La corriente I es igual a la corriente generada I_L . Con pequeñas pérdidas de la corriente del diodo I_D y la corriente de derivación I_{sh} . La resistencia interna R_s representa la resistencia interna al flujo de corriente y depende del dopado de la unión PN, impurezas y resistencias de contacto.

En una celda ideal $R_s = 0$ (sin resistencia interna) y $R_{sh} = \infty$ (sin pérdidas a Tierra).

En celdas típicas de 6.45 cm^2 R_s va de 0.05 a 0.1 Ω y R_{sh} de 200 a 300 Ω .

En el circuito equivalente, la corriente en la carga I es igual a la corriente I_L generada por la iluminación, menos la corriente del diodo I_D y las pérdidas I_{sh} .

La ecuación del diodo describe el funcionamiento de la celda fotovoltaica. La ecuación para la curva de corriente-voltaje es:

Ecuación 3.1

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV_{oc}}{KT}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

Donde:

I_L = Fotocorriente (corriente de la celda debida a los fotones).

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}/^\circ\text{K}$$

T = Es la temperatura en Kelvin

El término V_{oc}/R_{sh} es la fuga de corriente a Tierra. Para casos prácticos se puede despreciar comparando a I_L y a I_D . La corriente de saturación del diodo se puede determinar experimentalmente aplicando el voltaje V_{oc} a la celda en la obscuridad y se

mede la corriente que va hacia la celda. A esta corriente se le puede llamar “corriente oscura” o “corriente de saturación en inversa del diodo”.

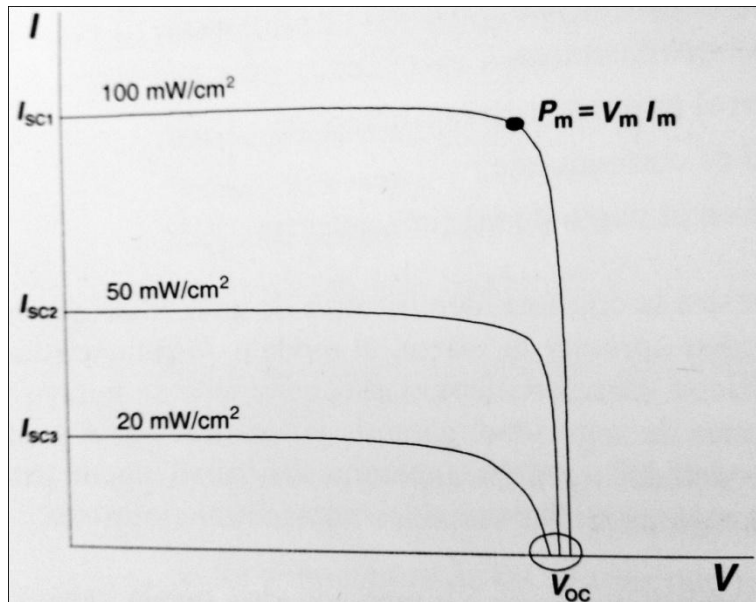


Figura 3-2 Curva Corriente vs. Voltaje

Según las curvas mostradas en la Figura 3-2, las celdas solares están limitadas por corriente y voltaje, por lo tanto, la celda se daña si opera fuera o por encima de estos límites tanto en circuito abierto como en corto circuito.

Para determinar la corriente, ignorando el diodo y la corriente de derivación, se hace $V_{oc} = 0$ en la Ecuación 3.1, obteniendo que la corriente de corto circuito es igual a la fotocorriente I_l , ($I_{sc} = I_l$). Lo cual quiere decir que la corriente de la celda es directamente proporcional a la irradiancia que recibe la celda. Experimentalmente se determina al unir las terminales de salida de la celda a una máxima iluminación.

Si la corriente de la celda es conocida bajo condiciones normales con irradiancia $G_0 = 1 \text{ kW/m}^2$ a AM 1.5, entonces la corriente de la celda a cualquier irradiancia G está dado por:

Ecuación 3.1

$$I_l(G) = \left(\frac{G}{G_0}\right) I_l(G_0)$$

Para determinar el voltaje a circuito abierto de la celda, se hace $I = 0$ y se despeja V_{oc} en lo cual se tiene la siguiente ecuación:

Ecuación 3.2

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_l + I_0}{I_0} \cong \frac{KT}{q} \ln \frac{I_l}{I_0} \quad \text{ó} \quad V_{oc} = \frac{KT}{q} \log \left(\frac{I_l}{I_D} + 1 \right)$$

Donde normalmente $I_l \gg I_0$.

El término $\frac{KT}{q}$ es expresado en términos de voltaje (26 mV a 300° K).

Por ejemplo, si la proporción de la fotocorriente con respecto a la corriente de saturación en inversa es 10^{10} y el valor para la constante térmica es de $\frac{KT}{q}$ de 26 mV; entonces: $V_{oc} = 0.6 V$.

El voltaje a circuito abierto es mucho mayor que $\frac{KT}{q}$. La fotocorriente es mucho mayor que la corriente de saturación en inversa. En condiciones de iluminación constante $\frac{I_l}{I_d}$ es una función lo suficientemente fuerte en la temperatura de la celda y generalmente la celda muestra un coeficiente de temperatura negativa en el V_{oc} .

El voltaje a circuito abierto es sólo dependiente logarímicamente a la iluminación que recibe la celda, mientras que la corriente es directamente proporcional a la iluminación. Si observamos la Ecuación 3.2 veremos que el V_{oc} es directamente proporcional a la temperatura absoluta de la celda. Y que la corriente de saturación en inversa es muy dependiente de la temperatura también. Lo que quiere decir; para casos prácticos, que la potencia de la celda decrece aproximadamente $0.5 \%/^{\circ}C$.

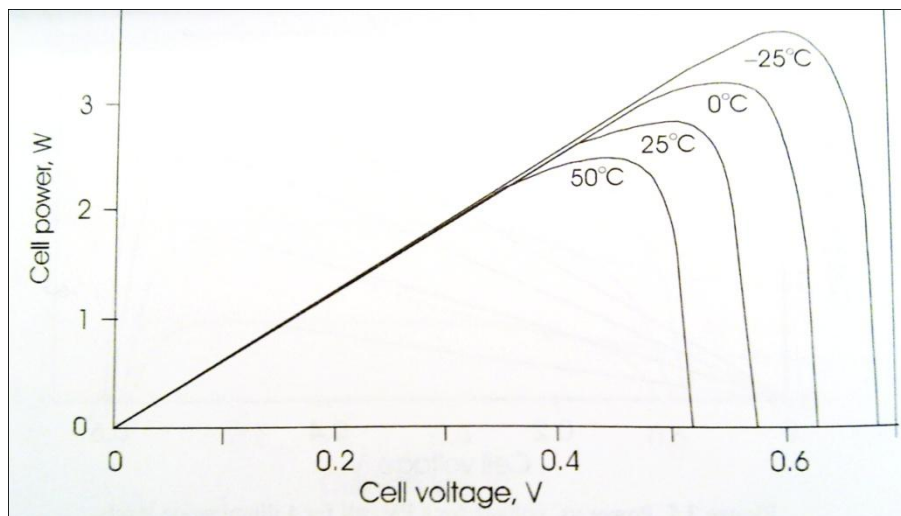


Figura 3-3 Curva de dependencia de la Potencia vs. Voltaje a la temperatura para una celda solar

Es importante hacer notar que cuando una celda es iluminada, generalmente convertirá menos del 20% de la irradiancia en electricidad; lo demás será convertido en calor. Como resultado, se espera que la celda opere a temperaturas mayores a la temperatura ambiente.

Para encontrar la potencia de la celda solo se debe recurrir a la ecuación:

Ecuación 3.3

$$P = IV$$

Para encontrar la potencia máxima; si I_m representa la corriente de la celda a máxima potencia y V_m representa el voltaje a máxima potencia, la potencia máxima de la celda puede expresarse como:

Ecuación 3.4

$$P_{m\acute{a}x} = I_m V_m = FR I_{sc} V_{oc}$$

Donde FR es el factor de relleno de la celda. El factor de relleno es una medida de la calidad de la celda. Celdas con alta resistencia interna tienen menor factor de relleno; mientras que la celda ideal tendrá un FR igual a la unidad. Esta característica implica que la celda funciona como fuente ideal de voltaje o de corriente.

Para una celda teniendo características “Corriente-Voltaje” ideales, $V_{oc} = 0.596 V$ y $I_{sc} = 2.0 A$ el factor de relleno será aproximadamente de 0.83, según la Ecuación 3.4. Valores típicos del FR –dependiendo de la tecnología– varían entre 0.5 a 0.82. Para maximizar el FR se debe maximizar la proporción de la corriente de saturación en inversa mientras que se minimizan las resistencias en serie y maximizando la resistencia en derivación entre las celdas.

3.1.1.2 Eficiencia

Para una celda su eficiencia está dada por:

Ecuación 3.5

$$\eta = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia solar recibida por las celdas}}$$

3.1.2 Módulo fotovoltaico

Para obtener el voltaje deseado se conectan varias celdas en serie para obtener el Voltaje a máxima potencia V_m deseado debajo del rango de las condiciones promedio de irradiancia. Este voltaje si es de 12 volts a condiciones de máxima insolación se obtendrá un valor aproximado de 16 – 18 V. Dado que V_m es normalmente el 80% de V_{oc} de alrededor de 20 V. Para celdas de silicio con un valor típico de voltaje de 0.5–0.6 V se deben conectar alrededor de 33–36 celdas en serie. Que generarían 70 – 100 W en total con celdas de 2 – 3 W cada una.

Las celdas son montadas juntas para crear módulos fotovoltaicos. Están cubiertas de una capa antirrefleтора y un laminado especial para evitar degradación en los contactos de las celdas. Los módulos tienen una temperatura nominal de operación de la celda (TNOC). La TNOC es la temperatura que las celdas alcanzarán cuando son operadas a circuito abierto a una temperatura ambiente de 20°C a AM 1.5 de irradiancia, $G = 0.8 \text{ kW}/\text{m}^2$ y velocidades

de viento de menos de 1 m/s . Para variaciones en la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) e irradiancia, la celda puede ser estimada con una aproximación tal que:

Ecuación 3.6

$$T_c = T_a + \left(\frac{TNOC - 20}{0.8} \right) G$$

Los efectos de la irradiancia y temperatura ambiente en el desempeño de la celda deben tenerse muy en cuenta, ya que para una celda de silicio el voltaje a circuito abierto decrece alrededor de $2.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Para un módulo el decremento de la tensión es de $2.3n \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, donde n es el número de celdas en serie en el módulo.

3.1.2.1 Eficiencia

La eficiencia depende del eslabón más débil. Dado que el módulo se compone de muchas celdas, es necesario que sus características sean lo más parecido posible.

Las características de la componente “Corriente-Voltaje” para n celdas en serie es obtenida por la suma de todas las celdas que conforman el módulo, dando como resultado que cada celda entregue la corriente requerida. La máxima corriente posible para el módulo es afectada por la celda de menor corriente bajo condiciones específicas de carga, a una irradiancia mínima de operación. Por lo tanto, es deseable tener idénticas curvas Corriente vs. Voltaje vs. Irradiancia.

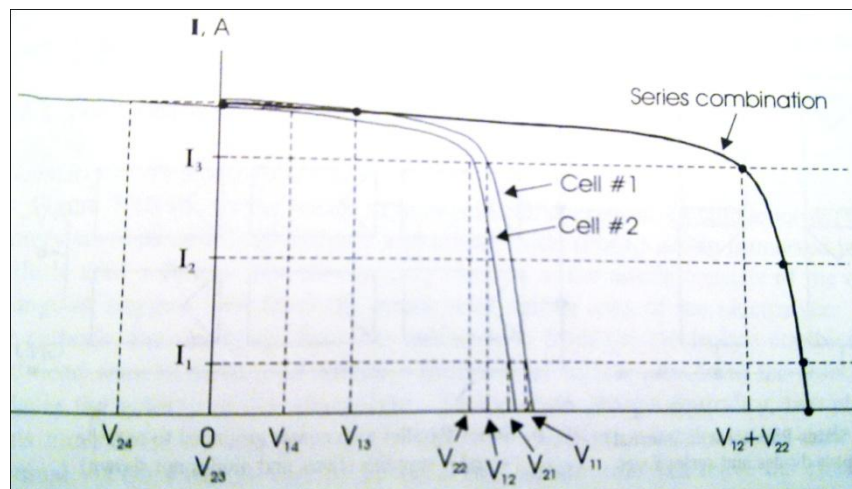


Figura 3-4 Operación conjunta de diferentes celdas fotovoltaicas

Para determinar la componente de la curva “Corriente-Voltaje” para dos celdas en serie, se suman los voltajes correspondientes, para producir la corriente requerida como se muestra en la Figura 3-4. Nótese que si una celda tiene una mayor I_{sc} que otras celdas, el voltaje de cada celda no será necesariamente cero.

En la Figura 3-4 la celda #2 tiene menor I_{sc} que la celda #1 y mientras su voltaje se vuelve negativo hasta que su corriente sea igual a la de la celda #1. Esto significa que la celda #1 está generando potencia mientras que la celda #2 está disipando potencia. Entre mayor sea la diferencia entre las celdas del módulo, mayor será el nivel de potencia disipada en las celdas más débiles.

3.1.3 Arreglo fotovoltaico

Si se necesitan mayores voltajes o corrientes es necesario conectar los módulos en serie o en paralelo. Arreglos conectados en serie entregarán mayor voltaje. Arreglos en paralelo entregarán mayor corriente.

Se deben instalar las protecciones necesarias si algún módulo llegase a fallar. Así se evitará un daño mayor al arreglo.

3.2 Controladores de carga de baterías en sistemas fotovoltaicos

La función principal de un controlador de carga de baterías en un sistema fotovoltaico es mantener los bancos de baterías a un nivel de carga máximo a la vez de proteger las baterías de una sobrecarga por parte del arreglo de paneles fotovoltaicos y de una sobredescarga debido a los dispositivos que demandan energía conectados en el sistema. Aunque en principio es posible diseñar un sistema fotovoltaico que no requiera de este controlador, en general es altamente conveniente y necesario debido a la variación de las cargas que alimenta el sistema, a la optimización del uso de la energía y los costos de inversión que requiere la instalación del sistema (es posible utilizar un banco de baterías con una capacidad menor a la requerida de acuerdo a un análisis de requerimientos de consumo de energía si se cuenta con un controlador adecuado).

El algoritmo usado por el controlador de carga determina la efectividad de la carga de las baterías y el aprovechamiento del arreglo de paneles fotovoltaicos. Los controladores de carga pueden contener algunas características adicionales que permitan extender el ciclo de vida de las baterías e indicadores adicionales que informen al usuario el estado del sistema.

Las funciones del controlador de carga así como los dos esquemas más utilizados para el diseño del controlador se describen en los apartados siguientes.

3.2.1 Control de sobrecarga y sobredescarga

Cuando se diseña un sistema fotovoltaico con respaldo de baterías se calculan los elementos del sistema para que éste cumpla los requerimientos de carga establecidos bajo las condiciones del peor caso posible, lo cual por lo general sucede en el mes con menor índice de irradiación solar. Dado lo anterior, cuando el sistema trabaja en condiciones más favorables, comúnmente el sistema excede los requerimientos de la demanda de energía. El control de sobrecarga implementado en el controlador debe garantizar que las baterías no sean sobrecargadas independientemente de los factores de diseño del sistema, variaciones de la carga, temperatura e irradiación solar.

Mediante la regulación de carga es posible alcanzar dicho objetivo de manera que el controlador suministrará energía a las baterías de manera que éstas se carguen completamente sin sobrecargarse. La condición de sobrecarga desgasta la composición de las baterías y reduce su tiempo de vida, lo cual conlleva fallas prematuras y pérdida de capacidad del sistema.

La manera en que el controlador evita la sobrecarga es limitando o interrumpiendo el flujo de corriente hacia las baterías cuando estas se hallan completamente cargadas. Frecuentemente la regulación de carga se logra limitando el valor máximo de voltaje que puede alcanzar la batería mientras se carga (a este valor se le conoce como *punto de regulación de voltaje*, VR por sus siglas en inglés).

A su vez durante condiciones desfavorables para la generación eléctrica fotovoltaica, como periodos de baja insolación o bajo una demanda de energía excesiva es posible que la energía suministrada por los paneles fotovoltaicos sea insuficiente para mantener las baterías en un nivel de carga aceptable. Cuando una batería sufre un ciclo descarga profunda las reacciones químicas internas deterioran la estructura de la misma. Al ocurrir ciclos de descarga continuos la batería eventualmente pierde capacidad y acorta su ciclo de vida útil. Por tal razón la mayoría de los controladores cuentan con opciones de desconexión del banco de baterías en caso de que estas lleguen a un nivel de voltaje crítico. Además algunas aplicaciones pueden funcionar de manera inadecuada o simplemente no funcionar si el nivel de voltaje suministrado por las baterías no es lo suficientemente elevado.

El control de sobredescarga se implementa comúnmente abriendo el circuito entre el banco de baterías y las cargas del sistema en cuanto el banco alcanza un nivel de voltaje establecido conocido como *punto de desconexión por bajo voltaje* (LVD por sus siglas en inglés) En cuanto las baterías alcanzan un nivel aceptable de carga aceptable, éstas son reconectadas al sistema.

3.2.2 Puntos de regulación de carga

Los niveles de voltaje de las baterías a los cuales el controlador lleva a cabo funciones de conmutación o de control son llamados puntos de regulación de carga. Cuatro puntos básicos están establecidos para la mayoría de los controladores que cuentan con funciones de protección contra sobrecarga y sobredescarga.

El punto de regulación de voltaje (VR) y el punto de reconexión al arreglo (ARV por sus siglas en inglés) se refieren respectivamente a los niveles de voltaje establecidos a los cuales el banco de baterías se desconecta y se vuelve a conectar al suministro eléctrico que proporciona el arreglo fotovoltaico.

El *punto de desconexión por bajo voltaje* (LVD) y el *punto de reconexión a carga* (LRV) se refieren a los niveles de voltaje a los cuales el banco de baterías se desconecta de la carga para prevenir la sobredescarga.

La Figura 3-5 muestra un diagrama de tiempo contra voltaje en las baterías que ejemplifica dichos puntos:

Puntos de regulación de carga

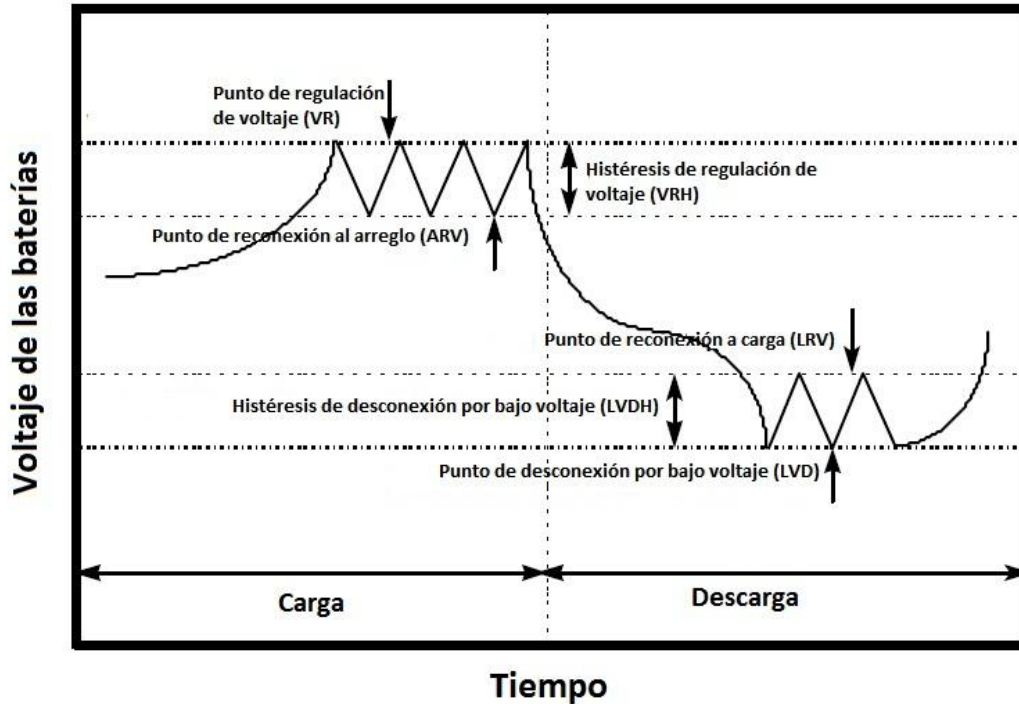


Figura 3-5 Diagrama de puntos de regulación de carga

- a) Punto de regulación de voltaje (VR): Se define como el máximo voltaje al cual el controlador permite que se carguen las baterías limitando así la sobredescarga. Una vez que el controlador reconoce que el nivel establecido de voltaje se ha alcanzado desconecta el banco de baterías del arreglo fotovoltaico o bien comienza a limitar la corriente que es entregada a la batería.
- b) Punto de reconexión al arreglo (ARV): Si el banco de baterías es desconectado en el punto de regulación de voltaje, la tensión en las mismas comenzará a disminuir debido a las cargas conectadas en el sistema. Cuando las baterías alcanzan un nivel determinado el banco es conectado nuevamente al arreglo fotovoltaico.
- c) Histéresis de regulación de voltaje (VRH): Se define como la diferencia entre el punto de regulación de voltaje y el punto de reconexión al arreglo. Este parámetro determina en gran medida la efectividad de la recarga de las baterías y es importante que este correctamente establecido para evitar desperdiciar energía proveniente del arreglo y a su vez evitar conmutar excesivamente la conexión de las baterías al arreglo.
- d) Punto de desconexión por bajo voltaje (LVD): Es el nivel de voltaje al cual la carga es desconectada del banco de baterías para evitar la sobrecarga. El nivel establecido

para este punto está directamente ligado a la máxima descarga posible para el banco de baterías y su capacidad total disponible. El nivel adecuado para este punto debe permitir mantener el banco de baterías en buen estado mientras que asegura la mayor disponibilidad de energía posible a las cargas.

- e) Punto de reconexión a carga (LRV): Es el nivel establecido al cual el controlador permite la reconexión entre el banco de baterías y las cargas del sistema después de que el banco ha sido desconectado para prevenir una sobredescarga. Este punto debe estar balanceado correctamente para permitir que las baterías se carguen a un nivel considerable antes de volver a conectar al sistema y a su vez mantener una disponibilidad de energía adecuada para las cargas evitando así que estas permanezcan desconectadas por tiempos prolongados.
- f) Histéresis de desconexión por bajo voltaje (LVDH): Es la diferencia de niveles que existe entre el punto de desconexión por bajo voltaje y el punto de reconexión a carga. Este debe elegirse para evitar un desgaste innecesario de los dispositivos de desconexión del banco de baterías a la carga y tomando en cuenta la capacidad del sistema, la química de sus baterías y los requerimientos de disponibilidad de energía que demanden las cargas.

3.2.3 Esquemas de diseño para controladores de carga

Existen dos esquemas básicos que siguen la gran mayoría de los controladores de carga para regular la carga suministrada por parte de los arreglos fotovoltaicos hacia el banco de baterías en un sistema de generación fotovoltaico: regulación por derivación (shunt) o en serie. Ambos esquemas son ampliamente utilizados en la actualidad y algunos diseños incorporan una serie de variaciones que incrementan su rendimiento. Los diseños más simples regulan el suministro de corriente mediante la desconexión de la carga y del arreglo fotovoltaico del banco de baterías mientras que diseños más sofisticados limitan la corriente suministrada de manera lineal por el arreglo de manera que las baterías se mantengan siempre en un nivel de voltaje elevado.

1. Control por derivación (shunt)

Gracias a que las celdas fotovoltaicas están limitadas en corriente de manera intrínseca debido a su construcción es posible ponerlas en cortocircuito sin riesgo alguno de dañarlas. Esta característica de las celdas fotovoltaicas se utiliza para el funcionamiento de este esquema de controlador de carga.

El control por derivación regula la carga proveniente del arreglo fotovoltaico hacia el banco de baterías cortocircuitando el arreglo mediante un elemento de derivación. Todos los controladores que usan este esquema cuentan con un diodo de bloqueo colocado en serie entre el banco de baterías y el elemento de derivación para prevenir que las baterías estén en corto circuito cuando la derivación se encuentra abierta. Debido a que existe una cierta caída de tensión entre el arreglo fotovoltaico y el controlador y debido a pérdidas resistivas en el cableado y a la resistencia del

elemento de derivación, se disipa una determinada cantidad de energía en forma de calor en el controlador. Por esta razón la mayoría de esta clase de controladores llevan un disipador de calor integrado y por lo general su uso se restringe a sistemas de generación fotovoltaica cuya corriente total en el arreglo sea menor o igual a 20 A. El elemento de derivación generalmente es un transistor MOSFET de potencia. La Figura 3-6 muestra la arquitectura de este esquema de regulación.

Esquema de regulación en derivación (shunt)

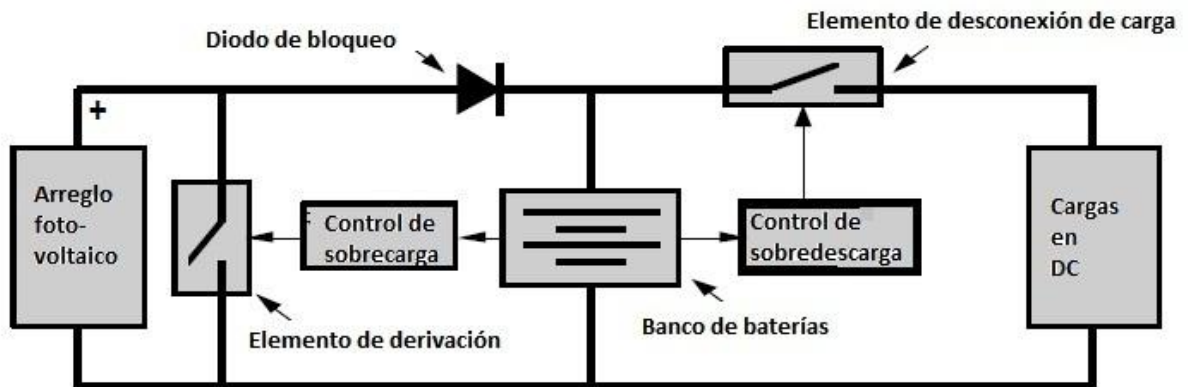


Figura 3-6 Arquitectura utilizada para el esquema de regulación en derivación (shunt)

2. Control en serie

Este esquema de regulación requiere que el controlador se conecte en serie entre el arreglo fotovoltaico y el banco de baterías a diferencia del controlador en derivación el cual se conecta en paralelo. Este esquema de control es usado comúnmente en sistemas de generación eléctrica fotovoltaica de gran tamaño gracias a que no tiene las limitantes de corriente que tiene el control por derivación, aunque también es usado en pequeños sistemas de generación.

En la Figura 3-7 se puede apreciar la arquitectura de un controlador de carga bajo el esquema de regulación en serie. En este tipo de controlador, un relevador o un interruptor de estado sólido desconecta el circuito entre el arreglo fotovoltaico y el banco de baterías para detener el flujo de corriente hacia éstas últimas o bien, si el controlador cuenta con esta característica, limita el flujo de corriente de manera lineal para mantener la batería cargada. Cuando no se cuenta con esta característica el controlador simplemente cierra nuevamente el circuito cuando el voltaje en el banco de baterías llega al punto de reconexión al arreglo (ARV).

Debido a que este esquema de regulación deja en circuito abierto al arreglo fotovoltaico en lugar de cortocircuitarlo como el esquema en derivación, no es

necesario que el sistema cuente con un diodo de bloqueo para evitar cortocircuitar el banco de baterías.

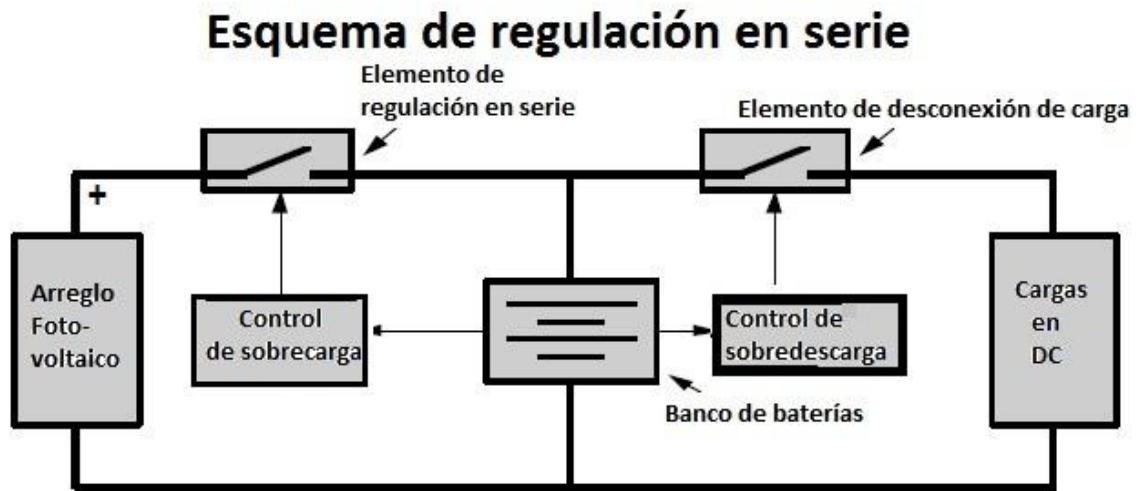


Figura 3-7 Arquitectura utilizada para el esquema de regulación en serie

3.3 Baterías

Una fuente de energía eléctrica de origen fotovoltaico se caracteriza, principalmente, por su variabilidad (diaria y estacional) y aleatoriedad, lo que afecta de forma directa y la disponibilidad de energía, por lo tanto los sistemas fotovoltaicos no pueden alimentar la carga durante la noche. Por otro lado los valores de voltaje y corriente de un módulo fotovoltaico dependen de la carga, de modo que la conexión directa no es, en la mayor parte de los casos, una buena solución. Para lo cual es necesario implementar baterías para el almacenamiento de energía que se va a requerir. Éstas deben conectarse entre sí de modo conveniente para alcanzar los valores de voltaje y corriente requeridos.

3.3.1 Generalidades

La batería almacena energía en forma electroquímica, además de que es el dispositivo más usado para almacenamiento de energía en distintas aplicaciones. Tiene una eficiencia de conversión (en un solo sentido de descarga) de 85% a 90%.

Las ventajas del uso de baterías son:

- Dotar al sistema de una fuente eléctrica independiente de las condiciones de radiación solar.
- Dotar al sistema de autonomía durante los periodos prolongados de inactividad de los módulos fotovoltaicos, haciendo uso de la energía almacenada durante los momentos de generación eléctrica.

- Fijar un voltaje de referencia que establezca en los módulos un punto de trabajo óptimo, manteniendo además unas condiciones de estabilidad en el voltaje del sistema aceptables para los elementos de consumo.

Existen dos tipos básicos de baterías electroquímicas:

- Batería primaria: Convierte energía química a energía eléctrica. La reacción electroquímica no es reversible y se desecha la batería después de una descarga completa.
- Batería secundaria: también conocida como batería recargable. La reacción electroquímica es reversible. Después de una descarga, puede volver a ser cargada inyectando corriente directa de una fuente externa. Esta batería convierte energía química en energía eléctrica en la fase de descarga. En la fase de carga convierte energía eléctrica a energía química. Su eficiencia es alrededor de 70% a 80%.

La celda que existe en la batería está conformada por dos placas; una positiva y una negativa separados por aislantes y un electrolito químico. Los dos grupos de placas de los electrodos son conectados a dos terminales externas montadas en un recipiente. La celda almacena energía electroquímica a un potencial eléctrico muy bajo, generalmente unos cuantos volts.

Una batería está conformada por numerosas celdas electroquímicas conectadas en una combinación serie-paralelo para obtener la corriente o voltaje deseados.

3.3.2 Características generales

Las baterías se utilizan en múltiples aplicaciones y su composición interna es variada. Los tres parámetros característicos e identificadores de una batería son:

- Tipo: El más común para este tipo de aplicaciones es plomo-ácido con electrolito líquido, plomo-ácido con electrolito gelificado y níquel-cadmio.
- Capacidad: Se suele expresar en Amperes por hora (Ah) y es una medida de cantidad de energía que puede suministrar la batería a determinadas condiciones. Lo que significa que entrega $C * A$ por una hora o $C/n A$ por n horas. La capacidad disponible en la batería se ve afectada por la temperatura a la que se encuentra sometida. Las proporciones de carga y descarga están dados en Ah, por ejemplo, cargar una batería de 100Ah a $C/10$ significa que se carga a $100/10 = 10 A$. Descargar la batería a $C/2$ significa $100/2 = 50A$, lo que significa que será completamente descargada en 2 horas.
- Voltaje de carga y descarga: La batería es una fuente de corriente directa que irá decrementando su voltaje conforme ésta sea descargada. También tendrá un voltaje fijo cuando se encuentre completamente cargada.
- Energía: La energía que entrega una batería está dado en términos del voltaje promedio durante la descarga y la capacidad en Ampere-hora que puede entregar

antes de que el voltaje caiga hasta cierto límite. El producto del Voltaje y el Ampere -hora forma el Watt-hora (Wh). Ésta es la energía que entrega una batería a plena carga.

Durante el funcionamiento de la batería hay una serie de parámetros que deben considerarse:

- Estado de carga: Es la relación existente entre la capacidad disponible y la capacidad promedio.

Ecuación 3.7

$$EC = \frac{\text{capacidad disponible en la batería}}{\text{capacidad promedio en Ah}}$$

- Profundidad: Es la relación existente entre la capacidad disponible y la capacidad total.
- Ciclo de carga: Los procesos de carga y descarga de la batería tienen un ciclo que determina en gran medida la vida de la batería.
- Circuito equivalente:

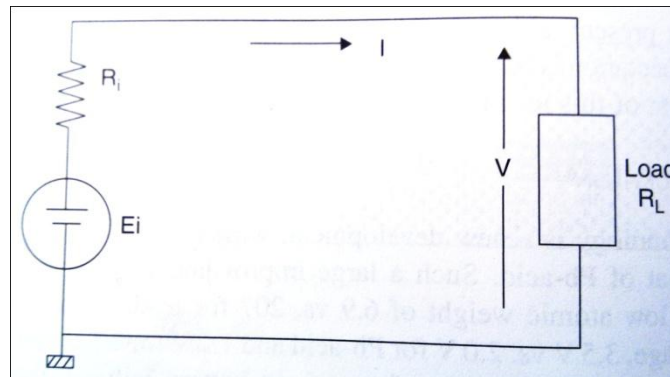


Figura 3-8 Circuito equivalente de una batería

En su manera más simple la batería trabaja como una fuente de voltaje constante con una pequeña resistencia. El voltaje a circuito abierto (E_i) de la batería decrece linealmente con los Ah descargados (Q_d) y la resistencia interna (R_i) aumenta linealmente con Q_d . Esto es, el voltaje a circuito abierto de la batería es menor y la resistencia interna es mayor en una batería parcialmente descargada, comparado con E_0 y R_0 -parámetros en estado a plena carga-. Esto se expresa de la siguiente forma:

Ecuación 3.8

$$E_i = E_0 - k_1 Q_d$$

Ecuación 3.9

$$R_i = R_0 - k_2 Q_d$$

Donde k_1 y k_2 son constantes de ajuste encontradas por experimentación. Una batería puede entregar máxima potencia a una carga cuando $R_L = R_i$ donde:

Ecuación 3.10

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{E_i^2}{4R_i}$$

Dado que E_i y R_i varían con el EC y la $P_{m\acute{a}x}$ varía también. La pérdida interna está dada por:

Ecuación 3.11

$$I^2 R_i$$

- La eficiencia a cualquier EC es por lo tanto:

Ecuación 3.12

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_i}$$

La eficiencia decrece cuando la batería es descargada por lo que genera mayor calor a menor EC .

- Eficiencia de carga está definido como la proporción entre los Ah siendo depositados internamente entre las placas y los entregados a las terminales externas durante el proceso de recarga. La eficiencia de carga es casi 100% cuando la celda está vacía, teniendo en cuenta que todos los Ah son convertidos en energía electroquímica útil. Mientras el EC se acerca a uno, la eficiencia de recarga se aproxima a cero.
- Efecto de memoria: Es la tendencia de una batería de recordar la profundidad o nivel de carga en donde entrega la mayor parte de su capacidad. Es como perder masa muscular debido a la falta de uso por mucho tiempo. Para remediar este problema se debe “reacondicionar” a la batería descargándola totalmente de vez en cuando por algunos meses después recargarla totalmente. Este efecto solamente lo tiene la batería NiCd.
- Efectos por temperatura: La capacidad y eficiencia de recarga decrece con el aumento de la temperatura. La capacidad cae arriba o debajo de ciertos rangos de temperatura y cae bruscamente a temperaturas bajo cero. El promedio de auto descarga aumenta junto con la temperatura.

3.3.3 Tipos de baterías

Existen en el mercado actualmente seis tipos distintos de baterías recargables:

1. Plomo-ácido

Ésta es la batería recargable más usada por su relación de alto rendimiento y bajo costo. Pero tiene la menor densidad de energía comparado con su peso y volumen. En una batería Pb-ácido en descarga agua y sulfato de plomo son formados, el agua diluye el electrolito (ácido sulfúrico) y el peso específico del electrolito disminuye junto con el *EC* (Estado de carga). Al recargar la batería se invierte la reacción en donde se forma plomo y dióxido de plomo en la placa negativa y positiva respectivamente. Existen varias versiones de este tipo de baterías, como la de ciclo superficial que se utiliza en automóviles y la de ciclo profundo que se utiliza para ciclos de carga y descarga completos. Para la aplicación de celdas fotovoltaicas es necesaria la versión de ciclo profundo.

2. Níquel-cadmio

El electrodo positivo está hecho de cadmio y el negativo de hidróxido de níquel. Los dos electrodos están separados por nylon y ubicado dentro del electrolito de hidróxido de potasio en un recipiente de acero inoxidable. Ya que la batería NiCd tiene la mitad del peso con la misma capacidad energética, mayor vida de ciclo profundo y tolerancia a mayores temperaturas que la batería Pb-ácido, es una de las baterías más utilizadas después de las baterías Pb-ácido. Su desventaja es que tiene efecto de memoria que degrada su capacidad si no es usada por un largo periodo.

3. Níquel-hidruro metálico

Es una mejora tecnológica de la batería NiCd que ofrece mejor densidad de energía. La mayor diferencia en su construcción es que el ánodo está hecho de un hidruro metálico. No tiene efecto de memoria, sin embargo, no es capaz de entregar potencia con picos muy altos, tiene una alta proporción de auto descarga y es susceptible a daño si es sobrecargada.

4. Litio-ion

Ofrece tres veces más densidad de energía que una batería Pb-ácido. Ésta mejora en densidad energética viene del bajo peso atómico de 6.9 contra 207 del plomo. En el ánodo el electrodo de litio reacciona con cualquier electrolito líquido arrancando una película inhibidora cada vez que la celda es descargada y cargada de nuevo, el litio es arrancado y una nueva superficie metálica es expuesta al electrolito y una nueva película inhibidora es formada. Ésta batería es vulnerable a sobrecargas o corto circuitos.

5. Litio-polímero

Es una batería de litio con polímeros sólidos como electrolitos. Es construida con una película de litio metálico ligado a una fina capa de electrolito de polímero sólido. Éste polímero sirve tanto como electrolito y como separador. Además, el metal reacciona menos con el electrolito sólido que con uno líquido.

6. Cinc-aire

Tienen un electrodo negativo de cinc, un electrolito de hidróxido de potasio y un electrodo positivo de carbón que está expuesto al aire. Durante la descarga, el oxígeno del aire es reducido al electrodo de carbón y el electrodo de cinc es oxidado. Durante éste proceso absorbe oxígeno del aire y lo convierte en iones de oxígeno para ser transportados al ánodo de cinc. Durante la recarga produce oxígeno.

Voltaje promedio en celdas durante la descarga en diferentes tipos de baterías recargables		
Tipo	Voltaje	Característica principal
Plomo-Ácido (Pb-ácido)	2	Tecnología de menor costo
Níquel-Cádmio (NiCd)	1.2	Presenta efecto de memoria
Níquel-Hidruro metálico (NiMH)	1.2	Sensible a la temperatura
Litio-Ion (Li-ion)	3.6	Segura, no contiene litio metálico
Litio-polímero (li-poly)	3	Contiene litio metálico
Zinc-aire	1.2	Requiere buena administración de aire para limitar su propia descarga

Tabla 3-1 Distintos tipos de baterías

3.4 Inversor

La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente directa (DC) a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna (AC). El voltaje de alterna a la salida puede ser fijo o variable e igual sucede para la frecuencia. Los inversores encuentran uso en diversas aplicaciones, entre ellas transmisión de potencia eléctrica para redes alimentación convencional, impulsores de motores de AC, fuentes ininterrumpibles de energía y especialmente para obtener corriente alterna a partir de fuentes que suministran corriente directa como paneles solares, aerogeneradores y baterías.

En general para la mayoría de las aplicaciones se busca una forma de onda senoidal a la salida del inversor; sin embargo, obtener una senoidal pura en la práctica resulta muy difícil de lograr. Comúnmente los inversores prácticos, dependiendo de su topología y las técnicas de control que utilicen, producen salidas con menor o mayor distorsión debido a los armónicos presentes. Dependiendo del tipo de aplicación en la que se trabaje es posible que una señal de onda cuadrada sea suficiente para satisfacer los requerimientos de la carga, sin embargo es común que en aplicaciones de alto voltaje y/o en aquellas en las que sea requerida una interconexión con la red de suministro eléctrico convencional se requiera una salida senoidal con muy poca distorsión.

El principio básico de funcionamiento de los inversores consiste en la conmutación secuencial de dispositivos controlados de encendido y apagado (como TBJ, MOSFET e IGBT entre otros). Las señales de control por lo general utilizan modulación de ancho de pulso para comandar la conmutación de dichos dispositivos. Existen una variedad de técnicas de conmutación disponibles en la actualidad las cuales presentan algunas ventajas como un aumento significativo en la calidad de la señal de salida a cambio de una implementación más costosa en la mayoría de los casos.

En términos comerciales se dice que los inversores tienen una salida senoidal modificada o senoidal pura dependiendo de la medida en que la salida del inversor represente fielmente una onda senoidal ideal. Aunque técnicamente no existe ninguna normativa que sirva para clasificarlos en una u otra categoría se puede decir que los inversores de onda senoidal pura son capaces de entregar a su salida una senoidal casi perfecta y cuentan con porcentajes de distorsión armónica total mucho menores que los inversores de onda senoidal modificada. Enseguida se presentan algunos detalles respecto a ambos tipos de inversores.

La Figura 3-9 muestra una comparación ilustrativa entre la salida de ambos tipos de inversores y la forma de onda que se encuentra en la alimentación de red suministradora o utilitaria.

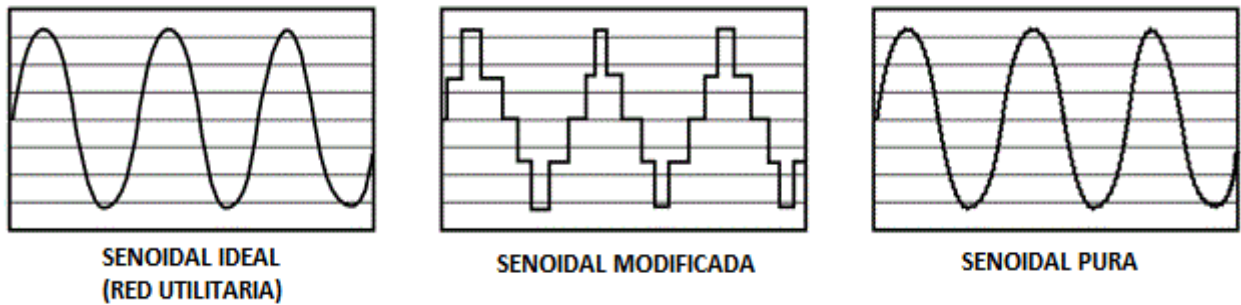


Figura 3-9 Configuración de puente completo

- **Inversores de onda senoidal modificada:** Esta clase de inversores utilizan técnicas de conmutación para generar formas de onda parecidas a una senoidal. Dependiendo del esquema de conmutación y de la topología del inversor su forma de onda a la salida será más o menos aproximada a una senoidal ideal. Su construcción resulta más barata y su construcción menos complicada que los inversores de onda senoidal pura. Esta clase de inversores resulta apropiada para la gran mayoría de las aplicaciones de CA.
- **Inversor senoidal de onda pura:** Por lo general esta clase de inversores poseen un índice de distorsión armónica total muy baja, del orden del 3% o menos. Los inversores que pertenecen a esta categoría pueden tener distintas clases de topologías, por ejemplo puede tratarse de inversores multinivel o inversores resonantes y contienen filtros de salida que permiten eliminar los armónicos espurios y así conseguir una salida prácticamente senoidal. Esta clase de inversores se prefiere para ciertas aplicaciones de CA que demandan una alta calidad de la energía o cuando se utilizan sistemas fotovoltaicos interconectados a la red suministradora.

En el presente trabajo se revisan de forma breve los fundamentos de una de las arquitecturas más utilizadas dentro del campo de inversores fotovoltaicos que consiste en el esquema de inversión mediante SPWM. Esta arquitectura se utiliza tanto para inversores de onda senoidal modificada como inversores de onda pura.

3.4.1 Configuración de puente completo

La configuración más utilizada para la construcción de inversores es el puente completo o puente H como comúnmente se le conoce el cual se muestra en la Figura 3-10. Este circuito se encuentra alimentado por una fuente de corriente directa (DC) y a partir del control de la apertura o cerrado de los cuatro interruptores de manera secuencial es posible obtener como salida en la carga una tensión de alterna (AC).

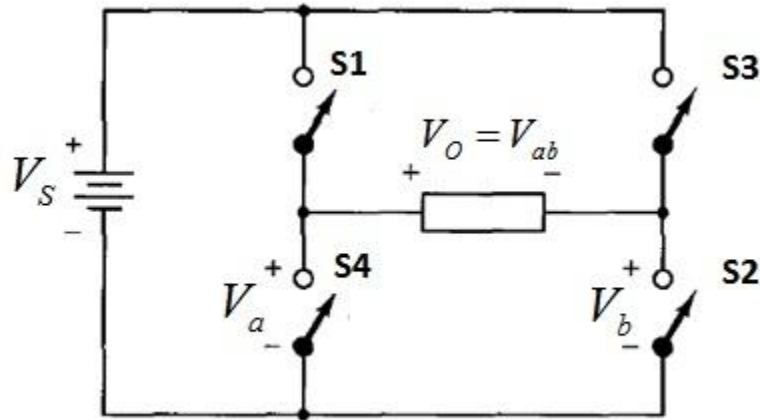


Figura 3-10 Configuración de puente completo

La tensión de salida en la carga puede tomar el valor de $+V_s$, $-V_s$ o cero dependiendo del estado de los interruptores como se muestra en la secuencia de la Tabla 3-2.

Interruptores cerrados	Tensión de salida del inversor
S1 y S2	$+V_s$
S3 y S4	$-V_s$
S1 y S3	0
S2 y S4	0

Tabla 3-2 Tensión de salida del inversor de puente completo de acuerdo a la combinación de interruptores abiertos

El puente completo puede dividirse en dos secciones o ramas, compuestas cada una por un par de elementos de conmutación o interruptores. Una de las ramas está conformada por los interruptores S1 y S2 y la rama complementaria está formada por los interruptores S3 y S4.

Para los inversores basados en la configuración de puente completo existen dos esquemas de conmutación:

Conmutación Bipolar: Se le llama así porque la tensión a la salida del inversor varía continuamente entre los valores de tensión $+V_s$ y $-V_s$. En este caso las ramas del puente completo se controlan de manera complementaria, es decir mientras una de las ramas se tiene sus interruptores abiertos la otra rama se encuentra con los interruptores cerrados. Esto se ejemplifica en la Figura 3-11.

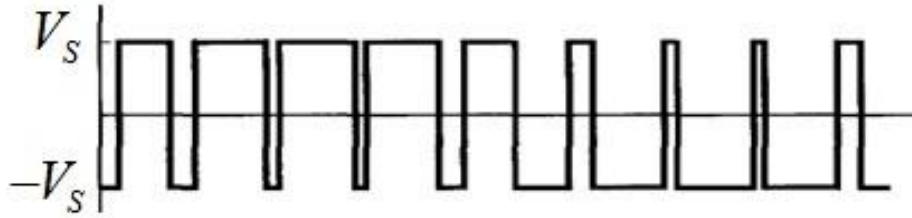


Figura 3-11 Forma de onda de salida para un inversor de puente completo de conmutación bipolar

Conmutación Unipolar: En este esquema la tensión de salida del inversor varía entre los valores de tensión $+V_s$ y cero o entre $-V_s$ y cero. Para este caso las ramas del puente se controlan de manera independiente una de la otra, es decir que las señales de control de cada rama son diferentes. Este esquema de conmutación se muestra en la Figura 3-12.



Figura 3-12 Forma de onda de salida para un inversor de puente completo de conmutación unipolar

Los inversores descritos en los apartados posteriores basan su funcionamiento en la configuración de puente completo para su funcionamiento.

3.4.2 Inversor de onda cuadrada

Esta es la topología de inversor más simple. Su ventaja radica en su fácil implementación y bajo costo ya que sus circuitos de control son relativamente simples, por otro lado su desventaja principal es que contiene una significativa cantidad de distorsión armónica lo cual aumenta los requerimientos del filtro de salida en caso de que se desee obtener una señal senoidal lo más pura posible y tampoco permite regular la amplitud de la tensión de salida.

Su principio de operación es el siguiente: cuando los transistores Q1 y Q2 se encuentran encendidos simultáneamente durante el tiempo $T_0/2$ el voltaje de alimentación V_s aparece a través de la carga. Cuando se apagan los dos transistores anteriores y se encienden simultáneamente Q3 y Q4 durante el siguiente medio ciclo $T_0/2$ el voltaje que aparece en la carga es $-V_s$.

La señal de salida del inversor y la señal de control para los transistores de cada rama del puente completo se aprecian en la Figura 3-12.

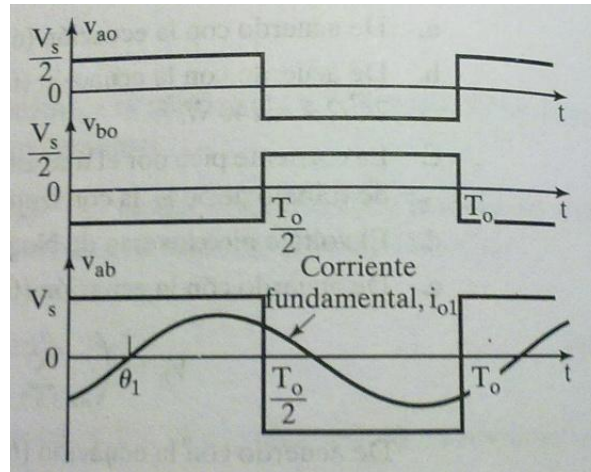


Figura 3-12 Señal de salida del inversor monofásico de onda cuadrada y señal de control para los transistores de cada rama del puente completo.

El voltaje rms a la salida del inversor puede calcularse mediante la expresión:

Ecuación 3.13

$$V_0 = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s$$

Desarrollando la expresión anterior para expresar el voltaje V_s en una serie de Fourier se tiene:

Ecuación 3.14

$$v_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen}(n\omega t)$$

Con $n=1$ en la expresión anterior se puede obtener el valor de la componente fundamental del voltaje de salida:

Ecuación 3.15

$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2}\pi} = 0.9V_s$$

3.4.3 Distorsión Armónica Total (THD)

La distorsión armónica total (THD por sus siglas en inglés) es una figura que nos permite cuantizar la calidad de la energía de alterna entregada a la salida del inversor. Se define como la relación de la suma de las componentes armónicas de la señal con respecto a la componente fundamental, es decir:

Ecuación 3.16

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}}$$

3.4.4 Inversor controlado por modulación de ancho de pulso sinusoidal (SPWM) unipolar

Es posible mejorar notablemente la calidad de la señal de salida de un inversor si se emplea un esquema de control de conmutación mediante PWM (modulación de ancho de pulso por sus siglas en inglés). Dicho esquema permite controlar la amplitud el voltaje de salida del inversor a la vez que reduce notablemente los armónicos indeseables en la salida.

Existen varios esquemas de control PWM, entre ellos se pueden destacar los siguientes:

- 1.- Modulación por ancho de un solo pulso.
- 2.- Modulación por ancho de pulsos múltiples (UPWM).
- 3.- Modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM).
- 4.- Modulación por ancho de pulso senoidal modificado (MSPWM).

El esquema de control SPWM es ampliamente utilizado en los inversores actuales debido a su costo y a la calidad de la señal de salida del inversor la cual es aceptable para una amplia gama de aplicaciones por lo cual este esquema tiene un amplio uso en aplicaciones industriales y de generación eléctrica mediante energías sustentables.

En el esquema de control SPWM se generan más de un solo pulso por cada medio ciclo de la señal de salida. Además el ancho de cada pulso se varía de en proporción con la amplitud de una onda senoidal de referencia. El principio de funcionamiento y sus elementos de interacción de describen a continuación.

- Se genera una onda senoidal de referencia (+Vsen) y una señal complementaria que es la señal anterior invertida (-Vsen) cuya frecuencia f_r determina la frecuencia de salida del inversor f_0 .
- Se genera una onda portadora triangular V_{tri} de frecuencia f_c , dicha frecuencia controla la cantidad de pulsos por cada semiciclo. A esta señal se le conoce como señal portadora o señal de conmutación.
- Se comparan la señal de referencia con la señal portadora con el fin de controlar el pulso de encendido de cada rama. El criterio de control se muestra en la Tabla 3-3.

Interruptor	Condición de encendido
S1	$V_{sen} > V_{tri}$
S2	$-V_{sen} < V_{tri}$
S3	$-V_{sen} > V_{tri}$
S4	$V_{sen} < V_{tri}$

Tabla 3-3 Criterio de control de interruptores para un inversor controlado mediante SPWM unipolar

Las formas de onda de la señal portadora, de referencia y las señales de control para cada rama así como la señal de salida resultante del inversor se muestran en la Figura 3-13.

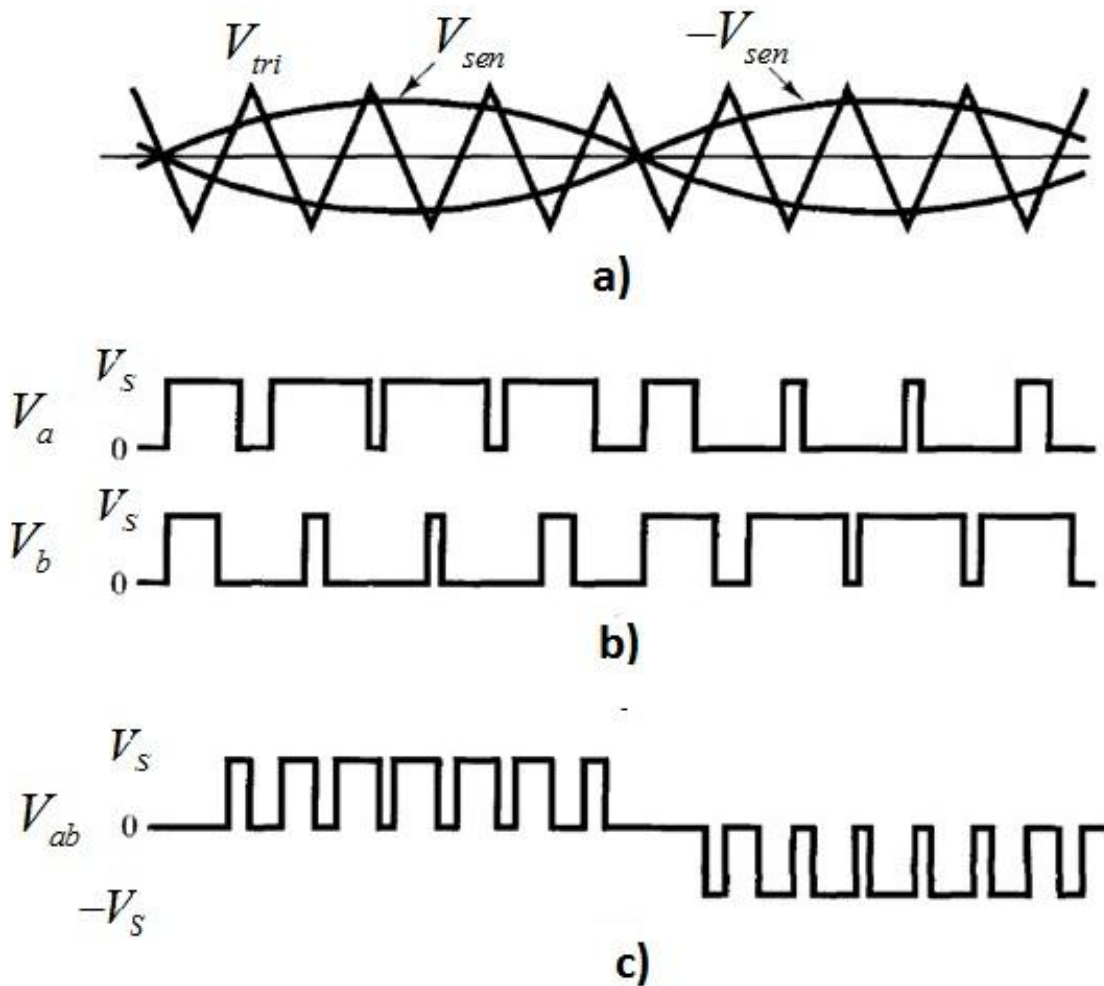


Figura 3-13 Formas de onda de las señales de un inversor controlado bajo el esquema de conmutación SPWM unipolar a) Señales de referencia [V_{sen} y $-V_{sen}$] y señal de conmutación [V_{tri}], b) Formas de onda tomadas en los puntos V_a y V_b respectivamente, c) Señal de salida del inversor.

3.4.5 Parámetros de modulación y consideraciones respecto a la modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM)

Es posible demostrar que la forma de onda salida de un inversor que trabaja bajo el esquema de SPWM se puede expresar como una función desarrollada en sus términos de serie de Fourier la cual depende de ciertos parámetros que se han establecido. La variación controlada de estos parámetros nos permite ajustar las características de la onda de salida. Asimismo existen algunas consideraciones eléctricas importantes que deben tomarse en cuenta al usar un inversor de este tipo.

- a) **Índice de modulación de frecuencia m_f** : La componente fundamental de la serie de Fourier expandida de la señal de salida tiene una frecuencia igual a la señal de referencia V_{sen} (o también $-V_{sen}$), es decir f_o . La señal de salida contiene armónicas en la frecuencia de conmutación f_c en sus múltiplos ($2f_c, 3f_c$...etc.) y alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos. Dado que estos armónicos se encuentran en frecuencia relativamente altas con respecto a la componente fundamental es posible eliminarlos fácilmente mediante un filtro paso-bajas. El índice de modulación de frecuencia se define como la razón entre la frecuencia de conmutación y la frecuencia de referencia, es decir:

Ecuación 3.17

$$m_f = \frac{f_{Vtri}}{f_{Vsen}} = \frac{f_o}{f_c}$$

Al aumentar el índice de modulación m_f se incrementa la frecuencia a la cual aparecen los armónicos sin embargo al mismo tiempo se incrementan las pérdidas por conmutación en el inversor debido al aumento en la frecuencia de la señal de conmutación.

- b) **Índice de modulación de amplitud m_A** : Se define como la relación de las amplitudes de la señal de referencia y la señal de conmutación, es decir:

Ecuación 3.18

$$m_A = \frac{V_{referencia}}{V_{conmutación}} = \frac{V_{sen}}{V_{tri}}$$

Para cuando $m \leq 1$ la amplitud de la componente fundamental de salida V_1 varía de forma lineal en proporción a m_A de manera que:

Ecuación 3.19

$$V_1 = m_A V_S$$

De acuerdo a la expresión anterior es posible ajustar la amplitud de la componente fundamental de salida variando el parámetro m_A lo cual resulta importante para el caso en que se trabaje con fuentes de tensión continua sin regular ya que el valor de m_A se puede controlar de manera que compense las variaciones de la fuente y permita obtener una salida de amplitud constante. Es posible usar valores de m_A superiores a 1 sin embargo la relación entre las amplitudes deja de ser lineal.

3.4.6 Inversores de onda senoidal pura

Como se mencionó en apartados anteriores los inversores de onda senoidal pura tienen como característica principal su bajo índice de distorsión armónica lo cual implica que su salida representa de manera fiel una senoidal prácticamente ideal. Dichos inversores utilizan filtros a su salida y técnicas de reducción de armónicos para lograr ese objetivo. Aquí se listan brevemente algunas de las topologías que utilizan esta clase de inversores:

- **Inversores con esquema PWM:** Estos inversores utilizan alguno de los distintos esquemas de modulación por ancho de pulso para crear una salida con cierto grado de distorsión armónica, la calidad de la misma corresponderá a la técnica empleada para sintetizar la onda de salida. Dentro de lo posible se utilizan técnicas de eliminación de los armónicos más cercanos a la fundamental y se utiliza un filtro sintonizado a la salida del inversor para eliminar el resto de los armónicos espurios y obtener así una señal de salida de alta calidad. Para el caso de los inversores de aplicación fotovoltaica se utiliza comúnmente el esquema SPWM o alguna de sus variantes.
- **Inversores multinivel:** El concepto de los inversores multinivel consiste en utilizar varios elementos de conmutación en serie o interruptores con un número determinado de fuentes de CD para realizar la conversión de CD a CA mediante la síntesis de una forma de onda escalonada. Para aplicaciones fotovoltaicas dichas fuentes de CD corresponden a cada uno de los paneles solares con los que se cuenta. La conmutación de los elementos permite la adición en serie de las distintas fuentes de CD para así crear los distintos escalones y obtener una forma de onda de CA de mayor voltaje. Tienen la ventaja de contar con un bajo índice de THD sin embargo utilizan un mayor número de elementos de conmutación para su operación con respecto a otros tipos de inversores. Estos inversores también pueden utilizar esquemas de síntesis mediante PWM para reducir los armónicos innecesarios a su salida.

- **Inversores resonantes:** Esta clase de inversores basan su funcionamiento en la conexión, ya sea en serie o en paralelo, de redes con elementos capacitivos e inductivos con la carga. Se aprovechan las características resonantes de dichas redes, en especial el cruce por cero de la corriente en los elementos para activar y desactivar los elementos de conmutación, permitiendo así disminuir las pérdidas de potencia producidas por la conmutación de dichos elementos. Debido a la naturaleza de dichos circuitos resonantes se obtiene también una forma de onda de salida con un bajo índice de THD.

3.5 Medidor de consumo bidireccional

En este apartado se hará énfasis en los medidores watt-hora monofásicos que solo miden potencia activa. Éste tipo de medidores miden en realidad el **consumo**; que es el producto de la potencia por la unidad de tiempo, que en este caso particular es el Watt-hora (Wh). En los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red suministradora es necesario el uso de éste elemento, ya que así es posible medir cuanta energía ha sido entregada a la red.

3.5.1 Medidor watt-hora mecánico

La bobina de corriente se conecta en serie con la línea y la bobina de voltaje se conecta en paralelo con la línea. Ambas bobinas son enrolladas en un núcleo metálico con un diseño especial, de donde se obtienen dos circuitos magnéticos. Un disco ligero de aluminio se suspende en el entrehierro del campo de la bobina de corriente, el cual produce corrientes de Foucault o parásitas que circulan por el disco, tal como se muestra en la Figura 3-14.

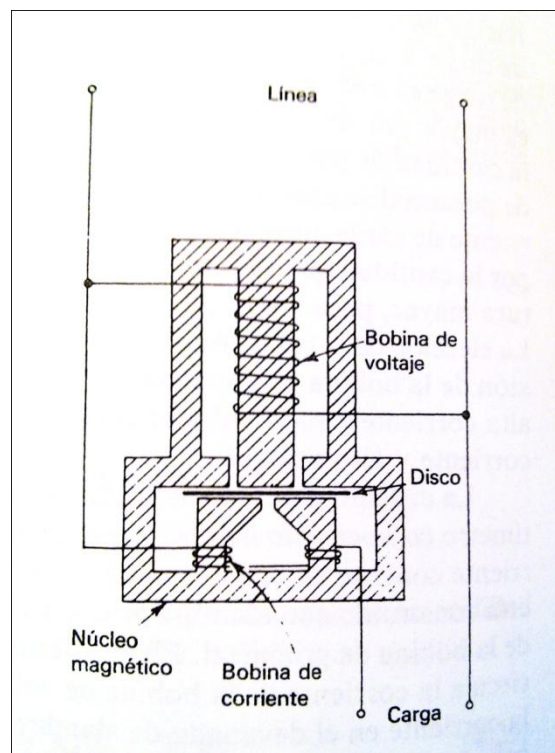


Figura 3-14 Elementos del medidor Watt-hora monofásico

La reacción de las corrientes parásitas y el campo de la bobina de voltaje crean un par en el disco, haciendo que éste gire. El par desarrollado es proporcional a la intensidad de campo de la bobina de voltaje y las corrientes inducidas en el disco, la cual es función de la intensidad de campo de la bobina de corriente. El número de vueltas del disco es proporcional a la energía consumida por la carga en un determinado tiempo y se mide en términos de kilowatts-hora (kWh). El eje que soporta al disco de aluminio se conecta por medio de un arreglo de engranes a un mecanismo de relojería situado junto a la carátula del medidor; esto proporciona una lectura calibrada en forma decimal del número de kWh.

Dos pequeños imanes permanentes proporcionan el amortiguamiento del disco. Se localizan de forma opuesta en el borde del disco. Cuando el disco gira, dichos imanes inducen una corriente. Esta corriente inducida por los campos magnéticos de los pequeños imanes permanentes amortigua el movimiento del disco. Tal como se muestra en la Figura 3-15.

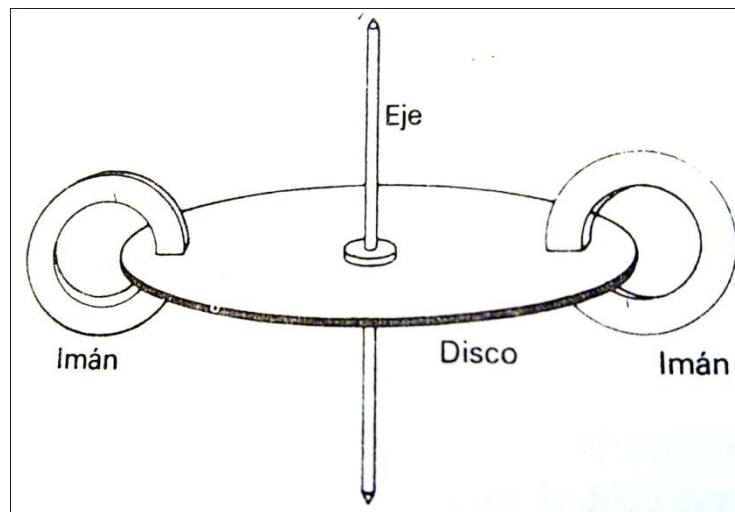


Figura 3-15 Imanes para el amortiguamiento del disco

Bajo el principio de funcionamiento el disco puede girar en ambos sentidos, lo que hace que éste tipo de medidores sean bidireccionales. Esta característica se ve limitada por el mecanismo de las manecillas, ya que éstas no giran en sentido contrario. Para que sea totalmente bidireccional es necesario un mecanismo especial para que funcione en ambos sentidos. El medidor que comúnmente se utiliza es el mostrado en la Figura 3-16.



Figura 3-16 Medidor electromecánico de consumo eléctrico

3.5.2 Watthorímetro electrónico

Para algunos de los esquemas de generación analizados en el presente trabajo se vuelve de suma importancia hablar de la exactitud de las mediciones del consumo de energía total del usuario, en especial en el caso de que el usuario se encuentre dentro del esquema de pago por consumo neto, en el cual el cobro de energía consumida durante el periodo, depende de la cantidad de energía que la red eléctrica convencional haya suministrado al usuario y de la cantidad de energía que el usuario haya suministrado hacia la red suministradora. Dado lo anterior es razonable que se requiera no sólo un grado de exactitud mayor en las mediciones de consumo energético sino que también se requiera de la implementación de nuevas funcionalidades de medición que permitan un control de la calidad de la energía suministrada por ambas partes, (el usuario y la red eléctrica) además de otras funcionalidades que permitan la medición remota del consumo de energía. La electrónica moderna ha permitido la construcción de watthorímetros digitales que cuentan con una exactitud de $\pm 0.2\%$ y cuyo diseño permite no sólo la medición del consumo de energía sino además de otros parámetros de la calidad de la energía como el factor de potencia, potencia real y reactiva y registro de consumo entre otros además de incorporar nuevas funcionalidades que permiten una comunicación entre la compañía suministradora y el usuario.

La mayoría de los watthorímetros electrónicos utilizan para su funcionamiento, ya sea el procesamiento analógico de señales o procesamiento digital. El procesamiento de las señales se refiere al filtrado y multiplicación de los valores instantáneos de corriente y voltaje para la posterior extracción la información necesaria para medir el consumo y otros parámetros de la energía consumida. Para el caso de los watthorímetros que procesan las señales de manera analógica se utilizan multiplicadores de efecto Hall o de transconductancia para realizar el producto de las señales de corriente y voltaje, su funcionamiento a grandes rasgos se describe en la Figura 3-17.

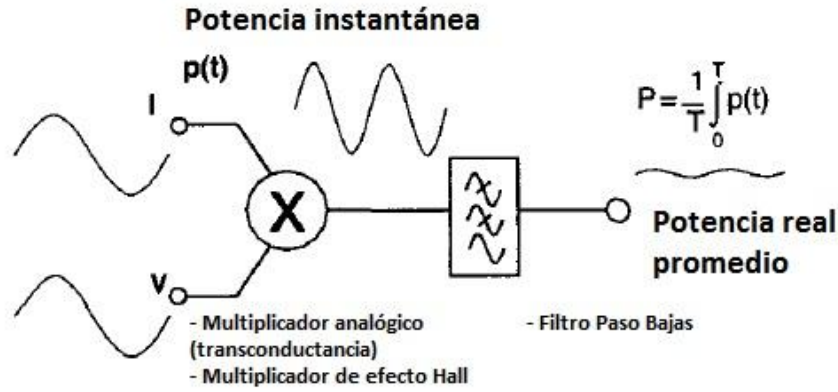


Figura 3-17 Principio de funcionamiento del medidor de consumo

Los wathhorímetros digitales por su parte utilizan convertidores analógico-digitales (ADC por sus siglas en ingles) para sondear las señales de corriente y voltaje y obtener así un valor digital de las mismas. Una vez con dicha información se utilizan circuitos digitales como microprocesadores o procesadores digitales de señales (DSP por sus siglas en ingles) para realizar el tratamiento de las señales. El diagrama a bloques de un wathhorímetro electrónico digital se puede apreciar en la Figura 3-18.

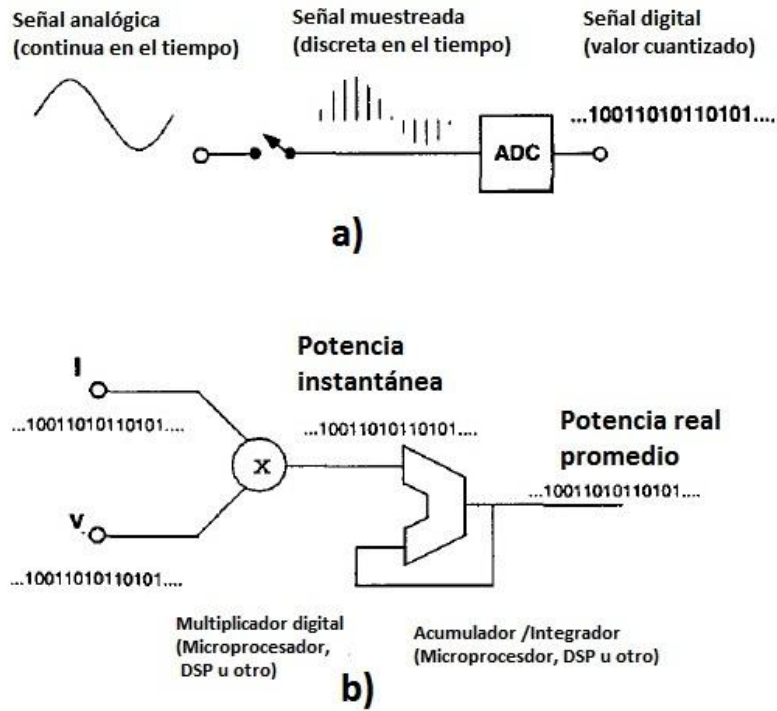


Figura 3-18 Wathhorímetro digital

En la actualidad se prefiere el uso de los wathorímetro electrónicos digitales debido a que ofrecen una mayor flexibilidad para ser reconfigurados o actualizados además de su menor costo y mayor escala de integración.

Una vez convertidos en una señal digital las formas de onda de voltaje y corriente pueden ser multiplicadas, filtradas e integradas para obtener los parámetros que se requieran por el medidor. En la Figura 3-18 se muestran los bloques básicos de construcción de un wathorímetro electrónico digital de arquitectura genérica.

En el diagrama se pueden apreciar las señales de entrada del wathorímetro, en este caso las señales de corriente y voltaje, las cuales son convertidas mediante transductores a señales equivalentes de voltaje para que sean manejables para los convertidores analógico-digitales. Una vez obtenido el valor digital de las mismas son procesadas mediante circuitos digitales para extraer la información necesaria (potencia activa, reactiva, valores RMS, etc.) Asimismo es necesario un módulo de memoria no volátil para almacenar la información necesaria como coeficientes de calibración, registros de consumo de energía y el código del programa que utilizara el medidor. También es necesario un módulo monitoreo de la fuente de alimentación del medidor y un temporizador de supervisión del programa (watchdog) para asegurar un correcto funcionamiento del medidor, especialmente cuando este se conecta o se desconecta de la fuente de alimentación. El medidor cuenta también con una pantalla para mostrar la información de consumo al usuario. Se pueden añadir módulos de comunicación a la construcción del medidor para implementar funciones de lectura automática remota (AMR por sus siglas en inglés).

Como se mencionó anteriormente los circuitos digitales se encargan del procesamiento de las señales cuantizadas de entrada pudiendo integrarse a la arquitectura del medidor un microprocesador o más frecuentemente un DSP. En ambos casos se requiere que el diseñador del medidor escriba el software necesario para extraer la información requerida de las señales.

El diseño modular del wathorímetro permite actualizaciones de software “en sitio” para añadir nuevas funcionalidades al medidor, además es posible utilizar los módulos de procesamiento digital, ya sea el microprocesador o el DSP, para manejar las funcionalidades extras que pudiera implementar el medidor como comunicación con la empresa suministradora de energía y módulos de prepago, como se muestra en la Figura 3-19.

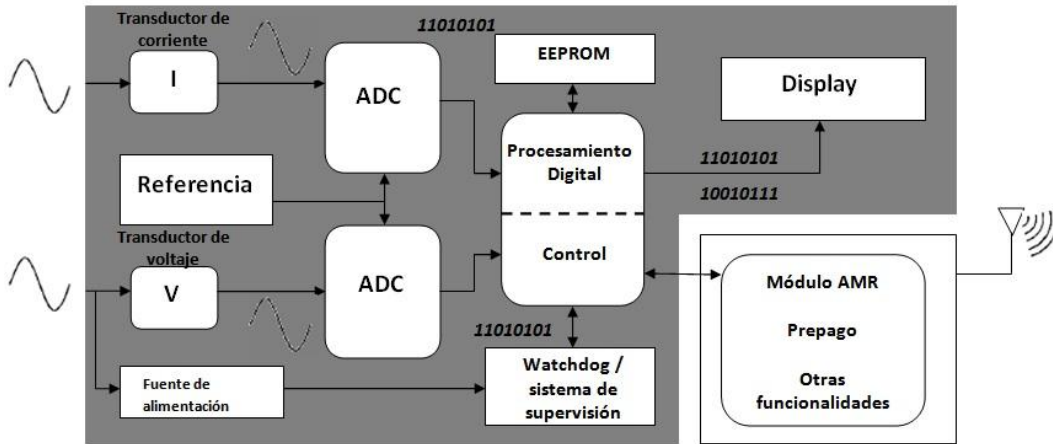


Figura 3-19 Diagrama de bloques de un wathorímetro digital

3.6 Dimensionamiento del sistema

Para el correcto diseño de un sistema de generación eléctrica basado en celdas fotovoltaicas, es necesario considerar; en primer lugar las especificaciones a cumplir de acuerdo a las cargas que estén conectadas al sistema de generación y a la aplicación en el sistema. Para el caso del presente trabajo se considerará la aplicación de uso residencial; ya sea en aquellas que operen de forma aislada o en forma conjunta con la red suministradora.

Cabe destacar que una buena manera de reducir la carga a suministrar y por tanto los costos, se debe tener un uso eficiente de la energía. Al hacer un mejor uso de la energía en el hogar, es posible reducir costos. Esto depende tanto de los hábitos de consumo como del uso de equipos eficientes.

Se presenta aquí una metodología general de diseño para un sistema de generación con respaldo de baterías. Dicha metodología se puede aplicar con las pertinentes modificaciones para el resto de las configuraciones de sistemas de generación que se estudian en el presente trabajo.

3.6.1 Determinación de la carga promedio

Una vez establecido que el sistema de generación será utilizado en aplicaciones residenciales, lo siguiente es delimitar las cargas que alimentará el sistema y establecer los requerimientos de energía de dichas cargas a fin de asegurarse que el diseño del sistema sea capaz de satisfacer dichos requerimientos. Una metodología de pasos sugeridos para esto se presenta a continuación:

- Identificar las cargas conectadas al sistema de generación: será necesario determinar si todo el suministro eléctrico de la residencia será proporcionado por el sistema fotovoltaico o sólo ciertas aplicaciones serán conectadas al sistema
- Determinar la demanda de energía de la carga: se procede a identificar los requerimientos de energía de cada carga de acuerdo a su voltaje, corriente y potencia

de operación, así como del tiempo promedio de uso diario. En el caso en que las cargas tengan un esquema de uso diferente de acuerdo a los meses o temporadas del año esto se deberá tomar en cuenta para la determinación de la demanda promedio diaria. Para las aplicaciones residenciales se asume que todas las cargas conectadas al sistema operan con CA, sin embargo es posible conectar cargas en CD.

- Calcular los amperes-hora (Ah) y el esquema de horas de uso diarias para cada carga y obtener la demanda total sumando todas las cargas.
- Calcular la corriente de entrada de CD al inversor en Ah la cual se puede obtener de la potencia de entrada en CD del inversor. La potencia de entrada de CD se puede obtener dividiendo la potencia total requerida en CA entre la eficiencia de inversor, es decir:

Ecuación 3.20

$$\frac{\text{Potencia total en CA}}{\text{Eficiencia del inversor}} = \text{Potencia total en CD}$$

- Tomar en cuenta las pérdidas en el cableado y las pérdidas debido a la eficiencia de carga y descarga de las baterías para obtener la demanda total corregida en Ah. Esto es:

Ecuación 3.21

$$\frac{\left(\frac{\text{Demanda total en CD}}{\text{Factor de eficiencia por pérdidas en el cableado}} \right)}{\text{Factor de eficiencia debido a las baterías}} = \text{Demanda total corregida en CD}$$

La demanda total corregida representa la cantidad de energía en Ah que deben entregar las baterías para poder alimentar las cargas conectadas al sistema, asumiendo que la configuración del sistema de generación usa baterías.

3.6.2 Determinación del banco de baterías

Una vez obtenida la demanda total de energía es necesario pasar al diseño del banco de baterías. La capacidad que será necesario instalar estará determinada principalmente por la demanda total de las cargas y la localidad en la cual será instalado el sistema de generación. Como regla general los lugares con mayores valores de irradiación solar necesitan una menor cantidad de baterías instaladas. Una metodología sugerida para determinar la capacidad del banco de baterías requerida se presenta a continuación:

- Determinar el número de días de almacenamiento requeridos: para el caso de aplicaciones residenciales se puede considerar la gran mayoría de las cargas como no críticas (es decir cuya disponibilidad requerida es menor al 95% del tiempo) y por lo tanto se puede aplicar la expresión siguiente para calcular el tiempo de almacenamiento que deberá proporcionar el banco.

Ecuación 3.22

$$\text{Días de almacenamiento requeridos} = -0.48T_{\min} + 4.58$$

Donde T_{\min} representa el menor número de horas pico de Sol mensuales para la inclinación seleccionada del arreglo fotovoltaico, es decir para el mes que el arreglo recibe la menor cantidad de insolación directa. Este valor puede ser ajustado a discreción en caso de que existan variaciones notables de la demanda de energía de acuerdo a la temporada del año. Los valores de insolación directa mensuales para diferentes localidades pueden ser encontrados en diversos manuales de instalaciones fotovoltaicas.

- Calcular la capacidad de almacenamiento de energía requerida en Ah: Esto se logra mediante la aplicación de la siguiente expresión:

Ecuación 3.23

$$\text{Capacidad requerida en Ah} = (\text{Demanda total corregida en CD})(\text{Días de almac. requerido})$$

- Fijar el valor del nivel de descarga máximo permitido para las baterías: el valor a fijar depende en gran medida del tipo de química de las baterías que se planeen utilizar, de ponderaciones de tipo económico y del tiempo de vida esperado de las baterías. Por lo general las baterías más costosas son capaces de soportar ciclos de descarga más profundos sin acortar la vida de la batería.
- Determinar si es necesario aplicar factores de corrección adicionales a la capacidad del banco debido a los efectos de la temperatura o a la tasa de descarga. También es necesario realizar ajustes en caso de que la corriente de carga proveniente del arreglo exceda la tasa de carga nominal especificada para las baterías.
- Dividir la capacidad corregida del banco entre la capacidad nominal de la batería seleccionada. A criterio del diseñador el valor obtenido puede ser redondeado hacia arriba o hacia abajo. El resultado es el número de baterías que contendrá el banco.

3.6.3 Determinación de la capacidad del arreglo fotovoltaico

Una vez que se ha determinado la demanda total corregida en CD que requieren las baterías para poder alimentar las cargas conectadas al sistema, es necesario determinar las dimensiones necesarias del arreglo, así como la orientación adecuada para optimizar el diseño del sistema:

- Determinar el ángulo de inclinación adecuado que reduzca la corriente que debe suministrar el arreglo: el hacer esto permite optimizar el diseño asegurando que el arreglo elegido es capaz de suministrar la corriente necesaria durante el o los meses de menor irradiación y además permite elegir el arreglo de menor tamaño posible para cumplir con la demanda total del sistema.

- Para cada mes del año es necesario calcular la corriente de diseño para cada uno de los ángulos que se incluirán en el estudio. La corriente de diseño se calcula usando la demanda total corregida en CD para el mes correspondiente y el valor de horas pico de sol por día para el mismo mes, utilizando el ángulo para el cual se desea calcular la corriente; esto es:

Ecuación 3.24

$$\text{Corriente de diseño} = \frac{\text{Demanda total corregida en CD para el mes}}{\text{Horas pico de sol diarias promedio para el mes}}$$

Esto se tabula para todos los meses del año para cada ángulo de inclinación a estudiar

- Determinar la corriente máxima de diseño para cada ángulo de inclinación y elegir el ángulo para el cual dicha corriente sea la mínima de entre todos los ángulos. El valor resultante es la corriente de diseño óptima.
- Ajustar la corriente de diseño por un factor de degradación debido al polvo y suciedad acumulada sobre los paneles durante su uso y debido al deterioro de los paneles por envejecimiento. Un factor de 0.9 es comúnmente utilizado en estos casos, es decir:

Ecuación 3.25

$$\text{Corriente de diseño óptima corregida} = \frac{\text{Corriente de diseño óptima}}{\text{Factor de ajuste}}$$

- Seleccionar un módulo fotovoltaico de la gama comercial ofrecida que sea capaz de trabajar adecuadamente bajo las condiciones de temperatura y de intensidad luminosa de la localidad de instalación del sistema. Asimismo revisar las características eléctricas para verificar que los módulos sean adecuados para la instalación, en especial la corriente nominal de salida y el voltaje de salida a máxima potencia.
- Determinar el número de módulos necesarios en paralelo dividiendo la corriente de diseño óptima corregida entre la corriente nominal de salida del módulo seleccionado.

Ecuación 3.26

$$\# \text{ Módulos en paralelo} = \frac{\text{Corriente de diseño óptima corregida}}{\text{Corriente nominal de salida del módulo}}$$

- Determinar el número de módulos necesarios en serie dividiendo el voltaje nominal de trabajo del sistema entre el menor voltaje de trabajo al cual se anticipa que trabajaran los módulos.

Ecuación 3.27

$$\# \text{ Módulos en serie} = \frac{\text{Voltaje nominal de trabajo del sistema}}{\text{Menor voltaje anticipado de trabajo de los módulos}}$$

- El número total de módulos será la multiplicación del número de paneles en paralelo por el número de paneles en serie.

También es recomendable analizar las opciones de diseño del arreglo de paneles de acuerdo a su viabilidad económica ya que puede ser posible que dos configuraciones de arreglos tengan rendimientos similares y uno de ellos sea más factible de adquirir en términos económicos.