

## Capítulo 4 Análisis de las configuraciones propuestas para sistemas fotovoltaicos en el sector doméstico

Existen distintos tipos de configuraciones para sistemas fotovoltaicos, desde la utilización de otras fuentes generadoras para crear híbridos, hasta la utilización directa de la celda fotovoltaica a la carga. Para definir los alcances de este capítulo tenemos que considerar que está dedicada al sector doméstico; donde las cargas están diseñadas para las características con las que la compañía suministradora entrega la energía (tensión y frecuencia son dos de las características principales que nos interesan). Al tener en cuenta estos factores, definiremos el alcance de éste capítulo, donde se analizará al sistema fotovoltaico como isla generadora o conectado a la red suministradora para entregar a la red excedentes de energía. Se analizarán este tipo de sistemas fotovoltaicos desde un punto de vista meramente descriptivo haciendo notar las ventajas y desventajas que éstos presenten en las distintas configuraciones propuestas.

### 4.1 Isla generadora

El esquema básico para este tipo de sistema tiene los siguientes elementos principales:

- Paneles o arreglo fotovoltaico
- Controlador de carga de baterías
- Baterías
- Inversor

La idea es alimentar una carga sin necesidad de tener alguna otra alimentación externa como la red eléctrica o alguna especie de generador. Además de que la carga no recibirá energía de alguna otra fuente, solamente del sistema fotovoltaico.

Para este sistema, como isla generadora, se llevará a cabo el análisis con baterías y sin baterías.

#### 4.1.1 Con baterías

Este sistema es uno de los más comunes, donde se alimentan cargas en corriente alterna. Los elementos son los que se muestran en la Figura 4-1.

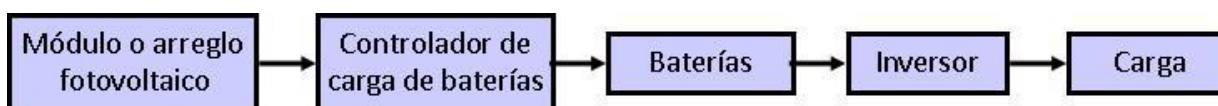


Figura 4-1 Elementos básicos del sistema fotovoltaico con baterías

Como se puede observar el sistema está compuesto por cuatro de los elementos analizados en el Capítulo 3; que son: módulo o arreglo fotovoltaico, controlador de carga de batería e inversor. Éste sistema nos asegura que tendremos en la carga las características necesarias, como lo son voltaje y frecuencia, como ésta las requiere.

Esta configuración se utiliza cuando se requiere alimentar cargas cuya disponibilidad debe superar el 99% de tiempo. Para lo cual se utiliza el banco de baterías que respalda el suministro de energía eléctrica en los casos en que el arreglo fotovoltaico no puede suministrar la energía necesaria. Para esta configuración se considera que el sistema no se encuentra interconectado a la red suministradora de manera que toda la demanda de energía recae en los arreglos fotovoltaicos y el banco de baterías.

Esta configuración es notablemente más robusta debido al banco de baterías, el controlador de carga así como los elementos de protección y conmutación necesarios para la interconexión de los elementos del sistema. Las cargas del sistema pueden ser de DC o AC en cuyo caso se requiere de un inversor adecuado. Por lo regular el controlador de carga incluye elementos de supervisión del sistema y elementos de conmutación que eligen el suministro de energía (arreglo fotovoltaico o baterías) en base al estado del arreglo y al estado de las baterías.

#### 4.1.2 Sin baterías

El sistema básico es como se muestra en la Figura 4-2:

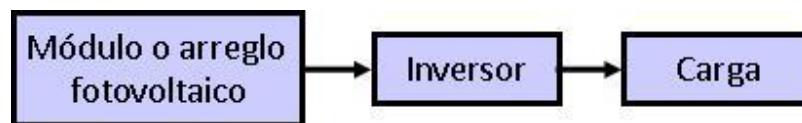


Figura 4-2 Elementos básicos del sistema fotovoltaico sin baterías

Es un sistema en realidad muy sencillo con solo dos elementos mencionados en el Capítulo 3. Esta clase de configuración se utiliza por lo regular en aplicaciones cuya disponibilidad no es crítica, ya que la falta de respaldo del suministro eléctrico reduce de manera drástica el tiempo efectivo de operación del sistema, además de hacerlo completamente dependiente de las condiciones de irradiación solar. La simplicidad del sistema así como el reducido número de componentes que requiere para operar es una de las grandes ventajas de esta configuración debido a su bajo costo de adquisición y fácil instalación.

El sistema se compone únicamente del arreglo fotovoltaico que suministrará toda la energía a las cargas. Las cargas del sistema pueden operar en DC o en AC. En el caso de que las cargas se alimenten con corriente alterna es necesario contar con un inversor de voltaje que cumpla los requerimientos mínimos para las cargas especificadas. En ambos casos es necesario tomar en cuenta el voltaje mínimo de operación del inversor y/o de las cargas en DC así como la potencia total que demandan las cargas para asegurar que el arreglo fotovoltaico es capaz de cumplir dichos requerimientos cuando existan condiciones de irradiación favorables.

Ya que esta configuración no interactúa con la red suministradora es posible utilizar un inversor simple de onda senoidal modificada para reducir el costo del sistema (sólo si la aplicación lo permite, de lo contrario deberá utilizarse un inversor de onda senoidal pura)

Aunque no es necesario para el funcionamiento del sistema, se puede instalar un módulo de control para monitorear el estado del sistema.

Cabe mencionar que esta configuración a menudo se combina con otras fuentes generadoras, ya sean renovables o no, especialmente con generadores eólicos o generadores a base de gas natural o gasolina con lo cual se satisface la demanda de energía en aquellas situaciones cuando no exista suficiente irradiación para energizar las cargas.

### **4.1.3 Comparativa entre los dos sistemas**

A continuación se hará un análisis de ambos sistemas con sus ventajas y desventajas.

#### **4.1.3.1 A nivel sistema**

El hecho de que se tengan baterías permite al sistema funcionar cuando los módulos fotovoltaicos no generan energía (en ausencia de Sol). Por lo tanto, es un sistema autosuficiente que puede tener una continuidad de servicio eléctrico en cualquier momento.

Ya que el sistema sin baterías requiere menos elementos, será menos costoso que teniendo baterías, ya que al eliminar baterías nos quitamos el costo de las baterías y del controlador de carga de baterías.

#### **4.1.3.2 Módulo o arreglo fotovoltaico**

Dependiendo el caso, se instalará un módulo o un arreglo dependiendo la capacidad de potencia que se requiera. Para éste análisis se tomará en cuenta que se tendrá un voltaje fijo, que será el que entregue un solo módulo. Para el arreglo se conectarán en paralelo, tratando de obtener la mayor cantidad de corriente posible.

Para ambos sistemas, el módulo o arreglo fotovoltaico, es igual a sabiendas que no generará cuando no existe radiación alguna. El dimensionamiento de éste elemento depende totalmente de la carga a alimentar.

#### **4.1.3.3 Controlador de carga de baterías**

Al no tener baterías no es necesario el uso de éste dispositivo; el sistema se vuelve más sencillo de usar y de instalar y menos costoso.

#### **4.1.3.4 Baterías**

La decisión de incluir o no las baterías dentro del sistema depende de la aplicación. En el sistema donde no existe manera de almacenar energía, solo podrá ser usado siempre y cuando haya radiación incidente sobre las celdas fotovoltaicas, de otra manera el sistema queda inutilizado. En cambio cuando existen baterías dentro del sistema, la energía estará disponible cuando haya ausencia de radiación sobre las celdas fotovoltaicas.

Se debe hacer notar que para que las baterías puedan almacenar energía, las celdas fotovoltaicas deben tener mayor capacidad que la que va a requerir la carga. Esto con el fin de que haya suficiente energía para alimentar tanto a la carga como a las baterías.

Dependiendo de la aplicación se deben considerar los costos, ya que si se pretende alimentar una carga durante la presencia del Sol, no será necesario el almacenamiento de energía.

#### **4.1.3.5 Inversor**

Este es uno de los elementos más importantes en los sistemas fotovoltaicos ya que prácticamente todas las cargas del hogar son alimentadas en corriente alterna (independientemente de que muchos de ellos internamente funcionen con corriente directa). Éste elemento al no estar conectado a la red suministradora, en este tipo de sistemas fotovoltaicos, será menos costoso que si tuviese que estar conectado a la red suministradora. Esto se debe a que al no tener que sincronizarse con la red suministradora, los circuitos de control son más sencillos.

### **4.2 Conectado a la red suministradora**

El 28 de noviembre de 2008, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), donde se establece como objetivo, entre otros, regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica. *(Véase Anexo 1)*.

Además el 2 de septiembre de 2009, se publicó en el DOF el Reglamento de la LAERFTE (RLAERFTE), en el que se establece que la Comisión Reguladora de Energía expedirá diversos instrumentos regulatorios para la generación renovable y la cogeneración eficiente. *(Véase Anexo 2)*.

Mediante Resolución RES/176/2007 de fecha 7 de junio de 2007, la Comisión Reguladora de Energía aprobó el Modelo de Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar a Pequeña Escala. *(Véase Anexo 3)*.

Se deben destacar las siguientes cláusulas en el Modelo de Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar a Pequeña Escala:

- En su cláusula quinta, usuarios con servicio de uso residencial está permitido como máximo 10 kW de potencia instalada en uso sistema fotovoltaico.
- En su cláusula séptima, los medidores y los equipos de medición a ser usados para medir la energía entregada por el generador al suministrador y la que entregue el suministrador al generador serán instalados por el suministrador a costa del generador. Los medidores a instalar tendrán la capacidad de efectuar la medición neta entre la energía eléctrica entregada por el Suministrador y la energía eléctrica entregada por el

generador al suministrador. En razón de ello, el generador únicamente pagará la diferencia entre el costo del equipo necesario para realizar la medición neta y el costo del equipo convencional que instalaría el suministrador para la entrega de energía eléctrica que corresponda.

- En su cláusula novena, para fines de facturación, el consumo de kWh del generador, se determinará como la diferencia entre la energía eléctrica entregada por el suministrador y la entregada por el generador al suministrador.

Cuando la diferencia sea negativa, se considerará como un crédito a favor del generador que podrá ser compensado dentro del periodo de 12 meses siguientes. De no efectuarse la compensación en ese periodo, el crédito será cancelado y el generador renuncia a cualquier pago por este concepto.

Cuando la diferencia sea positiva, se considerará como un crédito a favor del suministrador y se facturará en la tarifa aplicable según el contrato mencionado en la cláusula octava.

Teniendo en cuenta todos los lineamientos del Modelo de Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar a Pequeña Escala, se puede hacer uso de un sistema fotovoltaico conectado a la red suministradora con un medidor bidireccional.

Esta configuración requiere que el sistema esté conectado a la red suministradora y presenta algunas características que lo hacen atractivo en términos económicos para el usuario. En este caso las cargas son alimentadas utilizando la energía generada por los arreglos fotovoltaicos y en caso de ser necesario se complementa utilizando la energía de la red suministradora. Durante horas de baja demanda por lo general el sistema provee energía a la red suministradora mientras que en periodos de alta demanda es la red suministradora la que provee de energía al sistema. El consumo neto por parte del usuario se calcula como una diferencia entre la energía recibida de la red suministradora y la energía entregada por parte del sistema hacia la misma. Dependiendo del esquema de cobro adoptado por la compañía suministradora puede existir alguna bonificación por unidad de energía (kWh) aportada hacia la red suministradora.

En el caso de México y de acuerdo a los lineamientos contenidos en el Modelo de Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar a Pequeña Escala no existe dicha bonificación y el consumo neto que el usuario paga a la compañía (o tenga como crédito en caso de que la diferencia resulte negativa) suministradora (en este caso CFE), es la diferencia entre la energía recibida por medio de la red utilitaria controlada por CFE y la energía aportada por medio del sistema de generación eléctrica solar del usuario a la red suministradora.

Dado que el sistema de generación se encuentra se encuentra conectado y operando de manera conjunta con la red suministradora, por lo general la compañía suministradora requiere que la calidad de la energía aportada hacia la red por parte del sistema de generación del

usuario cumpla con ciertos requisitos de calidad de la energía. Para cumplir con lo anterior se requiere de componentes más robustos y con más funcionalidades en el sistema de generación, en especial el inversor, los sistemas de monitoreo del sistema (que en la mayor parte de los casos se encuentran integrados en el controlador de carga) y algunos componentes de protección y conmutación.

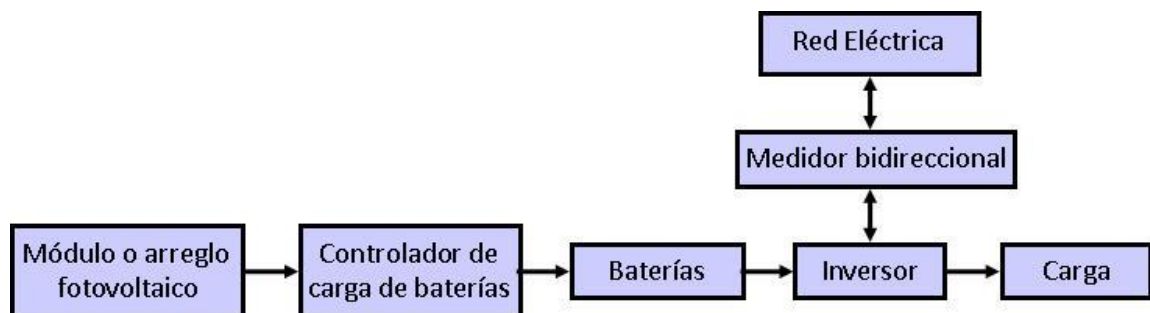
Con base en lo anterior CFE establece las especificaciones técnicas requeridas para la interconexión de esta clase de sistemas de generación fotovoltaica con el sistema eléctrico nacional en el documento “Requisitos técnicos para la interconexión de fuentes distribuidas de generación en pequeña escala” (Véase Anexo 4). En dicho documento se detallan los requerimientos de control y protección con los cuales debe contar el sistema de generación para garantizar que la energía producida por el mismo tiene la calidad adecuada para ser vendida hacia el sistema eléctrico nacional. También se detallan en el documento las condiciones bajo las cuales el sistema de generación deberá de salir de operación y volver a reconectarse en caso de fallas o perturbaciones en la red de distribución.

El esquema básico para este tipo de sistema tiene los siguientes elementos principales:

- Paneles o arreglo fotovoltaico
- Controlador de carga de baterías
- Baterías (puede o no llevarlas el sistema, dependiendo de los requerimientos del usuario)
- Inversor
- Medidor bidireccional

#### 4.2.1 Con baterías

El sistema se conforma de la siguiente manera:



Como se puede observar el sistema tiene todos los elementos mencionados en el Capítulo 3. Éste sistema es muy completo y dependiendo de la capacidad instalada será capaz de entregar energía a la red suministradora.

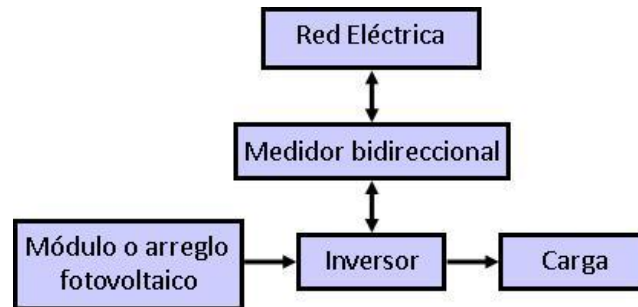
Esta configuración cuenta además con las ventajas de tener un banco de baterías. El banco puede ser utilizado como respaldo de energía en caso de que la red utilitaria sufra algún fallo que imposibilite el suministro eléctrico a la residencia en cuyo caso entrará en

operación el suministro de las baterías para satisfacer la demanda de energía. Esto es especialmente útil para aquellas aplicaciones residenciales que se consideren críticas o como forma de protección ante los fallos en el suministro eléctrico.

Adicionalmente es posible utilizar el banco de baterías como forma de almacenamiento de la energía no aprovechada proveniente del arreglo en periodos de poca demanda de energía y/o de gran irradiación solar aunque cabe señalar que por lo regular esta última posibilidad se utiliza de forma infrecuente ya que por lo general se prefiere aprovechar dicha energía entregándola hacia la red utilitaria local. Sin embargo existen casos en que resulta eléctricamente más eficiente transferir dicha energía al banco, y se pueda tener cierta independencia de la red suministradora cuando ésta, debido a fallas, no pueda entregar energía en la noche.

#### 4.2.2 Sin baterías

El arreglo del sistema es el siguiente:



Es un sistema sencillo que depende totalmente de la incidencia del Sol. En ausencia de radiación solar la red suministradora se encargará de alimentar a la carga.

#### 4.2.3 Comparativa entre los dos sistemas

A continuación se hará un análisis de ambos sistemas con sus ventajas y desventajas.

##### 4.2.3.1 A nivel sistema

El sistema con baterías tiene la ventaja de que se puede utilizar cuando no exista la incidencia del Sol en las celdas fotovoltaicas. Además cuando las baterías estén completamente cargadas la energía excedente será enviada a la red suministradora. Al contar con un medidor bidireccional, la energía tomada de la red suministradora se restará de la energía entregada a la red. Lo que dependiendo la aplicación y manera de uso de la energía podríamos tener una compensación económica al dejar de pagar cierta cantidad de energía de la red suministradora. Lo que nos podría ayudar a tener un menor tiempo de recuperación de la inversión en el sistema fotovoltaico.

El sistema sin baterías es mucho más barato que el sistema con baterías, debido a la ausencia del controlador de baterías y las mismas baterías. Éste tipo de sistema, dependiendo como sea usado tendrá la ventaja que durante el día entregará energía a la

carga o a la red suministradora. Pero durante la noche será forzoso el uso de la energía de la red suministradora. Si consideramos que durante la noche se tiene un buen uso de la carga, mientras que en el día casi no se utiliza energía para la carga, podríamos considerar que habrá una compensación de energía utilizada de la red suministradora y el sistema fotovoltaico. Además al no hacer uso de las baterías reducimos el impacto al medio ambiente que éstas puedan producir al ser desechadas.

Si tomamos en cuenta la cláusula novena del Modelo de Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar a Pequeña Escala, ya que la razón entre la energía entregada y absorbida a la red suministradora es uno a uno, podríamos decir que tenemos baterías virtuales en la misma red suministradora. Ya que si durante el día entregamos excedentes a la red tendremos saldo a favor, y al utilizar la energía de la red suministradora durante la noche tomaremos energía de las baterías virtuales. Como si hiciésemos un depósito en el banco.

#### **4.2.3.2 Módulo o arreglo fotovoltaico**

Para este tipo de sistemas se deben tener en cuenta algunos aspectos adicionales para calcular la cantidad promedio de energía que puede suministrar el arreglo. En principio debe tomarse en cuenta la potencia total que es capaz de suministrar el arreglo y posteriormente multiplicarla por la cantidad promedio de insolación diaria para obtener la potencia promedio generada por el arreglo diariamente [kWh/día] con lo cual fácilmente se puede convertir a otras unidades multiplicando por el tiempo correspondiente. Dado lo anterior se pueden hacer proyecciones de la cantidad de energía entregada hacia el arreglo para fines de análisis económico y para dimensionar correctamente el arreglo de acuerdo a las necesidades del usuario. Es necesario tomar en cuenta que de la cantidad obtenida anteriormente alrededor del 70% de la misma es entregada hacia la red utilitaria y el resto se consume en pérdidas en el inversor, los módulos y el cableado.

#### **4.2.3.3 Controlador de carga de baterías**

En este tipo de sistemas es muy importante este elemento cuando existen baterías, ya que de este dispositivo dependerá cuanta energía se enviará a la red suministradora y cuanta a las baterías. Una vez cargadas las baterías el excedente de energía se irá a la red suministradora.

Nuevamente la ventaja de no tener baterías en este sistema fotovoltaico, es que no será necesario el controlador de las baterías y por lo tanto será más barato el sistema.

#### **4.2.3.4 Baterías**

Al concebir éste tipo de sistema como un banco de energía, es cierto que al no tener baterías es más barato el sistema pero con la desventaja de que en la noche no se tendrá generación de energía y por lo tanto se depende totalmente de la continuidad del



servicio de la red suministradora. Al tener baterías se puede decir que tenemos independencia total de la red suministradora a cambio de un mayor costo.

#### 4.2.3.5 Inversor

El inversor en este sistema debe cumplir con ciertas características para entregar la energía tal como lo exige la compañía suministradora. Por lo regular entre dichos requisitos está un porcentaje muy bajo de distorsión armónica total en la señal de salida, sincronización en fase con la señal presente en la red suministradora y un estricto control de la frecuencia y voltaje de salida del inversor para que estos parámetros sean lo más apegados posibles a los de la red. El grado de exigencia de estos parámetros varía de acuerdo a los lineamientos que establezca el contrato de interconexión. Para satisfacer dichos lineamientos se requiere el uso de inversores de onda senoidal pura que además incluyan funcionalidades adicionales que permitan conocer las características de la señal presente en la red suministradora para poder empatar la forma de onda de salida de inversor con dicha señal. Este tipo de inversores son de mayor costo debido a los circuitos de control y monitoreo que utilizan.

De acuerdo a los lineamientos contenidos en el documento “Requisitos técnicos para la interconexión de fuentes distribuidas de generación en pequeña escala” (véase Anexo 4) CFE establece los parámetros con los que han de cumplir dichos inversores, ya que, como se ha señalado, son estos dispositivos los que cumplen las funciones de control y supervisión de la energía entregada al sistema en interconexión.

En dicho documento se establecen las protecciones y condiciones de operación que han de cumplir los dispositivos, a saber:

- Sincronía: Establece que el sistema de generación interconectado a la red de suministro de CFE no deberá causar una variación de tensión mayor al  $\pm 5\%$  en el punto de interconexión, es decir, que la señal de tensión de salida que proporciona el sistema de generación interconectado se encuentre en fase con la señal de tensión de la red suministradora.
- Protección por sobre voltaje y bajo voltaje: Establece los límites de tensión, tanto por bajo voltaje y sobre voltaje, a los cuales el sistema de generación deberá desconectarse de la red suministradora de CFE, así como los tiempos máximos de desconexión permitidos.
- Límites de operación en frecuencia: De manera similar al punto anterior indica los límites de frecuencia en los cuales puede operar el sistema de generación interconectado antes de salir de operación, así como los tiempos máximos de desconexión.

- Protección contra operación en isla: Establece que el sistema de generación interconectado deberá desconectarse de la red de distribución de CFE en caso de falla en el suministro eléctrico para evitar la operación en isla

#### **4.2.3.6 Medidor bidireccional**

Si queremos estar conectados a la red suministradora vale la pena invertir en este elemento. Nótese que no es necesario para el funcionamiento del sistema. Al tener este elemento y haciendo un contrato especial con la compañía suministradora vale la pena, ya que así al tener excedentes se reducirá el costo de la facturación por kWh consumido.

Además cabe destacar que en cuanto al “Modelo de Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar a Pequeña Escala”, en el servicio residencial no es tan exigente como en el de media escala. Por lo tanto es mucho más sencillo cumplir con los lineamientos técnicos que la compañía suministradora exija.