

# Consideraciones Mecánicas de Sistemas Solares Fotovoltaicos

Energía Integral S. de R.L. de C.V.  
Mauricio Zelaya Aguilar\*

25 de Febrero del 2015

## Introducción

Se tiene entendido que la función primaria de un sistema fotovoltaico (FV) es la conversión de luz solar en electricidad, entonces el rol e importancia de los aspectos mecánicos del sistema son ignorados. La gran mayoría de módulos son diseñados para que tengan una duración de 20 años o más.

Es además importante que las otras componentes del sistema, incluyendo las componentes mecánicas tengan una vida útil equivalente a la de estos módulos FV. Es recomendable que los requisitos del diseño mecánico del sistema sean consistentes con el rendimiento, así como también con la operación del sistema.

El diseño mecánico de un sistema FV involucra una variedad de disciplinas, más notablemente por parte de la Ingeniería Civil y Mecánica, hasta extenderse a la Ciencia de Materiales, Arquitectura e incluso Ingeniería Aeronáutica. De manera más específica los diseños mecánicos envuelven:

- Determinar las fuerzas mecánicas que actúan en el sistema.
- Seleccionar, dimensionar y configurar los miembros estructurales que soportaran estas fuerzas con un margen adecuado de seguridad.
- Seleccionar y configurar materiales que no se degraden o deterioren más de lo aceptable a lo largo de la vida del sistema.
- Locación, orientación y montaje del arreglo FV de manera que perciba de manera óptima la radiación solar, para de esa manera producir la mayor cantidad de energía eléctrica posible, además que opere sobre los rangos de temperatura aceptables para las celdas FV.

## Propiedades Mecánicas

El sistema FV, en particular el arreglo FV y su soporte estructural esta sujeto a una variedad de fuerzas mecánicas (estática y dinámica) las cuales producen esfuerzos internos y deformaciones.

## Esfuerzo ( $S$ )

Esta definido como fuerza por unidad de área. El *esfuerzo* ocurre cuando una fuerza  $P$  normal distribuida uniformemente actúa sobre un área seccional  $A$ . Puede ser calculado usando la sencilla ecuación

$$S = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Es responsabilidad del ingeniero primero estimar o calcular las fuerzas que actúan sobre el sistema FV y luego seleccionar el tamaño de los miembros de soporte estructurales de tal manera que la tensión máxima experimentada sea muy por debajo de los límites permitidos.

La más común fuerza estática actuando sobre arreglos FV y las estructuras de soporte es debido al peso mismo de los módulos, sistema de montaje, y en climas fríos nieve y hielo.

En adición a las fuerzas estáticas, el arreglo FV y su soporte estructural experimenta fuerzas dinámicas, más notablemente de cargas de viento.

Los cambios en la dirección y velocidad del viento, incluyendo los rápidos cambios asociados con ráfagas, complican la tarea del ingeniero estructural. En primer lugar, los cambios en la dirección del viento a menudo resultan en que un miembro estructural experimenta períodos alternados de tensión y compresión. En consecuencia, los miembros estructurales deben ser diseñados no sólo para resistir la tensión de tracción uniforme, sino también la compresión. En segundo lugar, las cargas dinámicas pueden dar lugar a un fenómeno conocido como fallo por fatiga.

## Deformación ( $\varepsilon$ )

Es otro concepto importante en la discusión de la resistencia de materiales. Recordando que el *esfuerzo* es una medida de la intensidad de la fuerza (i.e., fuerza por unidad de área), la *deformación* es una medida de elongación por unidad de longitud y puede ser definido por la ecuación

$$\varepsilon = \frac{\text{Elongación}}{\text{Longitud}} = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

Donde  $\delta$  =elongación y  $L$  =longitud.

\*mauricio.zelaya.aguilar@gmail.com

## Esfuerzo y Deformación

La figura (1) muestra una barra de longitud  $L$  y área seccional  $A$ . La fuerza  $P$  actúa uniformemente sobre el área seccional, poniendo la barra en tensión. El experimento es simple:

*Si se incrementa gradualmente la fuerza  $P$  de pequeños a grandes valores hasta la ruptura de la barra. Durante el experimento la **fuerza** y la **elongación** pueden ser medidos continuamente. Recordando que el **esfuerzo** es simplemente la fuerza por unidad de área y la **deformación** es la elongación por unidad de longitud, el esfuerzo puede ser graficado contra la deformación como se muestra en la figura 2.*

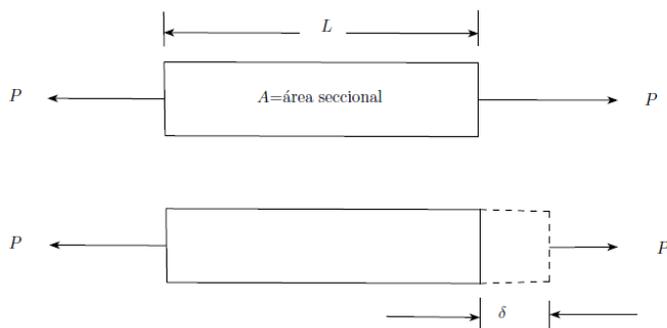


Figure 1:

El área bajo la curva *esfuerzo-deformación* tiene un significado físico especial, el cual es proporcional a la energía total requerida en la ruptura de la barra. Esta energía se refiere como la dureza del material.

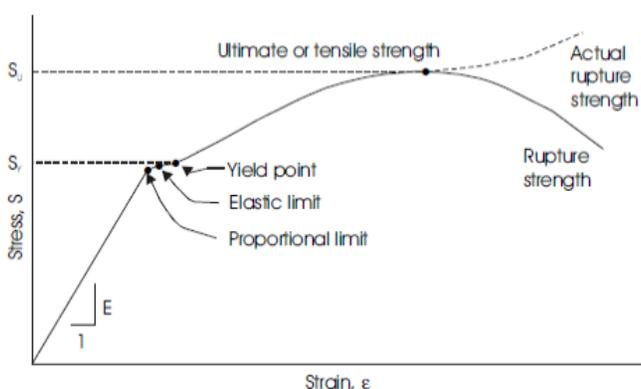


Figure 2:

Adicionalmente al *límite proporcional*, *límite elástico*, (*fuerza máxima*, *fuerza de ruptura*), otro parámetro importante obtenido de la curva *esfuerzo-deformación* es la pendiente de la porción de línea recta del gráfico desde el origen al límite proporcional. El cual es definido como el *módulo de elasticidad* (además conocido como el módulo de *Young*) y es usualmente representado por la letra  $E$ . Representa la relación entre el esfuerzo y la deformación en la parte lineal de la gráfica, que es donde la mayoría de los materiales estructurales

están diseñados para operar.

En forma de ecuación puede ser expresado como

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} = \frac{S}{\epsilon} \quad (3)$$

La ecuación (3) es conocida como la ley de *Hooke*. Un mejor nombre para  $E$  sería *módulo de rigidez*. Cuanto mayor sea el valor de  $E$ , menos el material se deforma para una determinada tensión. Para la mayoría de los materiales, el *módulo de elasticidad* es el mismo para la tensión y la compresión.

Para el caso unidimensional una fórmula usada para la elongación de la barra puede ser obtenido substituyendo para  $S$  (1) y para  $\epsilon$  (2) en (3), obteniendo

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (4)$$

La ecuación (4) nos muestra que la cantidad de elongación depende de la fuerza aplicada  $P$ , las dimensiones de la barra (longitud  $L$ , área  $A$ ) y el material de la barra representado por su rigidez  $E$ .

## Pandeamiento de Columna

La estructura usada al soportar un arreglo FV tiene una dimensión: su longitud, la cual es mucho más larga que las otras dimensiones. Para una columna hecha de un material con un módulo de elasticidad  $E$ , un momento de inercia mínimo (de su área seccional)  $I$  y longitud  $L$ , entonces existe una fuerza crítica de compresión  $P$ . Esta carga crítica es calculada usando la fórmula

$$P = \frac{EI\pi^2}{L^2} \quad (5)$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de *Euler*.

## Expansión Térmica y Contracción

Un cambio en la temperatura causa que los materiales se expandan o contraigan. Por ejemplo, la deformación lineal de un miembro estructural de longitud  $L$  puede ser representado por

$$\delta_t = \alpha L \Delta T \quad (6)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión lineal y  $\Delta T$  es la variación en la temperatura expresada en unidades consistentes con las unidades de  $\alpha$ .

## Fuerzas Actuando Sobre Arreglos Fotovoltaicos

### Consideraciones de Carga Estructural

En la mayoría de lugares alrededor del mundo, los efectos de la fuerza debido a la carga del viento

son mucho mayores que las otras fuerzas que actúan sobre la estructura sobre la que se colocan los módulos FV.

El estándar de la *American Society of Civil Engineers (ASCE)* nos proporciona instrucciones y formulas para computarizar los siguientes tipos de cargas:

- Cargas muertas
- Cargas vivas
- El suelo y la presión hidroestática
- Cargas de viento
- Cargas de nieve
- Cargas de lluvia
- Cargas de terremoto
- Cargas de hielo-la formación de hielo atmosférico
- Las combinaciones de las cargas anteriores

### Cargas Muertas

Las cargas muertas consisten en el peso de todos los materiales que son usados en la estructura de soporte, incluidos los pesos de los propios elementos estructurales.

Como ejemplo, considere un arreglo FV montado en el techo de un edificio. Los módulos están ligados estructuralmente juntos en paneles que utilizan el acero o el aluminio como miembros estructurales. El peso de los módulos se realiza por la estructura de soporte y se transmite a la estructura de la cubierta del edificio. El total de cargas muertas que el techo debe llevar es el peso combinado de los módulos, miembros estructurales que se utilizan para formar los paneles, accesorios de sujeción y soportes de montaje. Estas cargas pueden ser expresadas en libras por pie cuadrado (*PSF*) y se supone que actúan uniformemente sobre el área cubierta por el arreglo FV.

Las ecuaciones de equilibrio estático se pueden utilizar para determinar las fuerzas individuales en cada uno de los soportes que conectan los paneles en el techo. Para los sistemas FV, las cargas muertas son generalmente asumidas para actuar uniformemente sobre la estructura de soporte y se expresan en libras por pie cuadrado.

Las cargas muertas para sistemas fotovoltaicos generalmente caen dentro del rango de 2 a 5 PSF y, a pesar de que no se puede descartar, no plantean graves problemas estructurales para el ingeniero.

### Cargas Vivas

Las cargas vivas asociadas con sistemas FV son producidas por individuos, equipos y materiales durante la instalación, supervisión y mantenimiento. En el diseño de las estructuras para soportar cargas vivas, el ingeniero puede tratarlas como cargas distribuidas de manera uniforme, es decir, en libras por pie cuadrado, como cargas concentradas (*lb*) o como una combinación de cargas distribuidas y concentradas de manera uniforme. Para arreglos FV las cargas vivas se suponen por lo general que se distribuirán uniformemente y son pequeñas, del orden de 3 libras por pie cuadrado o menos.

### Cargas de Viento

La fuerza del viento que actúa sobre un arreglo FV es una fuerza aerodinámica. Como tal, sus magnitudes dependen particularmente de las propiedades de la atmósfera. Las propiedades atmosféricas incluyen presión estática, temperatura, viscosidad y densidad. De estas, la densidad es uno de los que más afecta las fuerzas mecánicas que actúan sobre el sistema FV. En una locación dada, la densidad se asume constante, la densidad varía con la altitud, decrece a la par que la altitud se incrementa. La densidad estándar del aire para la atmósfera al nivel del mar es  $0.00256 \text{ lb} - \text{s}^2 / \text{ft}^4$

El aire fluyendo sobre un arreglo FV produce dos tipos de fuerzas: fuerzas de presión normal a la superficie y fuerzas de fricción a lo largo de la superficie. Las fuerzas de fricción son simplemente fuerzas de rozamiento con la superficie resultado de la viscosidad del aire y su contacto con la superficie.

Para tener una mejor idea de la importante relación que afecta el flujo de aire sobre estructuras. Primero hay que asumir que el flujo de aire es *no viscoso*, lo cual implica que la viscosidad del aire es cero. Luego asumir que el flujo de aire es *incompresión* lo cual implica que la densidad del aire es constante. Finalmente, asumir que el flujo de aire es conservativo, lo cual implica que no hay otros procesos de disipación de energía. Con estas aseveraciones, la ecuación de momento lineal para flujo de fluidos se reduce a

$$\int \frac{1}{2} d(v^2) + \int g dz + \int \frac{dp}{\rho} = \text{Constante} \quad (7)$$

Donde  $v$  = velocidad del viento,  $g$  = aceleración debido a la gravedad,  $z$  = altitud o elevación,  $p$  = presión estática y  $\rho$  = densidad de masa. Integrando cada término se obtiene

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = \text{Constante} \quad (8)$$

Ignorando pequeños cambios de elevación en la vecindad del sistema FV y reordenando los términos obtenemos

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{Constante} \quad (9)$$

El término  $\frac{1}{2}\rho v^2$  se refiere a la presión dinámica. Esta importante relación entre las dos variables, presión estática y velocidad, es conocida como la ecuación de *Bernoulli*. Esto nos muestra que un incremento en la velocidad suele ser acompañado por la correspondiente disminución en la presión estática y viceversa.