

## Factibilidad técnica y económica de sistemas eléctricos operando bajo el esquema de red inteligente

**Abraham J. Sierra Delgado, Baltazar Laguna Belman, Osvaldo Rodríguez Villalón**

Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato

---

### Resumen.

En este trabajo se presenta un estudio de factibilidad técnico-económica al emplear un esquema de red inteligente a través del uso, diseño y aplicación de paneles fotovoltaicos, tendiendo a operar bajo un esquema de red inteligente. Se describirá el cálculo de la capacidad de paneles fotovoltaicos en el caso hipotético de 5 casas, para las cuales se estima un consumo de acuerdo a los componentes instalados, determinando capacidad del panel, batería e inversor. Dentro del esquema de red inteligente es muy importante el considerar la capacidad de la red de distribución a través del cálculo de la capacidad de integración del sistema eléctrico, mejor conocido por su nombre técnico como “hosting capacity”. El tópico es abordado de manera introductoria.

### I. Introducción.

La electricidad es la forma más versátil y más ampliamente utilizada de energía, y su demanda no deja de crecer en todo el mundo. Sin embargo, la generación de electricidad es la primera fuente de emisiones de dióxido de carbono, y por ello supone una importante contribución al cambio climático.

Para mitigar estas consecuencias en el cambio

climático, el sistema eléctrico actual necesita someterse a importantes cambios como dar paso a las fuentes de energía limpia.

Esto se puede hacer en una red inteligente o Smart grid, la red inteligente se puede ver de manera general como una red evolucionada que gestiona la demanda de electricidad de forma sostenible, fiable y económica, basada en una infraestructura avanzada, y adaptada para facilitar la integración de todos sus componentes.

Las redes inteligentes suministrarán más electricidad para atender la demanda creciente, mejorarán la fiabilidad y calidad de la generación, aumentarán la eficiencia energética y serán capaces de integrar en la red a las fuentes de bajas emisiones incorporándose las energías renovables (energía solar) y así responder a los desafíos ambientales. Otra de sus características es la bidireccionalidad. Es decir, la energía dejaría viajar en el canal único desde las grandes empresas productoras hasta los hogares, para convertir a los consumidores en productores que pueden donar sus excedentes privados a la red.

Los países del mundo con mayor recepción de luz solar al año son, en orden: China, Singapur, México, Australia e India. La radiación solar

promedio en el país es de 5 kilowatts hora por metro cuadrado, lo cual permitiría que las viviendas del territorio nacional recibieran suficiente energía solar para producir hasta 200 veces lo que consumen.

Con un área de 10 kilómetros por 10 kilómetros en el desierto, se podría generar suficiente energía para todo México.



Figura 1. Radiación solar en México según la IRENA Agency (2015).[3]

## II. Incremento de la capacidad de integración en redes de bajo voltaje (“hosting capacity”)

La capacidad de alojamiento es un enfoque transaccional que proporciona una forma de integrar la red de distribución con diferentes tipos de sistemas de energía.

Hoy en día, el despliegue de tecnologías de generación como los recursos fotovoltaicos y energía eólica en sistemas de energía eléctrica tiende a tener direcciones convencionales de flujo de energía.

Por lo tanto, es importante evaluar la capacidad del sistema para alojar a estos recién llegados sistemas de generación, sin exceder los límites de rendimiento operativo del sistema. En el sistema eléctrico, hosting capacity se está propuesto como la capacidad de absorción, que es capacidad fotovoltaica máxima que se puede instalar sin tener que reforzar ningún segmento del sistema de distribución.

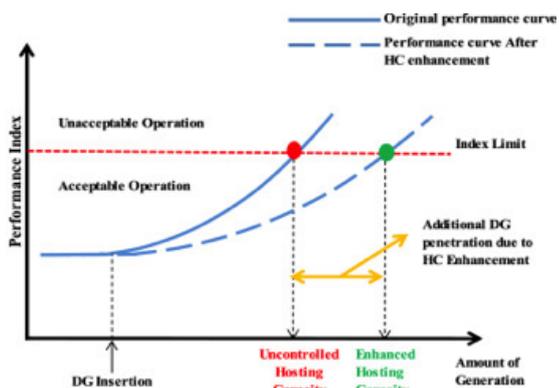


Figura 2. Concepto de HC y efecto de su mejora.[2]

## Coeficiente HC (HCC)

Este índice define la relación entre la energía reducida y la capacidad instalada por encima del HC inicial, para la comparación de los distintos esquemas de reducción.

## Localización HC

El Alojamiento de nuevos puntos de generación de distribución puede ser aceptado en algunas localizaciones, y otras no. El voltaje juega un papel importante en donde se definirá la localización de centro de alojamiento. Se puede observar en la Figura 2. [2][4].

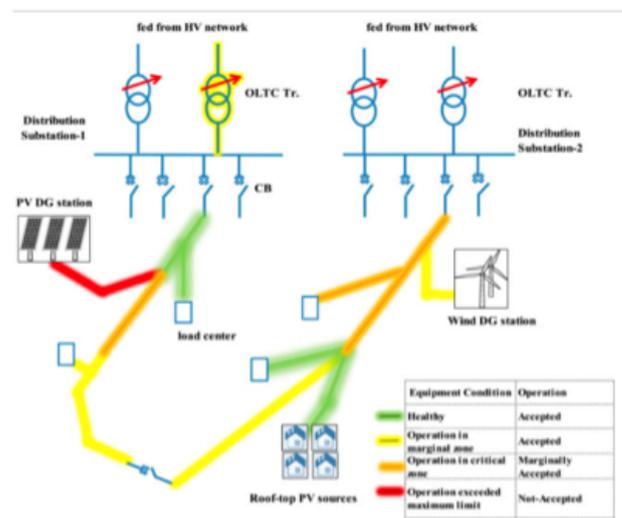


Figura 3. Mapa ilustrativo de HC. [2]

## III. CASO DE ESTUDIO

Se realizó un estudio técnico-económico de un caso de una red eléctrica de distribución consistente de 5 casas, en la cual se incluyó la conexión de la compañía suministradora, así como la generación mediante paneles fotovoltaicos. Se obtuvieron las características de consumo horario, perfil de demanda, rendimiento del panel fotovoltaico, rendimiento de la batería, análisis de tarifa eléctrica. [1]

### I. Perfil de consumo horario

Se realizó un análisis de los consumos de energía eléctrica en el sector residencial con el fin de saber cuánta energía es utilizada diariamente, así como la demanda horaria para hacer la correcta gestión energética de la Smart grid. Se obtuvo que una casa promedio consume un total de 27 kWh, considerando factor de rendimiento de conversión, pérdidas de cableado,

pérdidas por rendimiento de la batería la energía necesaria del sistema fotovoltaico será de 34 kWh.

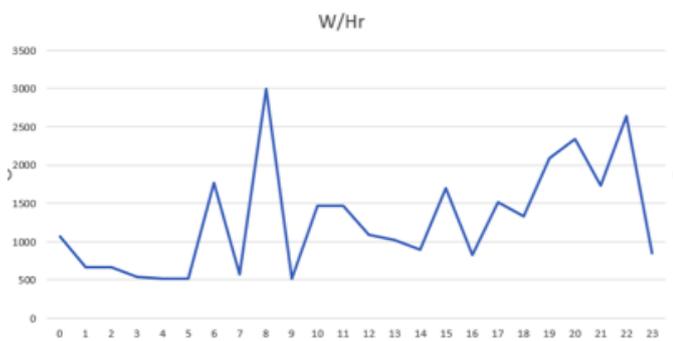


Figura 4. Consumo diario en una casa promedio.

## II. Dimensionamiento de la batería.

La fórmula básica para calcular la capacidad de la batería se obtiene multiplicando el número de días de autonomía por el consumo diario y dividido por la máxima profundidad de descarga.

Un factor importante es que la capacidad de la batería varía con respecto al régimen de descarga (la capacidad de la batería es mayor a corrientes de descarga muy bajas).

Los criterios de selección de una batería se pueden resumir en:

- Voltaje nominal del sistema
- Necesidades de regulación de carga
- Necesidades de capacidad y autonomía
- Capacidad de Ah al régimen de descarga
- Profundidad de descarga diaria y máxima
- Autodescarga
- Características de gaseo
- Rendimiento
- Efectos de la temperatura
- Dimensiones, peso y características estructurales
- Necesidades de mantenimiento
- Tiempo de vida
- Coste y garantías.

INFORMACION DE LA BATERIA	
MARCA:	FULMEN
MODELO	OPZ-1500
TIPO	PB-ACIDO VASOS DE 2V
VOLTAJE NOMINAL (V)	2
CAPACIDAD NOMINAL (Ah)	1500

En este caso de estudio se calcularon los parámetros y se seleccionó el siguiente sistema de reserva de energía de manera individual para cada residencia.

Consumo Ah corregido	Días de autonomía	Maxima profundidad de descarga	Correccion por temperatura
Ah/dia	(Dias)	60%	0.9
727.631	6		

Capacidad necesaria de batería.	Capacidad de la batería	Baterias en paralelo
(Ah)	1500	5.389
8084.78		

$$N^{\circ} \text{ baterias serie} = \frac{\text{Voltaje Nominal del sistema}}{\text{Voltaje nominal Batería}}$$

$$N^{\circ} \text{ baterias paralelo} = \frac{\text{Capacidad Necesaria batería}}{\text{Capacidad de una batería}}$$

## III. Dimensionamiento de generador fotovoltaico

El dimensionado de la batería se ha realizado en base al número de días de autonomía. El dimensionado del generador FV se basa en suministrar el consumo diario.

a) En primer lugar, se determinó el ángulo óptimo de inclinación del generador FV como aquel en el que se obtiene la mayor radiación en el peor mes del año. En este caso se utilizó el software “Sunny Design”, como herramienta para consulta de datos y cálculos.

Utilizando: Latitud fija, Agregando la mitad de la latitud, Restando la mitad de la latitud.

En base a los resultados obtenidos se llegó a la conclusión que el ángulo de inclinación más óptimo es de “Latitud Fija” con un ángulo de 20.7°.

b) Selección de panel, se determina a partir de pérdida de desempeño por temperatura. (se hace la comparación entre varios tipos de paneles para seleccionar el mejor)

Panel	Factor de perdidas por temperatura
Película delgada	-4.73%
Monocristalino	-0.47%
Policristalino	-4.73%

Haciendo la comparativa de los porcentajes de pérdidas de cada panel, tenemos una menor proporción de pérdidas en el panel de construcción monocristalina, así que se utilizará éste para realizar el análisis de dimensionamiento. El modelo del panel propuesto es Q. PEAK DUO L-G5.2 380-395. Monocristalino, eficiencia 17.96%, área 0.99198 m<sup>2</sup>.

Mes	HSP	Eficiencia	Área (m <sup>2</sup> )	Entrega de Energía (Día), (kWh)	Corrección por Factor de temp.	Entrega de energía (día) corregida
January	4.91	17.96%	0.99198	0.87476368	-0.47%	0.870652286
February	5.91	17.96%	0.99198	1.05292328	-0.47%	1.047974544
March	6.93	17.96%	0.99198	1.23464608	-0.47%	1.228843247
April	7.19	17.96%	0.99198	1.28096758	-0.47%	1.274947034
May	6.92	17.96%	0.99198	1.23286449	-0.47%	1.227070024
June	6.27	17.96%	0.99198	1.11706074	-0.47%	1.111810557
July	6.01	17.96%	0.99198	1.07073924	-0.47%	1.06570677
August	5.96	17.96%	0.99198	1.06183126	-0.47%	1.056840657
September	5.49	17.96%	0.99198	0.97809625	-0.47%	0.973499196
October	5.37	17.96%	0.99198	0.95671709	-0.47%	0.952220525
November	5.22	17.96%	0.99198	0.92999315	-0.47%	0.925622186
December	4.7	17.96%	0.99198	0.83735016	-0.47%	0.833414612

Energía de diseño. (por casa)  
c) Producción de energía (por casa)

Mes	Entrega de energía (día) corregida	# Paneles	Energía esperada (día)	Energía esperada (mes)	Pérdidas metodología	Energía esperada (mes)
January	0.870652286	40	34.826091	1079.60883	-20.00%	863.6870677
February	1.047974544	40	41.918982	1299.48843	-20.00%	1039.590747
March	1.228843247	40	49.15373	1523.76563	-20.00%	1219.012501
April	1.274947034	40	50.997881	1580.93432	-20.00%	1264.747458
May	1.227070024	40	49.082801	1521.56683	-20.00%	1217.253464
June	1.111810557	40	44.472422	1378.64509	-20.00%	1102.916072
July	1.06570677	40	42.628271	1321.47639	-20.00%	1057.181115
August	1.056840657	40	42.273626	1310.48241	-20.00%	1048.385931
September	0.973499196	40	38.939968	1207.139	-20.00%	965.711202
October	0.952220525	40	38.088821	1180.75345	-20.00%	944.6027604
November	0.925622186	40	37.024887	1147.77151	-20.00%	918.2172084
December	0.833414612	40	33.336584	1033.43412	-20.00%	826.747295

#### IV. Dimensionamiento del inversor

En el inversor a utilizar es de suma importancia tener en cuenta que para conseguir que las instalaciones fotovoltaicas ayuden a la estabilidad del sistema eléctrico, es necesario, implementar en los inversores una serie de modificaciones que permitan adaptar la producción de los inversores, adecuándose a las necesidades de la red.

Para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico, la generación de energía debe ser igual al consumo. Las tecnologías de generación eléctrica convencionales basadas en grandes generadores síncronos, permiten igualar generación y consumo mediante el control de la frecuencia de la red, ya que cuando la generación es superior a la demanda, los generadores síncronos tienden a acelerarse, aumentando la frecuencia de la red.

De manera análoga, cuando la generación es inferior a la demanda, los generadores síncronos tienden a frenarse, disminuyendo la frecuencia de la red. Actualmente, los inversores fotovoltaicos trabajan extrayendo en todo momento la máxima potencia disponible en el generador fotovoltaico. Sin embargo, es posible hacer que los inversores funcionen fuera del punto de máxima potencia cuando la red lo requiera, adecuando la potencia inyectada a la red. Para ello, el operador de red puede imponer una reducción de la potencia inyectada por los inversores o se puede realizar una regulación de potencia vs frecuencia.[5]

#### IV. Análisis económico

El análisis se realizó a partir del indicador ROI. Se propuso utilizar las tarifas de CFE y hacer un análisis con tarifas fijas y otro con tarifas cambiantes en el tiempo, mediante una interpolación.

Tarifa fija: 40.27%

Tarifa variable: 72. 87%

Haciendo la comparativa observamos que nuestro indicador ROI es confiable para hacer la inversión.

Además, podemos observar que al dimensionar correctamente un panel solar y hacer una comparativa de los gastos al tener una tarifa excedente mayor, podemos compensarla con el abastecimiento por medio de paneles, siendo así, una inversión satisfactoria a largo plazo.

Por otro lado, gracias a la capacidad de bidireccionalidad de la Smart Grid se puede tener un retorno de inversión aún más rápido, en México esto ya es posible mediante un contrato llamado Net Metering con CFE.

#### V. Conclusiones

- En este trabajo se han estudiado los conceptos principales asociados a redes inteligentes, y la aplicación de paneles fotovoltaicos dada la gran capacidad de energía solar que se tiene en nuestro país.
- Del estudio realizado en un caso de estudio de 5 casas operando en un esquema de red inteligente, con generación propia y conexión a la compañía suministradora, se obtuvieron resultados técnicos y económicos de la operación.
- Se puede observar en base a los resultados obtenidos que al dimensionar correctamente la instalación de la red en México existe un alto potencial para llevar este proyecto a cabo,

además de que es posible hacer una inversión satisfactoria a largo plazo.

•Como trabajos futuros basados en este mismo ámbito, se puede explorar la capacidad de la red eléctrica para incluir un determinado número de generación alterna en dicha red (“hosting capacity”).

## VI.REFERENCIAS

[1] Gilbert M, Masters. (2004). Photovoltaic materials and electrical characteristics. John Wiley & Sons. pp.445-595.

[2] Sherif M. Ismael. (2019). State of the art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation. Renewable Energy (130) pp. 1002-1020

[3] Limón P. Alejandro. (2017). Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento Recuperado de <http://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>

[4] T. Stetz, K. Diwold, M. Kraiczy. (2014). Techno-Economic Assessment of Voltage Control Strategies in Low Voltage Grids. IEEE 5(4). pp. 2125-2132.

[5] Balda, J. (2011). Energía Solar FV I Inversores. [www.ingeteam.com](http://www.ingeteam.com)