

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN GESTOR DE ENERGÍA PARA INVERSORES INTERCONECTADOS A LA RED

Marlon Alpuche-Javier, Freddy Chan-Puc  
Universidad de Quintana Roo, Departamento de Ingeniería  
Chetumal Quintana Roo, México  
e-mail: [freddy@uqroo.edu.mx](mailto:freddy@uqroo.edu.mx),  
email: malpuche18@hotmail.com

Daniella Pacheco-Catalán  
Centro de Investigación Científica de Yucatán, Unidad de Energía Renovable  
Mérida Yucatán, México  
[pacheco@cicy.mx](mailto:pacheco@cicy.mx)

### RESUMEN

Este trabajo de investigación se desarrolla en el contexto de las micro-redes inteligentes (*μSmart Grid*), cuyo propósito principal es optimizar el uso de la energía en un sistema fotovoltaico (SFV) interconectado a la red eléctrica. Para llevar a cabo dicha optimización, se deberá implementar un gestor de energía que determina las reconfiguraciones de los elementos que conforman la micro-red. Dicho gestor tiene como objetivo reconfigurar tanto a los módulos fotovoltaicos, los inversores y las cargas conectadas bajo ciertas condiciones de operación, generación y consumo de energía eléctrica. Las principales funciones del gestor de energía son tomar decisiones ante fallas y reconfigurar su operación, corregir desbalance de fases mediante conmutación de cargas, así como la conexión y desconexión permanente de cargas no críticas de manera eficiente e inteligente.

Palabras clave: Redes Inteligentes, Sistemas de Generación Distribuida, Sistemas fotovoltaicos.

### INTRODUCCIÓN

Las redes eléctricas son fundamentales para el desarrollo industrial y la calidad de vida de cada país. El avance tecnológico implica la necesidad del uso de energía eléctrica, sin embargo, el compromiso ambiental obliga el uso de fuentes de energía renovable, es por ellos que las redes eléctricas tradicionales se enfrentan a grandes desafíos, como el abastecimiento de energía eléctrica para todos los usuarios, la confiabilidad, la reducción de contaminantes hacia la atmósfera entre otros.

Es necesario el desarrollo de generación de energía distribuida que permita la implementación de fuentes limpias y con ello combatir los retos actuales de las redes que nos acontecen. En este artículo se propone un gestor de energía basado en un microcontrolador. El gestor de energía tiene como objetivo principal reconfigurar tanto a los módulos fotovoltaicos (MFV) así como las cargas conectadas bajo ciertas condiciones de consumo de energía eléctrica. Primeramente, el gestor tomará decisiones ante fallas, corregirá desbalance de cargas, podrá reconfigurar y reconectar cargas de manera inteligente. Otro punto importante que el gestor de energía debe analizar las redes eléctricas y por medio del algoritmo de reconfiguración, optimizar y hacer más eficiente

*Manuscrito recibido el 7 de Noviembre de 2016*

el uso de la energía (A. Mohd et al 2008).

### **ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

El panorama actual en el que se está desarrollando la energía solar fotovoltaica ofrece más de un área en la que su uso resulta ser ventajoso, tanto en el sector residencial como el industrial. La energía fotovoltaica es limpia, no emite dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), lo que ayuda a disminuir el efecto del cambio climático y su fuente de energía, el sol, lo hace un recurso inagotable. Dichos aspectos favorecen al cuidado del medio ambiente. El sistema fotovoltaico está constituido por un determinado número de módulos o unidades fotovoltaicas individuales. El número de unidades depende de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados. El voltaje de salida del arreglo, que corresponde al voltaje de operación del inversor, se obtiene mediante el tipo de conexión de dichos módulos, es decir, si es en serie o en paralelo. La potencia nominal de los módulos fotovoltaicos que conforman un sistema, están entre los 50 y 200 W. El material con los que están contruidos comúnmente es de Silicio donde la eficiencia esta en relación a la irradiancia y la temperatura. El acondicionamiento de la potencia eléctrica generada por el sistema es indispensable para la conexión de éste a la red eléctrica convencional mediante un inversor (Romero & Abella 2003).

### **SMART GRID**

El sistema fotovoltaico interconectado (SFVI) consiste en la integración de varios componentes, cada uno de ellos cumpliendo con una o más funciones específicas, a fin de que éste pueda aportar energía y de esta manera disminuir la demanda del consumo energético. Uno de los componentes del sistema es el módulo fotovoltaico, el cual generan energía en corriente directa (C.D.) a partir de un arreglo eléctrico y por medio de un inversor convierte la energía generada en corriente alterna (C.A.), así como la tensión y frecuencia necesaria para sincronizarse a la red eléctrica. Este último, son dispositivos que cumple con la función de acondicionar y adaptar la señal eléctrica de CD/CA para lograr la inyección de energía la red eléctrica (Cáceres et al 2011, Pardo et al 2013).

Al conectarse en paralelo con la red, el SFV contribuye al suministro de la energía demandada por la red. Las cargas conectadas en la instalación del consumidor, pueden ser alimentadas por cualquiera de las dos fuentes existentes o por ambas simultáneamente, dependiendo de los valores instantáneos de las cargas, así como de la potencia de salida de los SFV. Es por ello que se debe instalar un medidor de energía eléctrica tipo bidireccional. Estos medidores tienen la capacidad de medir la energía que se utiliza de la red, así como la energía que el sistema de energía renovable entrega a la red eléctrica, es decir los excedentes de energía. La tecnología *Smart-Grid* permite a la red eléctrica adaptarse mejor al comportamiento dinámico de la energía renovable y de generación distribuida, para ayudar a los usuarios y a las empresas que se encuentran dentro de este esquema. Las redes inteligentes trabajan en conjunto con los recursos energéticos renovables, y a medida que estos se vuelven intermitentes, la red necesita supervisión y control integrado, así como del trabajo en conjunto de la automatización y control para planificar y hacer más eficiente la energía (Bouzguenda et al 2011).

### **DISEÑO DEL GESTOR DE ENERGÍA**

Se analizaron las leyes de redundancia, así como las leyes de función de operación del gestor de energía para determinar la forma en la que tomara decisiones el interruptor de transferencia. Para ello es necesario realizar el análisis de las diferentes condiciones en las etapas de generación, conversión y distribución de la energía generada por el sistema fotovoltaico.

Para analizar las secuencias y la operación del interruptor de transferencia en las diferentes etapas y condiciones del sistema, será necesario definir lo siguiente:

- Se tiene dos arreglos fotovoltaicos de 125 watts c/u (MFV<sub>1</sub> y MFV<sub>2</sub>)
- Se tiene dos inversores de 250 watts con interconexión a la red eléctrica (INV<sub>1</sub> e INV<sub>2</sub>).
- El sistema eléctrico es bifásico de 220 V (FASE<sub>A</sub> y FASE<sub>B</sub>).
- Se cuenta con dos cargas críticas (R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub>) y dos No-críticas (R<sub>3</sub> y R<sub>4</sub>)

-Se cuenta con 8 interruptores de transferencia (S<sub>1</sub>-S<sub>8</sub>)

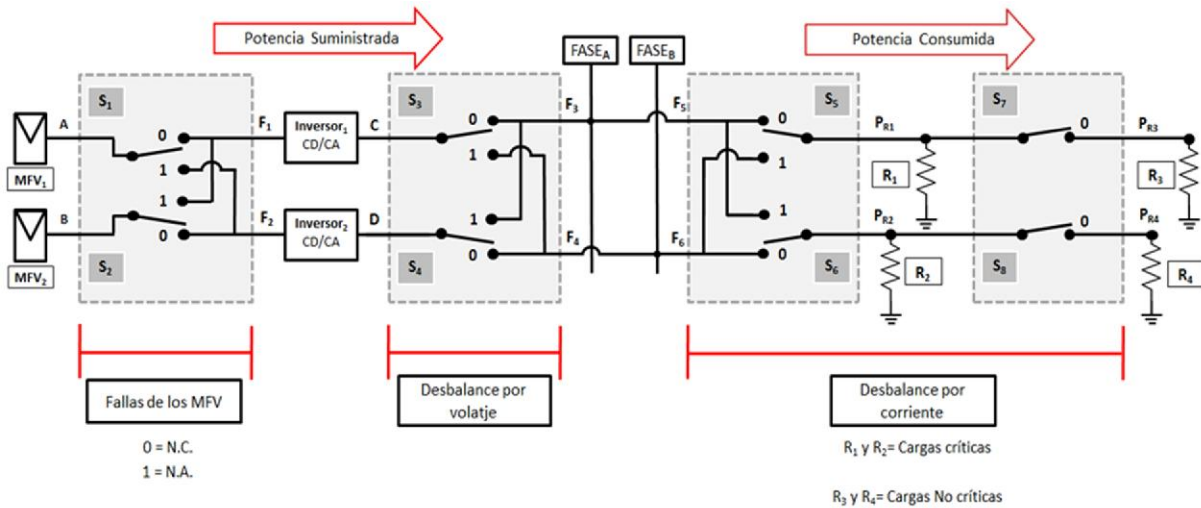


Figura 1. Circuito del gestor de energía

**Configuración de los MFV**

En la figura 2 se representa la unidad básica de conmutación para la etapa de generación de energía. En la tabla I se muestran todas las conmutaciones posibles del interruptor de transferencia (S<sub>1</sub> y S<sub>2</sub>). Cabe señalar que la condición 4 no tiene tanta relevancia, porque a pesar de ser una condición posible, no es necesaria. A y B corresponden a la energía de cada generador fotovoltaico. F<sub>1</sub> y F<sub>2</sub> corresponden a las funciones de salida del interruptor de transferencia en la etapa de generación.

Tabla I. Condiciones de transferencia en etapa de generación de energía.

CONDICIONES	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
1.- Cada MFV conectado a su inversor correspondiente	0	0	A	B
2.- El MFV2 se conecta junto con MFV1 junto al inversor 1	0	1	A+B	0
3.- El MFV1 se conecta junto con MFV2 junto al inversor 2	1	0	0	A+B
4.- Los MFV se conmutan y conectan a los inversores	1	1	B	A

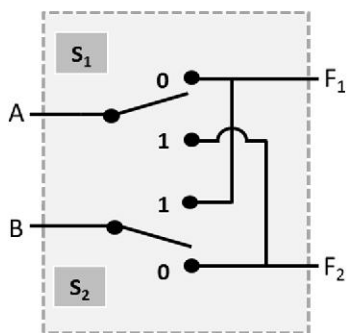


Figura 2 Interruptor de transferencia en la etapa de generación.

**Configuración de los inversores a la red eléctrica**

La figura 3 muestra el esquema del interruptor de transferencia para la etapa de conversión de energía, correspondiente a los inversores y su interconexión a la red eléctrica (Fase A y Fase B). En la tabla II se muestran todas las conmutaciones posibles del interruptor de transferencia (S<sub>3</sub> y S<sub>4</sub>). C y D corresponde a la energía generada por cada inversor. F<sub>3</sub> y F<sub>4</sub>: corresponden a las funciones de salida del interruptor de transferencia de la etapa de conversión.

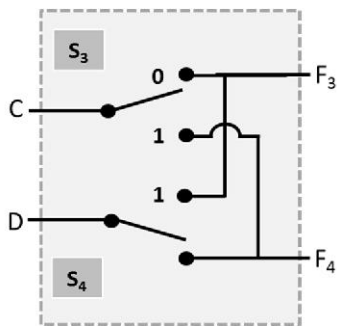


Figura 3 Interruptor de transferencia en la etapa de conversión.

Tabla II. Condiciones de transferencia en la etapa de acondicionamiento

CONDICIONES	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
1.- Cada inversor conectado a su fase correspondiente	0	0	C	D
2.- El INV 2 se conecta junto con INV 1 en la fase A	0	1	C+	0
3.- El INV 1 se conecta junto con INV 2 en la fase B	1	0	0	C+
4.- Los inversores se conmutan y conectan a las fases	1	1	D	C

### Configuración de las cargas conectadas

En la figura 4 se muestra el esquema de interruptor de transferencia para la etapa de consumo, correspondiente a la reconfiguración de las cargas críticas y No-críticas. Los interruptores S<sub>7</sub> y S<sub>8</sub> se utilizan para la desconexión parcial o permanente de las cargas No-críticas.

En la tabla III se muestran todas las conmutaciones posibles del interruptor de transferencia (S<sub>5</sub> y S<sub>6</sub>). En la etapa de consumo de energía por parte de las cargas conectadas, tenemos las siguientes condiciones:

F<sub>5</sub> y F<sub>6</sub>: Funciones de salida del interruptor de transferencia.

P<sub>R1</sub>, P<sub>R2</sub>, P<sub>R3</sub> Y P<sub>R4</sub>: Potencias consumidas por las cargas.

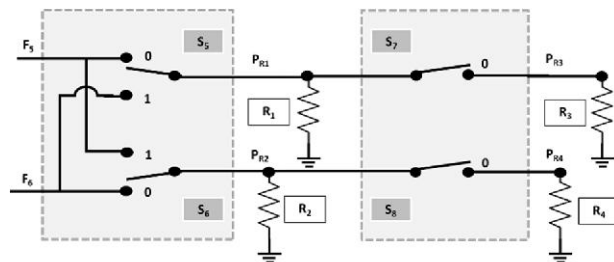


Figura 4 Interruptor de transferencia en la etapa de distribución de potencia.

Tabla III. Condiciones de transferencia en la etapa de distribución de potencia

CONDICIONES	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>8</sub>
1.- Cada carga conectada a su fase correspondiente	0	0	P <sub>R1</sub>	P <sub>R2</sub>
2.- Las cargas R1 y R2 se conecta a la fases A	0	1	P <sub>R1</sub> + P <sub>R2</sub>	0
3.- Las cargas R1 y R2 se conecta a la fases B	1	0	0	P <sub>R1</sub> + P <sub>R2</sub>
4.- Las cargas se conmutan y conectan a las fases	1	1	P <sub>R2</sub>	P <sub>R1</sub>

### Algoritmo para el gestor de energía.

Se analizaron y determinaron las operaciones sistemáticas para las leyes de redundancia y operación del gestor. Así como también el análisis de flujo de energía y balance de carga para dicha funcionalidad. En la figura 5 se presenta el diagrama de flujo. El algoritmo de reconfiguración se basa en la comparación de desbalances tanto de la tensión como de la corriente.

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron pruebas experimentales a una micro-red. Se utilizaron inversores con interconexión a la red Modelo 250GT para sistemas de generación eólica y/o solar; con capacidad de 250 W, con un rango de voltaje de entrada de 14 VDC a 28 VCD, salida de 110 VCA, opera en un rango de frecuencia de 45 Hz a 65 Hz y con una eficiencia de 92%. Los inversores serán conectados a una fase de 110 VCA cada uno, es decir a un sistema bifásico. En la figura 6 se muestra una imagen del inversor empleado.

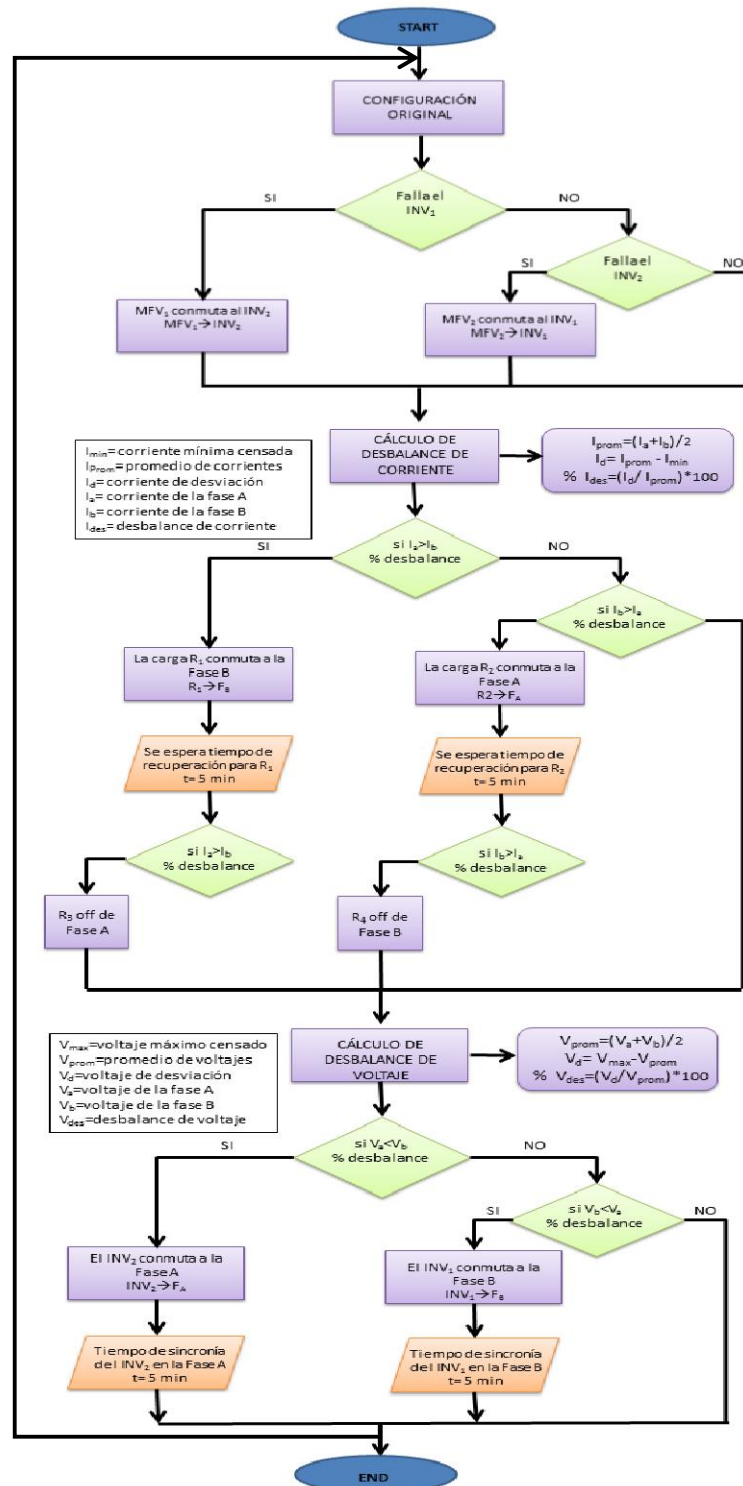


Figura 5 Diagrama de flujo del gestor de energía





Figura 6 Inversor con interconexión a la red

### Pruebas de voltaje de entrada al inversor

Se realizaron pruebas experimentales a los inversores. La tabla IV resume los resultados obtenidos ante variaciones del voltaje en corriente directa a la entrada del inversor.

Tabla IV. Valores de las pruebas de voltaje y corriente a la entrada del inversor

# de prueba	Voltaje CD	Corriente CD	Rizo de Voltaje	Corriente P-Pico
1	15.3V	4.47A	3.4V	5.8A
2	15.2V	4.33A	2.8V	5.6A
3	14.5V	3.67A	1V	1.2A
4	14.3V	888mA	800mV	1.2A
5	13.8V	879mA	200mV	400mA
6	12.9V	605mA	200mV	400mA

La figura 7 muestra las formas de entrada del voltaje y la corriente para la prueba #1 en los canales CH<sub>1</sub> Y CH<sub>2</sub>. En este caso corresponden aun voltaje de entrada de 15.3 volts. El inversor se encuentra sincronizado con la línea de CA y la corriente de entrada muestra cierta distorsión por la demanda de la red.

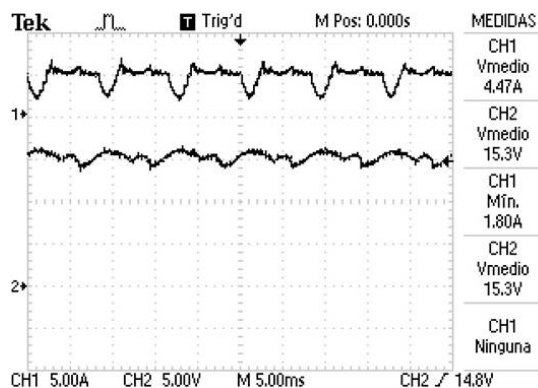


Figura 7 Señales de corriente y voltaje de entrada del inversor (Prueba #1)

La figura 8 muestra el voltaje y corriente de entrada para la prueba #3. Al decrementar el voltaje de entrada, la corriente sufre una mayor distorsión, aunque se reduce su valor medio.

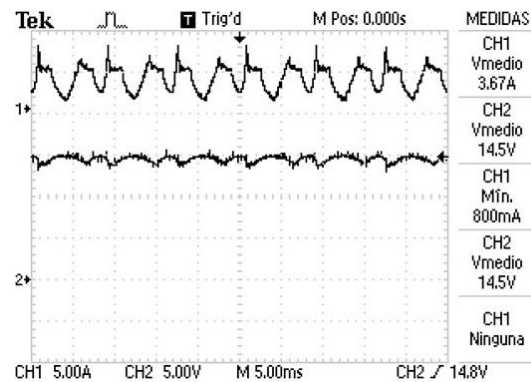


Figura 8 Señales de corriente y voltaje de entrada del inversor (Prueba #3)

### Pruebas de corriente suministrada

De forma análoga, se midieron el valor de las corrientes que suministra el inversor a la red eléctrica. Para estas mediciones se tomaron arbitrariamente las pruebas #1 y #5 las cuales son representadas por las figuras 9 y 10.

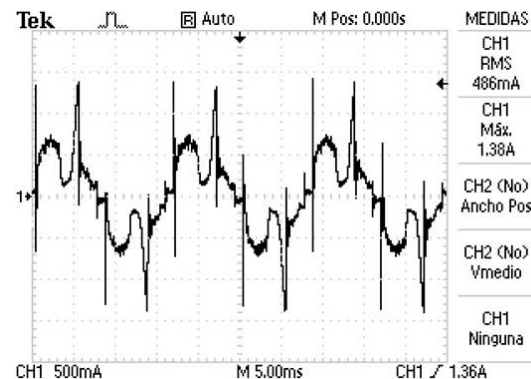
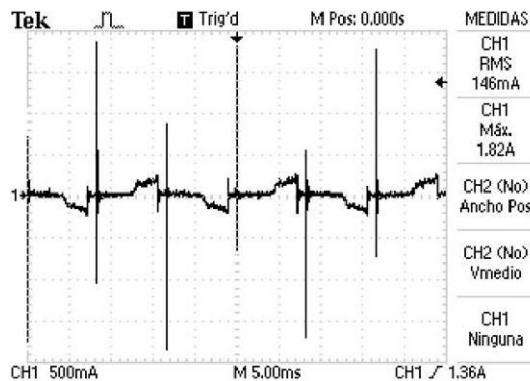


Figura 9 Señales de corriente de salida del inversor (Prueba #1)

La figura 9 muestra el caso cuando el inversor se sincroniza con la red eléctrica y suministra una corriente de CA a la red.

La figura 10 corresponde al caso cuando el inversor no se sincroniza con la red debido a un voltaje de entrada reducido.



**Figura 10** Señales de corriente de salida del inversor (Prueba #5)

### CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el análisis y el diseño de un gestor de energía para un sistema en micro-red. Se presentaron esquemas de operación y reconfiguración que permiten optimizar el flujo de energía desde los generadores fotovoltaicos hasta cargas conectadas a la red eléctrica. Se presentó un algoritmo para la toma de decisiones en las reconfiguraciones, así como algunos resultados experimentales de los inversores interconectados a la red eléctrica ante variaciones del voltaje de entrada. Existe una diversidad de equipos que se comercializan en México para la interconexión a la red, sin embargo, no siempre se cumple con los niveles adecuados de calidad de energía. En este caso el inversor utilizado presenta distorsiones de forma, al interconectarse a la red eléctrica.

### REFERENCIAS

A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, and D. Morton, "Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid," in 2008 IEEE international symposium on industrial electronics, 2008, pp. 1627-1632.

F. C. Romero and M. A. Abella, "Inversores para conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica," *Era solar: Energías renovables*, pp. 18-33, 2003.

M. Cáceres, A. Busso, C. Cadena, and L. Vera, "Determinación de la eficiencia de conversión del inversor empleado en un sistema de generación fotovoltaica conectado a la red instalado en el nordeste argentino," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 12, pp. 4.17-4.24, 2011.

A. Pardo García, J. S. Berrío Pérez, K. d. J. Beleño Sáenz, and O. E. Gualdrón Guerrero, "Diseño de una smart grid para un sistema híbrido de energía," 2013.

M. Bouzguenda, A. Gastli, A. Al Badi, and T. Salmi, "Solar photovoltaic inverter requirements for smart grid applications," in *Innovative Smart Grid Technologies-Middle East (ISGT Middle East)*, 2011 IEEE PES Conference on, 2011, pp. 1-5.

*Diseño e implementación de un gestor de energía*