

# SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA REDES DOMICILIARIAS DE LA CIUDAD DE TUNJA.

Diego Andrés Bautista López, *Member, IEEE*.  
diegobauti10@gmail.com

Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia.

**Resumen** —En este artículo se presentan los resultados obtenidos del diseño e implementación de un convertidor CSI bidireccional.

**Palabras Claves**—dimensionamiento, estimar, potencia, eficiencia, inversor, rectificador, carga, control.

## I. INTRODUCCIÓN

La red eléctrica domiciliar de la ciudad de Tunja obtiene la energía principalmente de procesos de transformación de energía hidráulica y energía térmica en energía eléctrica, estos procesos de transformación afectan al medio ambiente produciendo gases contaminantes, efecto invernadero en el caso de la térmica o cambiando la climatología de la región [1]. Por lo que el uso de paneles fotovoltaicos presenta una solución para disminuir la contaminación ambiental.

El consumo de energía eléctrica de una vivienda no es constante, por lo tanto surge la necesidad de realizar un estudio para estimar el consumo por cada hora y así dimensionar sistemas que puedan reducir los picos de consumo y disminuir los costos en los montajes eléctricos residenciales.

Como solución a este problema se plantea el diseño e implementación de un sistema que pueda recibir en las horas de menor consumo para luego entregarla en las horas de máximo consumo.

Con el fin de dimensionar la potencia del sistema se solicitaron datos de consumo energético a la Empresa de Energía de Boyacá (EBSA), quien ha facilitado el trabajo previo a este proyecto, los datos están bajo confidencialidad, por lo tanto, no se referencian los datos expuestos a continuación.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A partir de los datos suministrados por la EBSA (Empresa de Energía de Boyacá) se han extraído los datos de consumo del sector Cooservicios de la ciudad con 8457 usuarios; estos han sido suministrados del 1 de agosto de 2015 al 4 de agosto de 2016 teniendo la potencia promedio por cada hora.

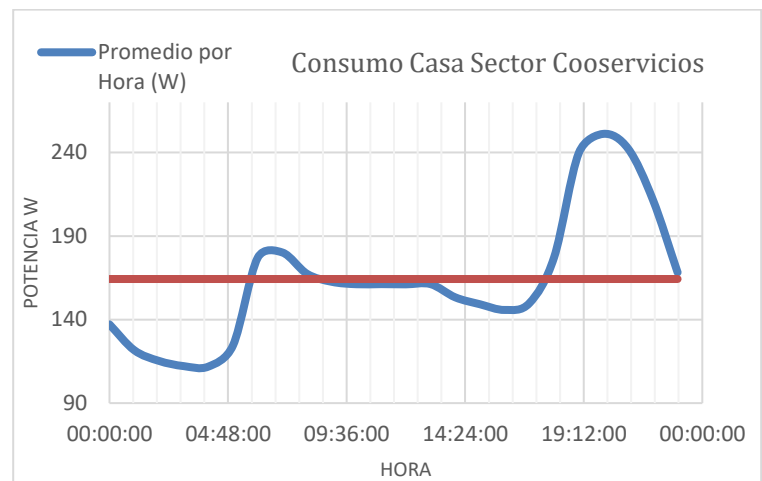


Figura II-1 Consumo promedio por hora de una casa.

En la figura II-1 se observan las variaciones de consumo en promedio por hora de un usuario promedio del sector, donde se obtienen las horas de mayor consumo, 6 am a 9 am y 6 pm a 10 pm. El sector de Cooservicios es principalmente residencial por lo que se observan consumos por debajo del promedio diario en horas de la tarde.

Se requiere un sistema que permita reducir las variaciones, que tome energía en horas valle y la entregue en horas de máximo consumo.

### III. SOLUCIÓN PROPUESTA

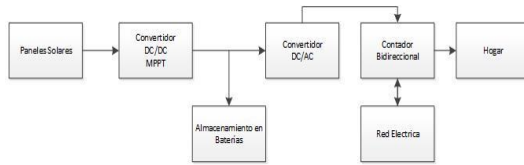


Figura III-1 Esquema propuesto.

Se propone el convertidor CSI que permite tener un voltaje de entrada menor al pico de la red eléctrica.

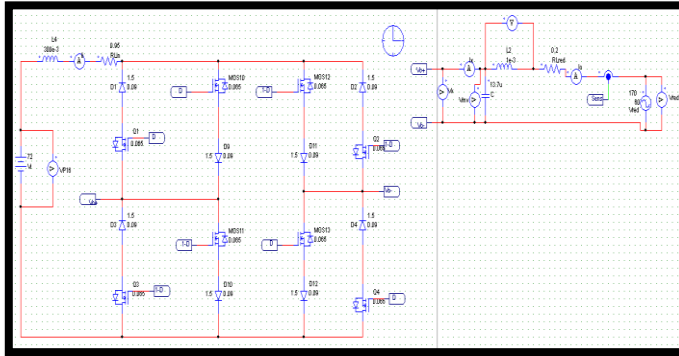


Figura III-2 CSI bidireccional.

El convertidor tiene una inductancia de entrada y un filtro CL a la salida del puente H para conectarse a la red.

La inductancia de entrada se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$L = \frac{V_i}{\omega \Delta i_i}$$

El filtro de salida se calcula usando las siguientes consideraciones

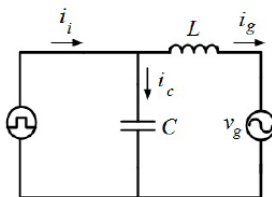


Figura III-3 Corriente sobre la inductancia de salida [2]

La corriente de entrada es conmutada y es filtrada por el condensador C, en el artículo [2] el autor presentar un método para calcular el filtro de salida CL y así reducir la distorsión armónica, relacionando la frecuencia de conmutación y la frecuencia de resonancia del filtro.

A continuación se calcula la inductancia de conexión a la red.

$$L = \frac{r^2}{4 * \pi^2 * f_s^2 * C}$$

En donde r es la relación entre la frecuencia de conmutación y la frecuencia de resonancia del filtro. A r se le puede relacionar con un factor de atenuación.

$$k_a = \frac{1}{|1 - r^2|}$$

De acuerdo a la norma IEEE 519-1992 y IEEE 1547-2008 no se puede inyectar corriente a la red con armónica 35 que supere el 0,3% del punto común de conexión.

El factor k\_a que cumple con la anterior condición es 0,02 [2].

$$r = \sqrt{1 + \frac{1}{k_a}}$$

El control del convertidor se realizó con el microcontrolador de Texas TMS 320F28377S, y se implementó el siguiente esquema de conexión

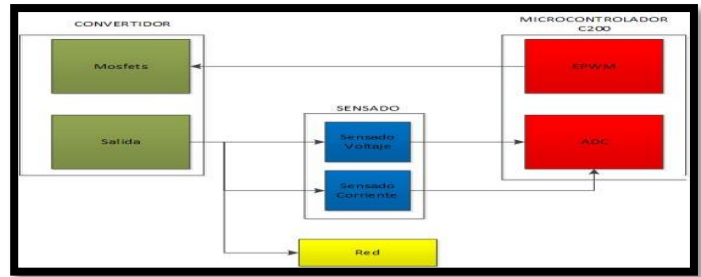


Figura III-4 Esquema conexión convertidor.

El modelo del convertidor es el siguiente

$$\frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \\ \hat{i}_2 \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_x}{L_1} & 0 & -\frac{U}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_{L2}}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ \frac{U}{C} & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \\ \hat{i}_2 \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{V_c}{L_1} \\ 0 \\ \frac{I_1}{C} \end{bmatrix} * \hat{u} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * \hat{v}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_2} \\ 0 \end{bmatrix} * \hat{v}_{red}$$

La función de transferencia de la corriente de salida es:

$$G_{hi_2}(s) = \frac{\frac{I_1}{C * L_2}}{s^2 + \frac{R_{L2}}{C} s + \frac{1}{L_2 C}}$$

### IV. RESULTADOS

Algoritmo para conectar a la red

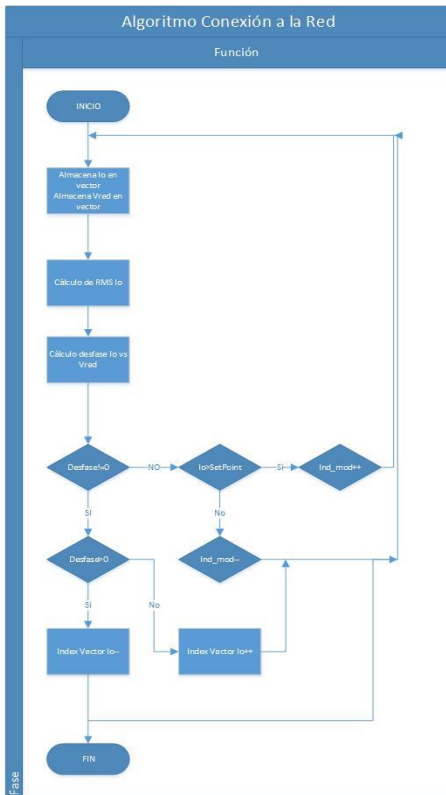


Figura IV-1 Algoritmo para conectar el circuito a la red

a) Entregando energía a la red.

A continuación se pueden observar los datos de corriente de entrada y salida, voltaje en la red y la potencia entregada a la red.

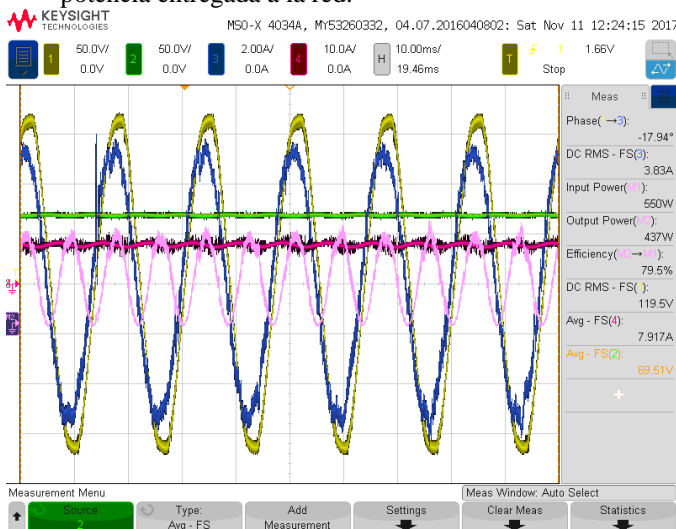


Figura IV-2 Señal amarilla voltaje red eléctrica, señal azul corriente red eléctrica, señal verde voltaje de entrada, señal roja corriente de entrada y señal rosada potencia entregada a la red.

Se puede observar que se están entregando 437 W a la línea eléctrica y la eficiencia del convertidor es de 79,5%, la

distorsión armónica calculada es de 9,8% para la corriente de salida y de 3,68% para la red eléctrica.

En la figura IV-1 se logra observar un desfase entre la corriente de salida y el voltaje de la red, esto se debe a que el algoritmo implementado presenta variaciones en el punto de operación, esto se podría mejorar almacenando más periodos de las señales aunque haría más lento las correcciones ante variaciones de la red tanto en fase como en la corriente que se le inyecta.

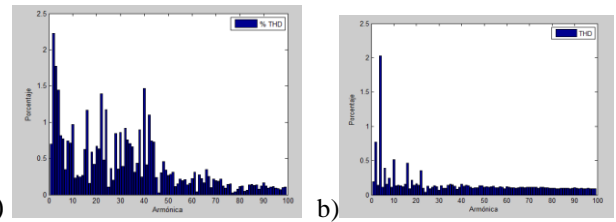


Figura IV-3 Porcentaje de valor rms a partir de la armónica 2, a) Corriente de salida. b) Voltaje de la red

La corriente de salida presenta una componente de 2,2% en la tercera armónica, siendo la armónica con mayor porcentaje, en el voltaje de la red se observa una componente de quinta armónica con 2% del valor rms de la red.

Calculando la distorsión en la corriente teniendo en cuenta la ya presente distorsión de la red, encontramos que la corriente tiene 2,66% THD con respecto a la red.

A continuación se presenta un cambio de referencia en el control RMS de la corriente de salida, se tiene una referencia inicial de 1 Arms y una referencial final de 1,41 Arms. El tiempo de establecimiento es de 6 s.

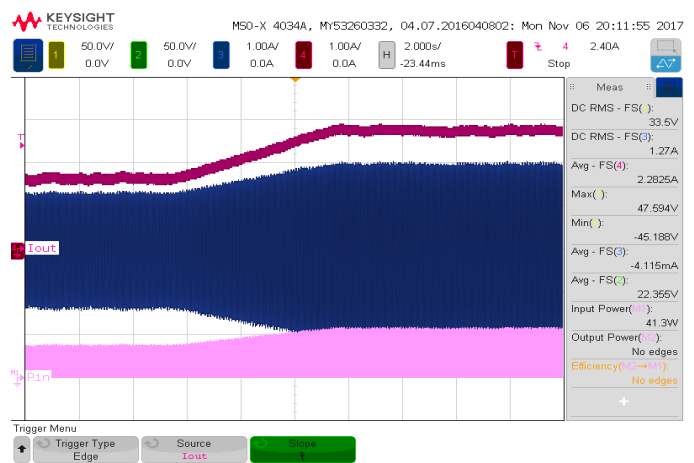


Figura IV-4 Seguimiento de referencia, corriente de salida.

b) Recibiendo energía de la red

Las medidas se realizaron teniendo en cuenta la polaridad del inversor por lo tanto se debe ver un desfase de 180 grados entre la corriente y el voltaje de la red.

El esquemático del convertidor en modo rectificador se puede observar en la figura III-2. En el cual se observa que se deja abierto el interruptor s1\_1 y se realiza la modulación con el interruptor s2\_2, que por su conexión en serie con el diodo permite entregar energía en la entrada del circuito.



Figura IV-5 Señal amarilla voltaje red eléctrica, señal azul corriente red eléctrica, señal verde voltaje de salida, señal roja corriente a la salida y señal rosada potencia consumida de la red.

Se puede observar que se está consumiendo 355 W de la línea eléctrica y la eficiencia del convertidor es de 87,9%, la distorsión armónica calculada es de 28,8% para la corriente de salida y de 3,68% para la red eléctrica. Se plantea como expectativa a futuro mejorar el control implementado para que la forma de onda de la corriente de salida sea semejante al voltaje de entrada.

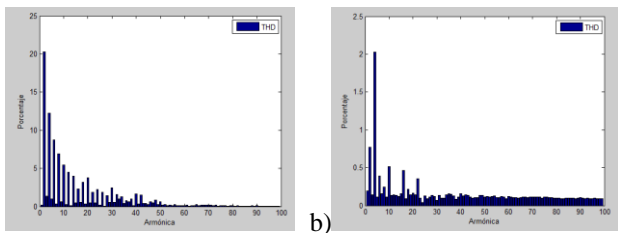


Figura IV-6 Porcentaje de valor rms a partir de la armónica 2, a) Corriente de salida. b) Voltaje de la red

La corriente de entrada presenta una componente de 20% en la tercera armónica, siendo la armónica con mayor porcentaje, en el voltaje de la red se observa una componente de quinta armónica con 2% del valor rms de la red.

Calculando la distorsión en la corriente teniendo en cuenta la ya presente distorsión de la red, encontramos que la corriente tiene 7,82% THD con respecto a la red.



Figura IV-7 Montaje final circuito.

## V. CONCLUSIONES

El circuito se ha probado bidireccional pero con pruebas separadas, se requiere de una prueba extra para poder programar un perfil de consumo y así comprobar que el circuito es capaz de generar un consumo promedio por hora constante o cero.

El control implementado presenta variaciones en el punto de operación, esto se debe a que se requiere una adición de parte integral, se realizaron simulaciones pero no se logró el objetivo de tener un desfase de cero grados.

El convertidor tiene una gran desventaja y está dada por la inductancia de entrada, ya que el valor depende de la frecuencia de la red eléctrica y no de la frecuencia de conmutación eso hace que su valor sea grande y por lo tanto se requiera una extensa cantidad de cable que se traduce en una resistencia serie grande.

El convertidor al tener una inductancia con una resistencia serie alta y siendo elevador, la corriente de entrada es mayor que la de la salida y las pérdidas en esta se verán elevadas al cuadrado cada vez que se quiera subir en potencia.

El índice de modulación que determina el pico de la corriente de salida respecto a la corriente de entrada, influye en el THD y en la eficiencia del circuito. Al disminuirlo afecta positivamente la señal de salida disminuyendo su distorsión, aunque al disminuirlo también reduce la eficiencia del circuito ya que requiere mayor corriente a la entrada.

A partir de las funciones de transferencia se concluye que la corriente de entrada no afecta a la dinámica de la corriente de

salida, ya que la corriente de entrada no varía respecto al ciclo útil.

Se realizó un comparativo sobre las diferentes configuraciones para la inductancia de entrada, siendo la de una sola inductancia la mejor opción tanto en precio como en el valor de la resistencia serie asociada.

El circuito puede ser conectado a un sistema de banco de baterías y gracias a la inductancia de entrada pueda tener un bajo rizado de corriente sin necesidad de un filtro adicional como sucede en el inversor VSI.

#### REFERENCES

- [1] C. Severiche, "El agua y la generación de energía en entornos de sostenibilidad," *Revista de la Escuela de Ingenierías y Arquitectura*, pp. 1-6, 7 Marzo 2013.
- [2] S. Jayalath and M. Haninf, "CL-FILTER DESIGN FOR GRID-CONNECTED CSI," *IEEE Explorer*, 2015.
- [3] UPME, "Mapas de brillo solar," 2002.
- [4] UPME, "Atlas radiación solar de Colombia," 2004.
- [5] UPME and IDEAM, "Atlas de radiación solar de Colombia," Bogotá, 2005.
- [6] D. Trowler and B. Whitaker, "Bi-directional inverter and energy storage system," *Texas Instruments Analog Design Contest*, Mayo 2008.
- [7] A. Pozo Ruz, *Convertidores Conmutados de Potencia. Test de Autoevaluación*, Primera ed., Marcombo, 2011, p. 412.
- [8] A. Perez Barbosa, "INVERSOR PARA SISTEMA FOTOVOLTAICO AL LADO," Bogotá, 2016.
- [9] B. Parikshith, "Integrated Approach to Filter Design for Grid Connected Power Converters," Bangalore, 2009.
- [10] B. C. Parikshith, "Integrated approach to filter design for grid connected power converters," 2009.
- [11] G. McPherson, *Introducción a Máquinas Eléctricas y Transformadores*, Primera ed., México DF.: Limusa, 1987, p. 547.
- [12] M. Mañana Canteli, *REGULACIÓN, CONTROL Y PROTECCIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS*, Santander, Cantabria, 2008.
- [13] A. J. Baronian and S. B. Dewan, "An adaptive digital control of current source inverter suitable for parallel processing inverter systems," *Industry Applications Conference*, 1995.



**Diego Andrés Bautista López**, Nació el 10 de Junio de 1993 en la ciudad de Tunja. Ingeniero Electrónico. Actualmente es miembro estudiantil del IEEE y se encuentra cursando cuarto semestre de maestría en ingeniería electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana.  
Diego\_bautista@javeriana.edu.co