

DISEÑO Y MODELADO DE UN INVERSOR MONOFÁSICO PARA CONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA A PARTIR DE PANELES

DESIGN AND MODELING OF A SINGLE PHASE INVERTER FOR CONNECTION TO THE GRID CIRCUIT FROM PHOTOVOLTAIC PANELS

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño y modelado de un inversor monofásico tipo puente que permite la conexión a la red eléctrica, de paneles fotovoltaicos. Se realizan los respectivos cálculos de la etapa de potencia en donde se establece el filtro a utilizar. Adicionalmente se obtiene el modelo de la etapa de potencia con el fin de establecer los lazos de control de corriente de salida y tensión de entrada con el fin de que el inversor opere correctamente al conectarse a la red eléctrica. Finalmente, el diseño se valida a través de simulaciones de la etapa de potencia junto a los lazos de control.

Palabras clave: Inversor monofásico, lazos de control, paneles fotovoltaicos, filtros.

ABSTRACT

This paper describes the design and modeling of a single-phase inverter that allows connection to the grid, from photovoltaic panels. It performed the respective calculations of the power stage, in which the filter to be used is chosen. Additionally, is obtained the model of the power stage in order to establish the control loops of the current output and the input voltage, in order that the inverter operate properly when connected to the mains. Finally, the design is validated through simulations of the power stage with the control loops.

Keywords: Single-phase inverter, control loops, photovoltaic panels,

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los países en aras del desarrollo tecnológico, social, económico, han realizado un manejo inapropiado e irresponsable de sus recursos naturales, trayendo consigo efectos tales como la deforestación, la emisión de gases contaminantes, entre otros [1].

En la actualidad, diferentes centros de investigación sobre energía solar y fotovoltaica, han enfocado sus esfuerzos a la investigación y el uso de la energía eléctrica a partir de energías limpias sostenibles, basadas en recursos renovables. Una de las tecnologías más desarrolladas y estudiadas en este campo, son los sistemas fotovoltaicos, los cuales proveen energía eléctrica limpia a partir de la energía solar

Cesar Leonardo Trujillo Hernandez:

Ingeniero Electrónico – Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Colombia. Ph.D Ingeniería Electrónica– Universidad Politécnica de Valencia – España.

Profesor– Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Colombia – cltrujillo@udistrital.edu.co; celetero@gmail.com.

Samuel Patacón:

Estudiante Ingeniería Eléctrica – Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Colombia. – Samuel.patacon@gmail.com

Hector Velez:

Estudiante Ingeniería Eléctrica – Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Colombia. – hectorvelez@udistrital.edu.co

Tipo: Artículo de Investigación científica

Fecha de Recepción: 6 de Abril de 2015

Fecha de Aceptación: 24 de Junio de 2015

[2]. Para poder tener un uso real de la energía solar, como fuente de energía eléctrica, se hace uso los paneles solares, los cuales deben poder transmitir dicha energía al sistema interconectado o alimentar cargas aisladas. Debido a que la energía captada por el panel solar no siempre es constante, se hace necesario el uso de dispositivos intermedios de transformación que permitan que la energía entregada a la red cumpla con los requerimientos del sistema, como lo son, la amplitud, la frecuencia y el sincronismo con la red [3].

Dadas las necesidades actuales del uso eficiente de energía y más aún, el ahorro de la misma, y teniendo en cuenta que la industria es un gran consumidor de energía eléctrica, se vislumbra la posibilidad, de usar este tipo de sistemas de generación de energía eléctrica limpia con el fin de lograr metas reales de ahorro de energía, esto en razón a que se tiene un sistema que inyecta energía eléctrica a la red, lo que disminuirá el consumo de las cargas por parte de la red eléctrica trayendo consigo la disminución en la tarifa cobrada por el operador de red, así como el hecho que brindará soporte cuando la red eléctrica no esté presente.

El artículo se encuentra dividido de la siguiente manera: en la primera parte se aborda el tema de los inversores y sus características. Posteriormente, se presenta el modelado y diseño de los lazos de control. En el tercer apartado se presenta la simulación del sistema y finalmente se dan las conclusiones.

Inversor monofásico

El inversor es un dispositivo electrónico cuya función es entregar energía eléctrica de manera alterna, a partir de una fuente de corriente continua. Para aplicaciones de conexión a la red, se requiere entregar una señal de tensión y corriente lo más sinusoidales posibles y que cumplan con los requerimientos de frecuencia y fase, y en sí de calidad, necesarios para realizar dicha conexión. A continuación se presentan los diferentes esquemas de conexión de paneles fotovoltaicos y la distribución de los inversores en dichos esquemas.

a. Configuraciones de inversores en esquemas fotovoltaicos

1. Configuración inversor centralizado

Esta configuración, presentada en Figura. 1, se utiliza para sistemas con demandas mayores a 10kW. Básicamente y dependiendo de las características de tensión y potencia que se requieran en el sistema, este modelo de basa en la disposición serie-paralelo de los paneles fotovoltaicos [4].

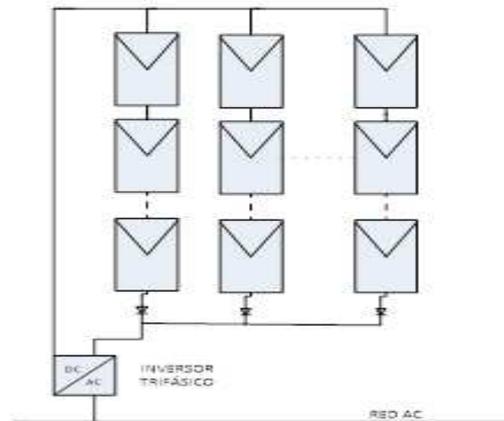
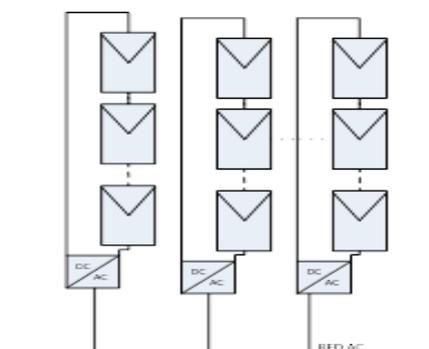


Figura. 1. Esquema inversor centralizado.
Fuente: Autores.

2. CONFIGURACIÓN INVERSORES EN STRING

En comparación con la configuración anterior, en esta, (Figura. 2), no se tiene un solo inversor para toda la instalación, sino que se cuenta con un inversor por arreglo, siendo un arreglo una disposición de paneles cuya potencia está entre los 3KW y 5 KW [5].



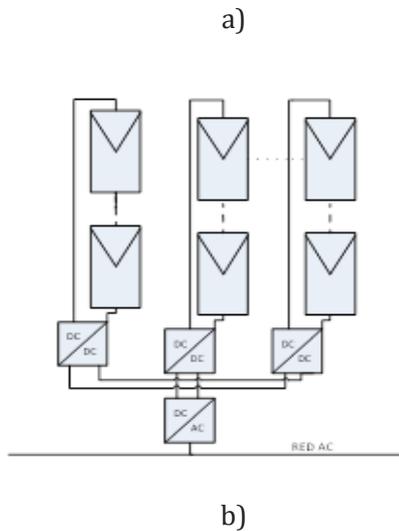


Figura. 2. Esquemas de inversores en string.
a) múltiples inversores. b) inversor centralizado.

Fuente: Autores.

3. CONFIGURACIÓN MICRO INVERSOR

Este tipo de configuración, presentado en Figura. 3, se fundamenta en el uso de un inversor por cada panel solar, con lo que cada unidad está en capacidad de manejar entre 50W pico y 400W pico [6].

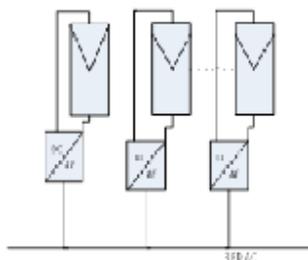


Figura. 3. Esquema de micro inversor
Fuente: Autores

b. Modulación por Ancho de Pulso – PWM

La modulación por PWM es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a

una carga. Aplicando esta técnica a los inversores, se logra obtener una señal de tensión alterna con notables características, altas prestaciones y un contenido armónico bajo [6].

El esquema más estandarizado es el PWM sinusoidal (SPWM), en el cual la señal del PWM es generada a través de la comparación de una onda sinusoidal fundamental y una onda portadora de alta frecuencia [7].

Aproximadamente hace una década, nuevos esquemas

PWM basados en el uso de degeneración aleatoria de números han sido propuestos, donde con la forma de onda sinusoidal fundamental se compara con dicha señal aleatoria, con el fin de generar una onda RPWM (random PWM) [8].

Con base en los aspectos teóricos presentados, a continuación se muestra el esquema de un sistema fotovoltaico con conexión a la red eléctrica (Figura. 4).

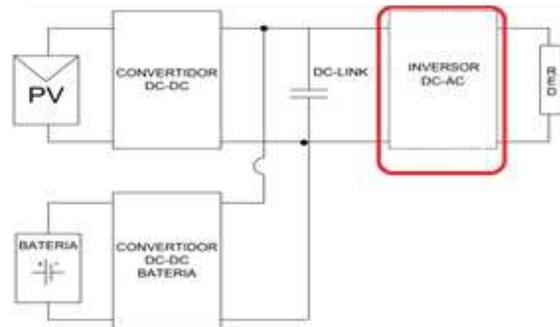


Figura. 4. Sistema convencional de generación de energía a partir de un panel fotovoltaico interconectado con la red eléctrica
Fuente: Autores.

En Figura. 4 se encuentra encerrado en rojo el inversor. El funcionamiento del inversor depende de la conmutación de los dispositivos mostrados en Figura. 5 y este proceso de conmutación es controlado por un sistema de conmutación a PWM como el mostrado en Figura. 6. El esquema circuital de los filtros a usar a la salida del inversor se muestra en Figura. 7.

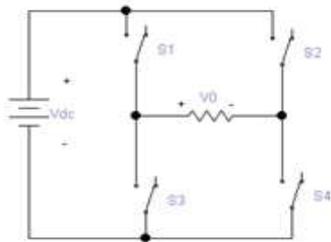


Figura 5. Esquema circuital del inversor.
Fuente: Autores.

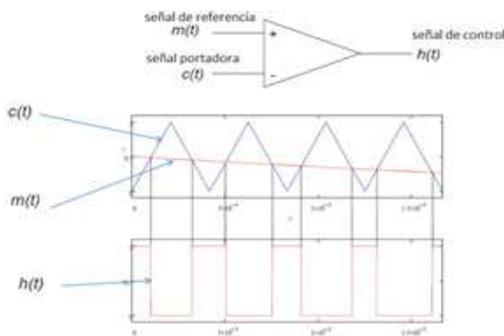


Figura 6. Esquema de generación PWM
Fuente: Autores.

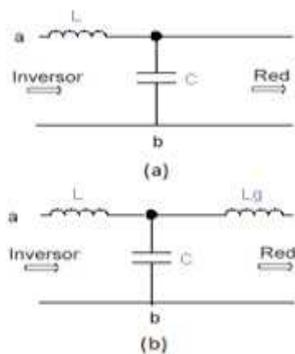


Figura 7. Modelos de filtros más usados. (a) LC, (b) LCL.
Fuente: Autores.

Para el diseño del inversor se decide hacer uso de un filtro LCL que permite tener una atenuación de 60db/década a partir de la frecuencia de resonancia, presenta una baja distorsión de

la corriente de red y baja producción de potencia reactiva [9]. El diseño como tal se realizó con base a la formulación presentada en [10]. Así las cosas, se tiene un circuito como el mostrado en Figura. 8.

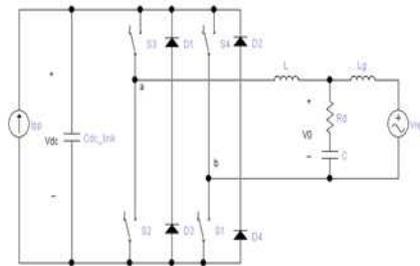


Figura 8. Circuito del inversor DC/AC, con filtro de salida
Fuente: Autores.

Las características del inversor a simular se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos generales inversor

Parámetro	Valor
Tensión de salida	120 V _{rms}
Potencia nominal	200 W
Frecuencia de salida	60 Hz
Frecuencia de conmutación f_s	20 kHz
Tensión Vdc	230 V
Z _{load}	72 ?
L	9 mH
C	1 μF
Lg	900 μH
C _{dc_link}	1 mF

Fuente: Autores

4. MODELADO Y DISEÑO DE LOS LAZOS DE CONTROL

Dada la naturaleza no lineal del circuito de la

Figura. 8, se requiere linealizar el sistema en torno a un punto de operación con el fin de poder emplear técnicas de control lineal. Para ello se hace uso del modelo del conmutador PWM [11], prácticamente lo que se hace es usar o modificar el circuito presentado en Figura. 8 por el circuito presentado en la Figura. 9.

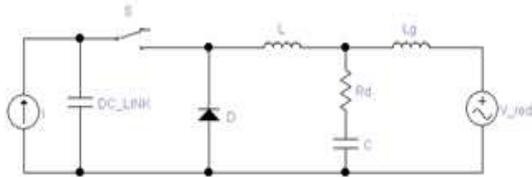


Figura. 9. Circuito BUCK modificado correspondiente inversor a desarrollar

Fuente: Autores

Asumir esto permite el modelado del sistema, con el fin de obtener las funciones de transferencia de interés a fin de realizar control lineal sobre el mismo. A continuación en la Figura. 10, se muestran los modelos circuitales en gran y pequeña señal del inversor.

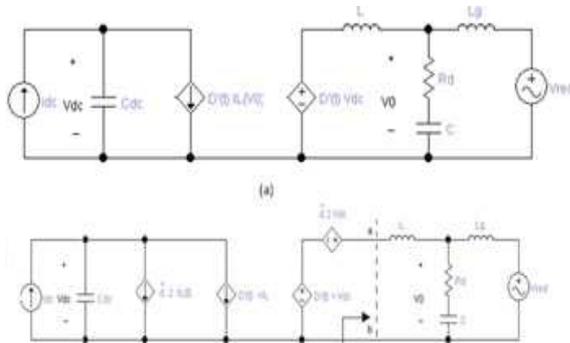


Figura. 10. Modelo equivalente del punto de operación del inversor (a) gran señal; (b) pequeña señal.

Fuente: Autores.

A partir de los modelos presentados, es posible realizar el diseño de los controladores tanto de tensión como de corriente, obteniendo el circuito, Figura. 11.

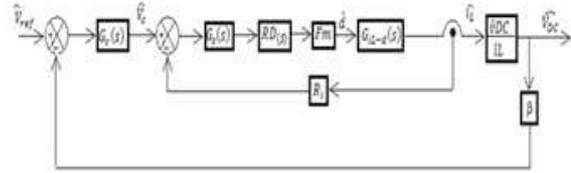


Figura. 11. Lazos de control de tensión y corriente

Fuente: Autores.

Lo que se observa en la Figura. 11, son los lazos de control, donde el lazo interno corresponde al lazo de corriente el cual está compuesto por: $G_s(s)$ que corresponde al controlador de corriente, $RD(s)$ que es un retardo digital que añade al lazo de corriente 2 ceros complejos conjugados de fase no mínima a la mitad de la frecuencia de conmutación, F_m es la ganancia del modulador PWM bipolar, G_{il-d} corresponde a la función de transferencia de la corriente del inductor de salida y el ciclo de trabajo, y R_i corresponde a la ganancia del sensor de corriente. Por otro lado el lazo externo de la Figura. 11, corresponde al lazo de tensión, el cual se está conformado por: $G_v(s)$ que corresponde al controlador de tensión que fija la referencia a seguir por el controlador de corriente, V_{dc}/i_L es la función de transferencia que relaciona la tensión de entrada con la corriente de salida del controlador de tensión y finalmente se tiene β que corresponde a la ganancia del sensor de tensión.

Con base en los modelos anteriormente planteados, Figura. 10, se pueden deducir las funciones de transferencia que se presentan a continuación.

$$G_{V_{DC-d}}(S) = \frac{\hat{v}_{DC}}{\hat{d}} = - \frac{(z_0 * 2 * I_L(t) + D'(t) * 2 * V_{DC})}{S * C_{DC} * Z_0 + D'(t)^2} \quad (1)$$

$$G_{i_{L-d}}(S) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = - \frac{(s * C_{DC} * 2 * V_{DC} - 2 + I_L(t) * D'(t))}{S * C_{DC} * Z_0 + D'(t)^2} \quad (2)$$

Para las anteriores ecuaciones se tiene en consideración la siguiente condición:

$$\hat{i}_{DC} = \hat{v}_0 = 0 \quad (3)$$

$$Z_0 = \frac{s^2 \cdot L \cdot L_g \cdot C + s^2 \cdot (L \cdot C \cdot R_d + L_g \cdot R_d) + s \cdot (L + L_g)}{s^2 \cdot L_g \cdot C + s \cdot C \cdot R_d + 1} \quad (4)$$

En la Tabla 2 se muestran los valores de las ganancias de los elementos que conforman el lazo de corriente y el lazo de tensión.

Tabla 2. Ganancias de los elementos de los lazos de corriente y tensión

ámetro	Valor
	1
s)	$RD(s) = \frac{1 - \left(\frac{s \cdot T_z}{2}\right) + \left(\frac{(s \cdot T_z)^2}{12}\right)}{1 + \left(\frac{s \cdot T_z}{2}\right) + \left(\frac{(s \cdot T_z)^2}{12}\right)}$
	0.2 Ω
	6·10 ⁻³

Fuente: Autores

Con los valores presentados en la Tabla 2, es posible ajustar el controlador de corriente y el controlador de tensión usando el sisotool de Matlab, para los lazos de corriente y tensión respectivamente.

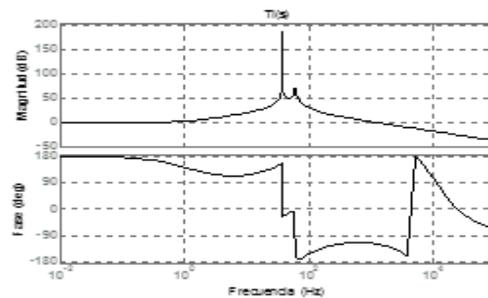
En la Tabla 3 se muestran las funciones de los controladores de corriente y tensión ajustadas.

Controlador	Función
Corriente	$G_s(s) = 0.8 + \frac{100 \cdot 2 \cdot \pi \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \pi \cdot s + (2 \cdot \pi \cdot 60)^2}$
Tensión	$G_v(s) = -4 - \frac{80}{s}$

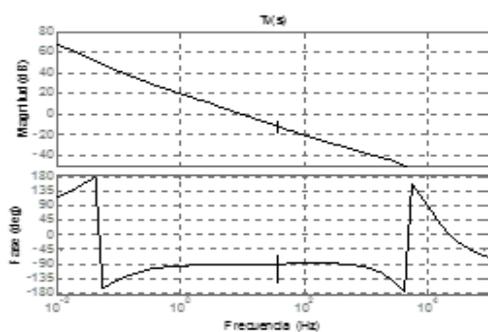
Fuente: Autores

Tabla 3. Funciones de transferencia de los controladores

En la Figura. 12, se muestran los diagramas de Bode del lazo de corriente y de tensión respectivamente.



(a)



(b)

Figura. 12. (a) Diagrama de Bode correspondiente a la función de transferencia (1); (b) Diagrama de Bode correspondiente a la función de transferencia (2)

Fuente: Autores.

Para la Figura. 12 (a), con el controlador de corriente propuesto, se obtiene un margen de fase de 62.8° , así como un ancho de banda de 1.2 KHz.

Por otro la en la Figura. 12 (b), con el controlador de tensión propuesto, se obtiene un margen de fase de 76° así como un ancho de banda cercano a 14.4 Hz.

5. SIMULACIÓN

Para las pruebas de simulación se hizo uso del circuito mostrado en la Figura. 13, donde se encuentra el inversor con conexión a la red eléctrica junto al sistema de control diseñado.

Cabe aclarar que la fuente de corriente de corriente a la entrada del inversor emula el comportamiento del panel fotovoltaico.

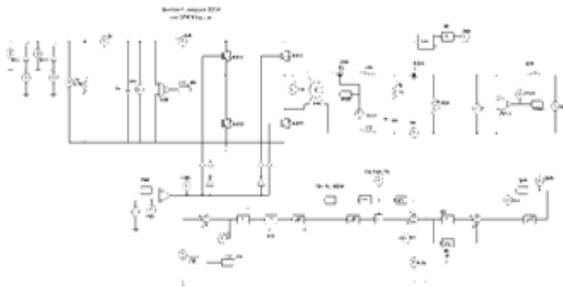


Figura. 13 Sistema modelado, incluyendo sistema de control y conexión a red.
Fuente: Autores.

Para poder hacer la conexión con la red, se requiere que la corriente de salida del inversor se encuentre sincronizada con la señal de tensión de la red eléctrica, lo que implica hacer uso de un PLL [12]. A continuación se muestra una prueba donde se inyecta corriente a la red a partir de incrementos de la fuente de corriente de entrada.

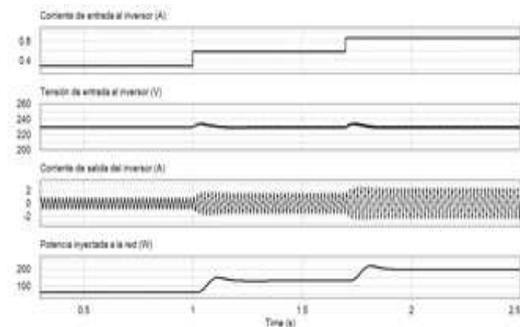


Figura. 14 Principales formas de onda en el inversor interconectado a red

Lo que se aprecia en los resultados presentados en la Figura. 14, es: la primera gráfica muestra las variaciones de la corriente de la entrada al inversor. Dichos cambios de corriente corresponden a 0.28 A, 0.56 A y 0.86 A respectivamente. La segunda gráfica muestra la tensión DC_link, esta permanece constante pese a los cambios de corriente de entrada. También se observa que al darse un cambio en la corriente se presenta una pequeña sobre tensión que no supera el 5% de la tensión en la DC_LINK, lo que implica que el sistema no se encuentra en riesgo. La tercera gráfica muestra la corriente de salida en la cual se puede apreciar que su valor inyectado a la red varía conforme la variación de entrada al inversor, los valores que toma esta señal son 0.54, 1.08 y 1.67 A, respectivamente. Por último, la cuarta gráfica muestra la potencia inyectada por el inversor a la red eléctrica, para este caso 65 W, 130 W y 200 W, respectivamente

Es relevante mencionar el hecho de que aun cuando el inversor no cuente con la potencia de entrada suficiente para suplir la demandada por la carga, la potencia a la salida se puede suplir conforme a la demandada; la ocurrencia de esto reside en que al existir interconexión con la red, esta suministra la potencia faltante para suplir a la carga.

6. CONCLUSIONES

Se modeló y diseñó un inversor monofásico

en puente completo interconectado con la red eléctrica con filtro LCL de salida.

Así mismo, se diseñó un control de corriente media, el cual presenta un lazo interno de corriente que hace posible la inyección de corriente, por parte del inversor, de forma sincronizada a la red y también cuenta con un lazo externo de tensión que cumple dos funciones, fijar la referencia para el lazo de corriente y regular la tensión presente en la entrada del inversor.

El diseño de los controladores se obtuvo a través de los modelos de gran y pequeña señal del inversor, los cuales se obtuvieron a partir del modelo del conmutador PWM sobre la aproximación del inversor a un convertidor buck.

Por último, el funcionamiento del inversor y de los controladores del mismo, fueron validados mediante simulación, donde se analizó el comportamiento en estado transitorio y en estado estable del inversor, logrando resultados satisfactorios.

Referencias

- [1] L. Hassaine, "Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para Inversores Aplicación a Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red", tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2010.
- [2] H.R. Murcia. "Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas". Revista de ingeniería. n.28. 2008. pp. 83.
- [3] I. L. Kosow, "Máquinas eléctricas y transformadores", Segunda edición, Pearson educación, 1993.
- [4] S.B. Kjaer, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid connected inverters for photovoltaic modules," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.41, no.5, pp. 1292- 1306, Sept.-Oct. 2005.
- [5] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, V.G. Agelidis, "Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview," Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, vol.4, pp. 1995-2000, 2002.
- [6] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, Z. Chen, M. Liserre, "Power converters and control of renewable energy systems," 1ra ed, pp. 1-120, 2004.
- [7] D.E. Álvaro, "diseño de un inversor monofásico autónomo de baja frecuencia ajustable mediante bus DC", proyecto fin de carrera, Departamento de ingeniería eléctrica, universidad Carlos III de Madrid escuela politécnica superior, Madrid, 2009.
- [8] S.Y.R.Hui, Senior Member, IEEE, I. Oppermann, and S. Sathiakumar, "Microprocessor-Based Random PWM Schemes for DC-AC Power Conversion," iee transactions on power electronics, vol. 12, no. 2, pp. 253-260, march 1997.
- [9] Y.Xue, L.Chang,S.Baekhoej, J.Bordonau, T.Shimizu, "Topologies of Single-Phase Inverters for Small Distributed Power Generators:An

- Overview". Power Electronics, IEEE Transactions, vol.19, pp.1305-1314, September 2004.
- [10] C.L. Trujillo, " Concepción de controladores conFigurables para microinversores fotovoltaicos operando como unidades autónomas de generación de energía en microrredes," tesis doctoral, Departamento de ingeniería electrónica, universidad politécnica, Valencia, 2011
- [11] J.M.A. Myrzik, M.Calais, "String and Module Integrated Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems-A Review" Power Tech Conference, 2003 IEEE Bologna, vol. 2, pp 8, June 23-26, 2003
- [12] S.M. Silva, B.M. Lopes, B.J. Filho, R.P. Campana and W.C. Bosventura, "Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase Grid-connected systems", industry applications conference, 2004. 39 th IAS annual meeting. Conference record of the 2004 IEEE, vol 4, pp 2259-2263, 3-7, Oct 2004.