



**MODELAMIENTO Y CONTROL DE INVERSOR PUENTE H MONOFÁSICO PARA
ENERGÍAS RENOVABLES EN OPENMODELICA**

Astrid Alejandra Roca Salazar

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesor

José Robinson Ortiz Castrillón, Magíster (MSc) en ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Eléctrica
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita	Astrid Roca [1]
Referencia	[1] A.A. Roca-Salazar, “Modelamiento y control de inversor puente h monofásico para energías renovables en Openmodelica”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Grupo de Investigación Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Noe Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico mi trabajo de grado a quienes confiaron en mis capacidades y me dieron una base estable para cumplir esta meta, quienes han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico este logro a mis padres.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres quienes gracias a sus esfuerzos logré cumplir esta meta, a mi asesor José Robinson Ortiz Castrillón y profesor Nicolas Muñoz Galeano quienes sin sus virtudes y constancia este trabajo no lo hubiese logrado, a mi hermana por ser ejemplo de fortaleza, a mis amigos quienes me hicieron reír y ofrecieron calidez en los momentos difíciles, y a la Universidad de Antioquia que me dio la oportunidad de crecer.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
III. JUSTIFICACIÓN.....	12
IV. OBJETIVOS.....	13
A. Objetivo general	13
B. Objetivos específicos	13
V. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	14
VI. MARCO TEÓRICO	15
VII. METODOLOGÍA	17
A. Modelamiento del inversor con el método de referencias y reacciones.....	17
B. Modelo conmutado del sistema	20
C. Modelo promedio del sistema.....	22
D. Función de transferencia	22
E. Control de corriente PI.....	24
VIII. RESULTADOS	26
IX. CONCLUSIONES	31
X. RECOMENDACIONES	32
REFERENCIAS	33

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Circuito de inversor puente H conectado a la red	16
Fig. 2. Inversor Puente H cuando los interruptores G1 y G2 están cerrados	17
Fig. 3. Inversor puente H con interruptores G1, G2, G3 y G4 abiertos, D3 y D4 polarizados	18
Fig. 4. Inversor puente H con interruptores G3 y G4 cerrados	19
Fig. 5. Inversor puente H con interruptores G1, G2, G3 y G4 abiertos, D1 y D2 polarizados	20
Fig. 6. Respuesta escalón y diagrama de polos y ceros (sisotool)	25
Fig. 7. Circuito del inversor en OpenModelica	26
Fig. 8. Bloque de ecuaciones diferenciales del inversor	27
Fig. 9. Código utilizado en bloque de ecuaciones del inversor	27
Fig. 10. Validación de modelo en lazo abierto.....	28
Fig. 11. Bloque de control de corriente PI	29
Fig. 12. Inversor con variación de voltaje de entrada, carga y control de corriente PI.....	29
Fig. 13. Señal de corriente de salida del inversor con control PI.....	30

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

I_L	Corriente de inductor
V_c	Tensión capacitor
u	Estado de conmutación
V_{DC}	Tensión de entrada
k	Variable auxiliar
L	Inductor
C	Capacitor
IGBT	Transistor Bipolar de Puerta Aislada
V_{red}	Tensión de la red
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
PI	Proporcional-integral
A	Amperios
V	Voltios
Seg.	Segundos
MPPT	Seguidor del punto de máxima potencia

RESUMEN

En este documento se presenta el funcionamiento del inversor puente H monofásico conectado a la red y se deduce su modelo matemático con el método de referencia y reacción. Se observa la variación entre los interruptores IGBT's y los diodos conectados antiparalelos, los cuales se polarizan cuando los inductores de acople a la red inyectan energía reactiva al inversor. Se deduce el control PI, haciendo uso de la herramienta de simulación Matlab (sisotool), posteriormente se modela un bloque de simulación de control en el software OpenModelica y se comprueba a través de la simulación el correcto funcionamiento del inversor y su control. La información suministrada presenta un aporte a la solución del modelo matemático del inversor a través del método de referencia y reacción, puede ser utilizada como una base para el desarrollo de simulación, control y optimización del inversor.

***Palabras clave* — Modelamiento, control, Inversor puente H, referencias y reacciones, OpenModelica.**

ABSTRACT

This paper presents the operation of the single-phase H-bridge inverter connected to the grid and it deduces its mathematical model with the reference and reaction method. The variation between the IGBT switches and the anti-parallel connected diodes, which are polarized when the grid coupling inductors inject reactive power to the inverter is observed. The PI control is deduced, making use of the Matlab simulation tool (sisotool), then a control simulation block is modeled in the OpenModelica software, and the correct operation of the inverter and its control is verified through the simulation. The information provided presents a contribution to the solution of the mathematical model of the inverter through the reference and reaction method, it can be used as a basis for the development of simulation, control, and optimization of the inverter.

Keywords — **Modeling, control, H-bridge inverter, references and reactions, OpenModelica.**

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica es conocida como una fuente de energía renovable; esta genera electricidad por medio de paneles solares, los cuales transforman la radiación solar en corriente directa (DC) [1]; sin embargo, la corriente utilizada en los hogares, fabricas, hospitales y más, es la corriente alterna (AC). La corriente proveniente de los paneles debe pasar por un inversor para que el sistema pueda entregar AC. El inversor es el elemento encargado de transformar la corriente DC en AC [2].

El inversor puede inyectar al sistema corriente activa, reactiva o una combinación de ambas; la corriente que inyecta el inversor depende de la necesidad del cliente, un inversor conectado a la red normalmente debe inyectar corriente activa [3]; sin embargo, aunque en este proyecto se trabaja con un inversor puente H conectado a la red, se tendrá en cuenta la inyección de corriente reactiva.

La simulación de un sistema eléctrico permite reproducir el funcionamiento de los circuitos; este es utilizado para: hallar fallas en el sistema, verificar que se cumpla con los parámetros esperados y recrear maniobras arriesgadas, disminuyendo con esto pérdidas económicas. El software de simulación gratuito OpenModelica posee bloques de simulación de diferentes elementos eléctricos [4] son bloques básicos con los cuales se resuelve sistemas sencillos, para obtener una simulación de un sistema más complejo se plantea modelar en OpenModelica un bloque de control teniendo en cuenta los parámetros de un inversor real.

La simulación de un inversor puente H monofásico con parámetros ya establecidos, podría ser utilizada para obtener una simulación con datos semejantes a los obtenidos en un sistema real, disminuyendo el margen de error entre ambos resultados. La simulación puede ser utilizada como una herramienta para realizar maniobras experimentales sin causar daños en el sistema.

Para deducir el modelo matemático del inversor, este proyecto se basara en el caso en que el inversor debe inyectar energía reactiva a la red, haciendo que las bobinas de acople intercambien energía con el inversor, La referencia [3] indica el funcionamiento del inversor en estos casos, sin embargo, no presenta un modelo matemático de este; La referencia [5] presenta el modelado y el control de un inversor multinivel de puente H en cascada de cinco niveles conectado a la red fotovoltaica monofásica, pero se basa en el caso que el inversor inyecta energía activa; al igual que las referencias [6] y [7] que modelan el inversor partiendo del caso de inyección de energía activa.

En este proyecto se realiza el modelamiento del inversor puente H monofásico con el método de referencia y reacción, del planteamiento de su modelo matemático se deduce sus funciones de transferencia y con ellas su controlador, con los datos obtenidos se simula un bloque de control de corriente PI del inversor en el software OpenModelica, se conecta el bloque de control al circuito del inversor y se varia el voltaje de entrada para observar la salida de corriente cuando el sistema posee perturbaciones.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La literatura científica presenta el modelamiento matemático del inversor considerando los interruptores de forma ideal (abiertos y cerrados) y despreciando el desempeño de los diodos conectados antiparalelo a los interruptores.

Cuando se abren los cuatro interruptores se polarizan los diodos y las bobinas de acople entregan energía reactiva al inversor, al omitir el funcionamiento de los diodos se desprecia el intercambio de energía, con el método de referencia y reacción (presentado en este trabajo) se puede deducir cuando los inductores entregan energía polarizando los diodos.

III. JUSTIFICACIÓN

La literatura científica no analiza el intercambio de energía entre el inversor puente H y las bobinas de acople al momento de modelar el inversor, despreciando el funcionamiento del sistema cuando los diodos se encuentran polarizados, en este trabajo se analiza el modelo matemático del inversor con el método de referencia y reacción, con este método se analiza el intercambio de energía entre el bus DC, inversor y las bobinas de acople, al igual que el funcionamiento del inversor cuando los diodos se polarizan.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Modelar un inversor puente H monofásico utilizado en el acople de energías renovables, mediante el método referencia y reacción.

B. Objetivos específicos

Hallar el modelo matemático del inversor puente H monofásico, mediante el método referencia y reacción.

Probar el modelo matemático del inversor puente H monofásico a través de la simulación en el software OpenModelica, se compara la salida de corriente del inversor del modelo circuital con la salida de corriente entregado por las ecuaciones diferenciales.

Diseñar el control del inversor puente H monofásico, mediante la herramienta de control ofrecida por el software Matlab (sisotool), con las funciones de transferencia obtenidas de su modelo matemático.

Validar el control de corriente de salida del inversor puente H monofásico, creando un bloque de control en el software de simulación OpenModelica.

V. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Un inversor puente H monofásico está conformado por cuatro interruptores IGBTs (generalmente) y cuatro diodos conectados en antiparalelo a cada interruptor, cuando los cuatro interruptores se encuentran abiertos entran en funcionamiento los diodos, sin embargo, en la literatura científica no se ha encontrado información que incluyan el funcionamiento del diodo en el modelo matemático del inversor.

Al tener solo una variable de conmutación se desprecia el trabajo de los diodos en el inversor, por ello se crean dos variables de conmutación para incluir el caso donde los cuatro interruptores se encuentran abiertos.

Al modelar el comportamiento del inversor se debe tener en cuenta que los cuatro diodos del inversor no pueden conducir corriente al mismo tiempo debido que producirían un corto, para descartar este caso se debe hacer uso de variables auxiliares que rijan el comportamiento de los diodos cuando los cuatro interruptores se encuentran abierto.

VI. MARCO TEÓRICO

Debido a la alta contaminación, la reducción de la capa de ozono y el constante aumento de consumo de energía eléctrica se ha incrementado el uso de las energías renovables. En Colombia las fuentes de energía renovable más utilizadas son la hidráulica, fotovoltaica y eólica. Esto se debe a que los países ubicados en centro y sur América poseen potencial en fuentes hídricas, radiación solar y eólica [8]. Colombia posee potencial para la generación de energía fotovoltaica, debido a que esta posee una radiación solar de 4.5 a 6 kWh/m²/día en departamentos como la Guajira; sin embargo, la implementación de esta no ha tenido gran relevancia, siendo las zonas rurales del país, las zonas con un mayor porcentaje de proyectos de energía solar fotovoltaica. Implementar un mayor porcentaje de sistemas solares fotovoltaicos en el país puede dar beneficios representativos en los sectores económico, social y ambiental de país [9].

Un sistema de generación de energía solar fotovoltaica está compuesto por módulos de paneles solares, los inversores y el tipo de conexión de estos (puede estar conectado a un sistema de baterías, a la red o híbrido) [10]. El inversor es el encargado de generar energía de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada, a partir de una fuente de energía de corriente directa [11].

Según la referencia [3] un inversor monofásico VSI (voltage Source Inverter) está compuesto por un bus DC y un puente H de dos ramas, donde cada rama contiene dos interruptores que conmuta de acuerdo con la estrategia de control. Cada interruptor está compuesto por un IGBT y un diodo antiparalelo, los cuales son los encargados de permitir la circulación de corriente hacia arriba o hacia abajo respectivamente, dependiendo de lo que amerite el control de controlador, tal como se muestra en la **fig. 1**.

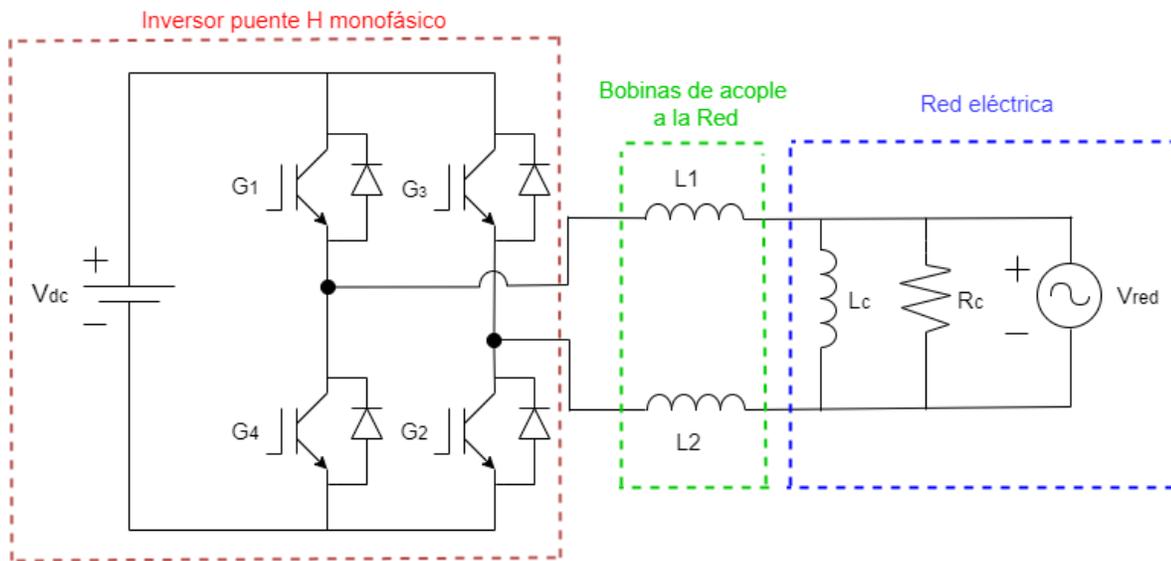


Fig. 1. Circuito de inductor puente H conectado a la red

Los inversores pueden producir desperfectos en la red, debido a que inyectan cargas no lineales. Es por ello por lo que estos sistemas deben ser controlados considerando armónicos, resonancias y otros problemas de calidad de la energía. Según la referencia [12] en los inversores con un control SPWM altas frecuencias los armónicos más significativos se distribuyen alrededor de dichas frecuencias, a la vez que el valor de los armónicos disminuye tanto para frecuencia como para índices de modulación en amplitud altos.

El método de referencia y reacción consiste en modelar el funcionamiento del sistema detallando el comportamiento de los elementos inductivos y capacitivos a medida que se varían los estados de conmutación. En este método se utiliza el color rojo para referenciar la corriente y voltaje de los elementos cuando estos son positivos y el color azul para referenciar la corriente y voltaje del sistema cuando los elementos negativos, este método puede ser utilizado en convertidores [13].

VII. METODOLOGÍA

A. Modelamiento del inversor con el método de referencias y reacciones

Se utiliza el método de referencia y reacción es para analizar el intercambio de energía en el sistema, se utiliza el color rojo para referenciar voltaje y corriente cuando los elementos absorbe energía y se utiliza el color azul para denotar las reacciones de los elementos cuando entregan energía. Se parte del modelo de la **fig. 1** para realizar el análisis.

Se deducen las ecuaciones diferenciales del inversor puente H monofásico partiendo de las referencias rojas del sistema.

Debido a que los inductores L_1 y L_2 son iguales estos son reemplazados en las ecuaciones por un único inductor nombrado L .

$$L_1 = L_2 = L \tag{1}$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \tag{2}$$

Se inicia la deducción de referencias cerrando los interruptores G_1 y G_2 , tal como se observa en la **fig. 2**, en este caso el bus DC entrega energía al inversor, por ello se referencia la corriente con azul, las bobinas de acople L_1 y L_2 se encuentran absorbiendo energía del bus DC, razón por la cual la corriente que sale del inversor se referencia en rojo al igual que la polaridad del voltaje de las bobinas.

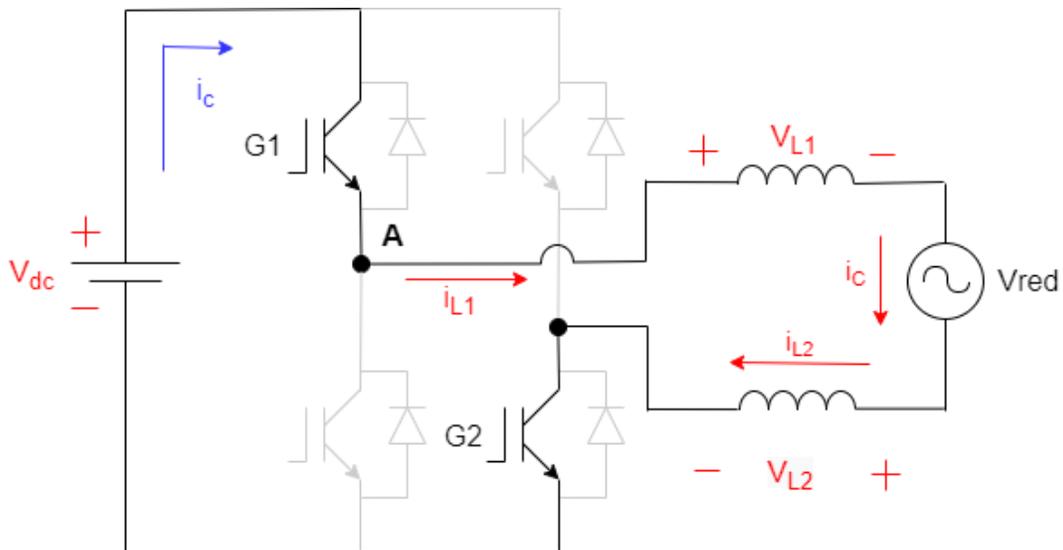


Fig. 2. Inversor Puente H cuando los interruptores G_1 y G_2 están cerrados

Se realiza suma de voltajes para deducir la ecuación diferencial que rige el comportamiento del inductor.

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{v_{DC} - v_{red}}{2} \quad (3)$$

Se realiza una suma de corrientes en el nodo **A** de la **fig. 2** para deducir la ecuación diferencial que rige el comportamiento del capacitor.

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L \quad (4)$$

En el circuito de la **fig. 3**, Se abren los interruptores G1 y G2, en este caso los inductores L1 y L2 reaccionan entregando energía al inversor polarizando los diodos D3 y D4, por ello se referencia su voltaje en azul. La corriente del bus DC se referencia en rojo al igual que su voltaje debido a que el capacitor se encuentra absorbiendo energía de los inductores.

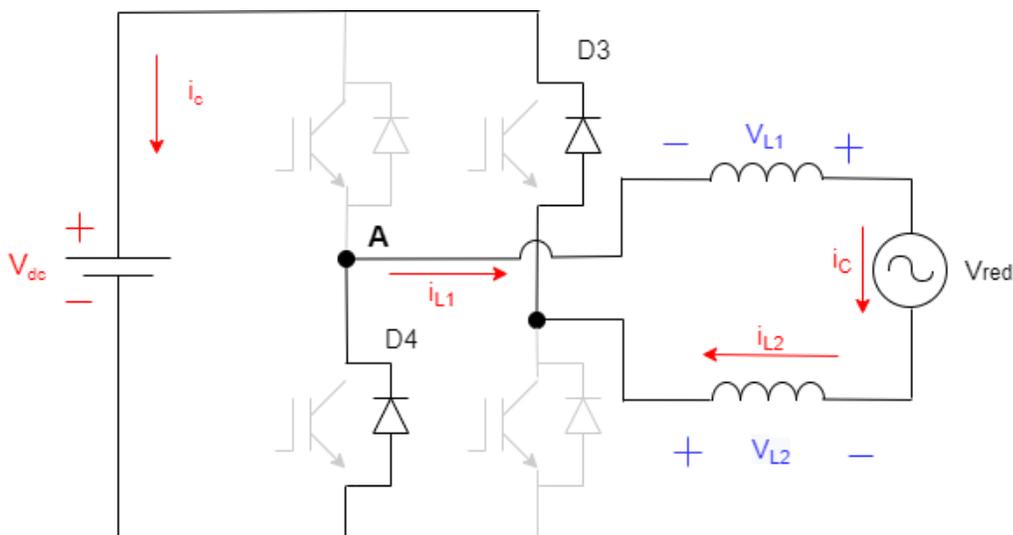


Fig. 3. Inversor puente H con interruptores G1, G2, G3 y G4 abiertos, D3 y D4 polarizados

Se realiza suma de voltajes para deducir la ecuación diferencial que rige el comportamiento del inductor.

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{-(v_{DC} + v_{red})}{2} \quad (5)$$

Se realiza una suma de corrientes en el nodo **A** de la **fig. 3** para deducir la ecuación diferencial que rige el comportamiento del capacitor.

$$C \frac{dv_c}{dt} = -i_L \quad (6)$$

Se observa en la **fig.4** el cierre de los interruptores G3 y G4, las bobinas L1 y L2 absorben energía lo cual hace que las dirección de la corriente que sale del inversor reaccione invirtiendo su dirección por ello se referencia en azul. La corriente del bus DC se referencia en azul debido a que éste está entregando energía al inversor.

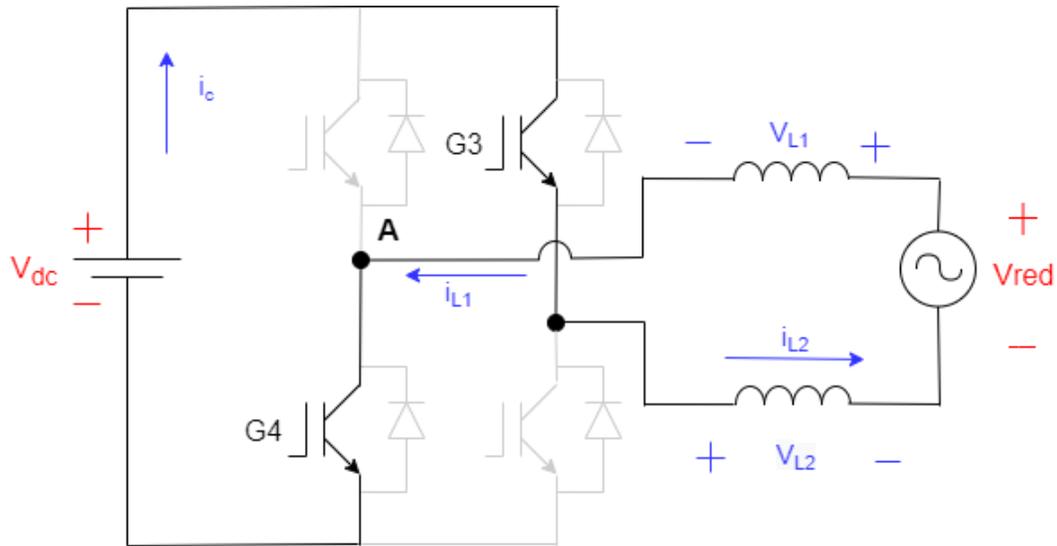


Fig. 4. Inversor puente H con interruptores G3 y G4 cerrados

Se realiza suma de voltajes para deducir la ecuación diferencial que rige el comportamiento del inductor.

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{-(v_{DC} + v_{red})}{2} \tag{7}$$

Se realiza una suma de corrientes en el nodo A de la **fig. 4** para deducir la ecuación diferencial que rige el comportamiento del capacitor.

$$C \frac{dv_c}{dt} = -i_L \tag{8}$$

En la **fig. 5** se observa los cuatro interruptores abiertos, los inductores entregan energía al bus DC polarizando los diodos D1 y D2. El bus DC absorbe energía razón por la cual su corriente se referencia en rojo.

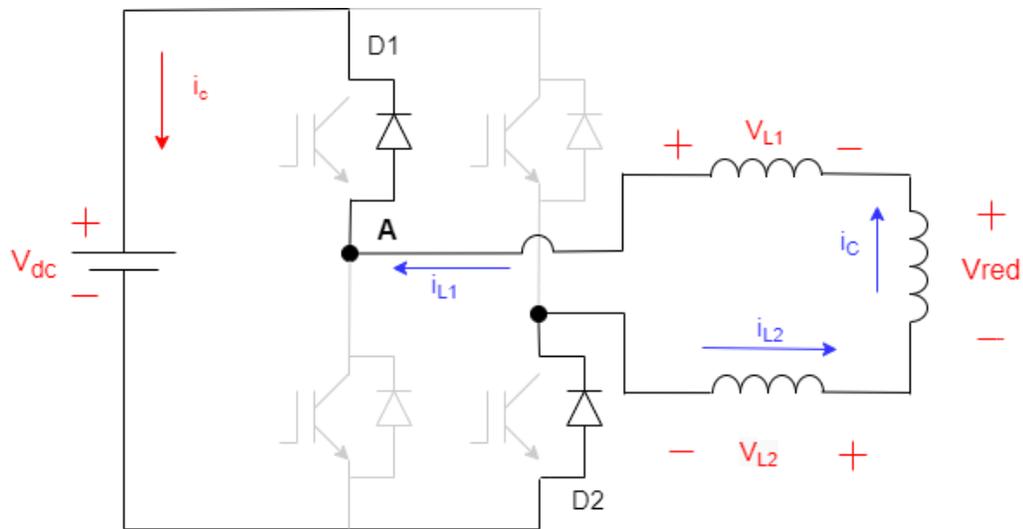


Fig. 5. Inversor puente H con interruptores G1, G2, G3 y G4 abiertos, D1 y D2 polarizados

Se realiza suma de voltajes para deducir la ecuación diferencial que rige el comportamiento del inductor.

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{v_{DC} - v_{red}}{2} \quad (9)$$

Se realiza una suma de corrientes en el nodo A de la **fig. 5** para deducir la ecuación diferencial que rige el comportamiento del capacitor.

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L \quad (10)$$

B. Modelo conmutado del sistema

El sistema posee cuatro estados: cuando los interruptores G1 y G2 se encuentran cerrados, cuando los interruptores G3 y G4 se encuentran cerrados, cuando los diodos D1 y D2 se polarizan y cuando los diodos D3 y D4 se polarizan.

Se utiliza u como una variable de estado que controla cuando los interruptores G1 y G2 se cierran.

Cuando los cuatro interruptores se encuentran abiertos, se pueden polarizar los diodos D1 y D2, o los diodos D3 y D4, en la ecuación diferencial se debe especificar que par de diodos se polariza, para ello se genera dos variables auxiliares k_1 y k_2 , cuando:

- $k_1=1$, Se polarizan D1 y D2.
- $k_1=0$, No se polarizan D1 y D2.
- $k_2=1$, Se polarizan D3 y D4.
- $k_2=0$, No se polarizan D3 y D4.

Los interruptores G3 y G4 se cierran cuando la variable de estado u y las variables auxiliares k_1 y k_2 , son igual a cero.

Se parte de las ecuaciones (3,5,7 y 9) para hallar el modelo conmutado del inductor, se reescribe las ecuaciones anteriormente nombradas usando las variables conmutables u_1 y u_2 y las variables auxiliares k_1 y k_2 .

De la ecuación (3) se obtiene:

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{v_{DC} - v_{red}}{2} * (u) \quad (11)$$

De la ecuación (5) se obtiene:

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{-(v_{DC} + v_{red})}{2} * (k_2) \quad (12)$$

De la ecuación (7) se obtiene:

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{-(v_{DC} + v_{red})}{2} * (1 - u - k_1 - k_2) \quad (13)$$

De la ecuación (8) se obtiene:

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{v_{DC} - v_{red}}{2} * (k_1) \quad (14)$$

Se obtiene una única ecuación diferencial del inductor juntando las expresiones anteriores:

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{2} ((2u + 2k_1 - 1) * (v_{DC}) - (v_{red})) \quad (15)$$

Se parte de las ecuaciones (4,6,8 y 10) para hallar el modelo conmutado del capacitor, se reescribe las ecuaciones anteriormente nombradas usando las variables conmutables u_1 y u_2 y las variables auxiliares k_1 y k_2 .

De la ecuación (4) se obtiene:

$$C \frac{dv_c}{dt} = (i_L) * u \quad (16)$$

De la ecuación (6) se obtiene:

$$C \frac{dv_c}{dt} = -(i_L) * k_2 \quad (17)$$

De la ecuación (8) se obtiene:

$$C \frac{dv_c}{dt} = -(i_L) * (1 - u - k_1 - k_2) \quad (18)$$

De la ecuación (10) se obtiene:

$$C \frac{dv_c}{dt} = (i_L) * k_1 \quad (19)$$

Se obtiene una única ecuación diferencial del inductor juntando las expresiones anteriores:

$$C \frac{dv_c}{dt} = (i_L) * (2u + 2k_1 - 1) \quad (20)$$

C. Modelo promedio del sistema

Se utiliza el modelo promedio para dimensionar los elementos del sistema incluyendo solo las dinámicas lentas, para hallar el modelo promedio se parte de las ecuaciones (15) y (20), la ecuación (15) presenta el modelo conmutado del inductor y la ecuación (20) presentada el modelo conmutado del capacitor.

El valor promedio de la señal de conmutación es representado por la letra U, donde U es el porcentaje del tiempo donde los interruptores G1 y G2 permanecen cerrados. El valor promedio de corriente y voltaje es representado por I y V respetivamente.

- Modelo promedio para el voltaje del inductor:

$$0 = (2U + 2K_1) * V_{DC} - V_{red} \quad (21)$$

- Modelo promedio para la corriente del capacitor:

$$0 = I_L * (2U + 2K_1) \quad (22)$$

D. Función de transferencia

En el primer paso para deducir las funciones de transferencia se definen los parámetros, estados, entradas y salidas del inversor. El inductor L, capacitor C y frecuencia de conmutación f_{sw} son los parámetros constantes, los estados del convertidor son definidos por la corriente del inductor i_l y

el voltaje del capacitor v_c , las estradas son definidas por la corriente de entrada i_{in} , la función de conmutación u , las variables auxiliar k_1 y k_2 , el voltaje de la red v_{red} , siendo la entrada v_{red} entrada no controlables, a diferencia de las entradas k_1, k_2 y u entradas con las cuales se puede controlar el sistema. Las salidas de corriente del inductor i_l y el voltaje del capacitor v_c son las variables que se pretenden controlar.

Se deriva los estados, para ello se despeja las ecuaciones (15) y (20).

$$f_1 = \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{2L} ((2u + 2k_1 - 1) * (v_{DC}) - (v_{red})) \quad (23)$$

$$f_2 = \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C} ((i_L) * (2u + 2k_1 - 1)) \quad (24)$$

Posteriormente se obtiene el valor promedio en el punto de trabajo:

$$f_1 = \frac{\langle di_L \rangle}{dt} = \frac{1}{2L} ((2\langle u \rangle + 2\langle k_1 \rangle - 1) * \langle v_{DC} \rangle - \langle v_{red} \rangle) \quad (25)$$

$$f_2 = \frac{\langle dv_c \rangle}{dt} = \frac{1}{C} * \langle i_L \rangle * (2\langle u \rangle + 2\langle k_1 \rangle - 1) \quad (26)$$

Se obtiene aplicando la derivada parcial a las ecuaciones (23) y (24) las pequeñas variaciones en el punto de operación.

Derivada parcial de ecuación (23):

$$\frac{d\langle di_{L\delta} \rangle}{dt} = \frac{\partial f_1 \langle i_{L\delta} \rangle}{\partial i_L} + \frac{\partial f_1 \langle v_{c\delta} \rangle}{\partial v_c} + \frac{\partial f_1 \langle u_{\delta} \rangle}{\partial u} + \frac{\partial f_1 \langle k_{1\delta} \rangle}{\partial k_1} + \frac{\partial f_1 \langle k_{2\delta} \rangle}{\partial k_2} + \frac{\partial f_1 \langle v_{red\delta} \rangle}{\partial v_{red}} \quad (27)$$

$$\frac{\partial f_1 \langle i_{L\delta} \rangle}{\partial i_L} = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial f_1 \langle v_{c\delta} \rangle}{\partial v_{DC}} = \frac{1}{2L} (2U + 2K_1 - 1) \quad (29)$$

$$\frac{\partial f_1 \langle u_{\delta} \rangle}{\partial u} = \frac{1}{2L} (2V_{DC}) \quad (30)$$

Las derivadas parciales de las auxiliares k_1 y k_2 , la corriente de entrada i_{in} y voltaje de salida v_{red} no se tienen en cuenta para facilitar la obtención de función de transferencia. Debido a que u_1

y u_2 conmutan interruptores diferentes, se desprecia la derivada parcial de u_2 al reescribir la ecuación.

Reescribiendo la ecuación (27) se obtiene:

$$\frac{d\langle i_{L\delta} \rangle}{dt} = \frac{1}{2L} (2U + 2K_1 - 1) * \langle v_{DC\delta} \rangle + \frac{2}{2L} V_{DC} * \langle u_{\delta} \rangle \quad (31)$$

Derivada parcial de ecuación (24):

$$\frac{\langle dv_{DC\delta} \rangle}{dt} = \frac{\partial f_2 \langle i_{L\delta} \rangle}{\partial i_L} + \frac{\partial f_2 \langle v_{c\delta} \rangle}{\partial v_c} + \frac{\partial f_2 \langle u_{\delta} \rangle}{\partial u} + \frac{\partial f_2 \langle k_{\delta} \rangle}{\partial k} + \frac{\partial f_2 \langle v_{red\delta} \rangle}{\partial v_{red}} \quad (32)$$

$$\frac{\partial f_2 \langle i_{L\delta} \rangle}{\partial i_L} = \frac{1}{C} * (2U + 2K_1 - 1) \quad (33)$$

$$\frac{\partial f_2 \langle v_{c\delta} \rangle}{\partial v_c} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial f_2 \langle u_{\delta} \rangle}{\partial u} = \frac{1}{C} * (2I_L) \quad (35)$$

Las derivadas parcial de las auxiliar k_1 y k_2 , y voltaje de salida v_{red} no se tienen en cuenta para facilitar la obtención de función de transferencia.

Reescribiendo la ecuación (32) se obtiene:

$$\frac{\langle dv_{DC\delta} \rangle}{dt} = \frac{1}{C} * (2U + 2K_1 - 1) * \langle i_{L\delta} \rangle + \frac{1}{C} * (2I_L) * \langle u_{1\delta} \rangle \quad (36)$$

Se aplica la transformada de LaPlace sobre las ecuaciones (31) y (36)

$$\langle i_{L\delta} \rangle * s = \frac{1}{2L} (2U + 2K_1 - 1) * \langle v_{DC\delta} \rangle + \frac{2}{2L} V_{DC} * \langle u_{\delta} \rangle \quad (37)$$

$$\langle v_{DC\delta} \rangle * s = \frac{1}{C} * (2U + 2K_1 - 1) * \langle i_{L\delta} \rangle + \frac{1}{C} * (2I_L) * \langle u_{\delta} \rangle \quad (38)$$

Seguido se manipula matemáticamente las expresiones obtenidas para hallar las funciones de transferencia con respecto al duty:

$$\frac{\langle i_{L\delta} \rangle}{\langle u_{1\delta} \rangle} = \frac{\frac{V_{red} * s}{L} + \frac{I_L}{LC}}{s^2 - \frac{(2U + 2K_1 - 1)^2}{2LC}} \quad (39)$$

E. Control de corriente PI

Se halla el control PI de corriente haciendo uso de la herramienta de simulación Matlab (sisotool), para ello se utiliza la función de transferencia obtenida en la ecuación (21), se simula el diagrama de polos y ceros y se escoge un punto de operación donde el sistema posee un tiempo de

estabilidad aceptable. Obteniendo una ganancia $k= 0.024902$ y un periodo $T= 0.0035s$, En la fig. 6 se observa el diagrama de polos y ceros y la respuesta escalón utilizada para hallar el controlador de corriente PI (proporcional-integral) del inversor.

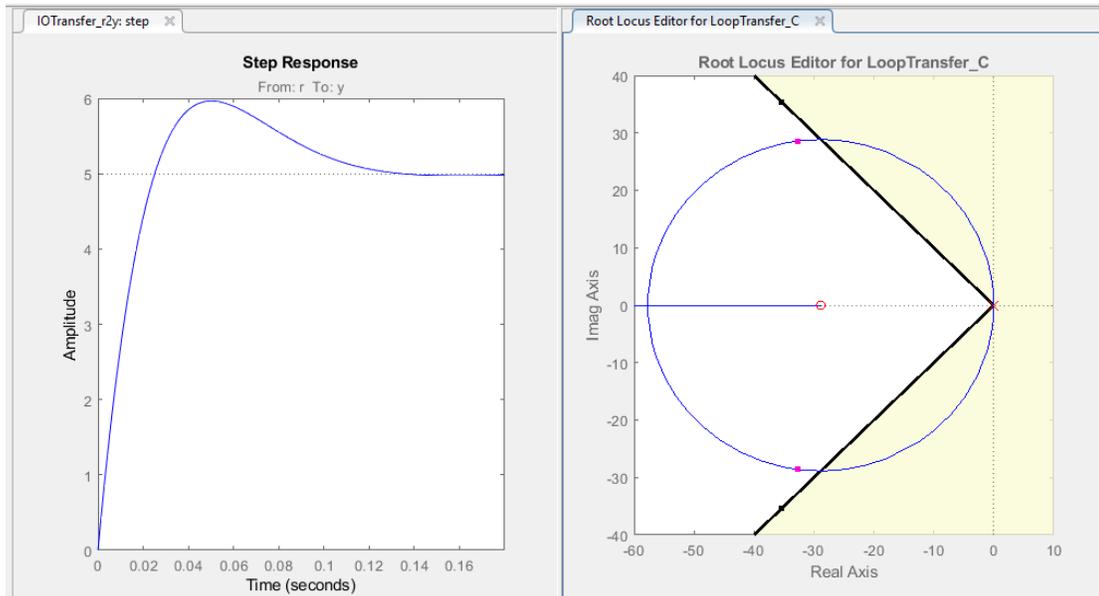


Fig. 6. Respuesta escalón y diagrama de polos y ceros (sisotool)

VIII. RESULTADOS

Se realiza la simulación para validar las ecuaciones diferenciales halladas, en el software de simulación OpenModelica, para ello se compara el circuito del inversor de la fig. 7 y un bloque compuesto por las ecuaciones diferenciales (15) y (20). El condensador del bus DC es de 0.047 F, las bobinas de acople a la red son de 0.019H cada una, el voltaje de red se fijó en 120 Vrms con una frecuencia de 60 Hz y las señales de control U1 y U2 en el modelo del circuito son del 50%, donde U2 es el complemento de U1. Los parámetros en el bloque de ecuaciones son los mismo utilizados en el circuito, sin embargo, a este bloque entran las variables auxiliares k1 y k2 que definen el comportamiento de los diodos, tal como indica la fig. 8 y 9.

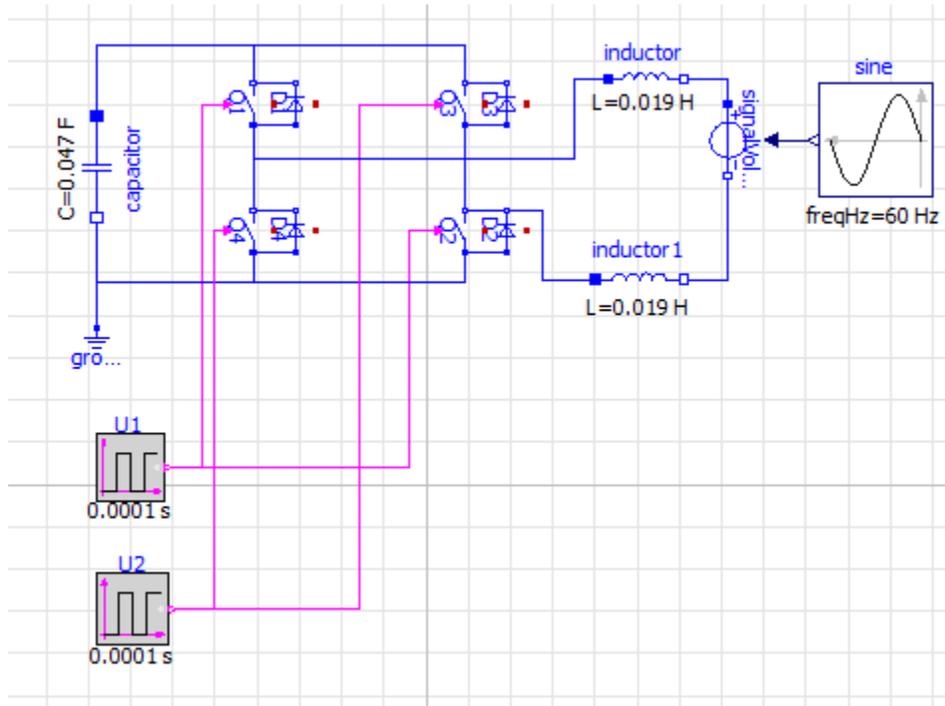


Fig. 7. Circuito del inversor en OpenModelica

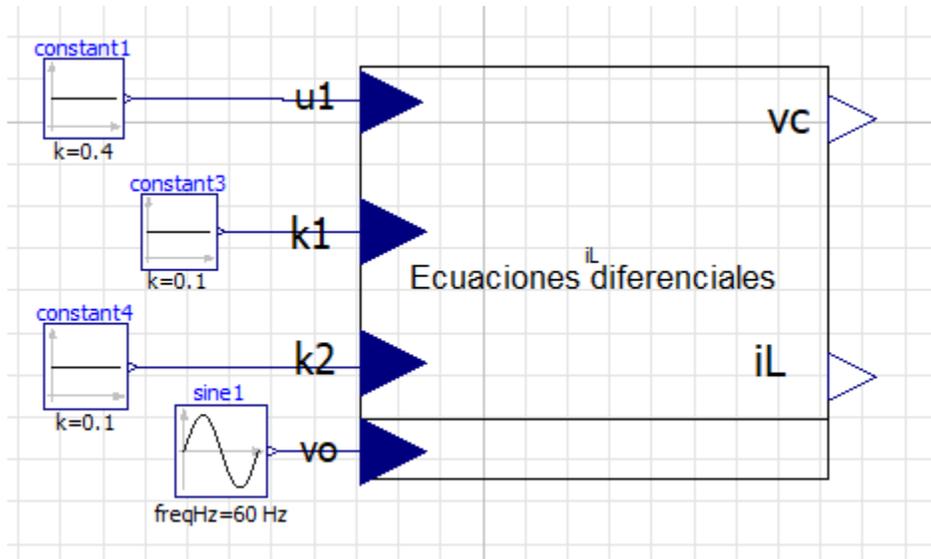


Fig. 8. Bloque de ecuaciones diferenciales del inversor

```

1 model Ecuaciones
2 parameter Real L=0.019;
3 parameter Real C=0.047;
4
5
6 Real il(start=0);
7 Real vc(start=0);
8 > Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput u1 annotation( ...);
10 > Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput vo annotation( ...);
12 > Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput CurrentL annotation( ...);
14 > Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput k annotation( ...);
16 > Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput VoltageC annotation( ...);
18 > Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput k1 annotation( ...);
20 equation
21 L * der(il) = (vc * (2 * k + 2 * u1 - 1) - vo) / 2;
22 C * der(vc) = il * (2 * k + 2 * u1 - 1);
23 CurrentL = il;
24 VoltageC = vc;
25 > annotation( ...);
28 end Ecuaciones;
    
```

Fig. 9. Código utilizado en bloque de ecuaciones del inversor

En la fig. 10 se enseña la señal de corriente del inductor a la salida del inversor en el circuito (señal roja) y la señal de corriente del inductor entregada por el bloque de ecuaciones (señal azul), ambas señales poseen una frecuencia, amplitud y fase igual por ello al sobreponerlas se observa una única señal. Al simular el inversor por dos métodos diferentes, circuito y bloque de ecuaciones, con los mismo parámetros y obtener una respuesta idéntica, se corrobora el modelo matemático del inversor hallado en este trabajo por el método de referencias y reacciones.

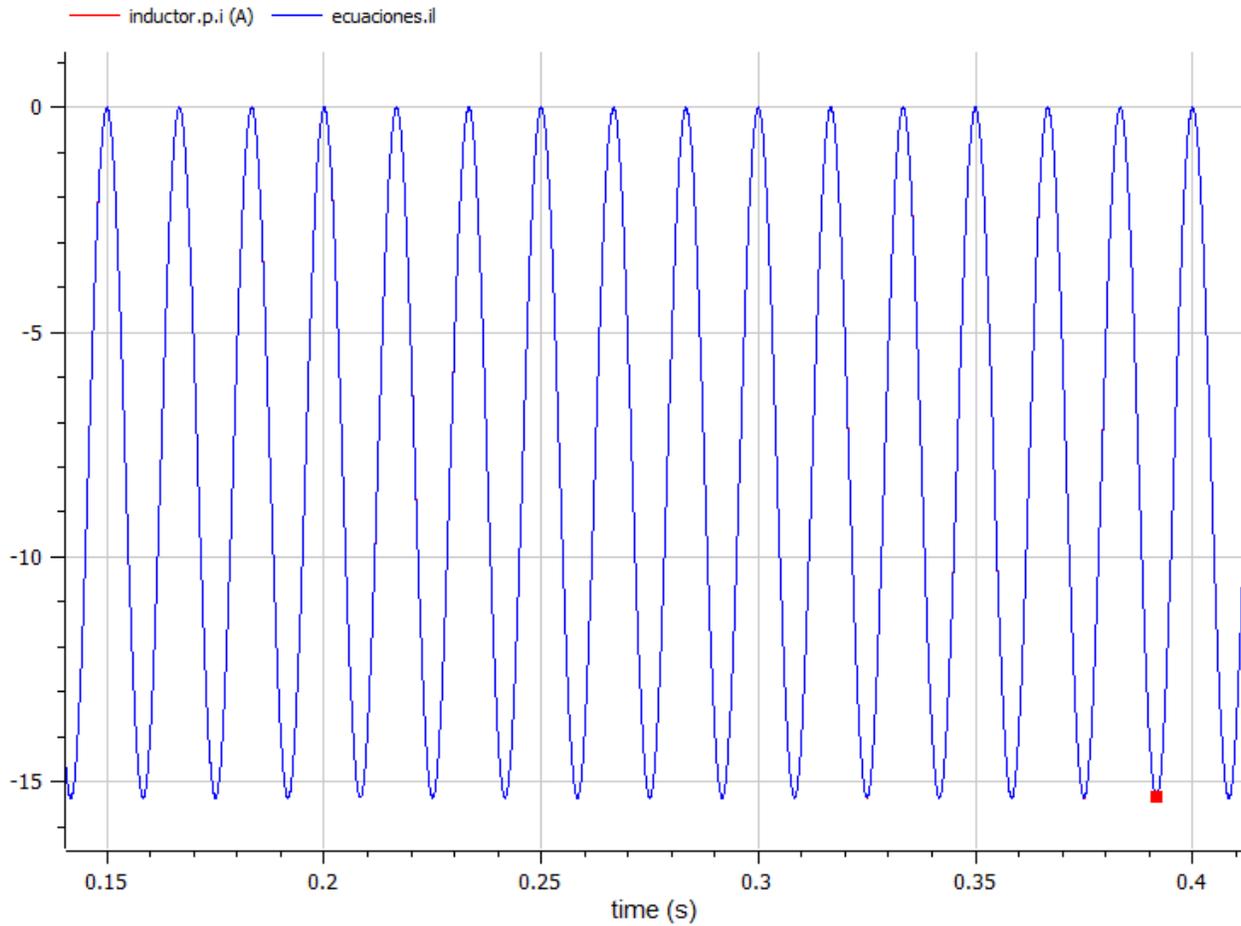


Fig. 10. Validación de modelo en lazo abierto

Finalmente, se simula en OpenModelica un bloque de control de corriente PI para el inversor con los parámetros obtenidos en Matlab (sisotool), tal como se observa en la fig. 11. Para comprobar el correcto funcionamiento del bloque de control cuando el inversor entrega energía a la red, se conecta el controlador al circuito del inversor y se varía el voltaje de entrada simulando la fuente como una salida de un controlador MPPT alimentado por paneles solares que entregan voltaje variable al inversor, iniciando en 100V, y sumando 50V en los segundos 1 y 2 del tiempo de simulación, tal como indica la fig. 12; esto se hace para validar el desempeño del control ante cambios en la fuente de alimentación del inversor.

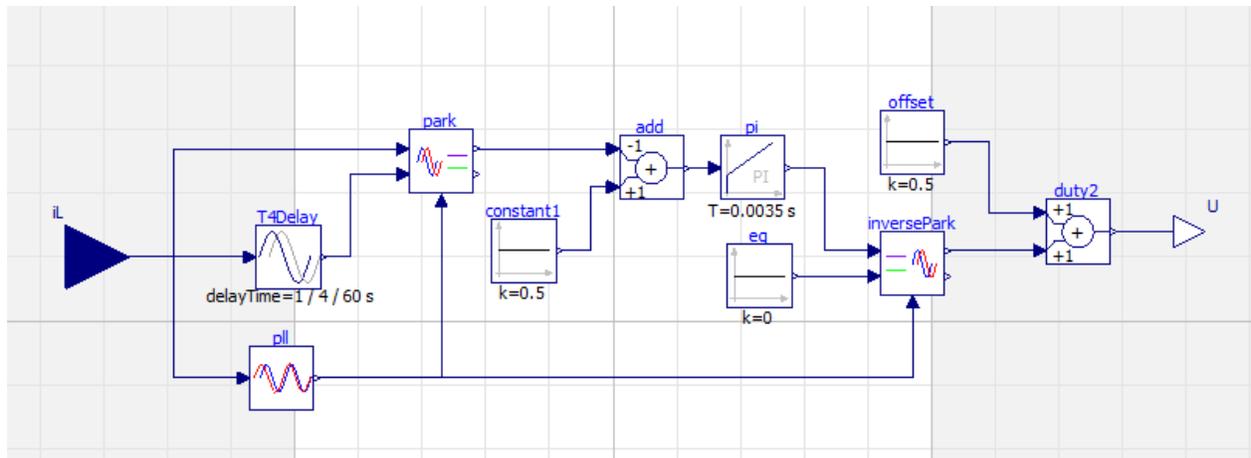


Fig. 11. Bloque de control de corriente PI

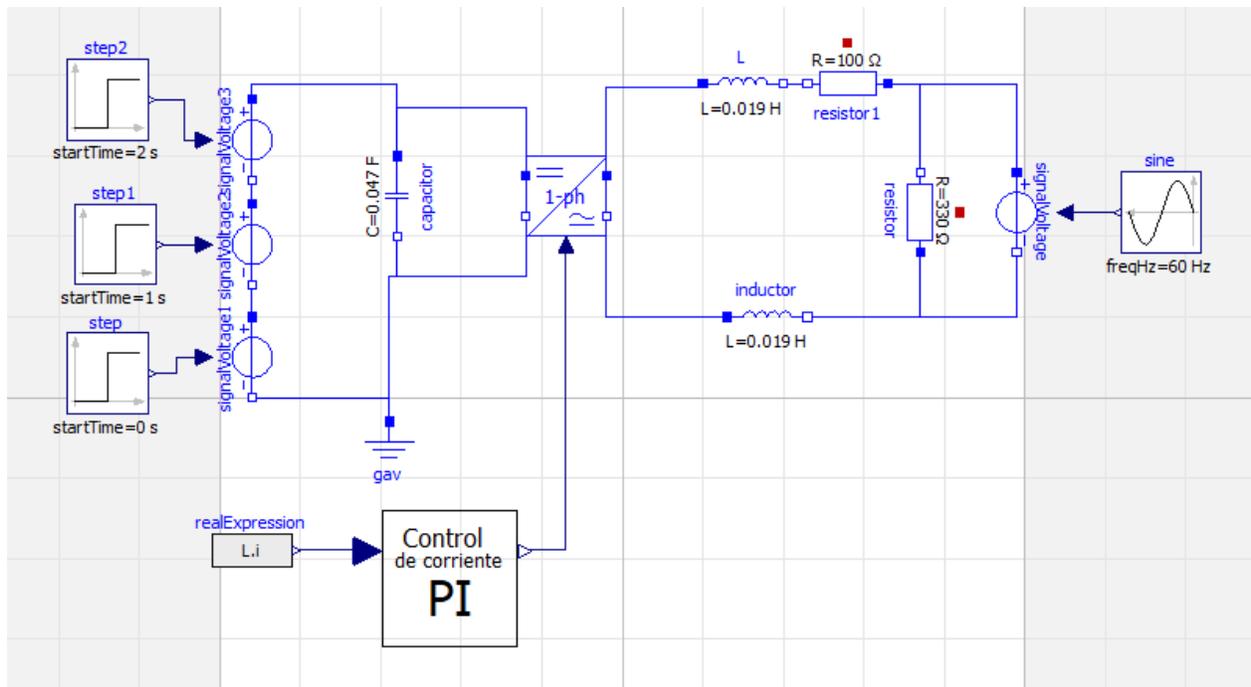


Fig. 12. Inversor con variación de voltaje de entrada, carga y control de corriente PI

En la fig. 13 se observa la respuesta de la salida de corriente del inversor cuando este se encuentra conectado a un controlador de corriente PI y posee un voltaje variable en la entrada. Se observa que la corriente se dispara llegando a 1.2A, sin embargo, se estabiliza en aproximadamente en 0.2seg, llegando a 0.5A, Al 1seg se inyecta al inversor 50V, produciendo una perturbación de aproximadamente 0.2seg. en la señal de salida de corriente, esta se vuelve a estabilizar en 0.5A, los 2seg. Se vuelve a variar el voltaje, produciendo a la señal de corriente otra perturbación de aproximadamente 0.2seg antes de volver a estabilizarse en 0.5A. Cuando se varia la entrada de

voltaje al inversor la corriente de salida sufre una perturbación de aproximadamente 0.2seg antes de estabilizarse en 0.5A. Como se puede observar en la figura, el control obtenido con el modelamiento mediante el método de referencias y reacciones opera de forma adecuada ya que estabiliza la corriente en el arranque y ante cambios en la fuente de alimentación, una vez pasado el transitorio, la corriente se estabiliza en el valor deseado para los casos analizados.

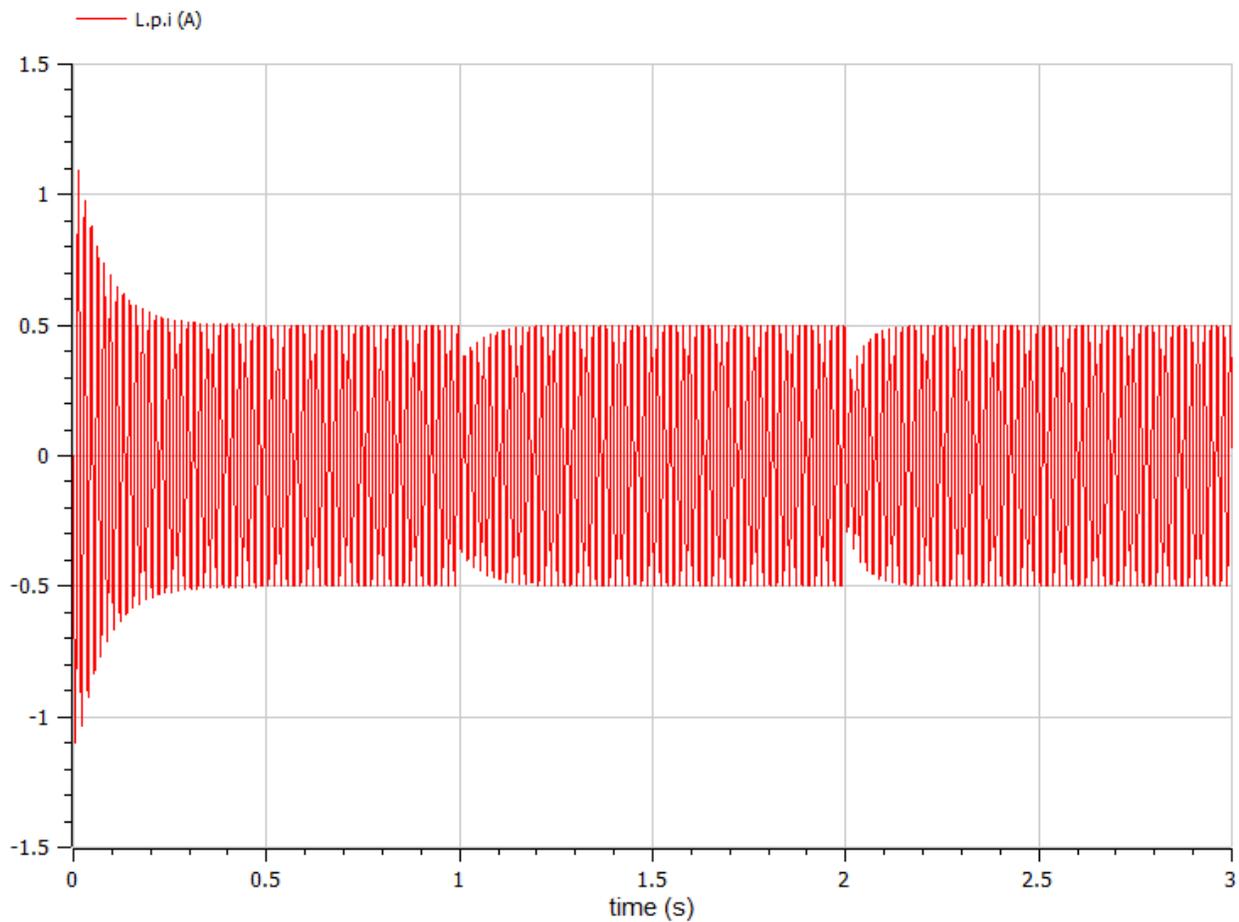


Fig. 13. Señal de corriente de salida del inversor con control PI

IX. CONCLUSIONES

El método de referencia y reacciones utilizado para modelar el funcionamiento de convertidores es válido para modelar el funcionamiento de inversores.

La literatura científica omite el funcionamiento de los diodos, despreciando cuando los elementos absorben o entregan energía, este trabajo modela el inversor con el método de referencia y reacción observando el intercambio de energía entre bobinas y condensador.

Los inductores de acople a la red absorben energía cuando los interruptores se cierran, sin embargo, cuando los interruptores se abren estos entregan energía polarizando los diodos.

Se debe utilizar variables auxiliares para modelar el funcionamiento del inversor cuando posee los cuatro interruptores abiertos para evitar en teoría un corto.

Al variar el voltaje de entrada al inversor este puede sufrir perturbaciones en la salida de corriente, sin embargo, el controlador de corriente PI se encarga de que la corriente a la salida vuelve a estabilizar en el mismo amperaje.

En el software de simulación OpenModelica los resultados obtenidos por medio del método de esquema son igual a los resultados obtenidos por el método de bloque (código), siempre y cuando el código del bloque posea los mismo parámetros del esquema.

X. RECOMENDACIONES

Este trabajo entrega las ecuaciones diferenciales que rigen del modelo matemático del inversor teniendo en cuenta el intercambio de energía entre el inversor y los elementos de acople, puede utilizarse esta información como una base para realizar estudios de simulación, control u optimización.

El control de corriente en el trabajo se realizó con la finalidad de comprobar el funcionamiento de las ecuaciones halladas, se recomienda realizar un estudio más adecuado de control de corriente para obtener resultados más eficientes, estabilizando la señal de salida más rápido y disminuyendo la amplitud de la perturbación.

REFERENCIAS

- [1] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, Apr. 2011, doi: 10.1016/J.RSER.2010.11.032.
- [2] P. Puig, M. Jofra, and D. Electricidad, “Energía Solar Fotovoltaica ENERGÍA SOLAR PARA LA GENERACIÓN”.
- [3] N. Muñoz-Galeano, J. B. Cano-Quintero, and J. M. López-Lezama, “Enseñando el funcionamiento de los inversores puente H: análisis del intercambio de potencia entre bobinas y condensadores,” *Formacion Universitaria*, vol. 9, no. 1, 2016, doi: 10.4067/S0718-50062016000100013.
- [4] P. Fritzson *et al.*, “OpenModelica - A free open-source environment for system modeling, simulation, and teaching,” pp. 1588–1595, Feb. 2009, doi: 10.1109/CACSD-CCA-ISIC.2006.4776878.
- [5] S. J. Lee, H. S. Bae, and B. H. Cho, “Modeling and control of the single-phase photovoltaic grid-connected cascaded H-bridge multilevel inverter,” *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009*, pp. 43–47, 2009, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316126.
- [6] F. Liu and A. I. Maswood, “A novel variable hysteresis band current control of three-phase three-level unity PF rectifier with constant switching frequency,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 21, no. 6, pp. 1727–1734, Nov. 2006, doi: 10.1109/TPEL.2006.882926.
- [7] M. Mohseni, S. M. Islam, and M. A. S. Masoum, “Enhanced hysteresis-based current regulators in vector control of DFIG wind turbines,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 26, no. 1, pp. 223–234, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2058816.
- [8] S. Cortés and A. Arango Londoño, “Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía,” *Revista Ciencias Estratégicas*, vol. 25, no. 38, pp. 375–390, 2017, Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/1513/151354939007.pdf>
- [9] L. Rodríguez Urrego, M. Valderrama Mendoza, H. García León, and P. C. Ocampo, “La gestión para cadena de suministro de sistemas de energía solar fotovoltaica en Colombia y su situación actual,” *Avances: Investigacion en Ingenieria, ISSN-e 1794-4953, Vol. 15, N° 1, 2018, págs. 112-130*, vol. 15, no. 1, pp. 112–130, 2018, doi: 10.18041/avances.v15i1.

-
- [10] A. Santos-Fuentefria and R. D. Santos, "Diseño de un sistema fotovoltaico para alimentar una vivienda," 2017, Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/317950069>
- [11] C. P. Andrés Torres, D. Y. MURILLO Ingeniero Electricista, M. Sc Profesor Catedrático, and C. Restrepo Patiño, "Diciembre de," *Scientia et Technica Año XIV*, vol. 40, 2008.
- [12] A. B. Telles *et al.*, "APLICACIONES INDUSTRIALES Análisis de calidad de la energía de inversor de puentes H y control SPWM Energy quality analysis of CH-bridge inverter and SPWM control," vol. 41, no. 1, p. 2911, 2020, Accessed: Oct. 09, 2022. [Online]. Available: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>
- [13] N. Muñoz-Galeano, J. M. Lopez-Lezama, and J. B. Cano-Quintero, "Methodology for teaching the operation principle of the boost converter: a rigorous description and solution using OpenModelica ," *ESPACIOS*, vol. 41, no. 25, 2020.