

jifi-eai 2012



Jornadas de Investigación Encuentro Académico Industrial

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA

26 - 30 noviembre 2012

## RECTIFICADOR/INVERSOR TRIFÁSICO USANDO MODULACIÓN ESPACIAL VECTORIAL

Julian Pérez<sup>1\*</sup>, Tamara Pérez<sup>2</sup> y Wilmer Malpica<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería UCV.

<sup>2</sup> Dpto. de Electrónica Computación y Control, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería UCV.

\*[julian.perez@ucv.ve](mailto:julian.perez@ucv.ve), [perezjulian16@gmail.com](mailto:perezjulian16@gmail.com)

### RESUMEN

En las últimas décadas, debido a la necesidad de aumentar la calidad y la eficiencia de las fuentes de alimentación y su creciente utilización, los rectificadores/inversores trifásicos se han convertido en una fuente de energía alternativa. Entre algunas de las ventajas de estos dispositivos trifásicos, están: el uso de una fuente de tensión compacta que proporciona un voltaje sinusoidal con amplitud y frecuencia variable, además de corriente sinusoidal y la posibilidad de acondicionar la corriente de salida de las fuentes de alimentación. En la literatura técnica se han propuesto diferentes métodos para controlar los rectificadores/inversores, siendo la modulación espacial vectorial (SVM) una de las más recientes. La ventaja principal de esta técnica de modulación, en convertidores AC-DC/DC-AC, es el control de los estados del dispositivo de conmutación y la libertad de selección de los vectores de tensión, con la finalidad de balancear las corrientes. El objetivo de este trabajo es exponer una aplicación que involucre el uso del SVM en rectificadores/inversores trifásicos para mejorar el factor de potencia, producir y balancear fuentes de corriente, entre otras aplicaciones. Las implementaciones se realizan a través de simulaciones para comprobar su operatividad. Los resultados arrojados permiten concluir que el uso de la técnica de SVM, es una herramienta efectiva para el control de convertidores utilizados para distintas aplicaciones.

*Palabras Clave: rectificador, inversor, convertidor, modulación espacial vectorial, balance de tensión.*

### ABSTRACT

In recent decades due to the need to increase the quality and efficiency of the power supply and its increasing usage, the rectifier/inverters have become an alternative energy source. Some of the advantages of these three phase devices could be the use of a compact voltage source, with amplitude and variable frequency and sinusoidal voltage, besides the production of a sinusoidal current and the possibility to conditioning the output current of the power supplies. In technical literature, different methods to control the rectifiers/inverters, have been proposed, being space vector modulation (SVM), one of the most recent. The main advantage of this modulation technique in AC-DC/DC-AC converters, in order to balance the currents, is the control of the states of the switching device and the freedom of selection of voltage vectors. The aim of this paper is to present an application involving the use of SVM in rectifiers/three-phase inverters for improving power factor and balance of current sources, among other applications. The implementations to verify its operation are done through simulations. The results obtained allow concluding that the use of SVM technique is an effective tool for controlling converters used for different applications.

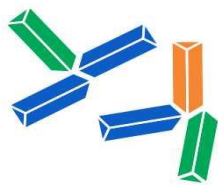
*Keywords: rectifier, inverter, converter, space vector modulation, voltage balance.*

**SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.** Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Telf.: +58 212-605 1644 / 1645. Telfax: +58 212 - 6628927

Correo electrónico: [jifi.eai.2012.ucv@gmail.com](mailto:jifi.eai.2012.ucv@gmail.com) <http://www.ing.ucv.ve>



jifi-eai 2012



Jornadas de Investigación | Encuentro Académico Industrial

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA

26 - 30 noviembre 2012

## INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas, debido a la necesidad de aumentar la calidad y la eficiencia de las fuentes de suministro de energía eléctrica y a su creciente utilización, los rectificadores/inversores trifásicos se han convertido en una fuente de energía alternativa. En tal sentido, se han propuesto diversos métodos para controlar el convertidor, siendo la modulación espacial vectorial (SVM-Space Vector Modulation) una de las más utilizadas, entre otras técnicas. Entre las ventajas de los rectificadores/inversores trifásicos está el hecho de que pueden convertirse en una fuente de tensión compacta que proporcione un voltaje sinusoidal con amplitud y frecuencia variable, además de producir una corriente sinusoidal balanceada y la posibilidad de mejorar el factor de potencia a la salida de las fuentes de alimentación [1].

Desde el método de control directo del par (DTC), propuesto a mediados de 1980, estas técnicas se convirtieron en una de las estrategias de control de alto rendimiento para máquinas de AC, para proporcionar un par muy rápido y control del flujo a través de corrientes sinusoidales.

Una de las principales aplicaciones de las técnicas de modulación, es la de generar la señalización requerida para el control de los convertidores DC/AC. En la actualidad existen diferentes tipos de procedimientos de modulación para el control de convertidores, como son: Modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM), Modulación por Ancho de Pulso Aleatorio (Random PWM), Modulación por Ancho de Pulso con Eliminación Selectiva de Armónicos (Selected Harmonic Elimination SHEPWM), Modulación por Vectores Espaciales (Space Vector Modulation, SVM), entre otras [2].

Tal vez uno de los enfoques de modulación más populares para los convertidores sea la modulación vectorial espacial (SVM), que se está utilizando cada vez más en el control de convertidores multinivel. El concepto de vectores espaciales de tensión, corresponde a diversos estados de conmutación y se ha aplicado para estudiar los efectos en el balance de carga de condensadores y una de sus ventajas es el control instantáneo de los estados de conmutación y la libertad para seleccionar vectores con el fin de equilibrar la corriente del neutro. Pero la principal limitación en el diseño del SVM (como ocurre con la mayoría de las técnicas de modulación multinivel) está en el hecho de poder reducir al mínimo el contenido armónico de la forma de onda de salida, mientras se mantiene el balance de carga del condensador. [3]

La Modulación Vectorial Espacial consiste en una representación vectorial, en un plano, de la tensión de salida del inversor y la selección de dichos vectores en una secuencia que se ajuste a los requerimientos de control.

El control de la corriente (o la tensión) en el lado de AC, se puede hacer mediante la modulación de vectores espaciales (SVM). La SVM maneja al rectificador/inversor como una sola unidad; en específico, el inversor puede activarse a ocho estados únicos. La modulación se obtiene por el estado de conmutación del inversor y las estrategias de control se implementan mediante sistemas digitales. De estos ocho vectores, seis son activos y tienen el mismo módulo y están desfasados  $60^\circ$  entre sí; los otros dos vectores son nulos. Los seis vectores activos forman un hexágono equilátero que encierra un círculo tangente a sus lados. El punto de tangencia del círculo con los

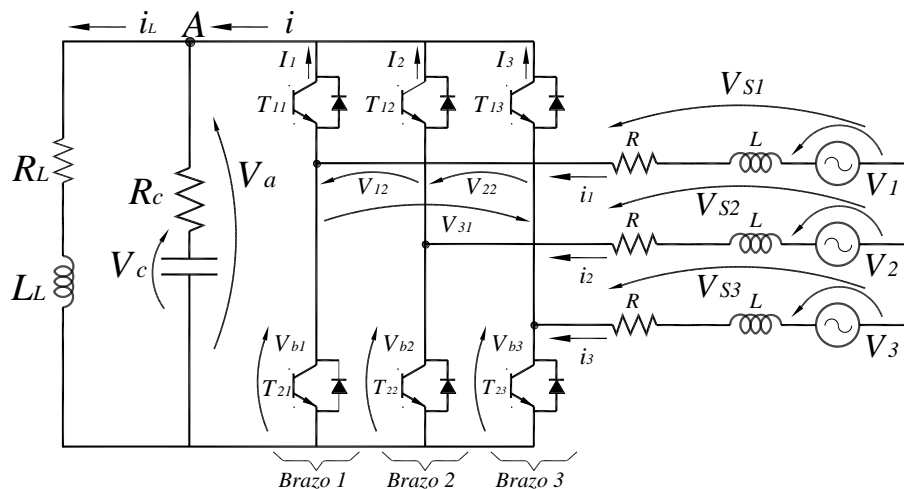
lados del hexágono, determina el valor máximo del vector modulado para lograr una modulación vectorial de tensiones sinusoidales. [3]

## METODOLOGÍA

La metodología empleada para la realización del presente proyecto, es desarrollar las aplicaciones a partir de simulaciones en Matlab/Simulink®, apoyada en bases teóricas. El objetivo principal es el diseño y modelación de un rectificador/convertidor AC-DC/DC-AC trifásico usando modulación vectorial espacial.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta el funcionamiento de un rectificador trifásico, compuesto por 3 brazos, con 2 transistores bipolares de compuerta aislada IGBT por cada brazo, que se usan como elementos de conmutación forzada, como se muestra en la Figura 1. También consta de un condensador para mantener el nivel de la tensión DC en el nodo A. Esta tensión depende de la potencia activa suministrada por la fuente. La potencia reactiva no pasa al lado DC del dispositivo.



**Figura 1.** Puente rectificador trifásico formado por 6 IGBT.

A continuación se presenta la técnica de control por modulación por vectores espaciales o SVM, se reseñan los casos de control de las corrientes de salida del inversor.

Se define una variable de conmutación  $S_{i,k}$  para cada transistor  $T_{i,k}$  que se muestra en la Figura 1:

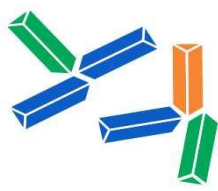
$$S_{i,k} = 1 \quad \text{si el transistor } T_{i,k} \text{ estuviera en saturación o conduciendo} \quad (1)$$

$$S_{i,k} = 0 \quad \text{si el transistor } T_{i,k} \text{ estuviera en corte o abierto} \quad (2)$$

donde:  $i \in 1,2 \wedge k \in 1,2,3$

Para que la fuente de tensión continua nunca quede en corto circuito a través de los transistores y para no interrumpir las corrientes inductivas del lado de la carga, se establece la siguiente restricción en cuanto a la conmutación de los transistores:

$$S_{1,k} + S_{2,k} = 1 \quad \text{para } \forall k \in 1,2,3 \quad (3)$$



Lo que indica la ecuación (3) es, que en cada brazo debe haber siempre un transistor en estado abierto y el otro debe estar conduciendo, nunca deben estar los dos conduciendo o los dos abiertos.

Se establece una variable de conmutación  $\gamma_k$  por cada brazo del puente:

$$\gamma_k = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{1,k} \text{ estuviera en conducción y } T_{2,k} \text{ estuviera abierto} \\ 0 & \text{si } T_{1,k} \text{ estuviera en abierto y } T_{2,k} \text{ estuviera en conducción} \end{cases} \quad \text{para } k \in 1,2,3 \quad (4)$$

Esta última variable será utilizada para controlar el puente por modulación por vectores espaciales SVM.

### Las tensiones en el lado de corriente alterna en función de las variables de conmutación $\gamma_k$ :

La tensión en los transistores  $T_{2,k}$ : para  $k \in 1,2,3$  (ver la Figura 1) es:

$$V_{b,k} = \gamma_k V_{dc} \quad (5)$$

Las tensiones de línea a línea en el lado de corriente alterna:

$$V_{12} = V_{b1} - V_{b2} \quad (6)$$

Al sustituir (5) en la ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$V_{1,2} = (\gamma_1 - \gamma_2) V_{dc} \quad (7)$$

Y de manera similar se obtienen las restantes tensiones de línea a línea:

$$V_{2,3} = V_{b2} - V_{b3} = (\gamma_2 - \gamma_3) V_{dc} \quad (8)$$

$$V_{3,1} = V_{b3} - V_{b1} = (\gamma_3 - \gamma_1) V_{dc} \quad (9)$$

Tensiones de fase a neutro para el lado de corriente alterna:

$$V_{12} = V_{s1} - V_{s2} \quad (10)$$

$$V_{23} = V_{s2} - V_{s3} \quad (11)$$

$$V_{31} = V_{s3} - V_{s1} \quad (12)$$

Al restar (10) de la ecuación (12) se obtiene lo siguiente:

$$V_{12} - V_{31} = 2V_{s1} - V_{s2} - V_{s3} \quad (13)$$

Por otra parte, se asume que las tensiones fase a neutro en la carga se encuentran balanceadas:

$$V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \quad (14)$$

Al sustituir (14) en (13) se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{12} - V_{31} = 3V_{s1} \quad (15)$$

Al sustituir (7) y (9) en la ecuación anterior se obtiene la tensión línea a neutro para la fase 1:

$$V_{s1} = \frac{2}{3} \frac{\gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3}{3} V_{dc} \quad (16)$$

Siguiendo la misma metodología, se obtienen las tensiones de línea a neutro para el resto de las fases:

$$V_{s2} = \frac{2}{3} \frac{\gamma_2 - \gamma_1 - \gamma_3}{3} V_{dc} \quad (17)$$

$$V_{s3} = \frac{2\gamma_3 - \gamma_1 - \gamma_2}{3} V_{dc} \quad (18)$$

Las ecuaciones anteriores permiten obtener las tensiones de línea a neutro en función de la variable de conmutación  $\gamma_k$ .

**Control de las tensiones aplicando la técnica de modulación por vectores espaciales (Space Vector Modulation) SVM:**

Este tipo de control se realiza en el dominio de la transformada de Concordia  $\alpha\beta 0$  [4]. Las ecuaciones utilizadas para calcular las tensiones en el dominio de las fases  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  y  $V_{s3}$  se transforman al dominio  $\alpha\beta 0$ :

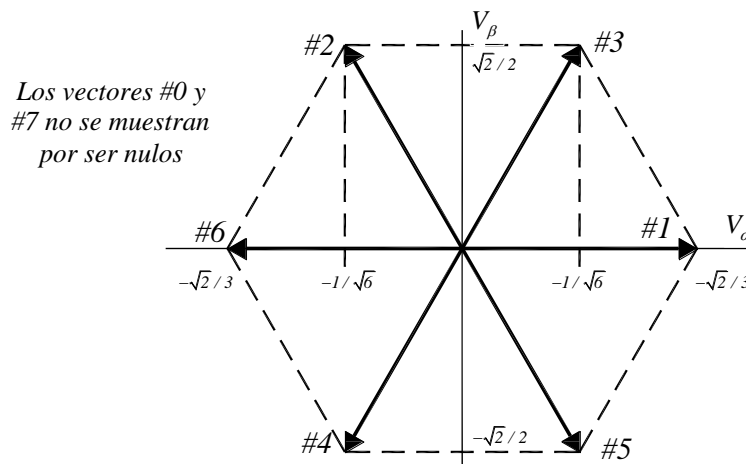
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (19)$$

Al sustituir (16), (17) y (18) en la ecuación (19) se obtienen las tensiones en el dominio  $\alpha\beta 0$ :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2\gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 \\ 2\gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 \\ 2\gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 \end{bmatrix} V_{dc} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \gamma_1 - \frac{\gamma_2}{2} - \frac{\gamma_3}{2} \right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} (\gamma_2 - \gamma_3) \\ 0 \end{bmatrix} V_{dc} \quad (20)$$

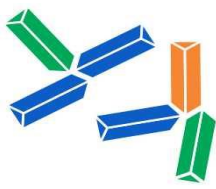
Con la ecuación (20) se obtienen las tensiones en el dominio  $\alpha\beta$  ( $V_\alpha, V_\beta, V_0$ ) para todas las combinaciones posibles de  $\gamma_1, \gamma_2$  y  $\gamma_3$ , asumiendo que  $V_{dc}=1V$ .

Con los valores de las tensiones, se construye el diagrama que se muestra en la Figura 2, donde se representan las tensiones  $V_\alpha$  y  $V_\beta$ , por vectores espaciales.



**Figura 2.** Tensiones  $V_\alpha$  y  $V_\beta$  representadas como vectores espaciales, para  $V_{dc} = IV$

Para el control de las tensiones, los voltajes de referencia deben estar en el dominio  $\alpha\beta 0$ :



$$\begin{vmatrix} V_{\alpha,ref} \\ V_{\beta,ref} \\ V_{0,ref} \end{vmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_{s1,ref} \\ V_{s2,ref} \\ V_{s3,ref} \end{vmatrix} V_{dc} \quad (21)$$

Para el control de la tensión, se debe definir voltajes de referencia, para cada una de las fases:

$$V_{s1,ref} = V_{max} \cos(\omega t) \quad (22)$$

$$V_{s2,ref} = V_{max} \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (23)$$

$$V_{s3,ref} = V_{max} \cos(\omega t - 4\pi/3) \quad (24)$$

Al sustituir (22), (23) y (24) en (21) se obtienen las tensiones de referencia en el dominio  $\alpha\beta 0$ :

$$\begin{vmatrix} V_{\alpha,ref} \\ V_{\beta,ref} \\ V_{0,ref} \end{vmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_{max} \cos(\omega t) \\ V_{max} \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{max} \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{vmatrix} V_{dc} \quad (25)$$

donde en la ecuación (25), se cumple que  $V_{0,ref} = 0$

Como primera estrategia de control se establece que las tensiones, a la salida del inversor, en el dominio  $\alpha\beta$  deben ser iguales a las tensiones de referencia:

$$V_{\alpha,ref} = V_{\alpha} \quad (26)$$

$$V_{\beta,ref} = V_{\beta} \quad (27)$$

Pero las dos ecuaciones anteriores son imposible de satisfacer porque las tensiones de referencia  $V_{\alpha,ref}$  y  $V_{\beta,ref}$  varían de manera continua según la ecuación (25) y las tensiones a la salida del inversor  $V_{\alpha}$  y  $V_{\beta}$  varían de forma discreta, según la ecuación (20). Entonces se propone otra estrategia de control, "las tensiones deben tener el mismo valor medio", y por lo tanto el área bajo ambas curvas tienen que ser iguales:

$$\int V_{\alpha,ref} dt = \int V_{\alpha} dt \quad (28)$$

$$\int V_{\beta,ref} dt = \int V_{\beta} dt \quad (29)$$

Pero para cumplir con la igualdad en las ecuaciones (28) y (29) los IGBT deben conmutar a una frecuencia infinita y esto resulta técnicamente imposible de cumplir; entonces se admite que la igualdad en (28) y (29) no se cumple, por lo tanto, se asume que habrá un error en las tensiones y que se cuantifica como:

$$\text{error}_{\alpha} = \int V_{\alpha,ref} dt - \int V_{\alpha} dt \quad (30)$$

$$\text{error}_{\beta} = \int V_{\beta,ref} dt - \int V_{\beta} dt \quad (31)$$

Lo ideal es mantener estos errores dentro de un cierto límite que denominaremos  $\delta$ , siendo  $\delta > 0$ :

$$\left| \int V_{\alpha,ref} dt - \int V_{\alpha} dt \right| < \delta \quad (32)$$

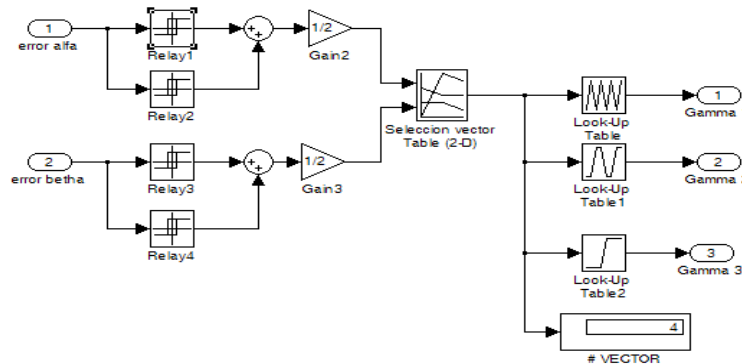
$$\left| \int V_{\beta,ref} dt - \int V_{\beta} dt \right| < \delta \quad (33)$$

Para satisfacer las inecuaciones (32) y (33) se deben variar las tensiones  $V_{\alpha}$  y  $V_{\beta}$ , esta variación de tensión es equivalente a seleccionar uno de los vectores que se muestran en la Figura 2. La Tabla 1 permite la selección del vector de tensión de acuerdo a los errores calculados por (30) y (31).

<b>error<sub>α</sub></b> \ <b>error<sub>β</sub></b>	error <sub>β</sub> < -δ	δ > error <sub>β</sub> > -δ	error <sub>β</sub> > δ
error <sub>α</sub> < -δ	4	6	2
δ > error <sub>α</sub> > -δ	4 ó 5	7 ó 0	3 ó 2
error <sub>α</sub> > δ	5	1	3

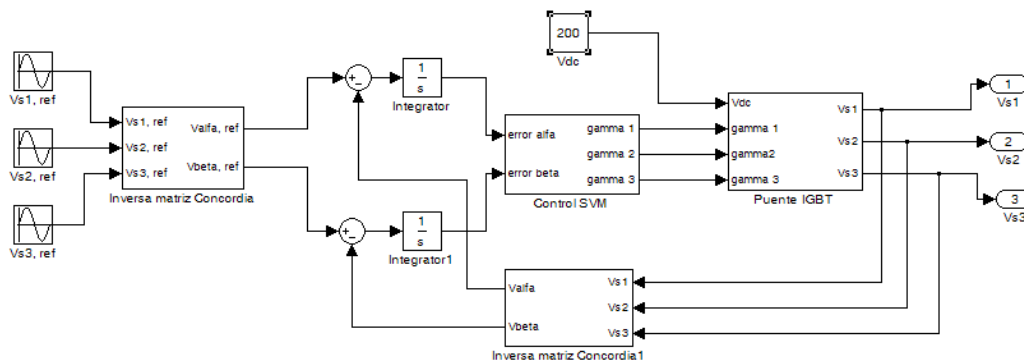
**Tabla 1.** Tabla para la selección de vector para el control de las tensiones de acuerdo al error

En el caso de una simulación con el software Matlab Simulink®, la Figura 3 muestra el diagrama de bloques para el control por vectores espaciales SVM. El componente con la etiqueta "#VECTOR" muestra el vector que se está seleccionando para realizar el control sobre las corrientes de salida.

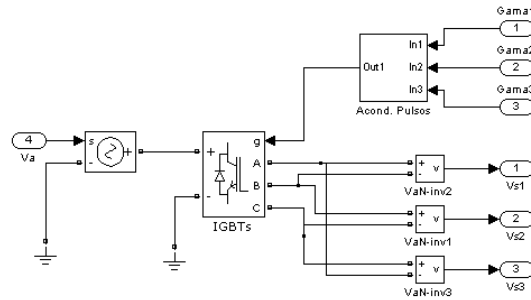


**Figura 3.** Diagrama de bloques en Matlab Simulink® para el control SVM

Por último, la Figura 4 muestra el diagrama de bloques del inversor controlado por tensión a lazo cerrado, empleando la modulación por vectores espaciales. El módulo denominado “Control SVM” es el que se muestra en la Figura 3 y el módulo “Puente IGBT” se muestra en la Figura 5.



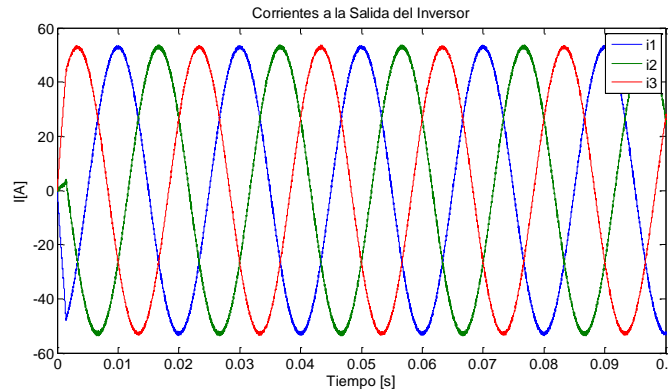
**Figura 4.** Diagrama de bloques para modelar el inversor, en Matlab Simulink®, por SVM a lazo cerrado



**Figura 5.** Diagrama de bloques del inversor formado por IGBT, para simulación.

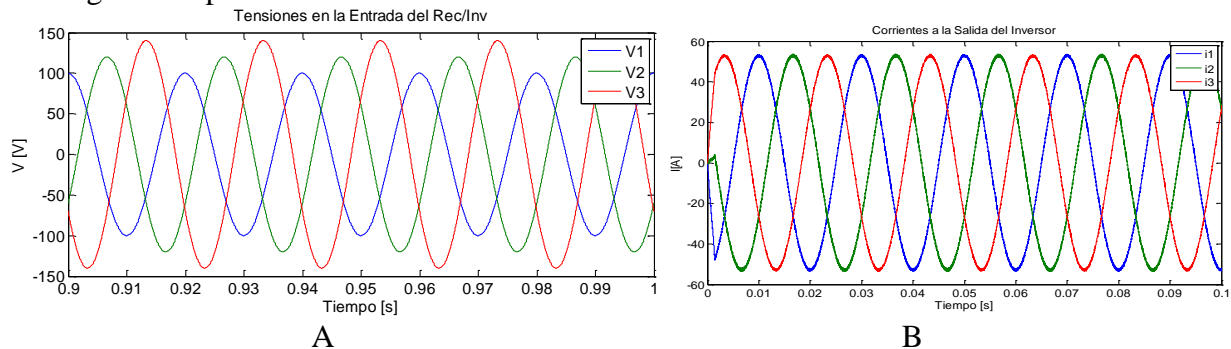
**Aplicaciones simuladas:**

**1- Inversor (DC/AC):** Para esta aplicación se utiliza solamente la etapa del rectificador inversor AC-DC/DC-AC a partir del módulo que ejecuta la última conversión. Esto quiere decir que a partir de una señal DC, se puede obtener a la salida corrientes sinusoidales, como puede apreciarse en la Figura 6.



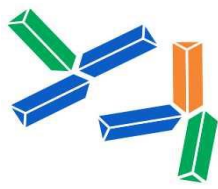
**Figura 6.** Salida de corrientes trifásicas de la etapa DC-AC.

**2- Desbalance de tensiones (y corrientes) en la entrada:** Se aplica un sistema de tensiones trifásicas desbalanceadas a la entrada del rectificador/inversor Figura 7A. Se observa a la salida (Figura 7B) las corrientes trifásicas balanceadas. Las tensiones a la salida tienen un gran componente armónico.



**Figura 7. A.** Tensiones de entrada desbalanceadas. **B.** Corrientes de salida balanceadas.





### CONCLUSIONES

El funcionamiento como inversor está garantizado al colocar una fuente DC en la etapa DC-AC del rectificador/inversor, las corrientes de salida son sinusoidales, no así la forma de onda de las tensiones.

Es de hacer notar que el dispositivo está desarrollado como una fuente que debe entregar una corriente sinusoidal, y al no tener control sobre las tensiones se pueden obtener formas de ondas distorsionadas con gran contenido armónico. Esta aplicación se ajusta a los requerimientos de las máquinas eléctricas de AC, que exigen una forma de onda sinusoidal en la corriente, no siendo afectadas por la forma de onda de la tensión. Para obtener formas de onda sinusoidal en la tensión, se debe recurrir a la colocación de filtros de armónicos o realizar un control adicional sobre las tensiones de salida.

Con la configuración actual, se pueden realizar aplicaciones como: acoplador de frecuencias, reguladores de corriente de salida, entre otras. Agregando las adecuadas etapas de control, se puede realizar el mejoramiento del factor de potencia del alimentador, control de flujo de potencia activa y reactiva a la red, compensación reactiva, acondicionamiento de la tensión de salida, supresión de picos y huecos de tensión entre muchas otras aplicaciones, lo que revela la versatilidad del rectificador/inversor controlado, en este caso, por modulación vectorial espacial.

### REFERENCIAS

- [1] C. Bin-Jun y Z. Jian-Lin, «A Novel DTC-SVM Method For Induction Motor Fed By Matrix Converter,» *I.J. Intelligent Systems and Applications*, vol. 1, pp. 15-22, 2010.
- [2] V. Iribe Q., J. Pérez R., J. A. Beristáin J. y A. Aganza T., «Implementación de la Técnica de Modulación de Vectores Espaciales utilizando un Controlador Digital de Señal dsPIC30F3010,» *RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*, vol. 6, n° 1, pp. 16-24, Junio 2009.
- [3] N. Celanovic, «Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters,» Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2000.
- [4] C. Concordia, «Synchronous Machines: Theory and Performance,» *General Electric Company*, 1951.