

Diseño y Construcción de los Sistemas de Potencia y Control para un Robot Industrial Tipo Cartesiano

Hernández Treviño Josué, M. A. Vargas, S. Vergara, O. Félix, F. Reyes., L. Gómez. y Arnulfo L.

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Área de Robótica y Control
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Av. San Claudio y 18 sur C.U. edificio 109 A. Puebla, Puebla. C.P. 72570, México.
Correo electrónico: josue_ht1@ece.buap.mx

Resumen

En la actualidad existen robots industriales de muchos tipos con tecnología que desconocemos, ya que no se informa a detalle la forma del diseño y construcción por parte de los investigadores que desarrollan este tipo de avances, son los llamados "secretos industriales". Actualmente el crecimiento de un país se ve reflejado en la tecnología que éste genera y particularmente en el ámbito industrial, por lo que es muy importante crear tecnología propia con la cual se puedan automatizar procesos. Dichos procesos elevan la calidad de los productos, permitiendo así entrar en el terreno competitivo que el mercado mundial demanda. Lo que proponemos es desarrollar el diseño y construcción de los sistemas de potencia y control para un robot industrial tipo cartesiano, con lo cual se pretende generar las herramientas necesarias para la manipulación de diversos procesos tanto industriales como del tipo didácticos mediante el manejo de todas las partes que componen al robot. Un robot con todas estas características permitirá desarrollar estrategias de control, así como lograr la automatización de procesos.

Palabras clave: Diseño y construcción de sistemas de potencia y control, tarjeta PCI, instrumentación, automatización, firmware.

1. Introducción

Es bien sabido que en la actualidad la robótica es un elemento clave para el desarrollo industrial de un país, casi todos los procesos automatizados utilizan algún tipo de robot [1]. Por lo que representa el desarrollo de la robótica, es de gran importancia crear tecnología propia que nos acerque a los avances que se desarrollan en los países tecnológicamente avanzados, por esta razón se propone el estudio, desarrollo y construcción de los sistemas de potencia y control de un robot industrial tipo cartesiano, el cual tendrá enormes aplicaciones con fines tanto académicos como en aplicaciones en la industria en procesos automatizados.

En la actualidad, la tecnología avanza rápidamente y a cada momento nos sorprende con nuevas técnicas de diseño y medición, estamos en el tiempo de optimizar todas las herramientas que nos permiten continuar avanzando tecnológicamente.

Una de las herramientas más utilizadas por sus características es la computadora, que está en constante desarrollo y por tanto poco a poco incrementa su velocidad, capacidad de almacenamiento, etc. Por tanto es una herramienta que nos puede abrir la puerta para desarrollar en ella muchas aplicaciones. Por lo anterior consideramos que un robot industrial controlado por computadora y desarrollado con la tecnología que tenemos a la mano permitirá el crecimiento económico y tecnológico, además de reducir la diferencia en cuanto al retraso tecnológico que en la actualidad presenta el país, con esto se puede ayudar tanto a investigadores como a estudiantes.

Se pretende crear una herramienta que permita la automatización de procesos industriales en forma económica desarrollando tecnología propia. Con los primeros estudios desarrollados hemos diseñado la etapa de potencia y la forma de manejar motores trifásicos de inducción, además se cuenta con una tarjeta PCI que funciona como interfaz entre la computadora y el robot, la idea es ir desarrollando cada uno de los pasos necesarios para el adecuado control del robot. En las siguientes secciones se describe el funcionamiento y partes que constituyen nuestro robot cartesiano.

2. Diseño del control

Para lograr el control de un robot industrial en toda su estructura, es necesario ser capaz de desarrollar la arquitectura de estos robots y esto representa trabajos de un alto grado de dificultad. Este tipo de robots utilizan tres sistemas: (1) electromecánico; referente a la estructura mecánica y actuadores, (2) electrónico: referente al tratamiento de las señales y (3) software de control: referente a las rutinas que seguirá el robot. Cada uno de estos sistemas

se acopla adecuadamente con lo cual se logra el control del robot. En este artículo se describe el diseño de cada una de las etapas del robot, donde se cuenta con el diseño y construcción de: la etapa de potencia, la lógica para controlar motores de inducción de corriente alterna, diseño de fuentes de alimentación, sistema sensorial, la lógica del accionamiento, comunicación del sistema con la computadora mediante el bus PCI utilizando un FPGA de la marca ALTERA [2].

El robot posee 3 grados de libertad. El control se efectúa desde la computadora cerrando el lazo mediante el monitoreo de las señales por medio del software LabView 8.0 como interfaz de usuario. Las fuentes necesarias para controlar los motores trifásicos del robot serán de alta corriente y voltaje variable de un rango de 4-100volts a 20 amperes.

El diagrama a bloques del sistema completo se muestra a continuación.

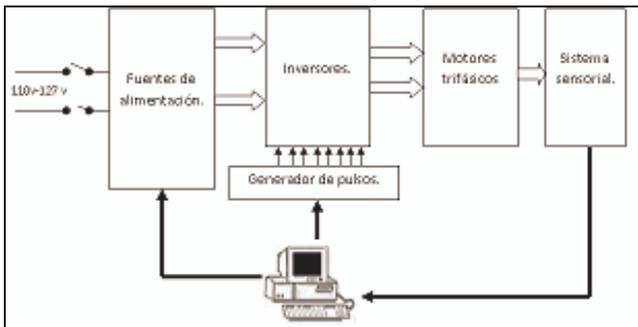


Fig. 1 Diagrama a bloques general.

La primera parte del diagrama a bloques corresponde a la fuente controlada por computadora conectada a la entrada de los circuitos inversores, necesarios para trabajar con los motores del robot. Para lograr enviar los pulsos adecuados que generen las fases necesarias para mover a los motores trifásicos se utiliza un FPGA y el bus PCI de la computadora, esto se representa con el bloque denominado generador de pulsos. La fuente de alimentación diseñada cuenta con circuitos electrónicos para la comunicación controlada desde la computadora a través del bus PCI, la razón de utilizar el bus PCI es por las prestaciones de velocidad de procesamiento con la que se permite trabajar, ya que se desea una respuesta rápida y dicho bus es capaz de ejecutar una instrucción cada 30 nanosegundos. Después, en la etapa en la que se envían los pulsos hacia los circuitos de potencia o "inversores" se controla la frecuencia con la que trabajan los motores, una vez que analizamos esto, nos encontramos con la etapa de los sensores de posición, que se encargan de informar a través de niveles de voltaje la posición de cada motor a partir del número de las vueltas que éste a dado, se da la posición por niveles de voltaje debido a

que los sensores de posición son analógicos (resolvers), por lo cual es necesario usar circuitos convertidores de resolver/digital (R/D) para comunicarse con la computadora.

La etapa del FPGA, en donde se concentra el accionamiento y herramientas de control del robot consta de varios módulos, en primer lugar tenemos las secuencias necesarias para mover a los motores trifásicos en ambas direcciones, la variación de la frecuencia para cada motor, el acoplamiento de las señales de posición provenientes de los resolvers, el control digital del voltaje proveniente de las fuentes que alimentan a los motores, además la tarjeta PCI junto con el FPGA sirven como interfaz entre el control a utilizar y los efectos que se produzcan en el robot ya que desde aquí se monitorea el funcionamiento del robot.

3. Actuadores

El motor de inducción de corriente alterna, tiene como principal inconveniente la complejidad del convertidor electrónico necesario para variar su velocidad. La aparición en un principio del Tiristor (SCR) y recientemente del transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) creado para trabajar en conmutación de potencia a altas tenciones, intensidades y frecuencias, a facilitado la regulación [3].

Los motores de inducción pueden ser monofásicos o trifásicos y dentro de estos últimos, pueden ser a su vez: de anillos rozantes o de jaula de ardilla. Para que un motor de inducción con jaula de ardilla produzca par o haga girar su carga, los circuitos de barras de rotor deben sentir un cambio de flujo respecto al tiempo. Básicamente el funcionamiento es el siguiente: al aplicar un sistema trifásico de tensiones de frecuencia al devanado estático, se produce una fuerza electromotriz (f.e.m) móvil distribuida senoidalmente en el entrehierro, que da origen a un campo magnético giratorio, esto se fundamenta en el teorema de ferraris. El procedimiento para generar las fases que demanda el motor trifásico para su funcionamiento, se basa en estudiar el comportamiento de un sistema trifásico, el cual consiste en fuentes del mismo valor de voltaje pero desfasadas 120° entre sí. Mediante el circuito inversor se logra este hecho de la siguiente forma: a partir de una fuente de DC y mediante interruptores de potencia se generan cada una de las fases que se conectarán directamente al estator del motor (ver figura 2).

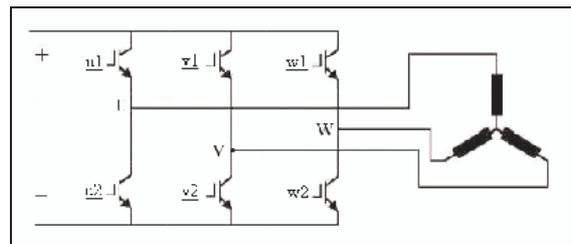


Fig. 2 Inversor trifásico conectado en estrella.

Ahora bien, como ya se mencionó anteriormente se definen las secuencias con las cuales trabaja el motor trifásico basados a una forma de señales idealizadas (ver figura 3) con lo cual se estudian los niveles de voltaje que se requieren en el estator del motor de inducción.

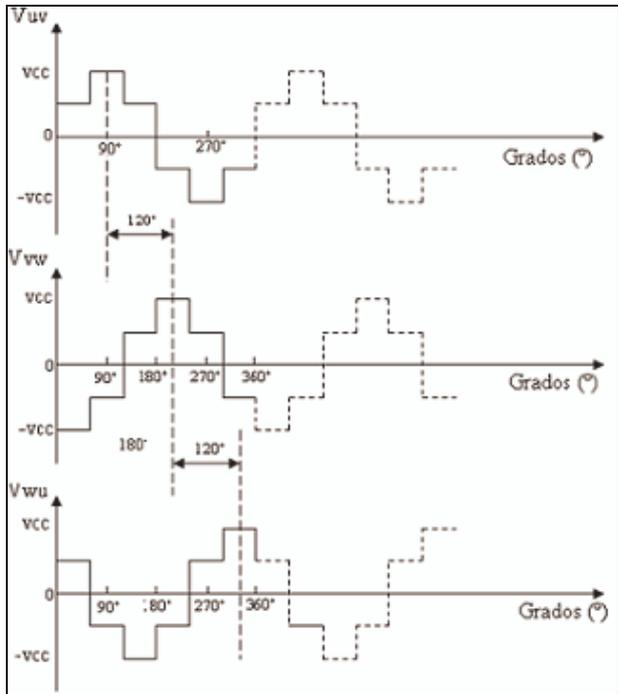


Fig. 3 Formas de onda idealizadas para el circuito de disparo.

Del estudio de los niveles de voltaje y de todas las posibles secuencias se obtienen 6 diferentes combinaciones en un determinado orden, lo que provoca el giro en 360° del motor en una dirección. Para lograr mover al motor en dirección contraria se intercambian dos fases del motor a nivel de firmware, es decir se dicta dentro del FPGA la forma de intercambiar dos fases modificando las secuencias y el orden en que se transmiten mediante el firmware. El FPGA a utilizar es el llamado CICLONE II, su matrícula es EP2C8Q208C7, es un dispositivo muy robusto en el que se puede implementar hasta un DSP, cuenta con 208 terminales, el modo de programar dichos dispositivos es por medio del software de diseño creado por ALTERA Quartus II versión 5.0.

Las combinaciones encontradas para mover al motor en una dirección se muestran en la tabla 1, las cuales siguen a las formas de onda idealizadas mostradas en la figura 2. Los niveles de voltaje para los devanados del estator se analizan estudiando el flujo de corriente a través de cada uno de los devanados de acuerdo a las combinaciones posibles que el circuito inversor puede proporcionar. La figura 4 nos muestra la forma de los devanados del estator y las ecuaciones (1), (2)

y (3) definen los niveles de voltaje. Estos niveles de voltaje encontrados se muestran en la tabla 1.

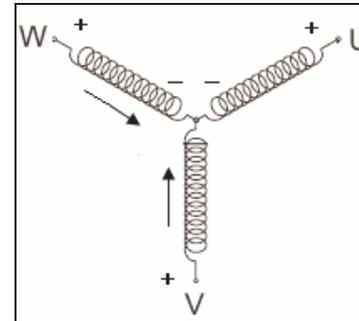


Fig. 4 Devanados y polaridades del motor de inducción.

El funcionamiento cíclico del circuito de disparo se divide en seis intervalos de igual duración de tiempo. Para encontrar las secuencias por las cuales se logre mover al motor se establecen las diferencias de potencial de cada devanado de acuerdo con la figura 4, de donde se obtienen las ecuaciones que describen el nivel de voltaje de cada devanado, de acuerdo a las seis combinaciones que se pueden presentar, dichas ecuaciones son [4]:

$$V_{UV} = V_U - V_V \tag{1}$$

$$V_{VW} = V_V - V_W \tag{2}$$

$$V_{WU} = V_W - V_U \tag{3}$$

Las combinaciones necesarias para el giro del motor en una dirección se muestran a continuación en la tabla 1, donde se indican los niveles de voltaje encontrados para cada combinación de interruptores o secuencias del circuito de disparo.

Tabla 1. Combinaciones necesarias para el giro.									
Secuencia	u1	u2	v1	v2	w1	w2	Vuv	Vvw	Vwu
1	0	0	0	1	1	0	Vcc/2	-Vcc	Vcc/2
2	1	0	0	1	0	0	Vcc	-Vcc/2	-Vcc/2
3	1	0	0	0	0	1	Vcc/2	Vcc/2	-Vcc
4	0	0	1	0	0	1	-Vcc/2	Vcc	-Vcc/2
5	0	1	1	0	0	0	-Vcc	Vcc/2	Vcc/2
6	0	1	0	0	1	0	-Vcc/2	-Vcc/2	Vcc

4. Variación de la velocidad en el motor asíncrono

Poder variar la velocidad de un proceso o de un sistema, es una necesidad que se plantea obligatoriamente en la mayoría de los sectores de la industria, la aparición del control

electrónico de los motores eléctricos, para variar y regular la velocidad, ha aportado a los procesos industriales grandes ventajas, aumentando sus posibilidades y prestaciones, además reduciendo su mantenimiento de energía y consumo entre otras [4].

Los motores de c.a. no se adaptan tan bien a las aplicaciones con velocidad variable como los motores de cd, por que no se puede controlar su velocidad en forma satisfactoria con una variación sencilla de voltaje de suministro. Esto es, un motor de inducción de c.a. funcionando a un voltaje reducido no es capaz de mantener una velocidad de eje razonablemente estable en presencia de pequeños cambios en demanda de par, impuesto por la carga mecánica [3]. Se puede obtener un control satisfactorio de la velocidad de un motor de inducción de c.a. sólo cuando se varía la frecuencia de suministro mientras se varía el voltaje de suministro. Por lo anterior se debe variar la frecuencia al mismo tiempo que se varía el voltaje, de ahí la necesidad de construir fuentes de alta corriente y voltaje variable para manipular el voltaje aplicado, además se debe considerar la rapidez de conmutación de la fuente para lograr un adecuado control del robot, mientras que la frecuencia se varia controlando el tiempo en que se envían los pulsos al inversor encargado de generar las fases del motor, de esta forma controlamos el par de los motores trifásicos.

5. Control por variación de frecuencia

Se basa en el control de la velocidad a través de la variación de la frecuencia de la tensión de alimentación. Este método permite una regulación de velocidad con un buen rendimiento en una amplia gama de frecuencias de trabajo, que abarca desde valores muy superiores a la velocidad nominal del motor hasta velocidad nula y en ambos sentidos, todo ello manteniendo un elevado par motor [3]. Por lo que respecta a los modernos equipos de regulación que existen actualmente en el mercado, las técnicas de control que utilizan principalmente se pueden resumir en :

- Control V / f : Tensión/frecuencia.
- Control I / f : Intensidad/frecuencia.
- Control vectorial de flujo magnético.

Las condiciones óptimas de funcionamiento de un motor de inducción se consiguen manteniendo constante el flujo eficaz en el entrehierro, sea cual sea la frecuencia y cualquier par transmitido. Por lo que si se mantiene constante el flujo (ϕ), el par motor también lo será. Este hecho se consigue manteniendo constante la relación: V_1 / f_1 , de tal forma que:

$$\frac{V_1}{f_1} = K_1 = cte. \quad (4)$$

Del estudio del motor asíncrono o motor de inducción se llega a la siguiente relación:

$$M_i = V_1^2 \quad (5)$$

$$\phi_{max} = \frac{V_1}{\pi\sqrt{2}N_1f_1} \quad (6)$$

donde:

V_1 es el voltaje aplicado en rms.

f_1 es la frecuencia de la fuente de alimentación.

N_1 es el número de vueltas de los devanados del estator.

M_i es el par interno del motor.

6. Fuente de alta corriente controlada por computadora

Para llevar a cabo un control satisfactorio de los motores de inducción trifásicos es necesario contar con fuentes de alta corriente y voltaje variable que responda a gran velocidad, las cuales no están disponibles en el mercado nacional y sus costos son muy grandes fuera del país, por lo que se tiene la necesidad de construirlas. El diagrama a bloques de la fuente es como se ilustra en la figura 5, donde se cuenta con un transformador con cuatro secundarios independientes a 18 V cada uno y una corriente máxima de 20 A, posee un circuito de selección de los secundarios para lograr utilizar el máximo voltaje de la fuente, es decir, el voltaje que puede ofrecer la fuente es de alrededor de 1.5 - 100 V a 20 A.

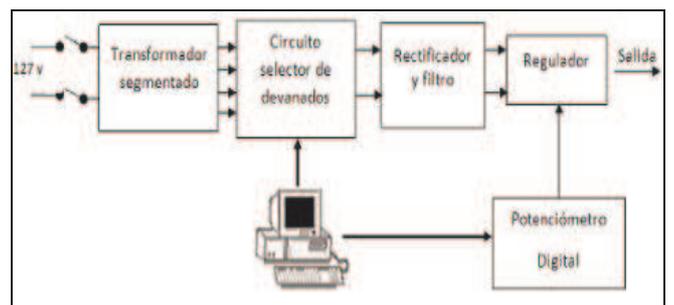


Fig. 5 Diagrama a bloques de la fuente controlada.

7. Generador de pulsos

A continuación se muestran un diagrama de flujo que gobiernan dentro del circuito de disparo del generador de pulsos, en dichos diagramas se muestra la inversión del giro del motor mediante el intercambio de dos de sus fases, se

indica para cada instante de tiempo la nueva secuencia en ambos sentidos de dirección utilizando los saltos adecuados.

Se muestra la forma que tienen los diferentes estados necesarios para mover al motor trifásico en una dirección con opción a cambiarla, para lo cual nos apoyamos con diagramas de flujo. Todos los estados que permiten el movimiento en una dirección son similares solo cambian los valores de la variable N y las secuencias en cada estado son diferentes (no se presentan todos los diagramas de flujo), en el orden que muestra la tabla 1. Si se desea invertir el giro del motor se deben buscar las nuevas secuencias que permitan intercambiar dos de las fases, la tabla 2 muestra este nuevo orden encontrado bajo el estudio de las fases.

Tabla 2. Combinaciones necesarias para invertir dos fases						
Secuencia	u1	u2	v1	v2	w1	w2
1	1	0	0	0	0	1
2	1	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	1	0
5	0	1	1	0	0	0
6	0	0	1	0	0	1

La figura 6 muestra la lógica utilizada para lograr el desplazamiento del motor en una dirección con opción a invertir el giro.

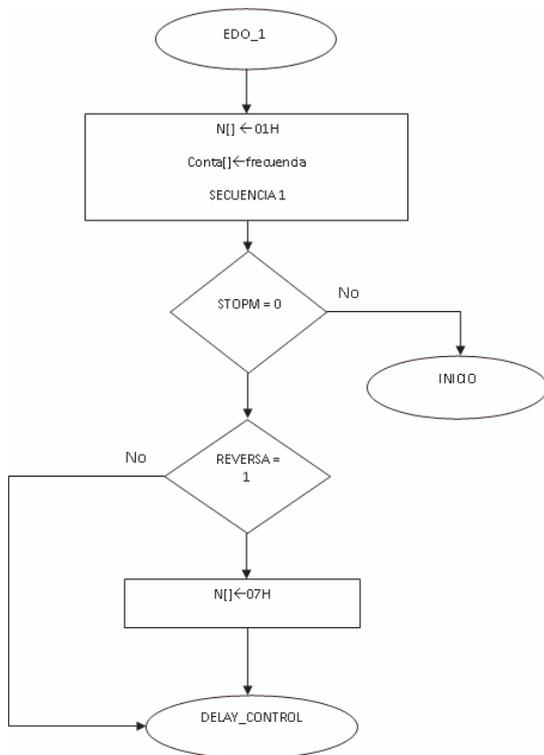


Fig 6. Diagrama de flujo para el movimiento en una dirección durante la primera secuencia.

Para lograr mover al motor en el sentido inverso se requieren de más estados, los cuales de igual forma incluyen la posibilidad de cambiar de dirección de giro en cualquier momento (no se presentan los diagramas de flujo), el cambio que se presenta con el diagrama anterior es la forma de activar la señal de reversa ya que en este caso se activará con un 0 lógico. Dichas secuencias y el orden en que se deben presentar se mencionan en la tabla 2.

Para el circuito de disparo del generador de pulsos se desarrolló el código descrito por los diagramas de flujo anteriormente expuestos dentro del programa Quartus II versión 5.0.

8. Tarjeta electrónica PCI

Se cuenta con una tarjeta electrónica diseñada y desarrollada en la Facultad de Ciencias de la Electrónica, Departamento de Robótica y Control como interfaz entre la computadora y el sistema completo, es decir, dentro de esta tarjeta especial se coloca el FPGA, donde se indican las entradas y salidas del robot, dentro del firmware que se carga al FPGA se establece el protocolo de comunicación del bus PCI de la computadora y se interconecta en la tarjeta. La tarjeta electrónica se muestra a continuación.



Fig 7. Tarjeta Electrónica.

Con la tarjeta electrónica se comunican los siguientes sistemas: fuentes de alimentación, control por computadora, sistema sensorial, y circuito de disparo para los inversores.

9. Resultados

Del inversor propuesto y mencionado anteriormente se cuenta con el prototipo armado en una tablilla de conexiones, donde se incluye la forma de conectarse a la tarjeta electrónica del bus PCI. La figura 8 muestra la tablilla de conexiones con el inversor implementado con IGBTs.

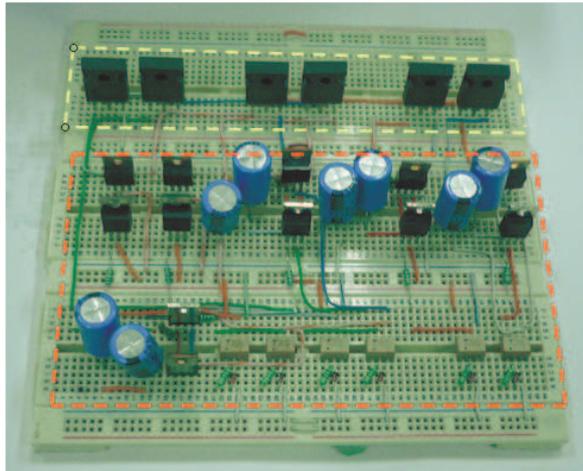


Fig 8. Inversor en tablilla de conexiones.

De la figura 8, dentro de recuadro rojo se encuentra la etapa de acoplamiento de las señales provenientes de la tarjeta electrónica, es decir, las señales que envía la tarjeta se adaptan y aíslan de la etapa de potencia mediante circuitos opto-acopladores y con el apoyo de transistores se depuran las señales con el fin de activar los interruptores (IGBTs) de forma adecuada. Del recuadro en amarillo se tiene la etapa de potencia implementada con IGBTs los cuales suministran las fases necesarias para mover a los motores de inducción trifásicos.

Finalmente se menciona la infraestructura con la que se cuenta, integrada por la parte mecánica y actuadores, es decir, se cuenta con la mecánica robot industrial tipo cartesiano y los motores trifásicos que lo mueven como se muestra en la figura 9. La contribución del trabajo esta en el diseño y construcción de los dispositivos de potencia y control que permitan mover y realizar un proceso con el robot y que además con ello se logre tener total control en las distintas etapas del robot de forma independiente, a fin de lograr varios y diversos procesos automatizados donde se apliquen las teorías de control.



Fig 9. Robot industrial tipo cartesiano a controlar.

De los sensores de los motores se tiene la electrónica necesaria para traducir los niveles de voltaje de los resolvers en señales digitales, las cuales se interpretan mediante un programa en LabView, el cual se utiliza como interfaz gráfica y de control para que el robot realice una tarea de dibujo. El dibujo desarrollado es un cuadrado, con lo cual se comprueba el correcto funcionamiento del robot.

10. Conclusiones

Se ha presentado la forma en que se ha logrado manipular el movimiento de los motores trifásicos que componen al robot industrial tipo cartesiano, así como la forma de controlar el par de dichos motores. Una de las principales contribuciones de este trabajo es el diseño y construcción de inversores, los cuales pueden ser utilizados en una gran cantidad de motores trifásicos, éstos son ampliamente utilizados en la industria y en el mercado representan un gasto muy grande, así como el de una fuente de potencia ideal para caracterizar muchos sistemas que dependan del voltaje aplicado. En trabajos futuros se pretende realizar tareas complejas en procesos como: corte, pintura, ruteo, entre otras. Así como estudiar nuevas estrategias de control.

También se estudio el modelo dinámico de un robot cartesiano de 3 g.d.l. y se definió una aplicación de dibujo, en el cual se realiza un trazo de un cuadrado, con el fin de validar los sistemas de potencia y control desarrollados.

Referencias

- [1] B Antonio, PL Felipe, A Rafael, "Fundamentos de robótica", Primera edición, McGraw Hill, España 1997, pp. 327
- [2] TIMOTHY J. Maloney, "Electrónica Industrial Moderna," Quinta edición, Pearson Education, México 2006, pp. 972
- [3] VELASCO B. Joaquín, Oriol V. Miguel, Otero A. José, "Sistemas Electrotécnicos de Potencia, Electrónica de regulación y control de potencia", Primera edición, Paraninfo, España 1998, pp. 143.
- [4] MERINO Azcárraga José María, "Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna. Funcionamiento y Aplicaciones", primera edición, McGraw Hill, Madrid 1998, pp. 408
- [5] Kelly Rafael, Santibáñez Víctor, "Control de Movimiento de Robots Manipuladores", primera edición, Prentice Hall, 2003, pp. 323