

**REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL ARTICULAR DE ROBOT  
PUMA DE 6 GRADOS DE LIBERTAD Y SU RESPECTIVO SISTEMA DE  
ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA.**

**MARTHA CECILIA GUTIERREZ TURIZZO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2010**

**REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL ARTICULAR DE ROBOT  
PUMA DE 6 GRADOS DE LIBERTAD Y SU RESPECTIVO SISTEMA DE  
ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA.**

Autora:

**MARTHA CECILIA GUTIERREZ TURIZZO**

Tesis de grado para optar por el título de  
Ingeniera electrónica

Director

**Msc. JAIME BARRERO PÉREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2010**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director, Jaime Barrero Pérez por su apoyo intelectual y dedicación.

A los ingenieros, Carlos Javier González y Carlos Andrés Angulo por su confianza y consejos.

A mis padres y hermanos, por su paciencia, apoyo incondicional y lucha por nuestra educación.

A todos mis amigos y los que dentro de la universidad me motivaron y me impulsaron a salir adelante.

## **DEDICATORIA**

*Solo a ti... Mi Dios.*

***Martha Cecilia Gutiérrez Turizzo***

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>1. ROBOT TIPO PUMA</b> .....	<b>15</b>
1.1. ESTRUCTURA MECANICA. ....	15
1.1.1. CINTURA.....	16
1.1.2. BRAZO SUPERIOR.....	16
1.1.3. BRAZO DELANTERO.....	16
1.1.4. MUÑECA.....	17
1.1.5. EFECTOR FINAL.....	17
1.2. SISTEMAS DE ACTUACION.....	17
1.2.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA. ....	18
1.2.2. SERVOMOTORES.....	19
1.2.3. ÉMBOLO PINZA. ....	20
1.3. SISTEMA SENSORIAL INTERNO .....	20
1.3.1. POTENCIOMETROS LINEALES.....	<b>20</b>
<b>2. SISTEMA DE CONTROL</b> .....	<b>21</b>
2.1. TIPOS DE TRAYECTORIAS. ....	21
2.1.1. TRAYECTORIAS PUNTO A PUNTO.....	21
2.1.2. TRAYECTORIAS COORDINADAS. ....	22
2.1.3. TRAYECTORIAS CONTINUAS.....	22
2.2. ESTRUCTURA GENERAL PARA REALIZAR MOVIMIENTO.....	22
2.2.1. GENERADOR DE TRAYECTORIA.....	24
2.2.2. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO. ....	25
2.2.3. CONTROLADOR. ....	25
2.2.4. GENERADOR SEÑAL PWM. ....	29
2.2.5. ETAPA DE POTENCIA. ....	30
<b>3. FUENTES DE ALIMENTACIÓN</b> .....	<b>31</b>
3.1. GENERALIDADES.....	31
3.2. FUENTE CONMUTADA.....	32
3.2.1. CONFIGURACIONES BÁSICAS.....	32
3.2.1.1. CONVERTIDOR BOOST .....	33
3.2.1.2. CONVERTIDOR BUCK.....	31
3.2.1.3. CONVERTIDOR FLYBACK. ....	34
3.3. DISEÑO DE FUENTES DE ALIMENTACION.....	35
3.3.1. ETAPA DE RECTIFICACION. ....	36
3.3.2. ETAPA DE CONMUTACION.....	37
3.3.3. CONFIGURACION DE SALIDA.....	44
<b>4. TARJETA DE PROGRAMACIÓN</b> .....	<b>48</b>
4.1. GENERALIDADES .....	48
4.2. MICROCONTROLADOR MC9S08QE128 .....	50
4.2.1. CARACTERISTICAS GENERALES.....	50

<b>5. ESQUEMA GENERAL DEL CONTROLADOR.....</b>	<b>55</b>
5.1. DESCRIPCION PROGRAMA DE CONTROL MOTOR DC .....	58
5.2. DESCRIPCION PROGRAMA CONTROL DE SERVOMOTORES....	595
<b>6. PRUEBAS REALIZADAS. ....</b>	<b>61</b>
6.1. PRUEBA DE FACTOR DE UTILIZACION DEL TRANSFORMADOR.	61
6.2. DETERMINACION DELFACTOR DE RIZADO.....	61
6.3. PRUEBA DE PRECISION PARA ARTICULACIONES 4, 5 y 6.....	61
6.4. PRUEBA DE PRECISION PARA ARTICULACIONES 1, 2 y 3.....	63
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>70</b>

## Lista de figuras.

<b>Figura 1.</b> Estructura física de manipulador.	15
<b>Figura 2.</b> Motor de corriente continua.	18
<b>Figura 3.</b> Servomotor utilizado para el movimiento de la muñeca.	19
<b>Figura 4:</b> Diagrama de Bloques de sistema de control.	24
<b>Figura 5.</b> Desacoplamiento por inversión del modelo.	26
<b>Figura 6.</b> Esquema de algoritmo de control basado en desacoplamiento por inversión de modelo.	26
<b>Figura 7.</b> Configuración reductora.	33
<b>Figura 8.</b> Configuración elevadores de tension.	34
<b>Figura 9.</b> Configuración inversora.	34
<b>Figura 10.</b> Etapa de rectificación.	37
<b>Figura 11.</b> Componentes internos de TL494.	39
<b>Figura 12.</b> Divisor de tension para realimentacion de salida.	40
<b>Figura 13.</b> Salida de etapa de conmutación de fuente de 12V ( I =4 A).	42
<b>Figura 14.</b> Etapa del conmutador.	43
<b>Figura 15.</b> Señal de salida de transistor de conmutación para fuente de 12 V.	44
<b>Figura 16.</b> Esquema de Fuentes de alimentación.	46
<b>Figura 17.</b> Salida de fuente de 12 V ( I=4A).	47
<b>Figura 18.</b> Diagrama de Bloques de MC9S08QE128.	52
<b>Figura 19.</b> Distribución de pines de MC9S08QE128.	52
<b>Figura 20.</b> Diagrama de flujo para control posición articulaciones 1,2 y 3.	56
<b>Figura 21.</b> Diagrama de flujo para control de posición de articulaciones 4, 5 y 6.	57

## **Lista de tablas.**

<b>Tabla 1.</b> Características de configuraciones básicas.	35
<b>Tabla 2.</b> Condiciones de diseño.	36
<b>Tabla 3.</b> Valores de resistencia y capacitores utilizados para el diseño de las fuente.	40
<b>Tabla 4.</b> Valores de resistores etapa de realimentación.	41
<b>Tabla 5.</b> Declaración de puertos utilizados para la implementación del controlador.	60
<b>Tabla 6.</b> Resultados obtenidos de experimento de posicionamiento articulaciones 4,5 y 6.	62
<b>Tabla 7.</b> Resultados obtenidos de experimento de posicionamiento articulaciones 1,2 y 3.	64

## RESUMEN

**TITULO:** REDISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL ARTICULAR DE ROBOT PUMA DE 6 GRADOS DE LIBERTAD Y SU RESPECTIVO SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA\*\*

**AUTORA:** MARTHA CECILIA GUTIERREZ TURIZZO\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Robot, fuente, controlador, simultáneo, microcontrolador.

### DESCRIPCION:

Este trabajo juega un papel importante en el avance de la implementación de tareas específicas para un brazo mecánico dentro de una celda de trabajo.

Este documento pretende hacer una descripción detallada de la estrategia de control utilizada para obtener el movimiento simultáneo de las articulaciones, aplicar el algoritmo desarrollado para esta y así posteriormente poder determinar su funcionalidad.

Para esto, se debió rediseñar y construir la etapa de alimentación de los actuadores debido a que el movimiento simultáneo de las articulaciones exige de esta etapa una mayor capacidad de corriente, estudiar los diseños realizados anteriormente de las etapas de acondicionamiento de señal de los sensores y de la etapa de potencia y determinar el dispositivo electrónico programable en el cual fuese posible llevar a cabo la aplicación.

Una vez determinado el dispositivo a utilizar, se procedió a determinar variables de entrada y de salida, a realizar la programación e implementar el esquema a grandes rasgos del controlador que permitiera el movimiento multiarticular del robot.

Como resultado se encontró que un controlador sencillo, como un Proporcional- Integrativo-derivativo implementado dentro de un microcontrolador con varias salidas para señales moduladas con diferente frecuencia permite cumplir los objetivos pero debe tenerse en cuenta la manera en que se envía esta señal controlada a los actuadores y los tiempos de respuestas de estos.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ciencias Físico – Mecánicas. Ingeniería Electrónica e Ingeniería Eléctrica.  
Director Msc. Jaime Barrero Pérez.

## SUMMARY

**TITLE:** REDESIGN AND IMPLEMENTATION OF JOINT CONTROL OF 6 DEGREES OF FREEDOM PUMA ROBOT AND ITS RESPECTIVE POWER SYSTEM\*.

**AUTHOR:** MARTHA CECILIA GUTIERREZ TURIZZO.\*\*

**KEYS WORDS:** Robot, source, controller, simultaneous, microcontroller.

### ABSTRACT:

This work plays an important role in advancing the implementation of specific tasks for a mechanical arm inside a work cell.

This document pretends to make a detailed description of the control strategy used to obtain the simultaneous movement of joints, to apply the algorithm developed for it and so later we can determine its functionality.

For this, we must redesign and build the power stage of the actuators due to the simultaneous movement of the joints requires from this stage a higher power capacity, to study designs made earlier about stages of conditioning of signal sensors and of the amplifier stage and also also to determine the programmable electronic device in which was possible to carry out the application.

Once determined the device to use, we proceeded to determine entry and exit variables, to do the programming and to do the implementation in broad terms of the driver scheme to allow the multijointed movement of the robot.

As a result it was found that a simple controller, such as a proportional-integrative-derivative implemented in microcontroller with several outlets for modulated signals with different frequency is capable of fulfilling the objectives but should be taken into account how this signal is sent to the actuators and their response times.

---

\* Graduation Project.

\*\* Faculty of Engineering Physical-mechanics. Engineering Electronic. Director Msc Jaime Barrero Perez.

## INTRODUCCIÓN

Las técnicas de control han ido avanzando a través de los años, logrando convertirse en una necesidad para la elaboración de sistemas robóticos útiles a la humanidad.

Estas metodologías cada día van más encaminadas a hacer de los procesos una manifestación de la realidad, como es hacer que los movimientos de las estructuras móviles sean lo más parecidas a las de los seres vivos., esto con el fin de dar la precisión y agilidad que tiene el cuerpo de los seres vivientes.

Las estructuras se han diseñado y elaborado con la finalidad de desarrollar actividades que pueden ser riesgosas, de altos niveles de complejidad para los seres humanos y que por ser actividades repetitivas y de gran concentración estarían sujetas a errores humanos llevando como consecuencia productos defectuosos.

Querer asemejar los movimientos de seres humanos conlleva a sistemas de control con mayor cantidad de cálculos y sometidos a un gran número de variables a las cuales se encuentra expuesta cualquier procedimiento real.

Basados en los antecedentes, este trabajo como parte de una tesis de maestría busca seguir avanzando en el campo de la robótica teniendo en cuenta que este robot será utilizado en una celda de trabajo y que deberá realizar desplazamientos lo más parecido a los que realiza un brazo humano.

Estos movimientos implican cambios en la estructura general de control del trabajo de grado anterior, realizar un nuevo sistema de alimentación eléctrica, estudiar los posibles sistemas embebidos que permitan el movimiento simultáneo e implementar un esquema de control general para una articulación y que sea aplicable a todo el sistema.

En capítulo preliminar, se hará una breve descripción de las partes del sistemas robótico, de sus actuadores y de los sensores que serán su comunicación con el entorno.

Posteriormente, se describirán los tipos de trayectorias que se pudiesen recorrer, las etapas que se requieren para mover cada articulación de esta estructura robótica y se estudiarán algunas de las posibles técnicas de control aplicables, determinando cual sería la más conveniente de emplear para cumplir el objetivo.

Más adelante, se estudiarán los tipos de fuentes de alimentación existentes que se ajustan a las exigencias del nuevo esquema de control debido a que las implementadas en trabajos anteriores solo suministraban la energía para el movimiento mono articular del robot. En este mismo capítulo, se realizará el diseño de las fuentes necesarias para el movimiento multiarticular.

En la cuarta sección, se describirá la estructura básica del dispositivo en el cual se programará el esquema general de control de las articulaciones.

En la quinta sección, se detallará la estructura de control a implementar en cada una de las articulaciones con el fin de satisfacer los objetivos planteados.

Y finalmente, se realizarán las pruebas para determinar utilidad y eficiencia del sistema planteado.

# 1. Robot tipo PUMA\*.

---

Físicamente, un robot está conformado por una gama de elementos o partes unidas que mediante puntos de inflexión permiten un movimiento relativo entre cada dos elementos consecutivos.

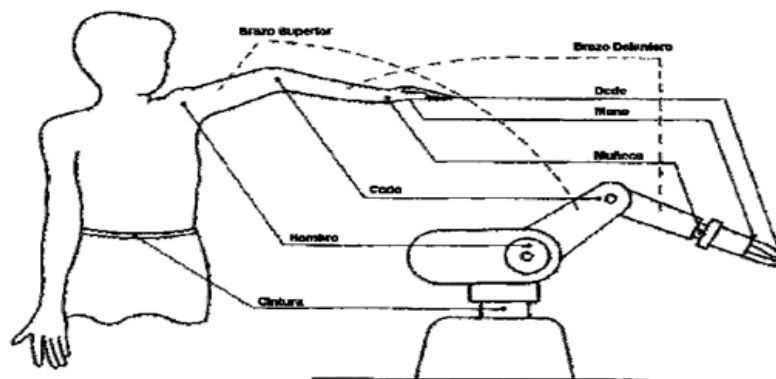
El movimiento que puede realizar por separado cada articulación con respecto a la otra se conoce como **GRADO DE LIBERTAD**.

Este tipo de robots, como cualquier sistema electromecánico está compuesto por una serie de elementos hardware, como son [1]:

- ✚ Una estructura mecánica.
- ✚ Un sistema de actuación.
- ✚ Un sistema sensorial interno.
- ✚ Un Computador.

## 1.1. ESTRUCTURA MECANICA

Este tipo de sistema electromecánico consta de cinco (5) partes principales: Cintura, brazo superior, brazo delantero, muñeca y efector final, haciendo semejanza a la estructura de un brazo humano. Ver figura 1.



**Figura 1.** Estructura física de manipulador.

(Fuente: [http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr\\_01/robotica/sistema/morfologia.htm](http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/morfologia.htm))

---

\* Programmable Universal manipulation Arm: Brazo manipulación de programación universal.

Este manipulador, en especial, se diseñó con la finalidad de mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales mediante movimientos programados para la realización de diferentes tareas específicas dentro de celdas de trabajo.

#### **1.1.1. CINTURA.**

La Base que soporta toda la estructura del brazo está construida en Aluminio y sobre ella se encuentra la primera articulación.

Esta articulación está asociada a un sistema de transmisión mecánica, que consta de dos (2) piñones, el primero de los cuales gira sobre el eje del motor de Corriente continua y el segundo sobre el sensor de posición y estos están acoplados, por medio de una correa dentada; lo cual tiene por objeto aumentar el torque de salida del actuador.

El movimiento que realiza esta articulación es rotatorio, y se hace respecto al eje acoplado al sensor de posición. Su máximo desplazamiento angular es de  $220^{\circ}$ [2].

#### **1.1.2. BRAZO SUPERIOR.**

Esta sección une las articulaciones del hombro y el codo. El hombro consta de una pieza en forma de ovoide, en la cual se encuentra la transmisión conformada por dos (2) piñones y una correa dentada. Estas bases alojan en su interior los sensores de posición acoplados a los ejes de revolución. Su máximo desplazamiento angular al igual que la cintura es de  $220^{\circ}$ [2].

#### **1.1.3. BRAZO DELANTERO.**

El brazo delantero va desde la articulación del codo hasta la muñeca. El sistema de transmisión mecánico de la articulación del codo es similar a los dos sistemas descritos anteriormente, con la diferencia en tamaño, número y forma

de los dientes de los piñones que lo conforman. Su movimiento, como los dos anteriores, es el mismo, de 220° [2].

#### **1.1.4. MUÑECA.**

Se encuentra conformada por un conjunto de tres servomotores, los cuales se acoplan entre sí por medio de ejes que están unidos al soporte del servomotor subsiguiente. Este sistema proporciona tres grados de libertad adicionales, donde todos los movimientos son giratorios y tienen como función, la orientación del efector final [2].

#### **1.1.5. EFECTOR FINAL.**

El efector final es una pinza de accionamiento neumático, fabricada por SAS Automation\*, cuya presión límite de operación es de 87 psi. Esta pinza se encuentra acoplada al eje del último servomotor [2].

### **1.2. SISTEMAS DE ACTUACION**

Los actuadores son los elementos encargados de dar el movimiento al sistema mecánico del robot. Este prototipo cuenta con tres (3) motores de corriente continua para el posicionamiento de las primeras articulaciones, tres (3) servomotores que le dan la orientación al efector final y un émbolo neumático encargado de abrir o cerrar la pinza.

La eficiencia del brazo robótico va ligada a este sistema y sus parámetros de funcionamiento.

---

\* Fabricantes de servomotor utilizado.

### 1.2.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.

El motor utilizado (figura 2) en este manipulador presenta las siguientes características [3]:

- ✓ Excitación de imán permanente controlado por armadura. El rango de control se extiende de 6 a 24 voltios.
- ✓ Tacómetro o sensor de posición Honeywell SS443A\*.
- ✓ Para que el motor pueda girar, el freno eléctrico que este posee debe ser alimentado a 24 V.



**Figura 2.** Motor de corriente continua.

(Fuente: <http://www.futurebots.com/gear.htm>)

- ✓ Sin carga, alimentado a 12 voltios consume una corriente de 130 mA con una velocidad de rotación de 25 R.P.M., logrando un torque de 400 onzas/pulgada.
- ✓ Con la misma tensión de alimentación puede consumir hasta 1.5 A. a una velocidad de 17 R.P.M. produciendo un torque de 1350 onzas/pulgada.

---

\* Referencia de Sensor incluido dentro de motor DC.

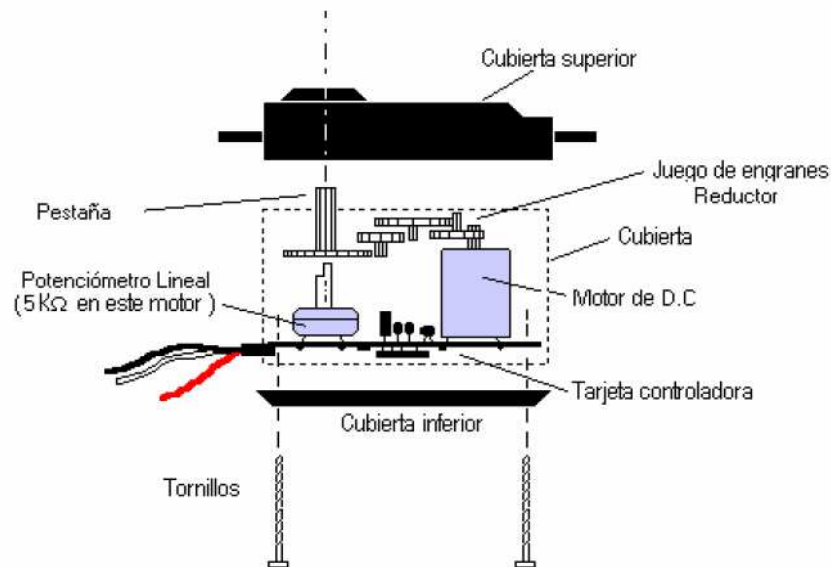
- ✓ Tiene un tamaño reducido, con 5.15" de largo por 1.52" de diámetro y el eje exterior de 0.9" de largo por 0.25" de diámetro, ideal para usarlo como actuador en un robot.

### 1.2.2. SERVOMOTORES.

La articulación de la muñeca del robot es controlada por este tipo de actuadores los cuales tienen poco peso comparado con los motores D.C. de las otras articulaciones y proporcionan un torque de 343 onzas/pulgada para una alimentación de voltaje de aproximadamente 5 voltios [2].

El servomotor está conformado por cuatro (4) partes esenciales: un motor eléctrico (D.C.), un potenciómetro lineal, un reductor y una tarjeta de control interna.

Además, este cuenta con tres líneas (Rojo, negro, blanco), dos utilizadas para alimentación y la otra para el envío de la señal de control como se observa en la figura 3.



**Figura 3.** Servomotor utilizado para el movimiento de la muñeca.

(Fuente [2]-pagina 48)

Su rango de giro del se encuentra entre 0° y 180° limitados por el valor del potenciómetro lineal que este posee.

### **1.2.3. ÉMBOLO PINZA.**

Como efector final se utiliza una pinza angular la cual cuenta con un émbolo encargado de transformar la energía del aire en un movimiento lineal. Cuando la presión aplicada es de 0 psi la pinza se encuentra en su estado normal abierto, si la presión aplicada está entre 70 y 87 psi la pinza se cierra debido al efecto de empuje que ejerce el émbolo sobre los dedos de la tenaza.

## **1.3. SISTEMA SENSORIAL INTERNO**

Es el encargado de interactuar con el exterior y brindar salidas que permitan conocer la posición de la articulación. Para este prototipo se utilizaron potenciómetros lineales.

### **1.3.1. POTENCIOMETROS LINEALES.**

Este sensor es acoplado al reductor de cada articulación a través de un eje rígido que no permite que existan cabeceos considerables entre el eslabón de interés y el. Estos proveerán la retroalimentación sobre el ángulo en el que se encuentra cada una de las articulaciones [2].

## 2. Control.

---

La principal función del control **cinemático** es generar las referencias articulares para el control **dinámico** a partir de las trayectorias articulares planeadas teniendo en cuenta los datos del programador, las limitaciones físicas, restricciones y el modelo cinemático del robot [4].

### 2.1. TIPOS DE TRAYECTORIAS.

Las trayectorias que puede seguir un manipulador se clasifican principalmente en tres categorías:

#### 2.1.1. TRAYECTORIAS PUNTO A PUNTO.

En este caso cada articulación realiza movimientos desde su posición inicial a uno final sin tener en cuenta el movimiento de las demás articulaciones. Cada actuador intenta llevar a su articulación al punto de destino en el menor tiempo posible y a partir de esta se pueden distinguir dos subcategorías:

o *Movimiento eje a eje*: Se mueve un solo eje cada vez. Comenzará moverse la primera articulación, y una vez que ésta haya alcanzado su punto final lo hará la segunda, y así sucesivamente hasta cumplir el movimiento de las N-articulaciones. Este es el control implementado actualmente en el sistema del robot PUMA.

o *Movimiento simultáneo de ejes*: Los actuadores comienzan simultáneamente a mover las articulaciones del robot a una velocidad específica para cada una de ellas. Dado que la distancia a recorrer y las velocidades son en general diferentes, cada una acabará su movimiento en instantes diferentes.

### **2.1.2. TRAYECTORIAS COORDINADAS.**

En este caso se busca que cada actuador trabaje a velocidades y aceleraciones específicas evitando esfuerzos innecesarios y evitando tener que esperar la conclusión del movimiento de la articulación más lenta.

Para esto se debe hacer un cálculo previo, averiguando cual es esta articulación y que tiempo invertirá. Se ralentizara entonces el movimiento del resto de los ejes para que inviertan el mismo tiempo en su movimiento, acabando todos ellos simultáneamente. Se tiene así que todas las articulaciones se coordinan comenzando y acabando su movimiento a la vez adaptándose todas a la más lenta.

### **2.1.3. TRAYECTORIAS CONTINUAS.**

Este tipo de trayectoria debe ser utilizado cuando se pretenda que el extremo del robot siga una trayectoria en el espacio cartesiano.

Normalmente suelen ser trayectorias en línea recta o en arco de círculo. El resultado normalmente es que cada articulación sigue un movimiento aparentemente caótico con posibles cambios de dirección y velocidad sin coordinación con el resto de las articulaciones. Sin embargo, el resultado conjunto es que el extremo del robot describirá la trayectoria deseada [1].

El control **dinámico** procura que las trayectorias realmente seguidas por el robot sean los más parecidas posibles a las propuestas por el control cinemático.

## **2.2. ESTRUCTURA GENERAL PARA REALIZAR MOVIMIENTO.**

Si las uniones del robot se mueven de manera simultánea generaría que los movimientos sean dinámicamente acoplados: el movimiento de cada unión afecta el movimiento de todas las uniones.

Por lo anterior, se considerará que cada unión está controlada por un servomecanismo, el cual considera que solo la unión en cuestión se mueve.

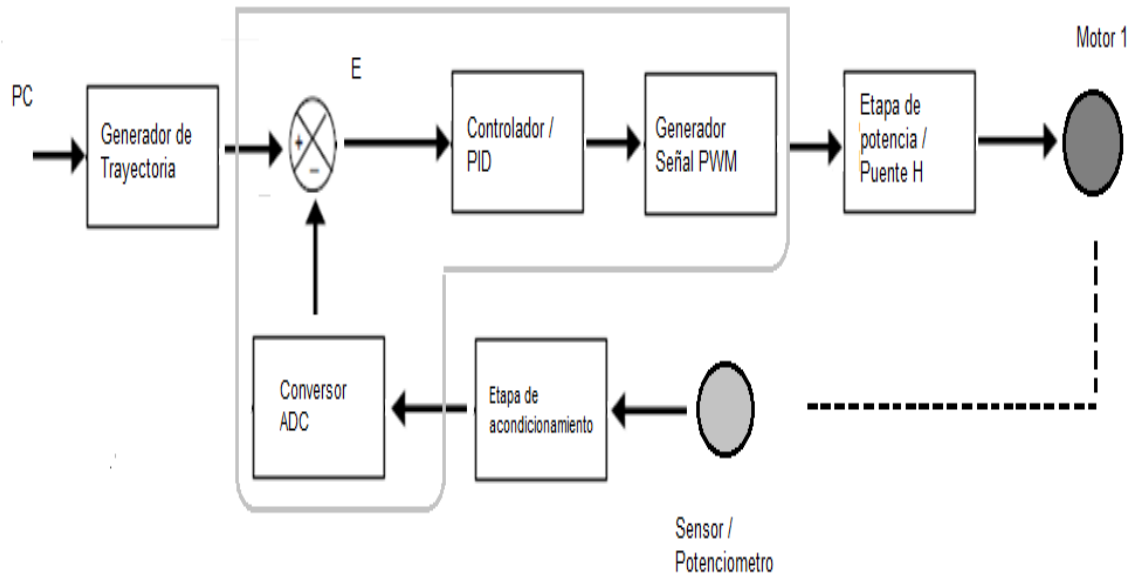
Sin embargo, en el momento de realizar la caracterización del sistema se debe tener en cuenta la repercusión del resto de articulaciones sobre la que se está estudiando. Al considerar el movimiento total existen variables a considerar las cuales se van simplemente a mencionar y tener en cuenta para más adelante. Estas son: momento de inercia, inercia cruzada, momento de gravedad, fuerzas centrífugas y fuerzas de coriolis (torques).

En este caso, se realizara el movimiento simultáneo de los ejes teniendo en cuenta las trayectorias punto a punto, con el fin de conocer la posición inicial de cada articulación y poder determinar con anticipación las trayectorias que debe recorrer y poder despreciar los factores externos que puedan afectar las trayectorias.

Para lograr cambiar la estructura de control del manipulador se debe, esencialmente, rediseñar y construir una fuente de alimentación capaz de soportar las cargas de todos los actuadores en sus puntos más críticos; seguidamente para la aplicación del movimiento simultáneo de las articulaciones se requiere de un dispositivo que permita implementar los controladores de cada articulación por separado y salidas de cada uno de estos independientes con el fin de poder dar mayor precisión y mantener el movimiento de todas las articulaciones mientras se realizan otros procesos útiles para la aplicación.

La etapa de potencia y la de acondicionamiento podrán mantener sus estructuras teniendo en cuenta que estas no dependen del tipo de movimiento de las articulaciones sino que estas son determinadas por constantes mecánicas y eléctricas del dispositivo que manejan o al que le suministran información.

El diagrama que se observa muestra los bloques básicos que se desarrollaran para cada articulación y que permite cumplir los objetivos planteados:



**Figura 4:** Diagrama de Bloques de sistema de control.

(Fuente: autor.)

### 2.2.1. GENERADOR DE TRAYECTORIA.

Esta etapa busca que el robot genere una trayectoria dada que permita hacer una evaluación de la precisión con la que funcionan los ciclos de control de la posición en régimen permanente y transitorio.

Esta evaluación se realiza midiendo la desviación entre la señal de referencia dada a los motores y el giro realizado por cada uno de estos.

Para que las trayectorias sean confiables deben cumplir a cabalidad los siguientes puntos:

- Llegar al punto final por los puntos determinados por el usuario.
- Satisfacer las condiciones cinemáticas y dinámicas que imponen los motores, como son: torques, velocidades y aceleraciones máximas.

Por la complejidad del sistema y para la reducción de trabajo se debe utilizar un software capaz de realizar los cálculos para generar las trayectorias.

### 2.2.2. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO.

Esta recibe los valores de tensión de la etapa de sensado, la cual ha convertido la posición de la articulación en una señal de voltaje a razón de 2mV/°; y los aplica a un amplificador de instrumentación que convierte esta señal en valores dentro del rango de 0 a 3V proporcionales al ángulo de posición del actuador.

### 2.2.3. CONTROLADOR.

La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, dominar las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados.

Para el rediseño de la estructura de control se puede utilizar una variedad de controladores dentro de los cuales se tienen:

#### 2.2.3.1. DESACOPLAMIENTO POR INVERSION DEL MODELO.

Se debe considerar el modelo dinámico del robot, incluyendo esta vez un posible par exterior  $T_e$  :

$$\tau = D(q) * \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + C(q) + Fv * \dot{q} + \tau_e = D(q) * \ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_e. \quad (2.1)$$

Donde  $N(q, \dot{q})$  se han incluido todos los pares distintos del de inercia ( coriolis, gravedad, rozamiento, etc).

Para desacoplar este modelo puede recurrirse al esquema representado en la figura 5 en el que la tensión de mando de los actuadores  $u$  se obtiene a partir de la señal de la señal  $T'$  y de las matrices  $D(q)$  y  $N(q, \dot{q})$  siendo:

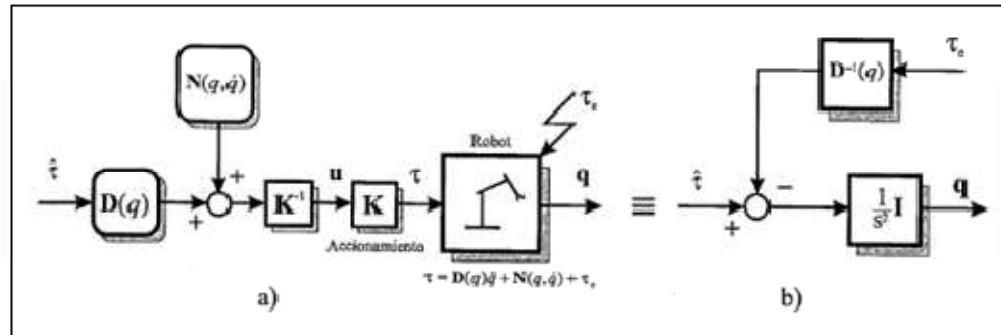
$$\tau = Ku = [D(q) * \tau' + N(q, \dot{q})] \quad (2.2)$$

$$\tau = [D(q) * \ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_e]. \quad (2.3)$$

$$\tau' = q'' + D^{-1}(q') * \tau e \tag{2.4}$$

Después de desacoplado el sistema, es sencillo calcular el par  $T'$  necesario para seguir la trayectoria deseada  $q_d$ . Basta para ello con que  $\tau' = q''_d = s^2 * I q_d$ , con lo que:

$$q''_d = q'' + D^{-1}(q) * \tau e. \tag{2.5}$$

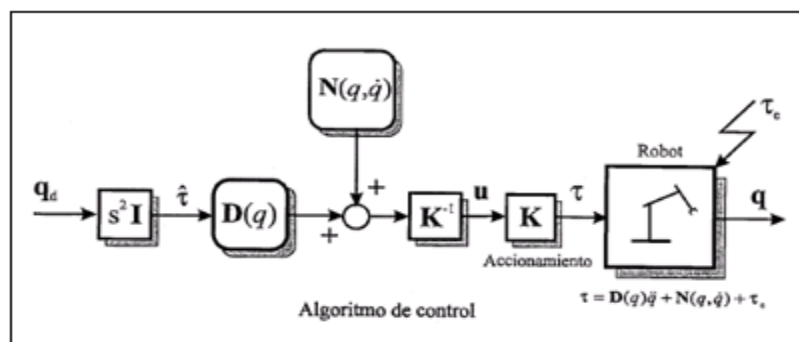


**Figura 5.** Desacoplamiento por inversión del modelo.

(Fuente [5]).

Como se observa, en ausencia de par exterior  $\tau_e$  si  $\tau' = q''_d$ , la trayectoria deseada  $q_d$  y la real coinciden. Por lo tanto, la ley de control correspondiente al método de desacoplamiento del modelo supone que la tensión de mando a proporcionar a los accionamientos sea (Figura 6) [5]:

$$U = K^{-1} \left[ \frac{D(q)s^2}{q_d} + N(q, q') \right] \tag{2.6}$$



**Figura 6.** Esquema de algoritmo de control basado en desacoplamiento por inversión de modelo.

(Fuente:[5]).

Sin embargo, en la práctica esta técnica tiene una aplicación limitada, bien

porque los parámetros que definen el modelo (inercias, rozamientos, etc.) no son conocidos con precisión, o bien porque el cálculo continuo en tiempo real del modelo inverso es excesivamente lento.

#### 2.2.3.2. CONTROL ADAPTATIVO.

La técnica del control adaptativo se puede aplicar con buenos resultados en aquellas ocasiones en las que el modelo, aún siendo conocido, cambia continuamente las condiciones de funcionamiento. La idea básica del control adaptativo es modificar en tiempo real los parámetros que definen de acuerdo al comportamiento instantáneo del sistema [6].

En el caso de un robot, es evidente que el comportamiento del sistema, y por lo tanto el modelo del mismo, cambia con los valores de sus variables articulares y con la carga que transporta. De este modo, supuesto que se hubiese ajustado adecuadamente un controlador para unas condiciones determinadas de localización del robot y carga manipuladas, este ajuste no sería válido cuando alguna de estas condiciones cambiase.

La utilización de la técnica de control adaptativo permite reajustar los parámetros del regulador cada vez que el comportamiento del robot se modifica, de modo que los movimientos de éste se aproximen siempre a las especificaciones deseadas.

Existen diferentes esquemas de control que entran dentro del concepto de control adaptativo. En todos ellos se utilizan procedimientos de identificación de los parámetros del modelo de sistema y algoritmos de cálculo de los parámetros del regulador.

El control por planificación de ganancias puede ser considerado como un caso simple de control adaptativo, en el que un número determinado de reguladores

están pre-calculados para diferentes condiciones de funcionamiento. Según se detecta que éstas se modifican se conmuta de un regulador a otro.

El control adaptativo con modelo de referencia realiza una comparación en línea entre el comportamiento del sistema real y deseado. El error entre ambos comportamientos se utiliza para modificar los parámetros del regulador.

El control adaptativo autoajustable identifica continuamente el modelo del sistema y utiliza algún algoritmo de diseño para ajustar los parámetros del regulador. Como caso particular de éste se conoce el control de par calculado adaptativo.

#### 2.2.3.3. CONTROL PID.

Un controlador PID corrige el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al manipulador. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo [7].

La ecuación que describe este tipo de control en función del tiempo viene dada por:

$$R(t) = K_p * e(t) + K_d * \frac{de(t)}{dt} + K_i * \int e(t) \quad (2.7)$$

La función de transferencia del controlador se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$U(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{1}{s} (K_p s + K_i + K_d s^2) \quad (2.8)$$

Un controlador PID permite con una ganancia  $K_p$  grande aumentar la rapidez de la respuesta reducir errores en régimen permanente y mejorar el rechazo a perturbaciones, con  $K_d$  se puede obtener una respuesta más estable (rápida y

sin excesivas oscilaciones) y con  $K_i$  se genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero

#### *2.2.3.4. CONTROLADOR APLICADO.*

Sin embargo, la solución más sencilla para este problema es considerar cada articulación como un servomecanismo independiente teniendo un único controlador ajustado para unas condiciones intermedias de funcionamiento y asegurando que los movimientos del robot se mantienen estables en otras condiciones, aunque con su calidad disminuida (tiempo de establecimiento, oscilación, precisión, etc.)

Esta se basará en controladores lineales mono variables en lazo cerrado de tipo PID (proporcional, integral, diferencial). Los métodos mono-variables requieren dividir el sistema en varios subsistemas, sin tener en cuenta la interacción entre ellos. Debido a que el robot es un sistema multi-variable que presenta grandes interacciones entre sus subsistemas, una posible solución consiste en considerar el proceso global multi-variable como una serie de procesos mono-variables independientes actuando en paralelo.

#### **2.2.4. GENERADOR SEÑAL PWM.**

Se realizara el control de los motores por medio de la modulación por ancho de pulso ya que evita interferencias provenientes del exterior y permite realizar control de forma eficiente. Cuando se controla por este medio, la señal no se ve afectada por el ruido eléctrico, ya que no importa la amplitud del pulso sino la frecuencia que esta posee y los tiempos de encendido y apagado.

Por lo anterior, se controlaran de los servomecanismos por medio de señales PWM enviando a la etapa de potencia señales con tiempos de trabajo (D)

proporcionales a la tensión promedio que se debe mantener, lográndose variar la velocidad y como consecuencia la posición de la articulación.

#### **2.2.5. ETAPA DE POTENCIA.**

La parte de potencia con la cual se controla el motor DC es un puente H, el cual debe soportar la corriente máxima de arranque que el motor tiene en ese instante. Este estará alimentado por la fuente de 12 V.

Esta etapa se implementará utilizando transistores que dependiendo de los valores en las variables del programa “positivo” y “negativo” se activaran o permanecerán inactivos determinando el sentido de giro del motor.

Para los servomotores esta etapa no es necesaria porque poseen otro tipo de funcionamiento.

Para el aislamiento entre la parte de potencia y la de control se usaran aisladores digitales para evitar daños en la parte de control.

### 3. Fuentes de alimentación.

---

La función principal de la fuente de alimentación diseñada es convertir la tensión alterna producida en el transformador en la tensión continua necesaria para alimentar cada uno de los actuadores de el sistema, para esto se utilizan los siguientes elementos:

- 1.- Transformador de entrada;
- 2.- Rectificador;
- 3.- Filtro para el rizado;
- 4.- Reguladores conmutados.
- 5.- Convertidor.

#### 3.1. GENERALIDADES.

Para realizar el diseño de las fuentes de alimentación en la literatura se encontraron dos tipos principales de fuentes reguladas: Conmutadas y Lineales.

De estas se puede afirmar que las **lineales** poseen mayor regulación, son más veloces y poseen mejores características de compatibilidad electromagnética que las conmutadas pero como desventaja se tiene que son poco eficientes debido a que parte de la corriente recogida de la red eléctrica se desperdicia en forma de calor.

De las **fuentes conmutadas** se puede decir que obtienen un mayor rendimiento, tienen menor costo y tamaño que las lineales. Su diseño se basa en la transferencia de energía de manera controlada entre el circuito primario y secundarios de un transformador, es decir solo se extrae de la red la potencia que la carga requiere lo que hace que prácticamente no haya potencia disipada en forma de calor, bajo rizado a la salida que evita que se produzcan

interferencias en el equipo alimentado por la fuente. Su mayor deficiencia es la dificultad para soportar picos de tensión transitorios.

Luego de estudiar las ventajas y desventajas de las fuentes lineales y conmutadas se decidió diseñar y construir una fuente conmutada.

## **3.2. FUENTE CONMUTADA.**

Este tipo de fuentes regulan la corriente de entrada conmutando la entrada con la salida y así controlando el promedio de corriente entregada a la carga, esto manipulando el ancho de pulso de la señal de control por medio de un PWM (Pulse Width Modulator)\*.

Esto se logra utilizando transistores, en este caso MOSFET\*\* operando como interruptores, conmutándolos activamente a frecuencias altas entre corte (abierto) y trío (cerrado). La potencia en este elemento de control es idealmente cero, es decir, la potencia de la fuente es entregada directamente a la carga.

La forma de onda resultante se entrega a un circuito que puede tener cualquiera de las siguientes configuraciones dependiendo de la aplicación, con el fin de rectificar y entregar la tensión para la cual se realizó el diseño

### **3.2.1. CONFIGURACIONES BÁSICAS.**

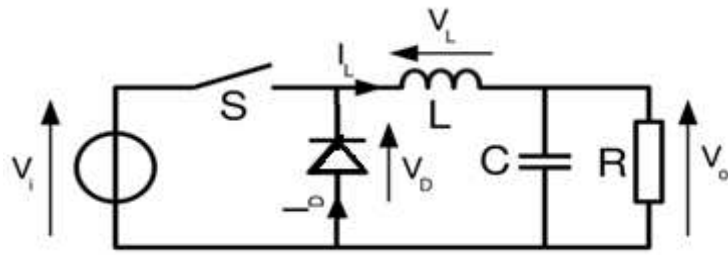
*3.2.1.1. CONVERTIDOR BUCK\*\*\*.* Es un convertidor de potencia que obtiene su salida una tensión continua menor que la tensión de entrada. El diseño consiste en una fuente conmutada con dos dispositivos semiconductores un transistor y un diodo, un inductor y opcionalmente un condensador C a la salida (Figura 7).

---

\* Modulador por ancho de pulso

\*\* Transistor del efecto de campo del metal-óxido-semiconductor.

\*\*\* Reductor.



**Figura 7.** Configuración reductora.

(Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor\\_Buck](http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_Buck))

El funcionamiento de este convertidor es bastante simple, consta de un inductor controlado por dos dispositivos semiconductores los cuales alternan la conexión del inductor bien a la fuente de alimentación o bien a la carga. La tensión de salida es  $V_{out} = V_{in} \times \text{ciclo de trabajo}$  y la regulación se ejecuta mediante la simple variación del ciclo de trabajo (D) [8].

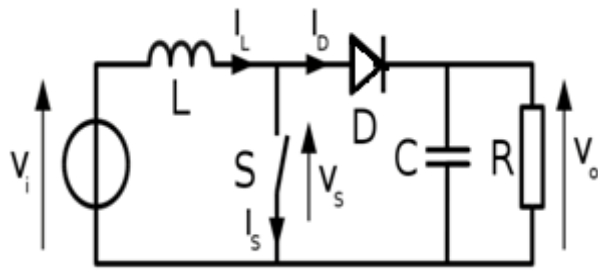
3.2.1.2. *CONVERTIDOR BOOST\**. Es un convertidor DC\*\* a DC de potencia que a la salida obtiene una tensión continua mayor que a su entrada. Este tipo de fuente conmutada contiene los mismo elementos que el convertidor reductor pero variando su forma de conexión.. Frecuentemente se añaden filtros contruidos con inductores y condensadores para mejorar el rendimiento.

Unas de las características de esta configuración es que la corriente de salida es menor que la corriente de entrada y su funcionamiento es más complejo que el de la configuración reductora, mientras este ultimo almacena la energía en una bobina, la configuración reductora entrega la energía almacenada más la tensión de alimentación a la carga.( figura 8).

---

\* Elevador.

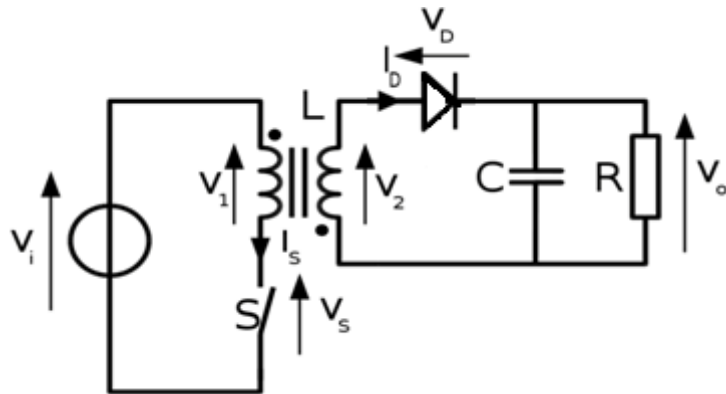
\*\* Corriente directa.



**Figura 8.** Configuración elevadores de tensión.

(Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor\\_Buck](http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_Buck))

3.2.1.3. *CONVERTIDOR FLYBACK\**. Es la evolución de los dos (2) sistemas anteriormente descritos. Es un convertidor DC a DC con aislamiento galvánico entre la entrada y la(s) salida(s). Tiene la misma estructura que un convertidor reductor o elevador con un transformador en lugar de un inductor lo que permite alcanzar altas relaciones de conversión. Debido a las limitaciones intrínsecas este convertidor solo se usa en aplicaciones de baja potencia (Figura 9).



**Figura 9.** Configuración inversora.

(Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor\\_Buck](http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_Buck))

El diagrama del convertidor de retroceso se muestra en la figura anterior y el principio de funcionamiento de ambos se describe a continuación:

---

\* Inversor.

Cuando el interruptor está activado, la bobina primaria del transformador está conectada directamente a la fuente de alimentación. Esto provoca un incremento del flujo magnético en el transformador. La tensión en el secundario es negativa, por lo que el diodo está en inversa (bloqueado). El condensador de salida es el único que proporciona energía a la carga.

Luego, cuando el interruptor está abierto la energía almacenada en el transformador es transferida a la carga y al condensador de salida.

La siguiente tabla muestra las características y modo de operación principales de las configuraciones básicas de las fuentes conmutadas:

Topología	Potencia (Wattios)	Eficiencia (típica)	Tensiones (V)	Almacenaje de Energía	Relación de tensión
“Buck”	0-1000	75%	5-1000	Inductor	$V_s < V_e$
“Boost”	0-150	78%	5-600	Inductor	$V_s > V_e$
“Flyback”	0-150	78%	5-600	Inductor	$V_s > 0 < V_e$

**Tabla 1.** Características de configuraciones básicas.

(Fuente: autor).

### 3.3. DISEÑO DE FUENTES DE ALIMENTACION

El robot PUMA es manipulado por medio de tres (3) motores DC encargados de proporcionar el movimiento a las tres primeras articulaciones las cuales simulan la rotación de la cintura, el hombro y el codo y tres (3) servomotores de 5V que se utilizan en el movimiento de la muñeca.

Para el diseño de la fuente de alimentación de los motores DC, se requiere conocer la corriente máxima que consume cada uno de estos cuando todo el sistema está en movimiento.

Para esto se realizaron pruebas de laboratorio alimentando los motores a tensiones nominales, con carga nominal y se obtuvo que estos consumía cada uno un valor máximo de corriente de 1.5 A.

Para el diseño de las fuentes se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros (tabla 2):

Fuente	V salida (V)	V entrada (V)	I salida (A)
Motores DC	12	18	5
Servomotores	5	18	3,5
Freno de motor DC	24	18	1

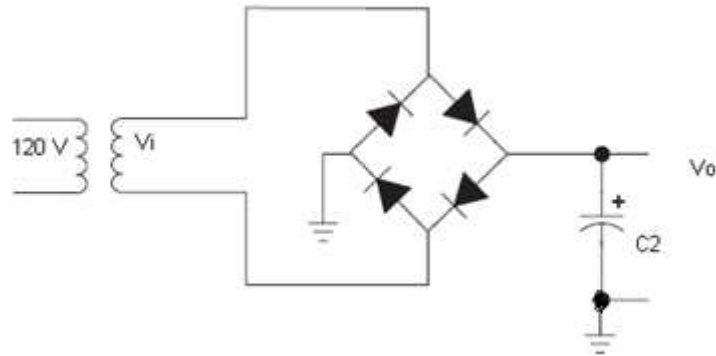
**Tabla 2.** Condiciones de diseño.  
(Fuente: autor)

Conociendo la necesidad, se construyó un transformador que entregara una tensión de salida de 18 V<sub>ac</sub> y capacidad de corriente igual a 10 [A], para así a partir de la salida de este construir las fuentes indispensables para el funcionamiento del robot.

### 3.3.1. ETAPA DE RECTIFICACION.

La salida del secundario del transformador (18 V) alimenta un puente rectificador de onda completa como se muestra en la figura 10. el cual proporciona más corriente, es más eficiente y tiene tensión de salida más estable que un rectificador de media onda.

Seguido a este un capacitor en paralelo a la carga que tienen como finalidad disminuir el rizado de la salida pulsante. Este debe ser de gran tamaño, en Faradios, con el fin de que el diseño de esta etapa permita que en la medida que se aumente la corriente la tensión a la salida del rectificador se mantenga.



**Figura 10.** Etapa de rectificación.  
(Fuente: autor).

La salida de corriente y voltaje de la etapa de rectificado son determinados por las siguientes ecuaciones:

$$V_{(\text{rectificador})1} = V_{(\text{secundario})} \times \sqrt{2} = 18 \times \sqrt{2} = 25.4 \text{ [V]}. \quad (3.1)$$

$$I_{(\text{rectificador AVG})1} \approx V_o / V_i \times I_o \approx 12 / 25.4 \times 5 \approx 2.36 \text{ [A]}. \quad (3.2)$$

Para las fuente de 5V y 24 V, se realizaron los cálculos de la corriente mínima que debe soporta el puente rectificador respectivamente:

$$I_{(\text{rectificador AVG})2} \approx V_o / V_i \times I_o \approx 5 / 25.4 \times 3.5 \approx 0.68 \text{ [A]}.$$

$$I_{(\text{rectificador AVG})3} \approx V_o / V_i \times I_o \approx 24 / 25.4 \times 1 \approx 0.96 \text{ [A]}.$$

### 3.3.2. ETAPA DE CONMUTACION.

Debido a las desventajas descritas en la sección 3.1 para este tipo de fuentes, se requiere utilizar un regulador que posibilite el control de picos de tensiones y y de corrientes.

Para esta etapa de la fuente se implementó un regulador que utilizara como principio de operación de control una señal PWM (Figura 13) con frecuencia fija.

Se seleccionó el TL494\*, además, de ser de bajo costo y comercial, porque es un circuito integrado que contiene la parte de realimentación y control de la señal de la base del transistor de conmutación.

En su interior, además, posee dos (2) amplificadores de error, un oscilador ajustable, un comparador, un flip-flop\*\* de control, circuitos de salida y un regulador interno (figura 11).

Este circuito integrado logra la modulación de los pulsos de salida comparando una onda de diente de sierra, creada por el oscilador interno, y dos (2) señales de control. En la etapa de salida se coloca un alto cuando el voltaje del diente de sierra es mayor que el voltaje de las señales de control. En la medida en que la señal de control crezca, el tiempo durante el cual la señal de diente podrá tener mayor valor es menor, y la duración del pulso decrece **[10]**.

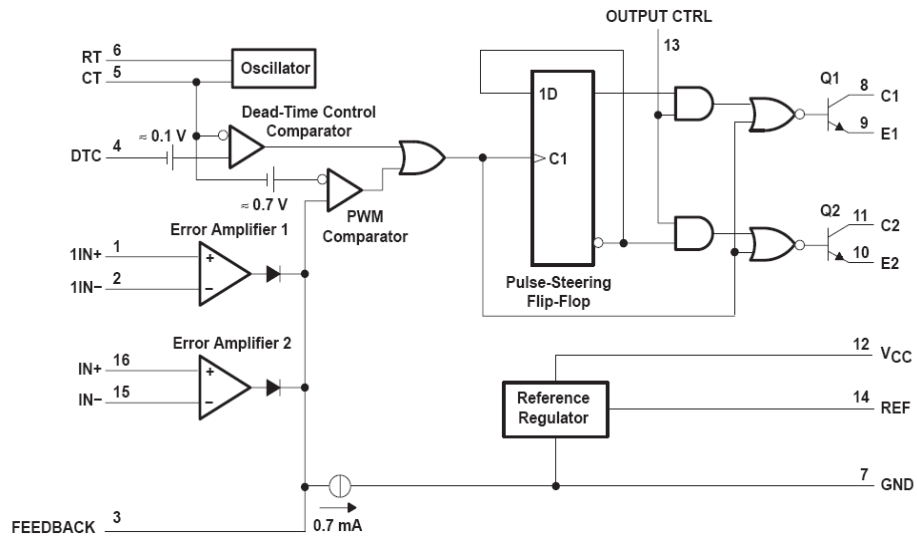
Las señales de control, es decir la variación de la señal PWM son derivadas de dos (2) fuentes:

1. La salida de el circuito de control del **tiempo muerto** que se encarga de controlar el tiempo de apagado y por consiguiente el tiempo de trabajo.
2. El **amplificador de error**.

---

\* Referencia de dispositivo utilizado para generar señales de onda cuadrada.

\*\* Biestable.



**Figura 11.** Componentes internos de TL494.

(Fuente [10]),

### ***Frecuencia de Operación.***

Este integrado trabaja a frecuencias que van desde 1 [Khz] hasta 300 [Khz]. Para programar la frecuencia de operación el oscilador se debe seleccionar los valores de  $R_t$  y  $C_t$  (tabla 3) que se encuentran conectados externamente a los pines 5 y 6, respectivamente.

El oscilador carga con corriente constante al condensador ( $C_t$ ), este valor de corriente es determinado por  $R_t$ . Esto produce una señal de voltaje en forma de rampa y cuando el voltaje del capacitor alcanza un valor igual a 3V, el circuito oscilador de descarga y el ciclo de carga es reiniciado.

La corriente de carga es determinada por la siguiente fórmula:

$$I_{carga} = 3V/R_t ; \quad (3.3)$$

El periodo y la frecuencia de la señal de diente de sierra es dada por las siguientes formulas:

$$T = 3 \times C_t / I_{carga} ; \quad (3.4)$$

$$F_{osc} = 1.1 / (R_t \times C_t) ; \quad (3.5)$$

La frecuencia del oscilador en esta aplicación es igual a la frecuencia de salida ya que los transistores de salida fueron conectados en paralelo.

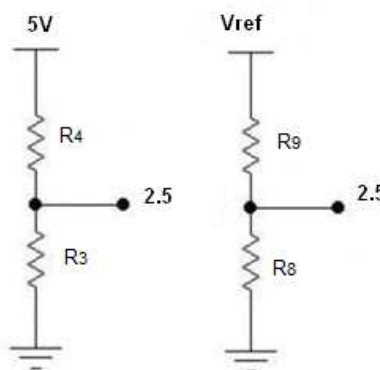
Fuente	Frecuencias de operación (Hz)	Rt (KΩ)	Ct (F)
24 V	2066	220	2.2 n
12 V	22727	20	2.2 n
5 V	17825	25.5	2.2 n

**Tabla 3.** Valores de resistencia y capacitores utilizados para el diseño de las fuente.  
(Fuente: Autor).

### ***El amplificador de error.***

El amplificador de error compara una muestra de la salida de voltaje con la referencia y ajusta el PWM para mantener la tensión de salida constante (regulador).

El TL494 posee internamente una tensión de referencia con la cual se realiza un divisor a través de R3 y R4. Esta fracción de tensión es comparada con una muestra de la tensión de salida a través de R8 y R9 (figura 12).



**Figura 12.** Divisor de tensión para realimentación de salida.

(Fuente:[10])

Tensión de referencia	R3	R4	R8	R9
12 V	5.1 k $\Omega$	5.1 k $\Omega$	1 k $\Omega$	3.8 k $\Omega$
5 V	5.1 k $\Omega$	5.1 k $\Omega$	5.1 k $\Omega$	5.1 k $\Omega$
24 V	5.1 k $\Omega$	5.1 k $\Omega$	1 k $\Omega$	8.6 k $\Omega$

**Tabla 4.** Valores de resistores etapa de realimentación.  
(Fuente: Autor).

Para incrementar la estabilidad del circuito amplificador de error, se le coloca una realimentación con ganancia 100.

#### ***Comienzo suave y tiempo muerto.***

Para reducir las tensiones elevadas de los transistores al iniciar la conmutación se implementara en los pines 4, 5 y 6 un circuito que permite el inicio. Este permite que la salida del ancho de pulso se incremente lentamente aplicando una señal con pendiente negativa a la entrada de control de tiempo muerto (pin 4).

Inicialmente, el capacitor C2 obliga a la entrada de control del tiempo muerto a seguir al regulador de 5V, el cual deshabilita las salidas (100% tiempo muerto). Como el capacitor se carga a través de R6, el ancho de pulso de la salida incrementa suavemente hasta que el bucle de control toma el mando. Con una razón de resistores de 1 a 10 para R6 y R7, el voltaje en el pin 4 después de puesto en marcha es de  $0.1 \times 5 = 0.5$  V.

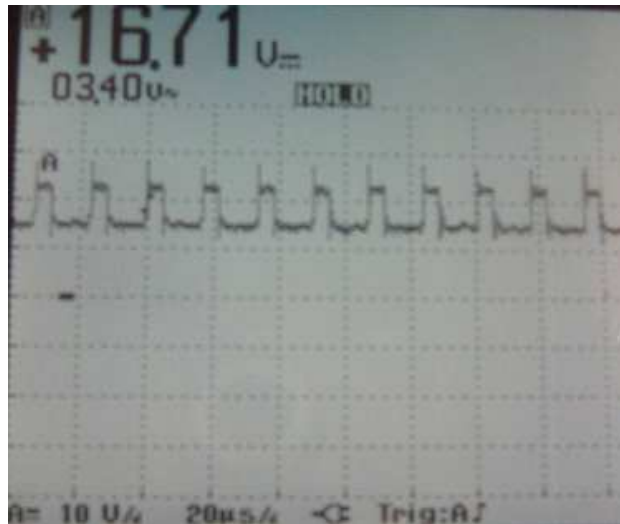
El tiempo de inicio lento generalmente esta en el rango de 25 a 100 ciclos de reloj. Si se seleccionan 50 ciclos de reloj a una frecuencia de conmutación de 20 KHz, el tiempo de inicio suave es:

$$t = 1/f = 50\mu\text{s por ciclo de reloj.} \quad (3.6)$$

El valor del capacitor es determinado por:

$$C_2 = \text{tiempo de inicio lento} / R_6 = 20\mu\text{s} \times 50 \text{ ciclos} / 1k\Omega = 1.0\mu\text{F}. \quad (3.7)$$

Esta elimina algunas señales falsas que se crean por el circuito de control cuando la fuente es aplicada.



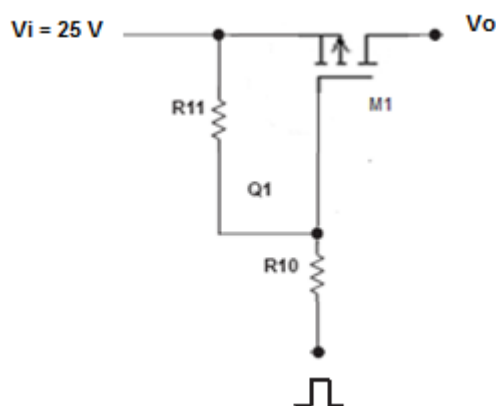
**Figura 13.** Salida de etapa de conmutación de fuente de 12V ( I =4 A).

(Fuente: Autor).

### **Calculo de los transistores de conmutación.**

La etapa de conmutación (Figura 14) es construida a partir de un mosfet de canal p ( $V_t < 0$ ).

La configuración para que pueda realizar una excelente conmutación debe colocar para el estado de conducción (cerrado) en trío y para el estado de no conducción (abierto) en corte [9]. En la figura 15 se observa la señal que se encuentra en el drenador del transistor de conmutación.



**Figura 14.** Etapa del conmutador.

(Fuente: Autor).

*Corte:*

$$I_d = 0$$

$$V_{gs} > V_t$$

$$V_g > -4 + 25 > 21$$

**(3.8)**

*Triodo:*

$$V_{gs} < V_t$$

$$V_g < V_t + V_s$$

$$V_g < -4 + 25$$

$$V_g < 21$$

**(3.9)**

En la región de corte debe circular corriente por las resistencias que se encuentran conectadas a la puerta del transistor para así poder cumplir con las condiciones de este estado:

$$V_g > 21;$$

$$R_{10} \cdot I + 0.7 > 21;$$

$$R_{10} > \frac{20.3}{I};$$

**(3.10)**

Teniendo en cuenta las leyes de Kirchhoff\* y haciendo suma de tensiones en lazo cerrado, se obtuvo:

$$-21 + (R_{10} + R_{11}) \cdot I + 0.7 = 0;$$

$$R_{10} + R_{11} = \frac{20.3}{I};$$

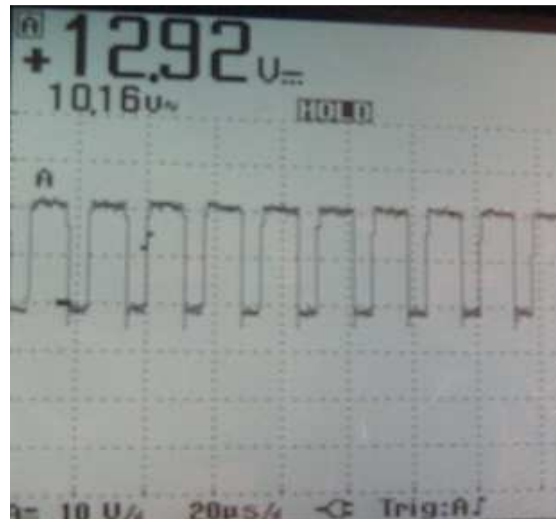
**(3.11)**

---

\* Creador de las leyes de suma de corrientes y voltajes.

El valor de R10 se utiliza para limitar la corriente a un valor menor del máximo que pueden soportar el TL494 (500mA) y de la ecuación anterior se obtiene que  $R10 > 40.6\Omega$ .

La resistencia R11 se coloca para descargar la compuerta cuando desaparece el pulso de disparo y debe tener un valor superior a  $7\Omega$ .



**Figura 15.** Señal de salida de transistor de conmutación para fuente de 12 V.  
(Fuente: Autor).

### 3.3.3. CONFIGURACION DE SALIDA.

Para la salida da la fuente se requiere una configuración que permita transformar los pulsos de la señal de salida en una tensión DC.

Debido a que la señal cuadrada que se encuentra a la salida de los transistores de conmutación tiene un valor máximo de 18 V (figura 15) se debe utilizar configuraciones Buck para todas las fuentes.

Para el diseño de la fuente de 12 V, se tiene:

$$D = 12V / 25 = 0.48 \tag{3.12}$$

$$T_{on} = 1/f \times D \rightarrow T_{on} = 1/22727 \times D = 0.48/22727 = 21.1 \mu S. \quad (3.13)$$

$$L \cong (V_i - V_o) \times T_{on} / \Delta I_L \quad (3.14)$$

$$L \cong (25 - 12) \times \frac{21.1 \mu}{0.85} = 323 \mu H \quad (3.15)$$

Para las fuentes de 5 y 24 V se obtuvieron los siguientes valores de Inductancias:

$$L(5V) \cong (25 - 5) \times \frac{11.2 \mu}{0.75} = 258 \mu H \quad (3.16)$$

$$L(24V) \cong (25 - 24) \times \frac{464.7 \mu}{0.85} = 547 \mu H \quad (3.17)$$

### **Capacitor de salida.**

Para un buen filtrado la frecuencia de rizado debe ser lo suficientemente pequeña para que la inductancia tenga valores pequeños, los elementos de interés son la resistencia efectiva en serie\* (ESR) y la capacitancia:

Para todas las fuentes diseñadas, se tiene que:

$$ESR_{max} = \frac{\Delta V_{orizado}}{I_L} = \frac{0.1}{0.85} = 0.11 [\Omega]. \quad (3.18)$$

Entonces, los valores de capacitancias mínimas para mantener el voltaje de rizo en 100 mV son de:

$$C_3(12V) = \frac{\Delta I_L}{8 \times F \times \Delta V_{orizado}} = \frac{0.85}{8 \times 22727 \times 0.1} = 47 [\mu F]. \quad (3.19)$$

$$C_3(5V) = \frac{\Delta I_L}{8 \times F \times \Delta V_{orizado}} = \frac{0.85}{8 \times 17825 \times 0.1} = 58 [\mu F]. \quad (3.20)$$

$$C_3(24V) = \frac{\Delta I_L}{8 \times F \times \Delta V_{orizado}} = \frac{0.85}{8 \times 2066 \times 0.1} = 514 [\mu F]. \quad (3.21)$$

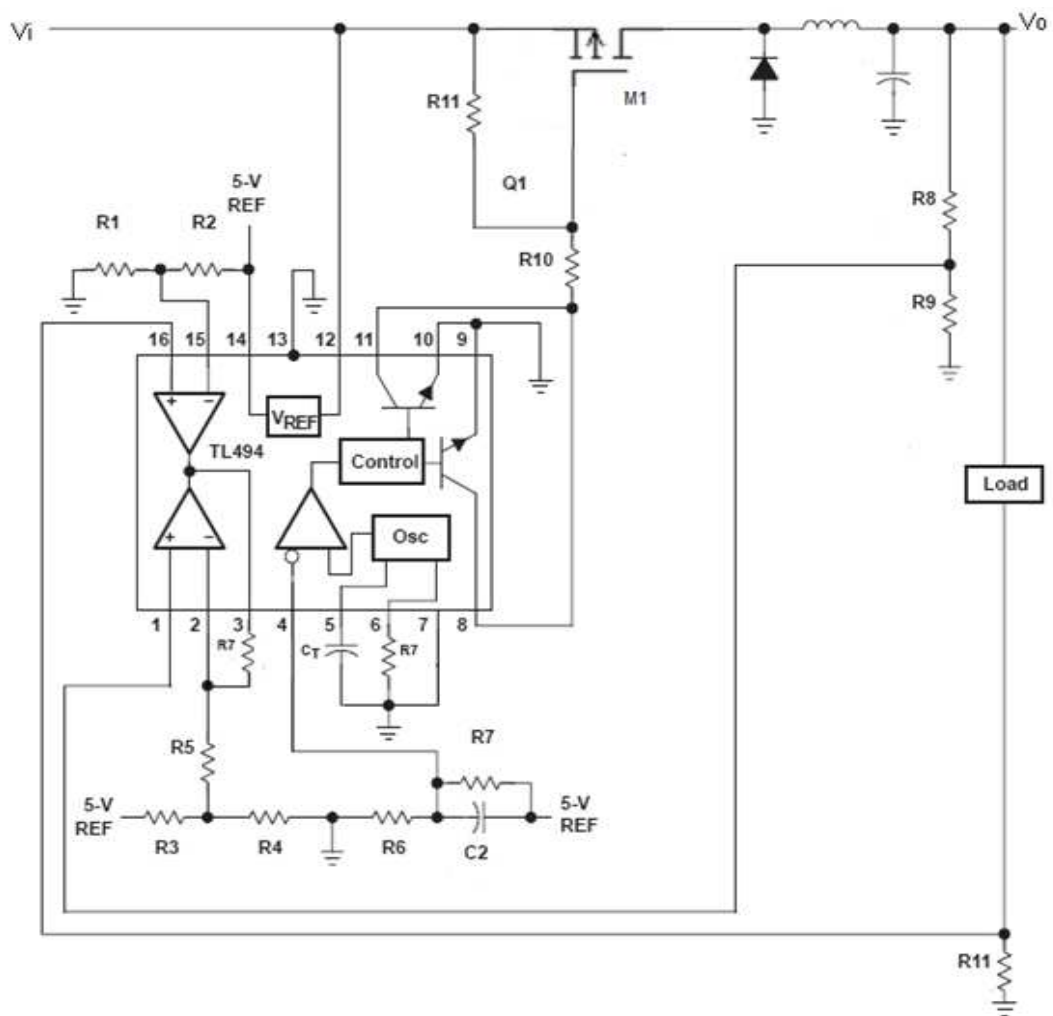
---

\* Valor dado por hoja de datos de capacitor.

En la figura 16. Se observa el esquema completo de las etapas de conmutación y las salidas de cada una de las fuentes de alimentación.

La tensión  $V_i$  viene dada por la etapa de rectificación y en este caso sería igual a 25 V.

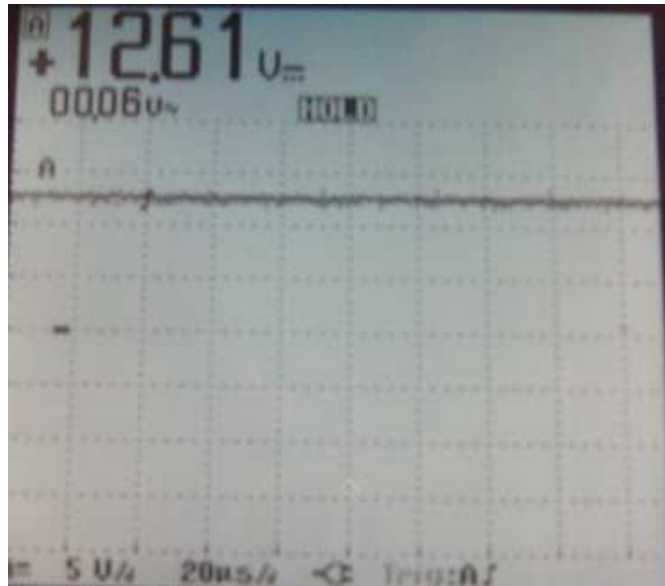
La carga para cada una de las fuentes es distinta. En el caso de la fuente de 12 V esta es el puente H que se encuentra en la etapa de potencia que maneja cada motor DC y que fue realizado en el trabajo de grado anterior [2], para la fuente de 5V, está dada por el servomotor (líneas de alimentación) y para la fuente de 24 V por el freno eléctrico que posee el motor de las tres (3) primeras articulaciones.



**Figura 16.** Esquema de Fuentes de alimentación.

(Fuente: [11]- Modificada por autor)

En la figura 17. Se observa la tensión de salida obtenida en pruebas realizadas en laboratorio para la fuente de 12V cuando su carga era de 3 ohmios. Esta mantiene un valor constante.



**Figura 17.** Salida de fuente de 12 V ( $I=4A$ ).  
(Fuente: Autor).

## 4. Tarjeta de programación.

---

### 4.1. GENERALIDADES.

Buscando una solución óptima para la programación del esquema de control del robot, encontramos una gran variedad de dispositivos programables que satisfacen nuestra necesidad de poder implementar controladores con salidas paralelas que permiten el movimiento simultáneo de todas las articulaciones.

Sin embargo, algunas de estas soluciones poseen mayores niveles de complejidad, costo, carencia de otros módulos necesarios para la aplicación y mayor dificultad de consecución. Dentro de estas soluciones se tienen:

- **FPGA's** (Field Programmable Gate Array)\*: son versátiles y tienen suficiente lógica para hacer circuitos digitales, además tiene memoria RAM. Su gran desventaja es que no incluye conversores analógico- digital, es decir, para nuestra aplicación se requeriría realizar por externamente el montaje de este modulo, incurriendo en mayores costos.  
La característica más importante de una FPGA es el **paralelismo**. Es decir, al ser circuitos digitales, la ejecución de cada bloque es en paralelo, no así en un microcontrolador por lo tanto la implementación de un controlador digital en una Fpga se puede hacer en paralelo, lo que genera altas velocidades de operación.
- Los **DSP's** (Digital signal Processor)\*\*: son sistemas basados en procesadores o microprocesadores que tiene un juego de instrucciones, un software y un hardware optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesado y representación de señales

---

\* Matriz de puertas programables de campo.

\*\* Procesador Digital de señales.

analógicas en tiempo real: en un sistema que trabaje de esta forma reciben muestras, normalmente provenientes de un ADC\*.

Es un sistema que puede trabajar con señales analógicas pero es digital, por lo cual requiere conversores analógico-digital tanto a su entrada con a su salida. Es en general, un dispositivo serial y de alto costo.

- Los **PLC's** (Programmable Logic Controller)\*\*: Son aparatos electrónicos operados digitalmente que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones las cuales implementan funciones específicas tales como lógicas, secuenciales, temporización, conteo y aritméticas, para controlar a través de módulos de entrada /salida digitales y analógicas, varios tipos de maquinas o procesos. De una manera general se puede definir al controlador lógico programable a toda máquina electrónica, diseñada para controlar en tiempo real y en medio industrial procesos secuenciales de control. Su programación y manejo puede ser realizado por personal con conocimientos electrónicos.  
Estos ofrecen muchas ventajas sobre otros dispositivos de control tales como relevadores, temporizadores electrónicos, contadores y controles mecánicos como del tipo tambor. Sin embargo, tiene como desventaja que requieren aadiestramiento de técnicos y poseen un costo elevado.
- Los **MICROCONTROLADORES** son circuitos integrados que incluyen en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y unidades de E/S (entrada/salida). Poseen módulos como ADC, programadores de tiempos, comunicación serial, etc.  
Son diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular.  
Son útiles para aplicaciones de baja a mediana velocidad (hasta unos 70-100 MHz). Estas aplicaciones son ilimitadas entre ellas se pueden mencionar: sistemas de alarmas, juego de luces, paneles publicitarios, etc.

---

\* Conversor analógico- digital.

\*\* Controlador lógico Programable.

Controles automáticos para la Industria en general. Entre ellos control de motores DC/AC y motores de paso a paso, control de máquinas, control de temperatura, control de tiempo, adquisición de datos mediante sensores, etc.

Estudiadas las características de las tarjetas por costo, sencillez de programación, porque no es necesario un nivel tan alto de procesamiento como para utilizar un DSP y la velocidad requerida está limitada por los actuadores se decidió utilizar un *microcontrolador* que cumpliera los requerimientos.

Por lo anterior, se optó por utilizar la tarjeta DEMOQE128\* propiedad de la universidad Industrial de Santander y el microcontrolador MC9S08QE128 de 64 pines del cual describiremos sus características y estructura en la siguiente sección.

## **4.2. MICROCONTROLADOR MC9S08QE128 .**

Es un microcontrolador de bajo costo, bajo consumo de potencia, de alto rendimiento de la familia de microcontroladores HCS08 de 8 bits.

### **4.2.1. CARACTERISTICAS GENERALES.**

131,057 bytes de memoria flash\*\*.

8064 bytes de memoria RAM (Random Access Memory)\*\*\*.

22 canales para el ADC. Este posee una resolución máxima de 12 Bits y un tiempo de conversión de 2.5  $\mu$ S y es totalmente funcional de 1.8 V a 3.6 V.

64 puertos de entrada- salida.

Doble modulo de interfaz de comunicación Serial (SCI).

---

\* Sistema de desarrollo utilizado para demostrar, evaluar y programar los microcontroladores MC9S08QE128 y MCF51QE128.

\*\* No volátil.

\*\*\* Memoria de acceso aleatorio.

Tres (3) módulos de interfaz del temporizador (TIM) o moduladores de ancho de pulso y 12 canales de salida.

Tiene un contador de tiempo real.

Permite la conexión de un oscilador externo.

Posee dos (2) módulos de comparadores analógicos que sirven para comparar dos (2) entradas analógicas.

Permite programación en lenguaje C.

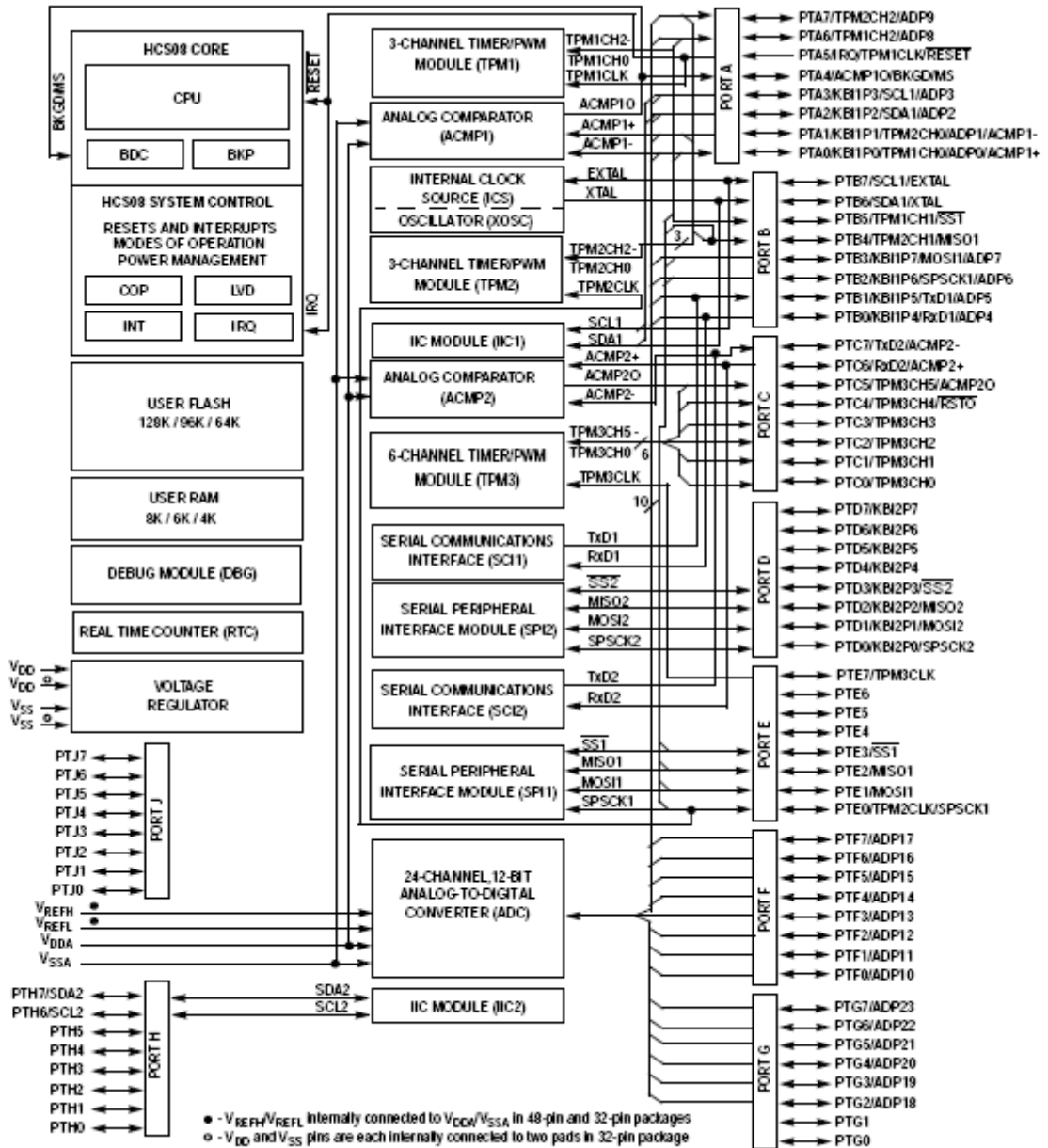
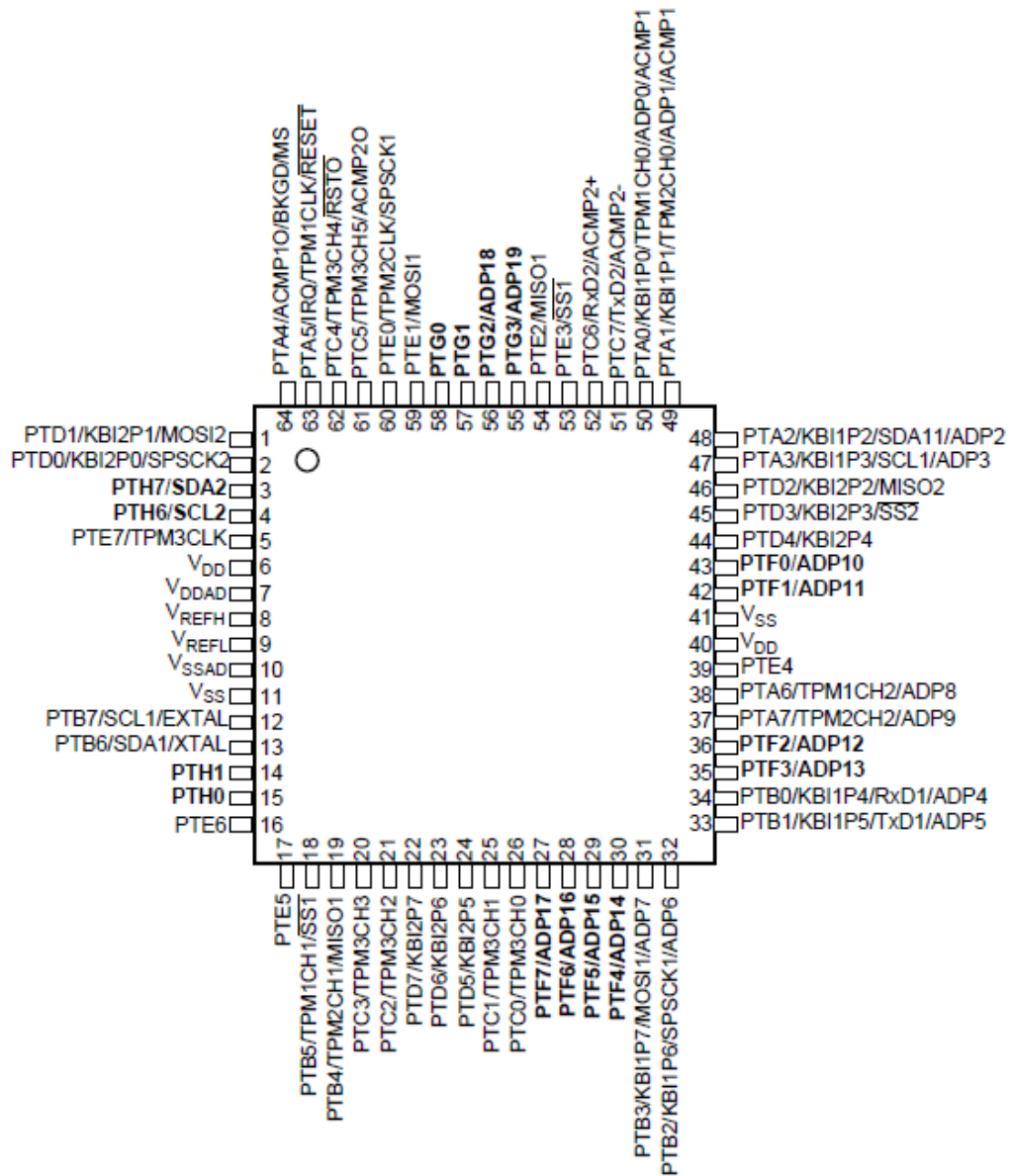


Figura 18. Diagrama de Bloques de MC9S08QE128.

(Fuente: [12]).

**Descripción de pines.** El esquema general de los pines del se muestra en la figura 19.



**Figura 19.** Distribución de pines de MC9S08QE128

(Fuente: [12]).

Algunas de las funcionalidades principales de estos pines serán descritas a continuación [12]:

**Puerto D (PTD0-PTD7):** Son pines de propósito general, que también son usados para el módulo de interrupción periférico (KBI), el convertor analógico-digital (ADC) y el circuito inter-integrado (IIC).

**Puerto H (PTH0-PTH1:PTH6-PTH7):** Son cuatro (4) pines de propósito general, además uno de estos se puede emplear para el reloj serial del circuito inter-integrado (IIC) y otro para los datos del mismo modulo, el cual provee un método para comunicación entre varios equipos.

**Puerto E (PTE0-PTE7):** En estos pines se puede conectar dos de las tres fuentes de reloj externas. Además, comparte pines con el modulo de los temporizadores permitiendo a través de ellos generar múltiples señales PWM con dos (2) frecuencias de muestreo diferentes.

Estos puertos, al igual que el puerto D comparte pines con el modulo de interfaz de periférico serial.

**Puerto A, B y C (PTX0-PTX7):** Incluyen la mayor cantidad de puertos que se van a utilizar. Entre estos pines se encuentran los doce (12) canales de los temporizadores (TMxCH). El canal TPM no controla el pin I/O cuando (ELSnB:ELSnA = 0:0) o cuando (CLKSB:CLKSA =0:0). Cuando CPWMS = 1 ( y ELSnB: ELSnA no es igual 0:0), todos los canales incluyendo el TPM son configurados para generar PWM con alineado al centro y el pin TPMxCHn son todos controlados por el sistema TPM. Cuando CPWMS=0, el bit de control MSnB: MSnA determina si el canal es configurado para capturar entrada, compara salida o alineación de borde de la señal PWM.

Algunos de estos pines, también son compartidos con canales el modulo del conversor analógico-digital, el módulo de interrupción periférico (KBI) y con la interfaz de comunicación serial (PTB0:PTB1).

**Puerto F y G (PTF0-PTF7:PTG0-PTG3):** Además de ser puertos de propósito general son 12 canales del modulo del conversor analógico-digital.

**VDD y VSS:** Son puertos utilizados para alimentar el microcontrolador.

## 5. Esquema general del controlador

---

En la operación del sistema, al registrar que el usuario requiere que el manipulador se desplace un número de grados, el micro controlador enviará una señal a cada actuador.

Para los motores DC estas señales dependerán de la diferencia entre la señal deseada y la señal enviada por el sensor que indica su posición actual.

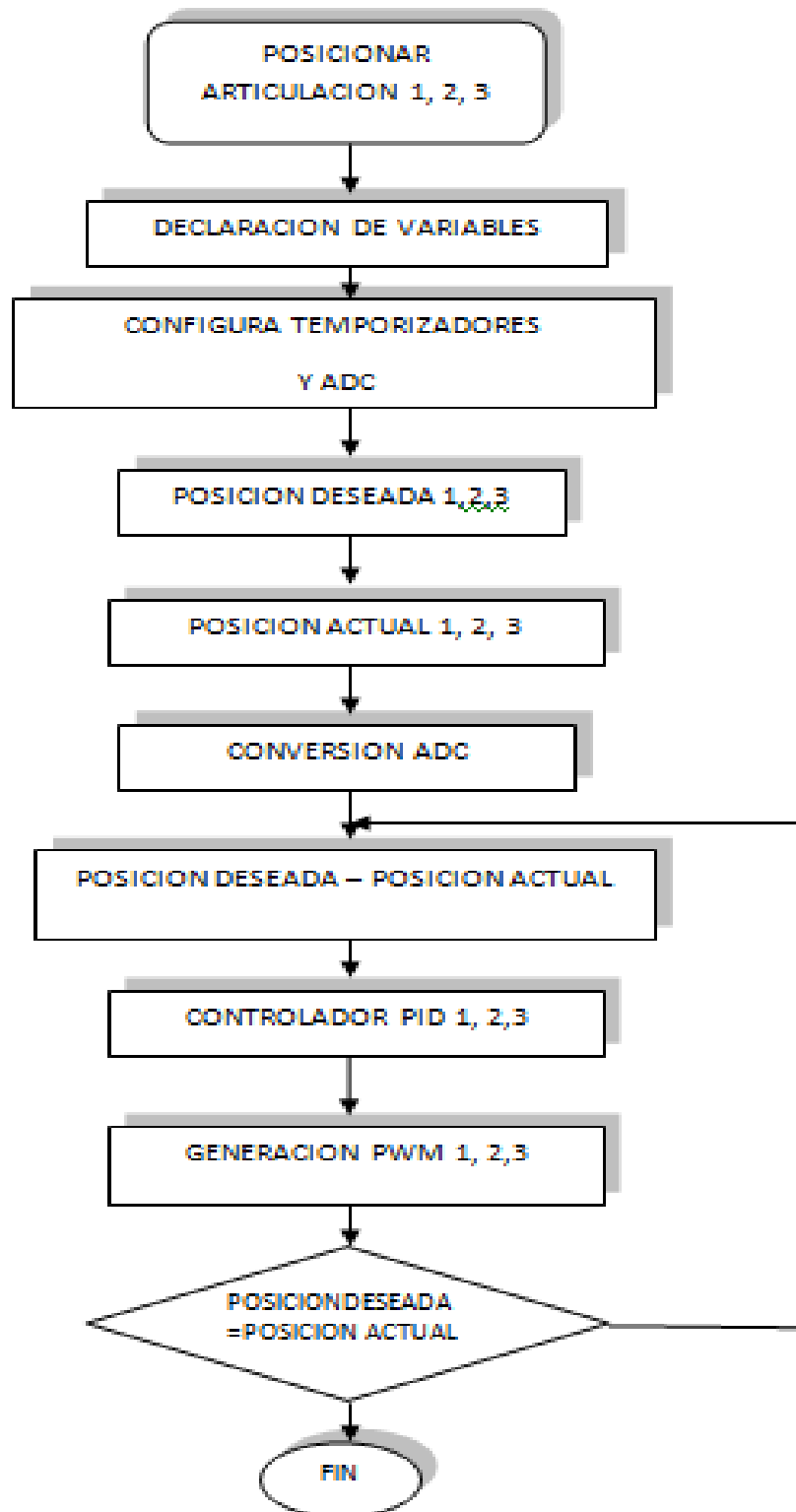
Estas deberán tener valores analógicos dentro del rango de 0.3 a 3 [V] y deberán ser enviadas a un ADC con el fin de ser convertidas para su posterior procesamiento, en este caso se tendrá una resolución de 10 bits.

Posteriormente, se determina cada uno de los errores; estos valores son manipulados a través de un controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo con el fin de lograr que la articulación se ajuste a la posición deseada.

El valor obtenido a la salida de cada uno de los controladores determinará el ciclo útil de la señal PWM que será directamente proporcional a la tensión promedio que se debe aplicar al motor para girar la cantidad de grados que se desea.

Después de realizados todos los cálculos anteriores para cada una de las articulaciones, se enviarán las tres (3) señales PWM a los transistores de la etapa de potencia que será la encargada de darle al motor el torque y corriente requerida para moverse (Ver figura 20).

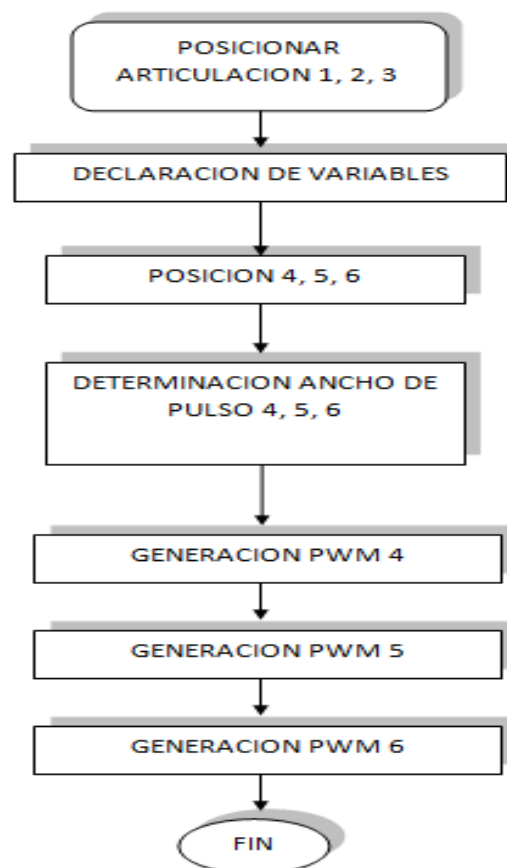
La idea principal es aplicar esta estructura de control y sincronizar los tiempos de inicio y de envío de señales para que mientras se realiza el movimiento de las articulaciones se ejecuten operaciones dentro del microcontrolador utilizadas en todo el proceso para el movimiento de cada una de las articulaciones.



**Figura 20.** Diagrama de flujo para control posición articulaciones 1,2 y 3.  
(Fuente: Autor).

Por otra parte, para el control de los servomotores del efector final se emplea una estructura distinta (Ver figura 21), no se requiere de la aplicación de controladores (se realiza el control internamente) y conversores analógicos digitales, debido a que es el microcontrolador es quien envía directamente una señal digital que tiene un periodo de 20 ms y un ancho de los pulsos variante de 760  $\mu$ s a 2.3 ms. El ancho del pulso se calcula de acuerdo con los grados que se quiera mover cada servomotor.

El posicionamiento angular del servomotor es proporcional al ancho del pulso de la señal que llega por la línea de control. Por ejemplo si el ancho del pulso de la señal es de 760 $\mu$ s el servomotor se posiciona en el extremo izquierdo; de forma contraria si tiene un ancho de pulso de 2.3 ms se posiciona en el otro extremo, valores intermedios de ancho de pulso indicaran posiciones diferentes.



**Figura 21.** Diagrama de flujo para control de posición de articulaciones 4, 5 y 6. (Fuente: Autor).

## 5.1. DESCRIPCION PROGRAMA DE CONTROL MOTOR DC.

Básicamente, para la programación del esquema de controlador se debe realizar la declaración de variables, la configuración del ADC y el generador de señales PWM.

La configuración el ADC se realiza seleccionando el modo de operación, el reloj, el divisor del reloj, el consumo de potencia y la resolución de este.

Este conversor posee un registro ADCSC1 que muestra la bandera de final de conversión, permite deshabilitar las interrupciones, escoger entre una conversión o conversión continua y deshabilitar el conversor mientras se inicia el proceso.

La configuración del temporizador para generar señales PWM se realiza deshabilitando las interrupciones, determinando la alineación, el tipo de pulso y escribiendo en el registro TPMxMOD el periodo de la señal PWM a generar.

Cada canal del conversor se lee independientemente y de forma simple, se escoge el canal de conversión y para esto en el registro ADSCR se escribirá 0, 1 o 2. Seguidamente, cuando la bandera COCO esté activa se coloca la información que está en los registros ADCRH y ADCRL en una variable de 16 bits llamada "VALOR\_ADC".

Luego de haber realizado la conversión de los datos de los puertos PTA3/PTF0/ PTF1 y PTB0/PTB1/PTA2 (dependiendo de la articulación) estos se guardaran en dos variables llamadas "realim" y "deseada" respectivamente. Con estos valores se hallara el error que hará parte del algoritmo de control digital PID.

En los puertos PTH6/PTH7/PTD4/PTD5/PTD6/PTD7 se colocara un alto o bajo dependiendo del signo de la señal de control. Este determinara el sentido de giro de los motores.

Con el dato obtenido a la salida del controlador, se puede comenzar a generar la señal PWM de control para los motores de corriente continua que efectúan el movimiento de las tres (3) primeras articulaciones. Este dato es guardado en los registros T1CH0H y T1CH0L, los cuales determinan el ancho de pulso de la señal.

Esta señal es colocada en el puerto del motor DC que se desea controlar de acuerdo a la tabla 5.

## **5.2. DESCRIPCION PROGRAMA DE CONTROL DE SERVOMOTORES**

Esta rutina tiene como función generar el ancho de pulso correspondiente para el valor en grados de cada servomotor, teniendo en cuenta que el periodo de la señal debe estar entre 10 ms y 30 ms. Además esta señal debe generarse continuamente para garantizar que no se pierda la posición alcanzada por el servomotor.

El ancho de pulso es generado por medio de retardos que dependen de los grados a moverse.

Esta señal será colocada en los puertos PTC dependiendo de la articulación manipulada como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Declaración de puertos utilizados para la implementación del controlador.

<b>PUERTO</b>	<b>TIPO DE SEÑAL</b>	<b>DESCRIPCION</b>
PTA3	ENTRADA	Señal sensor articulación 1
PTB1	ENTRADA	Posición deseada articulación 1
PTF0	ENTRADA	Señal sensor articulación 2
PTB0	ENTRADA	Posición deseada articulación 2
PTF1	ENTRADA	Señal sensor articulación 3
PTA2	ENTRADA	Posición deseada articulación 3
PTA1	SALIDA	Señal pwm articulación 1
PTA7	SALIDA	Señal pwm articulación 2
PTB4	SALIDA	Señal pwm articulación 3
PTC2	SALIDA	Señal pwm articulación 4
PTC3	SALIDA	Señal pwm articulación 5
PTC4	SALIDA	Señal pwm articulación 6
PTH6	SALIDA	Señal de control giro articulación 1
PTH7	SALIDA	Señal de control giro articulación 1
PTD4	SALIDA	Señal de control giro articulación 2
PTD5	SALIDA	Señal de control giro articulación 2
PTD6	SALIDA	Señal de control giro articulación. 3
PTD7	SALIDA	Señal de control giro articulación 3
PTG0	SALIDA	Control de freno articulación1
PTG1	SALIDA	Control de freno articulación 2
PTH0	SALIDA	Control de freno articulación 3

## **6. Pruebas realizadas.**

---

### **6.1. PRUEBA DE FACTOR DE UTILIZACION DEL TRANSFORMADOR.**

Para determinar este factor en las fuentes de alimentación, se utilizó una pinza volti-amperimetrica\* que permite obtener el valor de corriente que circula por el conductor y la tensión que alimenta el primario del transformador, además se midió la potencia a la salida de la fuente obteniéndose que esta tenía un factor de utilización de aproximadamente 89% para cada una de las fuentes.

### **6.2. DETERMINACION DE FACTOR DE RIZADO.**

Para establecer el factor de rizado de las fuentes de alimentación, se colocó carga a las fuentes y se midió tensiones a la salida tanto en alterna como en corriente continua, obteniéndose como resultado que el factor de rizado para todas las fuentes variaba, es decir para la fuente de 5V se obtuvo un valor de 4.1% aproximadamente, para la de 12 V de 2.2% y para la de 24 V de 3.3%.

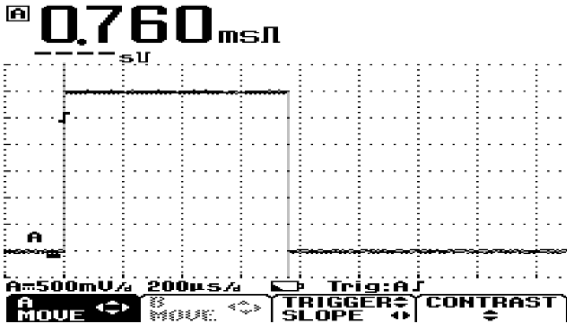
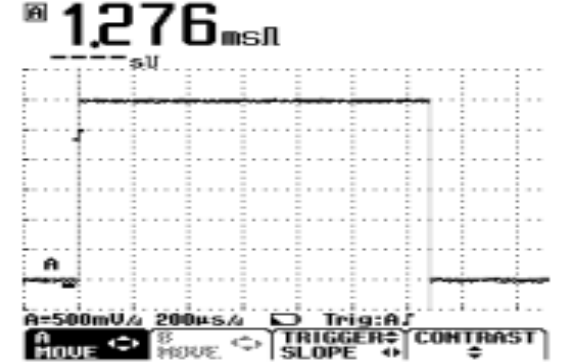
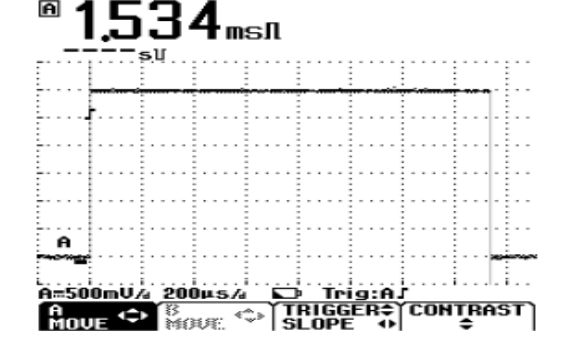
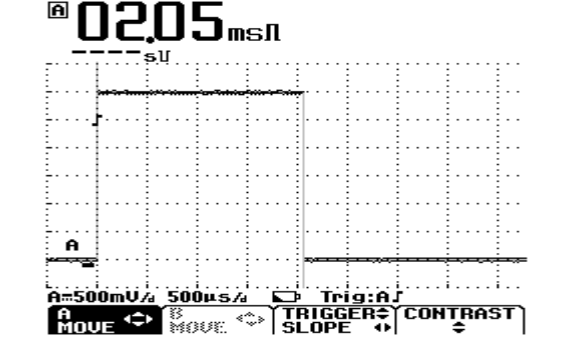
### **6.3. PRUEBA DE PRECISION PARA ARTICULACIONES 4, 5 y 6.**

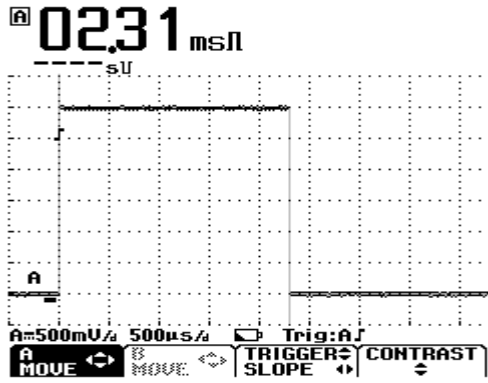
Para establecer la precisión se programaron diferentes posiciones para cada articulación partiendo de una posición dada. Por medio de un osciloscopio, se observó el ancho de pulso y un goniómetro\* se halló el valor angular experimental de cada articulación. Este último, se comparó con la posición deseada (Ver tabla 6) y se concluye que existe una diferencia entre el posicionamiento teórico y el experimental del 5% aproximadamente.

---

\* Instrumento de medición que permite obtener valores de tensión y corriente alterna.

\*\* Herramienta que permite ángulos de posición.

Angulo de movimiento deseado ( $\theta$ )	Grados de movimiento experimentales ( $\theta$ )	Imagen Osciloscopio (señal PWM de control)
0	4	 <p>0.760 ms</p> <p>A=500mV/div 200µs/div Trig:A</p> <p>MOVE TRIGGER SLOPE CONTRAST</p>
60	57	 <p>1.276 ms</p> <p>A=500mV/div 200µs/div Trig:A</p> <p>MOVE TRIGGER SLOPE CONTRAST</p>
90	85	 <p>1.534 ms</p> <p>A=500mV/div 200µs/div Trig:A</p> <p>MOVE TRIGGER SLOPE CONTRAST</p>
150	144	 <p>02.05 ms</p> <p>A=500mV/div 500µs/div Trig:A</p> <p>MOVE TRIGGER SLOPE CONTRAST</p>

180	174	
-----	-----	--

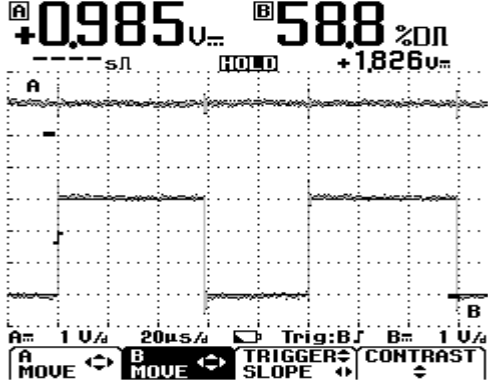
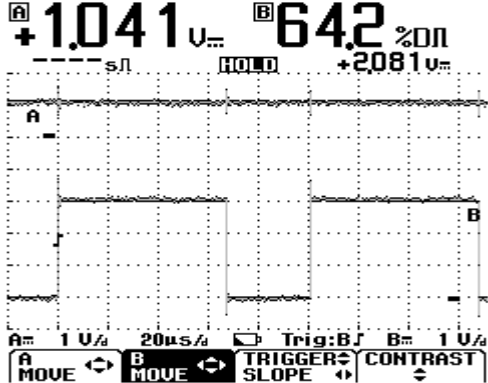
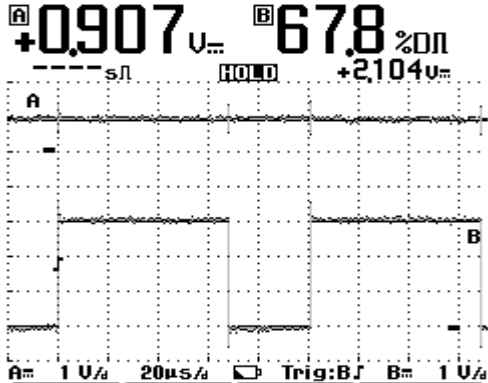
**Tabla 6.** Resultados obtenidos de experimento de posicionamiento articulaciones 4,5 y 6.

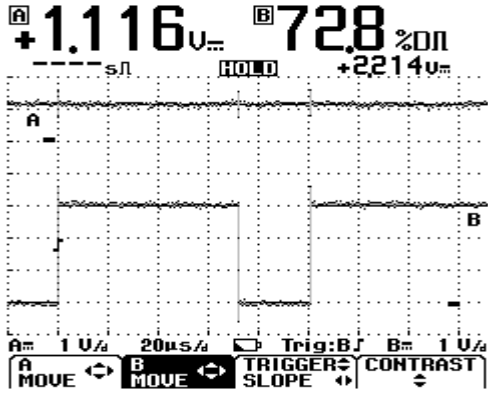
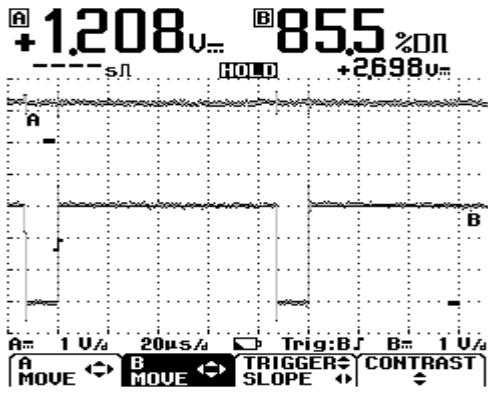
(Fuente: Autor).

#### 6.4. PRUEBA DE PRECISION PARA ARTICULACIONES 1, 2 y 3.

Para establecer la precisión, se determina como tensión deseada dada por el usuario un valor igual a 1 V y se varía la señal del sensor, obteniendo los errores y tensiones de alimentación a los motores mostrados en la tabla 9. De las tensiones esperadas y las obtenidas experimentalmente se obtiene una precisión del 2%.

En la tercera columna de la tabla 7, se observa la tensión obtenida de la señal de realimentación (sensor) por el canal A del osciloscopio y la señal PWM que alimenta la etapa de potencia en el canal B.

Error (V)	Tensión aplicada al motor (V) / sentido de giro	Imagen del osciloscopio
0.015	7.0 / Positivo	 <p> <b>A</b> +0.985 V... <b>B</b> 588 %D      +1826 μs      A: 1 U/div 20 μs/div Trig: B B: 1 U/div      A MOVE B MOVE TRIGGER SLOPE CONTRAST   </p>
0.041	7.56 / negativo	 <p> <b>A</b> +1.041 V... <b>B</b> 642 %D      +2081 μs      A: 1 U/div 20 μs/div Trig: B B: 1 U/div      A MOVE B MOVE TRIGGER SLOPE CONTRAST   </p>
0.093	8.08 / positivo	 <p> <b>A</b> +0.907 V... <b>B</b> 678 %D      +2104 μs      A: 1 U/div 20 μs/div Trig: B B: 1 U/div      A MOVE B MOVE TRIGGER SLOPE CONTRAST   </p>

0.116	8.63 / negativo	
0.208	9.80 / negativo	

**Tabla 7.** Resultados obtenidos de experimento de posicionamiento articulaciones 1,2 y 3.

(Fuente: Autor).

De esta tabla se puede observar que en la medida en que aumenta el error la tensión que se aplica al motor es mayor, esto con el fin de aumentar la velocidad y llegar a la posición deseada en menor tiempo. El rango de control es de 6 a 12 V debido a las especificaciones técnicas del motor DC.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de realizar un análisis detallado del rediseño del método de movimiento de las articulaciones, se obtiene que existen diferentes controladores que poseen altos niveles de complejidad y que realizan el control simultáneo. Sin embargo, controladores sencillos como el Proporcional-Integrativo-derivativo permite realizar esta misma tarea.

El movimiento simultáneo de una articulación se ve afectado sustancialmente por el dispositivo de programación, ya que es una característica propia de este la velocidad de procesamiento y la cantidad señales de control que puede enviar a los actuadores y recibir de los sensores.

Inicialmente, se planteó implementar la estructura de control en un microcontrolador propio que cumplía con los requerimientos, pero debido a inconvenientes presentados con la tarjeta de programación el desarrollo en esta acarrea mayores costos.

Por lo anterior, se decidió usar la tarjeta de programación propiedad de la universidad Industrial de Santander y adquirir el microcontrolador utilizado por esta ya que esta permitía implementar la aplicación cumpliéndose con los objetivos.

En la medida en que se aumente la carga del sistema, será mayor la corriente solicitada. El movimiento simultáneo de todas las articulaciones exige una fuente robusta y eficiente, en este caso se realizó el diseño y construcción de una fuente conmutada con la capacidad de corriente necesaria para mover el sistema completo.

Para próximos trabajos de grado que permitan la implementación completa del control a todas las articulaciones se recomienda:

Para la determinación de las constantes del controlador, utilizar un método eficaz que pueda ser verificado de forma experimental debido a la complejidad del sistema ya que valores errados en estas constantes puede llevar a estados no definidos en el sistema e impidiendo el control de este.

Realizar el montaje de todas las etapas en solo dos (2) tarjetas; Una tarjeta para el manejo de las señales de potencia (Puentes H y fuentes de potencia) y otra para la etapa de sensado y programación, reduciendo el número de conductores y disminuir la probabilidad de errores y ruido.

Realizar lubricación periódica de los actuadores para evitar inconvenientes en la manipulación del sistema robótico y mantenimiento a las bandas de transmisiones del sistema de piñones ya que estas con el uso tienden a romperse o sufrir estiramiento.

Este trabajo de grado como aporte a la aplicación de una celda de manufactura permitió aplicar y desarrollar los conocimientos adquiridos teóricamente en los estudios de electrónica.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] **BARRIENTOS, ANTONIO.** Fundamentos de Robótica (2ª ED.) de. S.A. MCGRAW-HILL.

[2] **PEÑA, ALFONSO.** Prototipo de un robot tipo PUMA de seis grados de libertad. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2005.

[3] <http://www.futurebots.com/gear.htm>

[4] **Grupo de Automática Robótica y Visión Artificial.** Control cinemático de un brazo robot. Universidad de Alicante.

[5] **MEJIA, GERSON.** Diseño de un controlador dinámico para un robot SCARA mediante redes neuronales artificiales. Tesis de grado. Universidad de Pamplona. 2007.

[6] **PEREZ LONDOÑO, SANDRA.** Métodos de control utilizados en la implementación de estabilizadores de sistemas de potencia. Universidad tecnológica de Pereira. 2005.

[7] **OGATA, KATSUHIKO.** Ingeniería de control moderna. 3º Edición en español.

[8] **RASHID, MUHAMMAD H.** Power Electronics. Second edition

[9] **SEDRA SMITH,** Microelectronic circuits, 5<sup>TH</sup> edition.

[10] Datasheet TL494. Pulse Width Modulation Control Circuits. Revisado mayo 2002.

**[11]** Designing Switching Voltage Regulators With the TL494. Texas Instruments. Revisado enero 2005.

**[12] MC9208QE128.** Reference manual. Freescale. Revision 2 / 2007.



```

    if (deseada[i] == realim[i]){
        freno[i]=0;
        ciclo_util[i]=0;
    }else {
        freno[i] = 1;
        ciclo_util[i] = ECUACION_DC(i, deseada[i], realim[i]);
        ciclo_util[i] = ciclo_util[i] + periodo_pwm/2; // ajustar el 50%
    }
}

// * * * generar pwm y control de giro MOTOR 1
//PTGD_PTGD0= freno[0];
if (ciclo_util[0] >= periodo_pwm) // evitar que ciclo de la pwm sea mayor
que 100%
    TPM2C0V = periodo_pwm-1;
else
    TPM2C0V = ciclo_util[0];

positivo = ~negativo[0];
PTHD_PTHD6 = negativo[0];
PTHD_PTHD7 = positivo;

// * * * * *

// * * * generar pwm y control de giro MOTOR 2
//PTGD_PTGD1= freno[1];
if (ciclo_util[1] > periodo_pwm)
    TPM2C1V = periodo_pwm-1;
else
    TPM2C1V = ciclo_util[1];

positivo = ~negativo[1];
// PTDD_PTDD4 = negativo[1];
// PTDD_PTDD5 = positivo;
PTDD_PTDD5 = negativo[1];
PTDD_PTDD4 = positivo;

// * * * * *

// * * * generar pwm y control de giro MOTOR 3
//PTHD_PTHD0= freno[2];
if (ciclo_util[2] > periodo_pwm)
    TPM2C2V = periodo_pwm-1;
else
    TPM2C2V = ciclo_util[2];

positivo = ~negativo[2];
PTDD_PTDD6 = negativo[2];
PTDD_PTDD7 = positivo;

// * * * * *

retardo_TS(TS); // TS*1mS

```

```

} // *****

// *** controlador motores dc ***
int ECUACION_DC(char motor, int set_point, int feed_back){
// declaración de variables locales ***
int ERROR;
int PROP, INTEG, DERIV;
int SALIDA;
static int ERROR_O[num_motores]={0,0,0};
static int INTEG_O[num_motores]={0,0,0};

ERROR = set_point - feed_back;

PROP = kp[motor] * ERROR;
PROP = PROP*10; // kp=kp/10, error =100*error

INTEG = (ki[motor]*ERROR);
INTEG = INTEG*TS;
INTEG = INTEG/100; // ki=ki/10, Ts= TS/1000, error =100*error
INTEG = INTEG + INTEG_O[motor];

DERIV = ERROR - ERROR_O[motor];
DERIV = kd[motor]*DERIV;
DERIV = 10*DERIV; // kd= kd/10; error=100*error
DERIV = DERIV/TS; // Ts= Ts/1000
DERIV = 10*DERIV; // kd= kd/10; error=100*error

SALIDA= INTEG + PROP;
SALIDA= SALIDA/100;
SALIDA= DERIV + SALIDA;

// separar signo y magnitud
if (SALIDA<0){
negativo[motor] = 1;
SALIDA = -(SALIDA);
} else{
negativo[motor] = 0;
// SALIDA = SALIDA;
}

ERROR_O[motor] = ERROR;
INTEG_O[motor] = INTEG;
return SALIDA;
} // *****

// *** CONFIGURAR ADC *****
void CONFIG_adc(void){
ADCCFG = 0b10111001; /* ADLPC = 1 ==> Low power configuration
ADIV = 01 ==> Input clock / 2

```

```

        ADLSMP = 1    ==> Long sample time
        MODE   = 10   ==> 10 bit conversion
        ADICLK = 01   ==> Bus clock /2      */
ADCSC1 = 0b00011111; /* COCO = READ
        AIEN   = 0    ==> Interrupt disabled
        ADCO   = 0    ==> One conversion
        ADCH   = 11111 ==> Module disabled  */
} // *****

// *** ADC ***
int CONV_adc(char canal){
    int valor_adc;
    ADCSC1_ADCH = canal;      // iniciar conversión canal
    while (!ADCSC1_COCO){;}
    valor_adc = (word) (ADCRH<<8); // Read ADC value
    valor_adc |= (word) (ADCRL);
    ADCSC1_ADCH = 31;        // Deshabilitar módulo
    return valor_adc;
} // *****

// *** CONFIGURAR PWM *****
void CONFIG_pwm_DC(void){
    TPM2C0SC = 0b00101000; /* CH0F = READ
        CH0IE = 0    ==> Interrupt disabled
        MS0B:A = XX  ==> Center-aligned pwm
        ELS0B:A = 10 ==> High-true pulses
        00          */
    TPM2C1SC = 0b00101000; /* CH0F = READ
        CH0IE = 0    ==> Interrupt disabled
        MS0B:A = XX  ==> Center-aligned pwm
        ELS0B:A = 10 ==> High-true pulses
        00          */
    TPM2C2SC = 0b00101000; /* CH0F = READ
        CH0IE = 0    ==> Interrupt disabled
        MS0B:A = XX  ==> Center-aligned pwm
        ELS0B:A = 10 ==> High-true pulses
        00          */

    TPM2SC = 0b00101110; // TOF = READ
        /* TOIE = 0 ==> Interrupt disabled
        CPWMS = 1 ==> Center-aligned PWM
        CLKSB:A = 01 ==> bus rate clock (4.19MHz)
        PS2:0 = 110 ==> TPM clock / 64  */
    TPM2MOD = periodo_pwm; // T = 64*621/4.19 us = 8.0ms
} // *****

// *** RETARDO TIEMPO DE MUESTREO *****
void CONFIG_demora(void){
    TPM1C0SC = 0b00010000; /* CH0F = READ
        CH0IE = 0    ==> Interrupt disabled
        MS0B:A = 01
        ELS0B:A = 00 ==> pin not used for TPM
        00          */
}

```

```

    TPM1SC = 0b00000101; /* TOF = READ
                          TOIE = 0  ==> Interrupt disabled
                          CPWMS = 0  ==> NO Center-aligned
                          CLKSB:A = 01 ==> TPM counter disable
                          PS2:0 = 101 ==> TPM clock / 32 */
} // *****

void retardo_TS(char tiempo){
    int demora;
    TPM1SC = 0b00001101; // CLKSB:A = 01 ==> bus rate clock (4.19MHz)
    demora = 131*tiempo; // T = 131*32 = 4192 ==> 4192/4.19 us ~= 1ms
    TPM1MOD = demora-1;
    while (!TPM1SC_TOF){;}
    TPM1SC_TOF = 0;
    TPM1CNT = 0;
} // *****

```

## 2. PROGRAMA PARA POSICIONAMIENTO DE ARTICULACIONES DE MUÑECA.

```
#include <hidef.h> /* for EnableInterrupts macro */
#include "derivative.h" /* include peripheral declarations */

#define num_servos 3

// *** declaración de funciones ***
void CONFIG_pwm_servos(void);
int ecuacion_servos(char);

// *****
// *** principal ***
void servos(void) {
    // declaración de variables locales ***
    char deseada[num_servos]={60, 90, 120}; // valor en grados de la posición
    deseada(0 - 180);
    int ciclo_util[num_servos];
    char i;

    for(i=0;i<num_servos;i++) {
        ciclo_util[i] = ecuacion_servos(deseada[i]);
    }
    TPM3C2V = ciclo_util[0]; // pwm servo1
    TPM3C3V = ciclo_util[1]; // pwm servo2
    TPM3C4V = ciclo_util[2]; // pwm servo3
} // *****

// *** controlador ***
int ecuacion_servos(char set_point){
    const int OFFSET = 1592; // equivale a 0.76mS
    int SALIDA;

    SALIDA = 18*set_point;
    SALIDA = SALIDA + OFFSET;
    return SALIDA;
} // *****

// *** CONFIGURAR PWM *****
void CONFIG_pwm_servos(void){
    TPM3C2SC = 0b00101000; /* CH0F = READ
                           CH0IE = 0 ==> Interrupt disabled
                           MS0B:A = XX ==> Center-aligned pwm
                           ELS0B:A = 10 ==> High-true pulses
                           00 */
    TPM3C3SC = 0b00101000; /* CH0F = READ
                           CH0IE = 0 ==> Interrupt disabled
                           MS0B:A = XX ==> Center-aligned pwm
                           ELS0B:A = 10 ==> High-true pulses
                           00 */
    TPM3C4SC = 0b00101000; /* CH0F = READ
```

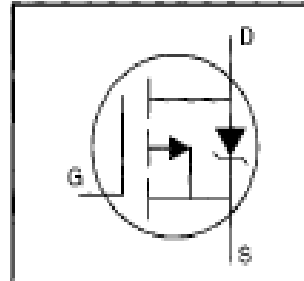
```

        CH0IE = 0    ==> Interrupt disabled
        MS0B:A = XX ==> Center-aligned pwm
        ELS0B:A = 10 ==> High-true pulses
        00          */
TPM3SC = 0b00001001; // TOF = READ
        /* TOIE = 0    ==> Interrupt disabled
        CPWMS = 1    ==> Center-aligned PWM
        CLKSB:A = 01 ==> bus rate clock (4.19MHz)
        PS2:0 = 001 ==> TPM clock / 2      */
TPM3MOD = 41900;    // T = (2/4.19MHz)*41900 = 20ms
} // *****

```

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- P-Channel
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DSS} = -100V$$

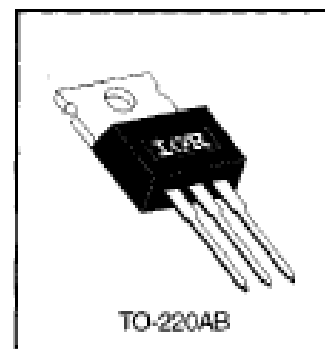
$$R_{DS(on)} = 0.30\Omega$$

$$I_D = -12A$$

**Description**

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



DATA SHEETS


**Absolute Maximum Ratings**

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10 V$	-12	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10 V$	-8.2	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	-48	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	88	W
	Linear Derating Factor	0.59	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ②	400	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current ①	-12	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ①	8.8	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	-5.5	V/ns
$T_J$ $T_{STG}$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1 N-m)	


**Thermal Resistance**

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	1.7	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	62	

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	-100	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=-250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	-0.10	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}$ , $I_D=-1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.30	$\Omega$	$V_{GS}=-10V, I_D=-7.2A$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	-2.0	—	-4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=-250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	3.7	—	—	S	$V_{DS}=-50V, I_D=-7.2A$ ①
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	-100	$\mu A$	$V_{DS}=-100V, V_{GS}=0V$
		—	—	-500		$V_{DS}=-80V, V_{GS}=0V, T_J=150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS}=-20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	100		$V_{GS}=20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	36	nC	$I_D=-12A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	6.8		$V_{GS}=-80V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	21		$V_{GS}=-10V$ See Fig. 6 and 13 ②
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD}=-50V$
$t_r$	Rise Time	—	52	—		$I_D=-12A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	31	—		$R_G=12\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	39	—		$R_D=3.9\Omega$ See Figure 10 ③
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
$L_S$	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	860	—	pF	$V_{DS}=0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	340	—		$V_{GS}=-25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	93	—		$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	-12	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	-48		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	-6.3	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=-12A, V_{GS}=0V$ ②
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	120	240	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=-12A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	0.46	0.92	$\mu C$	$di/dt=100A/\mu s$ ③
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S+L_D$ )				

### Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)

②  $I_{SP} \leq 12A, di/dt \leq 140A/\mu s, V_{GS} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$

③  $V_{DD}=-25V$ , starting  $T_J=25^\circ\text{C}$ ,  $L=4.2\text{mH}$ ,  $R_G=25\Omega, I_{SP}=-12A$  (See Figure 12)

④ Pulse width  $\leq 300\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .



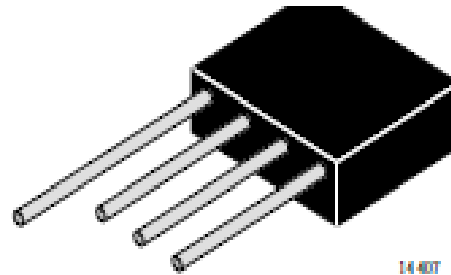
## PBL401–PBL407

Vishay Lite-On Power Semiconductor

### 4.0A Bridge Rectifier

#### Features

- Diffused junction
- High case dielectric strength of 1500V
- Low forward voltage drop, high current capability
- Surge overload rating to 150A peak
- Ideal for printed circuit board applications
- Plastic material – UL Recognition flammability classification 94V-0
- UL listed under recognized component index, file number E95060



14-007

#### Absolute Maximum Ratings

$T_J = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Test Conditions	Type	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage =Working peak reverse voltage =DC Blocking voltage		PBL401	$V_{RRM}$ = $V_{RWM}$ = $V_R$	50	V
		PBL402		100	V
		PBL403		200	V
		PBL404		400	V
		PBL405		600	V
		PBL406		800	V
		PBL407		1000	V
Peak forward surge current			$I_{FSM}$	150	A
Average forward current	$T_C = 75^\circ\text{C}$		$I_{FAV}$	4	A
Junction and storage temperature range			$T_J = T_{stg}$	-85...+150	$^\circ\text{C}$

#### Electrical Characteristics

$T_J = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Test Conditions	Type	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward voltage	$I_F = 3\text{A}$		$V_F$			1.1	V
Reverse current	$T_C = 25^\circ\text{C}$		$I_R$			10	$\mu\text{A}$
	$T_C = 100^\circ\text{C}$		$I_R$			1	mA
I <sup>2</sup> t Rating for fusing			I <sup>2</sup> t			100	A <sup>2</sup> s
Thermal resistance junction to case	on PC board with 13x13x0.03mm		$R_{thJC}$		10		K/W

# HER1601 THRU HER1606

**FMS**

16.0 AMP HIGH EFFICIENCY RECTIFIERS



## FEATURES

- \* Low forward voltage drop
- \* High current capability
- \* High reliability
- \* High surge current capability
- \* High speed switching

## MECHANICAL DATA

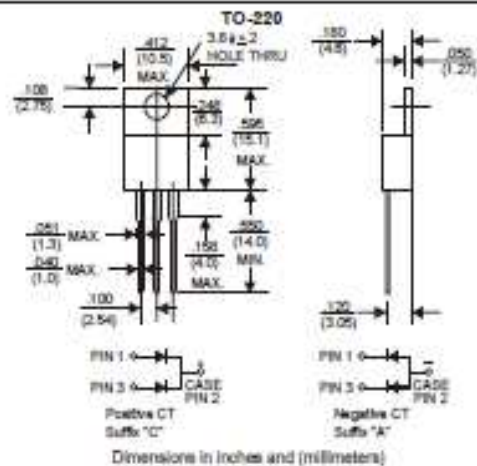
- \* Case: Molded plastic
- \* Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant
- \* Lead: Lead solderable per MIL-STD-202, method 208 guaranteed
- \* Polarity: As Marked
- \* Mounting position: Any
- \* Weight: 2.24 grams

## VOLTAGE RANGE

50 to 600 Volts

## CURRENT

16.0 Ampere



## MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rating 25°C ambient temperature unless otherwise specified.  
Single phase half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
For capacitive load, derate current by 20%.

TYPE NUMBER	HER1601	HER1602	HER1603	HER1604	HER1605	HER1606	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	300	400	600	V
Maximum RMS Voltage	35	70	140	210	280	420	V
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	300	400	600	V
Maximum Average Forward Rectified Current .375" (9.5mm) Lead Length at Tc=75°C	16.0						A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)	200						A
Maximum Instantaneous Forward Voltage at 8.0A	1.0		1.3		1.85		V
Maximum DC Reverse Current Tc=25°C	10.0						µA
at Rated DC Blocking Voltage Tc=100°C	200						µA
Maximum Reverse Recovery Time (Note 1)	60					100	nS
Typical Junction Capacitance (Note 2)	65						pF
Operating and Storage Temperature Range Ta, Tstg	-55 — +150						°C

### NOTES:

1. Reverse Recovery Time test condition: IF=0.5A, IR=1.0A, IRR=0.25A
2. Measured at 1MHz and applied reverse voltage of 4.0V D.C.



# RE3 MINIATURE ALUMINUM ELECTROLYTIC CAPACITORS



## Standard Ratings

Rated voltage (V)	6.3			10			16			25			35			50			63			100			
	Item	Case	ESR	I <sub>ripple</sub> (mA)	Case	ESR	I <sub>ripple</sub> (mA)	Case	ESR	I <sub>ripple</sub> (mA)	Case	ESR	I <sub>ripple</sub> (mA)	Case	ESR	I <sub>ripple</sub> (mA)	Case	ESR	I <sub>ripple</sub> (mA)	Case	ESR	I <sub>ripple</sub> (mA)			
		φD×L (mm)	Ω		φD×L (mm)	Ω		φD×L (mm)	Ω		φD×L (mm)	Ω		φD×L (mm)	Ω		φD×L (mm)	Ω		φD×L (mm)	Ω		φD×L (mm)	Ω	φD×L (mm)
0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5x11	1900	3	—	—	—	5x11	1330	2.1
0.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5x11	905	6	—	—	—	5x11	603	4.7
0.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5x11	603	9	—	—	—	5x11	402	7
0.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5x11	423	13	—	—	—	5x11	282	10
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5x11	199	21	—	—	—	5x11	133	21
2.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5x11	90.5	31	—	—	—	5x11	60.3	30
3.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5x11	60.3	38	—	—	—	5x11	40.2	40
4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5x11	56.5	38	5x11	49.4	40	5x11	42.3	45	5x11	35.3	45	5x11	28.2	45	
10	—	—	—	—	—	—	5x11	33.2	50	5x11	26.5	55	5x11	23.2	59	5x11	19.9	66	5x11	16.6	66	6.3x11	13.3	75	
22	—	—	—	—	—	—	5x11	15.1	75	5x11	12.1	82	5x11	10.6	87	5x11	9.05	98	5x11	7.54	100	6.3x11	6.03	130	
33	—	—	—	—	—	—	5x11	10.1	92	5x11	8.04	100	5x11	7.04	107	5x11	6.03	126	6.3x11	5.03	140	8x11.5	4.02	180	
47	—	—	—	5x11	8.47	99	5x11	7.06	110	5x11	5.65	118	5x11	4.94	130	6.3x11	4.23	155	6.3x11	3.53	170	10x12.5	2.82	230	
100	—	—	—	5x11	3.78	146	5x11	3.32	160	6.3x11	2.65	199	6.3x11	2.32	214	8x11.5	1.99	260	10x12.5	1.66	300	10x20	1.33	370	
220	5x11	2.11	200	6.3x11	1.81	240	6.3x11	1.51	264	8x11.5	1.21	349	10x12.5	1.06	443	10x12.5	0.905	443	10x16	7.54	470	12.5x20	0.603	620	
330	6.3x11	1.41	270	6.3x11	1.21	290	8x11.5	1.01	383	10x12.5	0.804	510	10x12.5	0.704	542	10x16	0.603	595	10x20	0.503	710	12.5x25	0.402	760	
470	6.3x11	0.988	322	8x11.5	0.847	417	8x11.5	0.706	457	10x12.5	0.565	545	10x16	0.494	664	12.5x20	0.423	687	12.5x20	0.353	900	16x25	0.282	1000	
1000	8x11.5	0.464	546	10x12.5	0.398	650	10x16	0.332	791	10x20	0.265	996	12.5x20	0.232	1210	12.5x25	0.199	1400	16x25	0.166	1300	18x40	0.133	1380	
2200	10x20	0.226	1010	10x20	0.196	1080	12.5x20	0.166	1350	12.5x25	0.136	1660	16x25	0.121	1950	16x35.5	0.106	2340	—	—	—	—	—	—	
3300	10x20	0.161	1230	12.5x20	0.141	1430	12.5x25	0.121	1690	16x25	0.101	2030	16x35.5	0.09	2510	18x35.5	0.08	2810	—	—	—	—	—	—	
4700	12.5x20	0.12	1710	12.5x25	0.106	1780	16x25	0.092	2100	16x31.5	0.078	2650	18x35.5	0.071	2990	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6800	12.5x25	0.093	1930	16x25	0.083	2200	16x35.5	0.073	2590	18x35.5	0.063	3290	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10000	16x25	0.076	2450	16x35.5	0.07	2700	18x35.5	0.063	3130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
15000	16x35.5	0.062	2880	18x35.5	0.058	3100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
22000	18x40	0.053	3340	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Miniature Aluminum Electrolytic Capacitors