

SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID PARA UN ROBOT
MANIPULADOR PUMA MA2000

IRIS ROCÍO ORTIZ CÁCERES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2012

SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID PARA UN ROBOT
MANIPULADOR PUMA MA2000

IRIS ROCÍO ORTIZ CÁCERES



Trabajo de Grado para optar por el título de
Ingeniera Electrónica

Director

DR. RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA

Codirector

MsC(c). JOSE JORGE CARREÑO ZAGARRA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado la sabiduría y la fortaleza para alcanzar este triunfo.

A mis padres y hermanas por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mi director de proyector y a todos los profesores que estuvieron acompañándome en mi desarrollo profesional.

A mi Codirector por su colaboración intelectual y confianza.

Al ingeniero Raúl Hernando Cadena por su dedicación y apoyo.

Y a todos mis amigos...

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. CONCEPTOS GENERALES	15
1.1 EL ROBOT TIPO PUMA	15
1.2 LA DINÁMICA DEL MANIPULADOR	17
1.3 TARJETA DE POTENCIA DEL ROBOT PUMA MA2000	19
1.4 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID	20
1.4.1 Método de Ziegler - Nichols para sintonización de controladores PID	21
2. SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID EN EL PUMA MA2000	22
3. IMPLEMENTACIÓN EN LA TARJETA DE POTENCIA	25
4. PRUEBAS Y RESULTADOS	31
5. CONCLUSIONES	39
6. RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	44

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Robot PUMA perteneciente a la Universidad Industrial de Santander....	15
Figura 2. Grados de libertad y rangos de movimiento para el PUMA MA2000	16
Figura 3. Esquema de la tarjeta de Potencia	20
Figura 4. Montaje experimental para sintonización de PID.....	21
Figura 5. Oscilaciones sostenidas en el codo	24
Figura 6. Oscilaciones sostenidas en el Hombro	24
Figura 7. Oscilaciones sostenidas para la cintura.....	25
Figura 8. Diagrama de Flujo del microcontrolador	28
Figura 9. Control posición articulación del robot	30
Figura 10. Velocidades vs Frecuencia para el codo	32
Figura 11. Velocidad vs Frecuencia para el hombro.....	32
Figura 12. Velocidades vs Frecuencia para la cintura	33
Figura 13. Variación set point para cada articulación del PUMA MA2000	33
Figura 14. Control PID para la posición vertical del brazo y oscilando la cintura...	34
Figura 15. Control PID posición horizontal del brazo y oscilando la cintura.....	35
Figura 16. Control PID posición brazo flexionado y oscilando la cintura.....	35

Figura 17. Control PID brazo en posición vertical oscilando el codo	36
Figura 18. Control PID posición vertical el codo oscilando para una secuencia	36
Figura 19. Control PID posición inclinada oscilando el codo para una secuencia .	37
Figura 20. Control PID posición vertical oscilando el hombro para una secuencia.	37
Figura 21. Control PID posición brazo flexionado el codo oscilando para una secuencia.....	38

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Ajuste de controladores usando K_c y T_c	22
Tabla 2. Sintonización de controladores para codo, hombro y cintura usando K_c y T_c	25
Tabla 3. Coeficientes b para codo hombro y cintura.....	27
Tabla 4. Velocidades de los motores codo, hombro y cintura.....	31
Tabla 5. Resultados control PID	38

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. PID discreto lenguaje C.....	44
Anexo B. Programa sintonización.....	45

RESUMEN

TÍTULO: SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID PARA UN ROBOT MANIPULADOR PUMA MA2000

AUTORA: IRIS ROCÍO ORTIZ CÁCERES**

PALABRAS CLAVES: Sintonización, Controlador, Robot Manipulador, Control PID

DESCRIPCIÓN

El presente trabajo de grado tiene como objetivo controlar el comportamiento dinámico de los movimientos de un robot PUMA MA2000 TQ de seis grados de libertad, presente en el laboratorio de electrónica de la Universidad Industrial de Santander, a partir de la sintonización empírica e implementación de controladores PID. Este trabajo de grado sirve como referente y apoyo a la tesis de maestría *“Control robusto de la dinámica de un robot manipulador, considerando incertidumbre paramétrica”* que actualmente se realiza en la universidad.

Inicialmente se hizo una revisión teórica del robot manipulador, de su modelo dinámico, la tarjeta de potencia para controlarlo y el método de sintonización experimental escogido. Luego se realizó el proceso de sintonización de las tres principales articulaciones (cintura, hombro y codo) considerándolas desacopladas dinámicamente; mediante reglas de sintonización empíricas usando curvas de reacción en lazo cerrado con el método de Ziegler-Nichols.

Posteriormente se programó los controladores PID para tres grados de libertad cintura hombro y codo, usando la tarjeta de potencia del robot manipulador construida previamente cuyo núcleo de procesamiento fue el microcontrolador MC9S08QE16 de freescale.

Finalmente como resultado de las pruebas realizadas se validó experimentalmente el buen desempeño dinámico de los controladores obtenidos para diferentes trayectorias del robot.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas. Ingeniería Electrónica e Ingeniería Eléctrica.
Director Dr. Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector Ing. Jose J. Carreño Zagarra.

SUMMARY

TITLE: PID CONTROLLER TUNNING FOR PUMA MA2000 ROBOT MANIPULATOR

AUTHOR: IRIS ROCÍO ORTIZ CÁCERES*

KEY WORDS: Tuning, Controller, Robot Manipulator, PID Control**

DESCRIPTION

The main objective of this degree project is to control dynamics of 6-DOF PUMA robot TQ MA2000, what belongs to the electronics lab of the Universidad Industrial de Santander, by using empirical tuning of implemented PID controllers. This work is a support for master thesis : “*Control robusto de la dinámica de un robot manipulador, considerando incertidumbre paramétrica*”, what is under development in the UIS.

Initially a literature review about manipulator robot was achieved, by including dynamics model, power unit and experimental tuning methods. Then tuning process of the three main joints (waist, shoulder and elbow) was achieved by considering each one dynamically decoupled, through Ziegler-Nichols empirical method by reaction curves in closed loop.

Then, PID controllers were programmed for three degrees of freedom: waist shoulder and elbow, by using a power unit previously built for robot manipulator, whose core processing is a MC9S08QE16 Freescale microcontroller.

Finally, dynamic performance of robot was demonstrated by means of experimental tests, where different paths were programmed.

* Graduation Project

** Faculty of Engineering Physical-Mechanics. Engineering Electronic.
Director Dr Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector Ing. Jose J. Carreño Zagarra

INTRODUCCIÓN

La Robótica¹ es una rama de la tecnología que se dedica al estudio, diseño, construcción, operación y mantenimiento de robots. Su formación se considera interdisciplinaria, puesto que combina diversas áreas como: la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y el control; de tal manera que ante cualquier dificultad se aborde el problema desde un punto de vista integral.

Tradicionalmente, los robots se han utilizado en ambientes industriales cuyo objetivo principal ha sido el de sustituir al ser humano en tareas repetitivas, difíciles, desagradables e incluso peligrosas de una forma más segura, rápida y precisa. Además, existen aplicaciones monopolizadas por los robots manipuladores tales como el trabajo en zonas radioactivas, tóxicas o explosivas, así como también en zonas submarinas y espaciales.

Por otra parte, debido a su fácil implementación y buenas prestaciones, los controladores PID² [1] presentan un desempeño eficiente en diversas aplicaciones industriales, particularmente cuando las dinámicas del proceso son apacibles y los requisitos de comportamiento son modestos. Por dicha razón es común encontrar robots manipuladores que operen con este tipo de controladores, por lo cual se necesita un apropiado ajuste de los parámetros del controlador con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del robot³. Esta elección de parámetros es lo que se conoce como sintonización del controlador.

La sintonía o ajuste es una metodología que involucra una gran cantidad de técnicas para obtener de forma empírica las ganancias del controlador de

¹ La palabra robótica fue utilizada por primera vez por el científico y escritor de ciencia ficción Isaac Asimov en 1942.

² Proporcional-Integral-Derivativo.

³ Término usado por primera vez por el dramaturgo checo Karel Capek, (1890-1938) en la obra (Rossum's Universal Robots) R.U.R se estrenó en 1921.

manera que la respuesta del sistema en lazo cerrado tenga unas características determinadas.

La escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con un robot manipulador PUMA⁴ MA 2000⁵ de seis grados de libertad, que se ha acondicionado dentro de un proyecto de financiación interna como plataforma de investigación de algoritmos de control robusto de su dinámica. Por estas razones, como primer paso, a ser abordado mediante este proyecto, al momento de investigar e implementar estrategias de control avanzado, se requiere tener sintonizados los controladores PID de referencia, tal que se pueda concluir respecto al nivel de desempeño del algoritmo de control en estudio.

El presente documento está organizado de la siguiente manera: en el primer capítulo se plasman los conceptos fundamentales del robot tipo PUMA, la tarjeta de potencia para controlar el robot y la sintonización de controladores PID. En el capítulo 2, se presentan los resultados obtenidos en el momento de aplicar las técnicas necesarias para la sintonización de controladores PID en el robot PUMA MA2000. En el tercer capítulo se detalla la implementación de controladores PID en la tarjeta de potencia. En el cuarto capítulo se evidencian las pruebas y resultados llevados a cabo durante el proceso de sintonización e implementación de controladores en el robot. En el quinto y sexto capítulo respectivamente se dan conclusiones específicas y recomendaciones sobre el uso de este método de acuerdo a los resultados obtenidos en los experimentos.

⁴Universal Manipulation Arm: Brazo Manipulador Programable Universal.

⁵Equipo desarrollado por TecQuipment, DC Servo Controlled 6 Axis Robot (Código de producto: MA2000).

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1 EL ROBOT TIPO PUMA

El robot PUMA fue desarrollado por la empresa Unimation para General Motors en el año 1978 para aplicaciones industriales; cuenta con seis articulaciones rotatorias, que le permiten posicionar y orientar su herramienta final.



Figura 1. Robot PUMA perteneciente a la Universidad Industrial de Santander

Fuente: Autor

En la Figura 1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se aprecia el brazo robótico MA2000 de la empresa Tecquipment, cuya longitud con el brazo completamente extendido es de 500mm, y el peso máximo que puede desplazar es de 1kg. El rango para los ángulos correspondientes a los ejes del brazo (codo, hombro y cintura) es de 0° a 270°; por su parte los de la muñeca son 0° a 180° para pitch, yaw, y roll, como se aprecia en la Figura 2 [2].

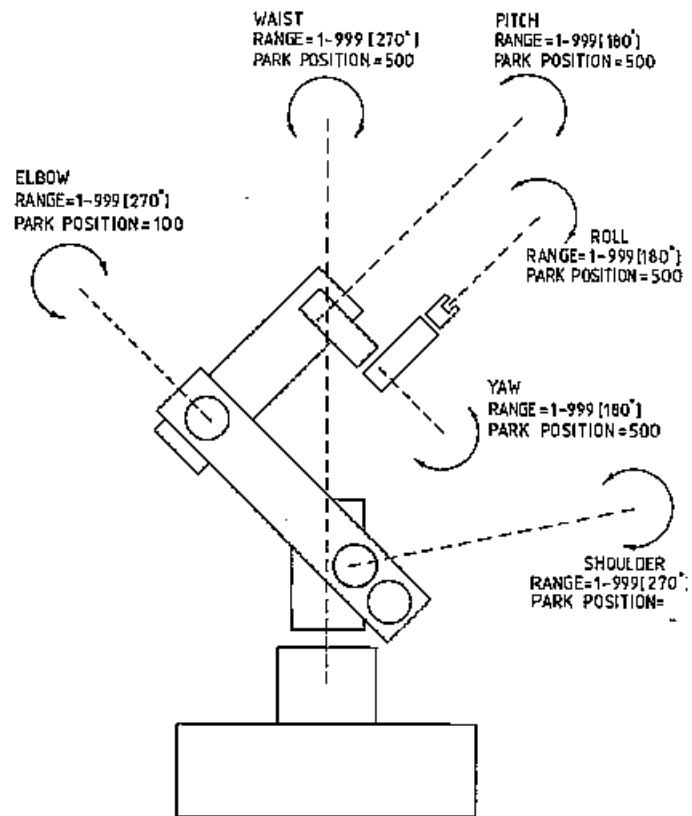


Figura 2. Grados de libertad y rangos de movimiento para el PUMA MA2000

Fuente: Tecquipment Ltd [2]

Este manipulador cuenta con elementos mecánicos, actuadores, sensores y el sistema de control. El sistema mecánico está constituido por el brazo articulado, el y el elemento terminal, al cual se le conoce también como: aprehensor, garra, pinza o gripper. El brazo está constituido por tres articulaciones: la cintura, el hombro y el codo; siendo la primera la única articulación que no se ve afectada por la gravedad, entre tanto el hombro es un elemento que se ve afectado por el momento de inercia, la gravedad de la propia articulación y el codo; esta última se ve afectada por los momentos de inercia y por la gravedad [3].

Los actuadores son los elementos encargados de proporcionar el movimiento al robot. Los sensores están encargados de registrar datos tomados del entorno,

entregando información de la cinemática del sistema mecánico, la dinámica y del estado del espacio de trabajo. El sistema de control se encarga de hacer que el robot realice las tareas para las cuales fue diseñado, activando los actuadores y tomando en cuenta las señales recibidas del entorno por medio de los sensores.

Cada articulación provee al robot de al menos un grado de libertad o DOF⁶. Algunas de las aplicaciones industriales del robot son: carga y descarga de máquinas, paletizado y transporte, embalado, mecanizado (Taladrado, pulido, desbarbado...), pintura, soldadura (por puntos, continua), sellado, encolado y ensamble entre otras [4].

1.2 LA DINÁMICA DEL MANIPULADOR

La dinámica se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina como resultado de las mismas. Por lo tanto, el modelo dinámico de un robot es un conjunto de expresiones matemáticas que tiene por objeto conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo.

Según la teoría de LaGrange [5], la dinámica del robot manipulador de n grados de libertad está representada por la ecuación:

$$\tau = M(q) \cdot \ddot{q} + V(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_p \quad (1)$$

M : Matriz de inercia, de dimensiones $n \times n$

V : Vector de términos centrípetos y de Coriolis de dimensión $n \times 1$

F : Vector de $n \times 1$ que modela las fricciones de las articulaciones

⁶ Degree of Freedom

G : Vector $n \times 1$ de términos gravitatorios.

τ : Vector de fuerzas generalizadas de las articulaciones.

La dinámica no modelada, por su parte, va incluida en el par de perturbación τ_p [6], el cual incluye también cualquier acción externa. En lo que al actuador se refiere [7], se trata de un motor de corriente continua con inductancia despreciable, lo que dará lugar a n ecuaciones desacopladas [8], una para cada articulación.

$$u - k_b \cdot \dot{q}_m = R_a \cdot i \quad (2)$$

$$\tau_m = J_m \cdot \ddot{q}_m + B \cdot \dot{q}_m + R \cdot \tau \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que $\tau_m = K_v \cdot i$ [9] y agrupando términos se pueden poner las ecuaciones anteriores en una forma similar a la del manipulador:

$$J_m \cdot \ddot{q}_m + \left(B + \frac{K_v \cdot K_b}{R_a} \right) \cdot \dot{q} + R \cdot \tau \frac{K_v}{R_a} \cdot u = K_m \cdot u \quad (4)$$

donde en este caso, las variables articulares que aparecen representan posiciones, velocidades y aceleraciones de giro del eje del motor correspondiente [7], mientras que R es un término multiplicativo de reducción debido al acoplamiento entre el actuador y el manipulador. Debido a estas mismas reductoras, se tiene que $q_i = R \cdot q_{mi}$ donde como ya se ha mencionado anteriormente q_i representan las variables articulares del manipulador y q_{mi} las del motor. Así, introduciendo la ecuación de la dinámica del manipulador en la ecuación del motor, se tiene:

$$J_m \cdot \ddot{q} + B_m \cdot \dot{q} + R^2 \cdot \tau = K_m \cdot R \cdot u \quad (5)$$

$$(J_m + R^2 \cdot M(q)) \cdot \ddot{q} + (B_m + R^2 \cdot V(q, \dot{q})) \cdot \dot{q} + R^2 \cdot F(\dot{q}) + R^2 \cdot G(q) + R^2 \cdot \tau = K_m \cdot R \cdot u \quad (6)$$

Dado que la dinámica de los brazos manipuladores es no lineal, inestable en lazo abierto, dinámicamente acoplada y algunas veces con incertidumbre paramétrica, se hace complejo obtener este modelo, por consiguiente no se cuenta para éste robot manipulador con ecuaciones matemáticas que describan su dinámica.

1.3 TARJETA DE POTENCIA DEL ROBOT PUMA MA2000

El MA2000 consta de seis grados de libertad otorgados por los movimientos de guiñada, alabeo y cabeceo del actuador, y las rotaciones en codo, hombro y cintura. Debe aclararse que solo se controlaron las tres principales articulaciones correspondientes al codo, hombro y cintura, sin peso en el efector final.

Para este fin se utilizó la tarjeta de potencia, suministrada por el grupo de Electrónica y Robótica Aplicada ERA; la cual esta encargada de mover y controlar las articulaciones del robot, además de brindar un medio de comunicación entre los potenciómetros que proveen las posiciones angulares de cada una de las articulaciones y el microcontrolador MC9S08QE16 de la tarjeta. Esta tarjeta es compatible con los demás elementos del sistema robot, como lo son: la fuente de alimentación, los sensores y los actuadores del brazo.

La posición específica de cada una de las articulaciones es sensada por un potenciómetro lineal que varía un divisor de tensión; este voltaje resultante es digitalizado y posteriormente interpretado por el microcontrolador a través del ADC⁷.

La tarjeta de potencia consta de dispositivos como: conectores a fuentes externas, interfaces de comunicación, interruptores, relés, borneras y puentes H como se

⁷ Analog to Digital Converter.

aprecia en la Figura 3. Estos últimos están encargados de soportar la corriente máxima de arranque y de controlar la dirección de giro de los motores.

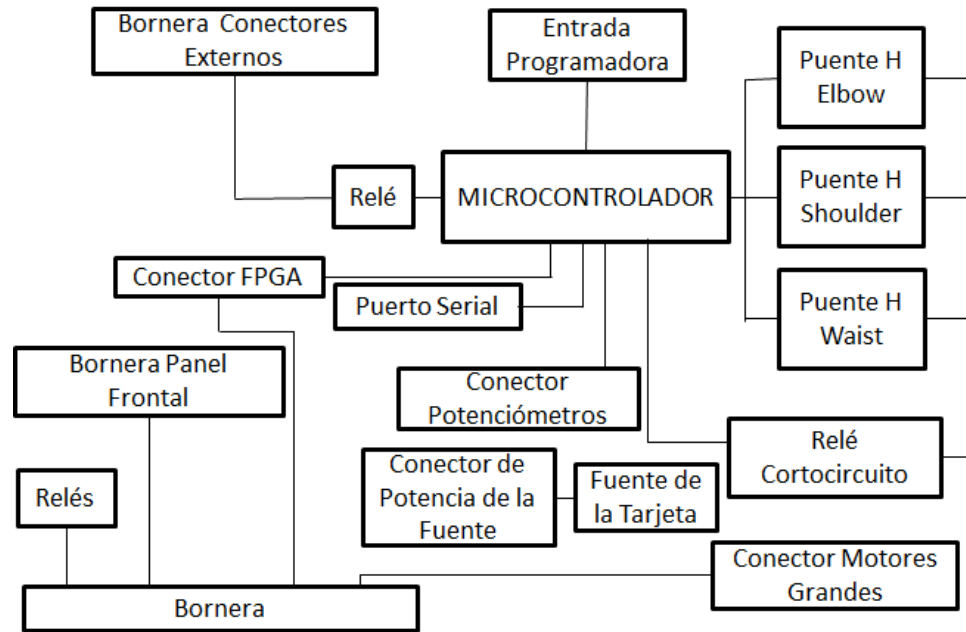


Figura 3. Esquema de la tarjeta de Potencia

Fuente: Autor.

1.4 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID

La sintonización de controladores PID es el procedimiento mediante el cual se determinan los parámetros K_P , T_I y T_D de los mismos, a fin de conseguir un desempeño deseado en el sistema de control.

Tal sintonía se puede hacer de diversas maneras, dependiendo de la información que se tenga disponible del modelo del proceso; si se dispone de un modelo matemático, se puede calcular algebraicamente las constantes del PID, sin embargo, cuando el modelo matemático que describe el proceso no se conoce o es difícil obtenerlo se debe recurrir a procedimientos experimentales, por lo tanto,

una alternativa es usar una sintonización empírica de las constantes K_P , K_I y K_D [10].

1.4.1 Método de Ziegler - Nichols para sintonización de controladores PID

En 1942 Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar de forma empírica o experimental los valores de la ganancia proporcional K_P , del tiempo integral T_I y del tiempo derivativo T_D , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada [11].

Existen dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler- Nichols: el primer método utiliza la curva de reacción de la planta en lazo abierto a una entrada escalón unitario y es aplicado cuando la planta no contiene integrados ni polos dominantes complejos, por lo cual no puede ser usado en este caso.

El segundo método se aplica cuando el lazo de control se cierra y consiste en encontrar la ganancia de un controlador de tipo proporcional con el propósito de que el lazo oscile indefinidamente a una amplitud constante. Esta máxima ganancia se le denomina ganancia crítica (K_C), donde el periodo de estas oscilaciones es llamado periodo crítico (T_C) [12]. Dicho método consiste en hacer un montaje experimental, como el mostrado en la Figura 4.

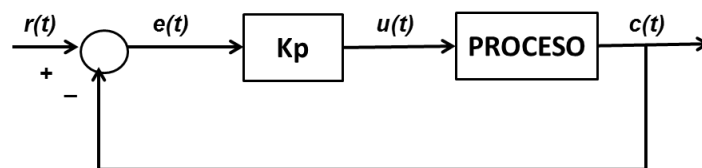


Figura 4. Montaje experimental para sintonización de PID

Fuente: [10]

Como sugiere [10] se deben seguir los siguientes pasos:

1. "Cierre el lazo de control con el regulador solo en el modo proporcional (haga $K_I = K_D = 0$).
2. Con la ganancia proporcional en un valor arbitrario, provoque diferentes cambios en el punto de consigna $r(t)$ y observe la respuesta del sistema $c(t)$.
3. Aumenta o disminuya la ganancia proporcional hasta conseguir que el sistema oscile con una amplitud constante. Registre el valor de la ganancia proporcional ($K_P = K_C$, ganancia crítica) en tal condición de oscilación constante y mida el valor del periodo de oscilación (T_C , periodo crítico). A partir de T_C , y K_C se calculan las constantes del PID usando la Tabla 1".

Tipo de controlador			
Parámetros	P	PI	PID
K_P	0.5 k_C	0.45 k_C	0.6 K_C
T_I	-	$\frac{T_C}{1.2}$	$\frac{T_C}{2}$
T_D	-	-	$\frac{T_C}{8}$

Tabla 1. Ajuste de controladores usando K_C y T_C

Fuente: [10]

2. SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID EN EL PUMA MA2000

Los estudios sobre métodos de sintonización de controladores PID se centran en los sistemas lineales, visto de esta forma se pueden agrupar según su naturaleza y uso como en [13]:

- *“Los métodos de análisis: los parámetros de PID se calculan a partir de las relaciones analíticas o algebraicas entre un modelo de planta y un objetivo.*
- *Los métodos heurísticos: Estos están evolucionando a partir de la experiencia práctica en la sintonización manual, y de técnicas de inteligencia artificial.*
- *Los métodos de respuesta de frecuencia: las características de frecuencia del proceso controlado se utilizan para ajustar el controlador PID.*
- *Los métodos de optimización: Estos pueden ser considerados como un tipo especial de control óptimo, donde se obtienen los parámetros PID ad hoc, con una optimización numérica en línea.*
- *Los métodos de ajuste adaptativo: son para sintonización automatizada en línea, utilizando uno o una combinación de los métodos anteriores basados en identificación en tiempo real”.*

Dentro de los métodos más utilizados para el ajuste de ganancias PID en robots manipuladores están las técnicas inteligentes, por ejemplo, la lógica difusa [14], redes neuronales [15] y el método de genética [16], pero los controladores finales ya no son PID lineal, se convierten en sistemas completos de control inteligentes. Adicionalmente, no se cuenta con el modelo matemático del robot PUMA por lo que se hizo necesario usar un método heurístico, entonces se escogió por simplicidad y practicidad el método de sintonización en lazo cerrado de Ziegler y Nichols; donde se halla el K_C y el T_C en cada una de las articulaciones, en que el sistema presenta oscilaciones sostenidas.

Por otra parte el control de posición del sistema robótico es del tipo monoarticular, es decir, para cada articulación se determina la ganancia y el periodo crítico. De esta manera se procede a desplazar el brazo hasta una posición establecida, donde el movimiento se realiza secuencialmente articulación por articulación; seguidamente, se aumenta paulatinamente la constante de proporcionalidad

K_p hasta que la articulación deseada oscile, como se aprecia en las Figura 5, 6 y 7 para el codo, hombro y cintura respectivamente.

Finalmente, con los valores de K_c y T_c obtenidos de las gráficas se calculan las ganancias de los controladores P, PI y PID como se observa en la Tabla 2, para cada articulación.

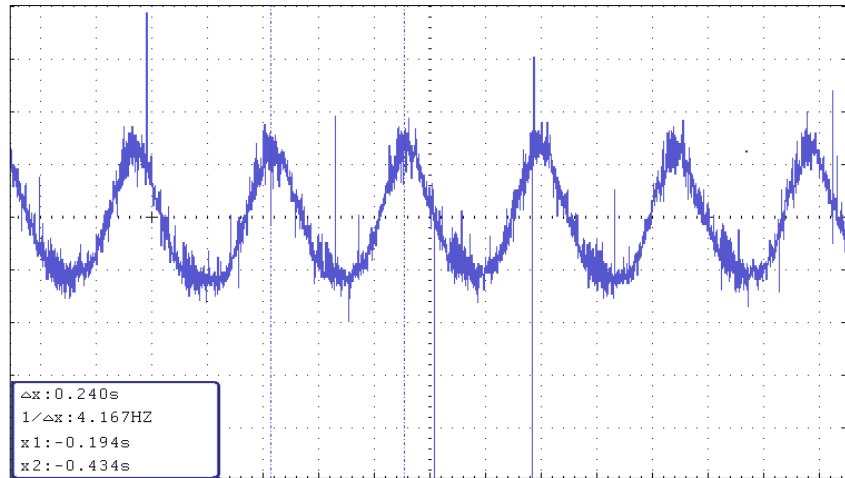


Figura 5. Oscilaciones sostenidas en el codo

Fuente: Autor

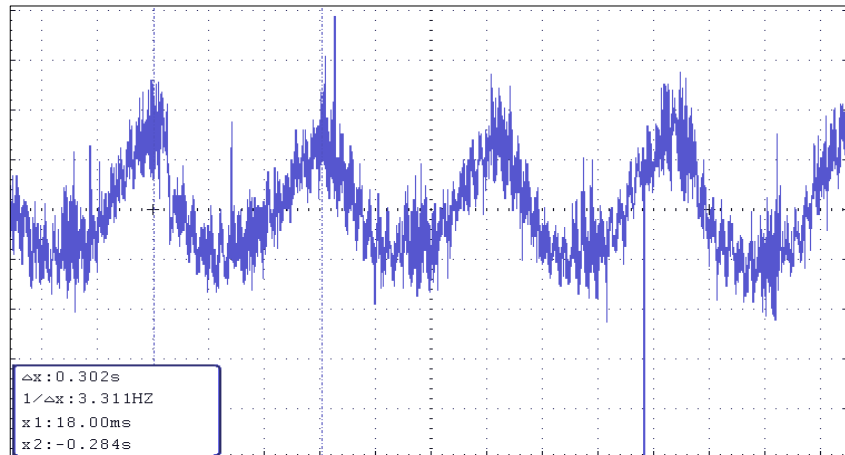


Figura 6. Oscilaciones sostenidas en el Hombro

Fuente: Autor

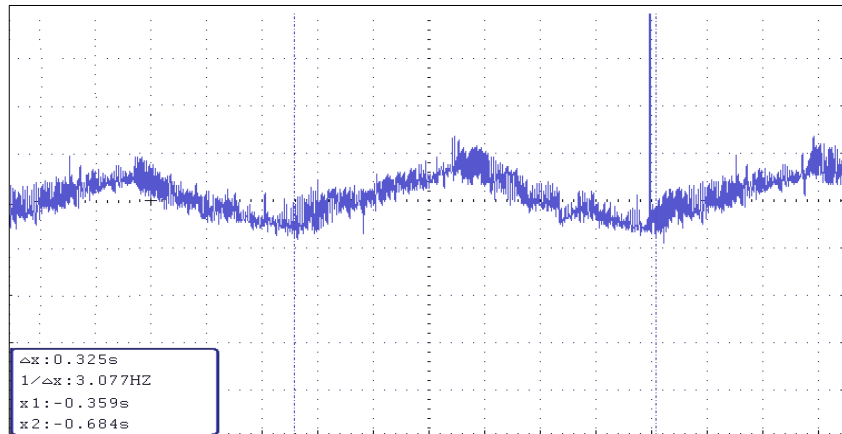


Figura 7. Oscilaciones sostenidas para la cintura

Fuente: Autor

Tipo de controlador									
Parámetros	Codo: Kc= 120 Tc=0.24s			Hombro: Kc= 145 Tc=0.302s			Cintura: Kc=60 Tc=0.325s		
	P	PI	PID	P	PI	PID	P	PI	PID
K_p	60	54	72	72.5	65.25	87	30	27	36
T_I	-	0.2	0.12	-	0.251666	0.151	-	0.2708333	0.1625
T_D	-	-	0.03	-	-	0.03775	-	-	0.040625

Tabla 2. Sintonización de controladores para codo, hombro y cintura usando Kc y Tc

Fuente: Autor

3. IMPLEMENTACIÓN EN LA TARJETA DE POTENCIA

La implementación del control PID para cada articulación se llevó a cabo en el microcontrolador MC9S08QE16 [17] de la tarjeta de potencia. Por lo tanto, se hizo necesario afrontar un diseño de regulador digital donde existen dos enfoques

como en [18]: “el primero diseña directamente en el plano z donde se trabaja con sistemas discretos; el segundo diseña en el plano s y las especificaciones son transferidas al plano z ”. Como las constantes del controlador ya las habíamos obtenido del proceso de sintonización, entonces se escoge este último enfoque. Visto de esta forma podemos obtener un PID discreto a partir de la versión continua, que es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left(1 + \frac{1}{T_I s} + s T_D \right) \quad (7)$$

Realizando la sustitución de las s por $\frac{1-z^{-1}}{T}$ y operando, finalmente obtenemos la función de transferencia del PID discreto obtenido por la aproximación de la derivada:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K \left[1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} - \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) z^{-1} + \frac{T_D}{T} z^{-2} \right]}{1 - z^{-1}} \quad (8)$$

que pasada a ecuación en diferencias es:

$$u_k = b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + b_2 e_{k-2} + u_{k-1} \quad (9)$$

Donde los coeficientes b valen:

$$b_0 = K_P \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) \quad (10)$$

$$b_1 = -K_P \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) \quad (11)$$

$$b_2 = K_P \frac{T_D}{T} \quad (12)$$

Para obtener los coeficientes b , se remplaza en las ecuaciones 10, 11 y 12 los valores K_P , T_I y T_D obtenidos en la sintonización para un tiempo de muestreo T de 16,1ms, como se resume en la Tabla 3.

Coeficientes	codo	hombro	cintura
b0	216	300	130
b1	-340	-495	-218
b2	134	204	91

Tabla 3. Coeficientes b para codo hombro y cintura

Fuente. Autor

La implementación de un regulador discreto como el PID anterior, consiste en repetir cada T segundos un algoritmo [18], el cual se expresa en lenguaje C en el anexo A y se enuncia a continuación:

1. *“El conversor A/D toma el valor de la salida del sistema a regular en el periodo actual k , es decir, el valor de y_k .”*
2. *Se calcula el error para el periodo actual k , es decir e_k , como diferencia de la referencia r_k y la salida del sistema y_k : $e_k = r_k - y_k$.*
3. *Se calcula la acción de control para el periodo actual k , es decir U_k , como resultado de la ecuación $U_k = b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + b_2 e_{k-2} + U_{k-1}$, donde se observa que se usa el error que hubo en los dos periodos de muestreo anteriores al actual, e_{k-1} y e_{k-2} , y la acción de control del periodo de muestreo anterior, U_{k-1} , todos los cuales debemos haber almacenado previamente.*
4. *El conversor D/A da como salida de tensión el valor dado por la acción de control u_k .*
5. *Se incrementa k ”.*

El diagrama de flujo general del robot manipulador que se muestra en la Figura 8 permite observar la composición del cuerpo del programa y está constituido por los siguientes bloques funcionales:

Configuración: Este primer bloque es el encargado de la configuración del sistema, en él se definen las variables a utilizar y se establecen sus valores iniciales;

también se configuran los puertos del microcontrolador ya sean como entradas o como salidas.

Secuencia de inicialización del brazo: En este bloque se leen las posiciones de los potenciómetros y se fija como valor de referencia para tratar de estabilizar el brazo, dicho de otra forma, trata de controlar esta posición leída a través de los potenciómetros al cerrar el lazo de control.

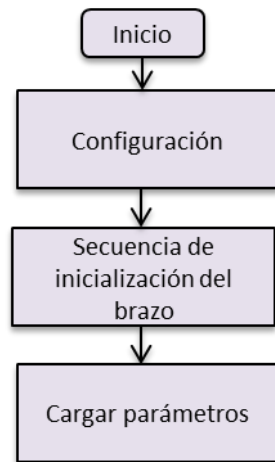


Figura 8. Diagrama de Flujo del microcontrolador

Fuente: Autor.

Cargar parámetros: En este bloque se asignan los valores correspondientes a cada uno de los parámetros que llevan el robot a una posición deseada; este movimiento se realiza secuencialmente articulación por articulación.

El proceso de posicionamiento de las articulaciones del robot a un valor deseado es como se ilustra en el correspondiente diagrama de flujo de la Figura 9 donde, a partir de una señal externa se activa una línea de interrupción en el sistema, entonces el microcontrolador deja de lado la tarea que está ejecutando, atiende dicha interrupción, y luego continúa con lo que estaba haciendo. Esta interrupción

en el sistema se realiza cada cierto periodo de tiempo en el microcontrolador y se repite nuevamente.

Justamente en la Figura 9, se visualizan las etapas correspondientes al control de posición para una articulación y se describen brevemente a continuación.

Para posicionar una articulación, se comienza asignando valores a las constantes que inicializan la rutina; luego se obtienen los valores sensados por los potenciómetros, los cuales traducen el valor del ángulo en un voltaje; y dependiendo de los valores suministrados por los potenciómetros se calculan las constantes del controlador PID las cuales limitan la posición para la articulación deseada. Posteriormente se aplica el filtro antiwindup en la salida del bloque integral del controlador PID para evitar la saturación del actuador y el filtro washout se aplica en salida del bloque derivador para atenuar las bajas frecuencias como el ruido. Después se actualizan los datos teniendo en cuenta saturar las variables y constantes para que no se desborden o presenten conflictos en el programa, entonces ya se está listo para enviar el PWM⁸ que se encarga de controlar la velocidad de giro de cada motor.

⁸ Modulación por ancho de pulsos

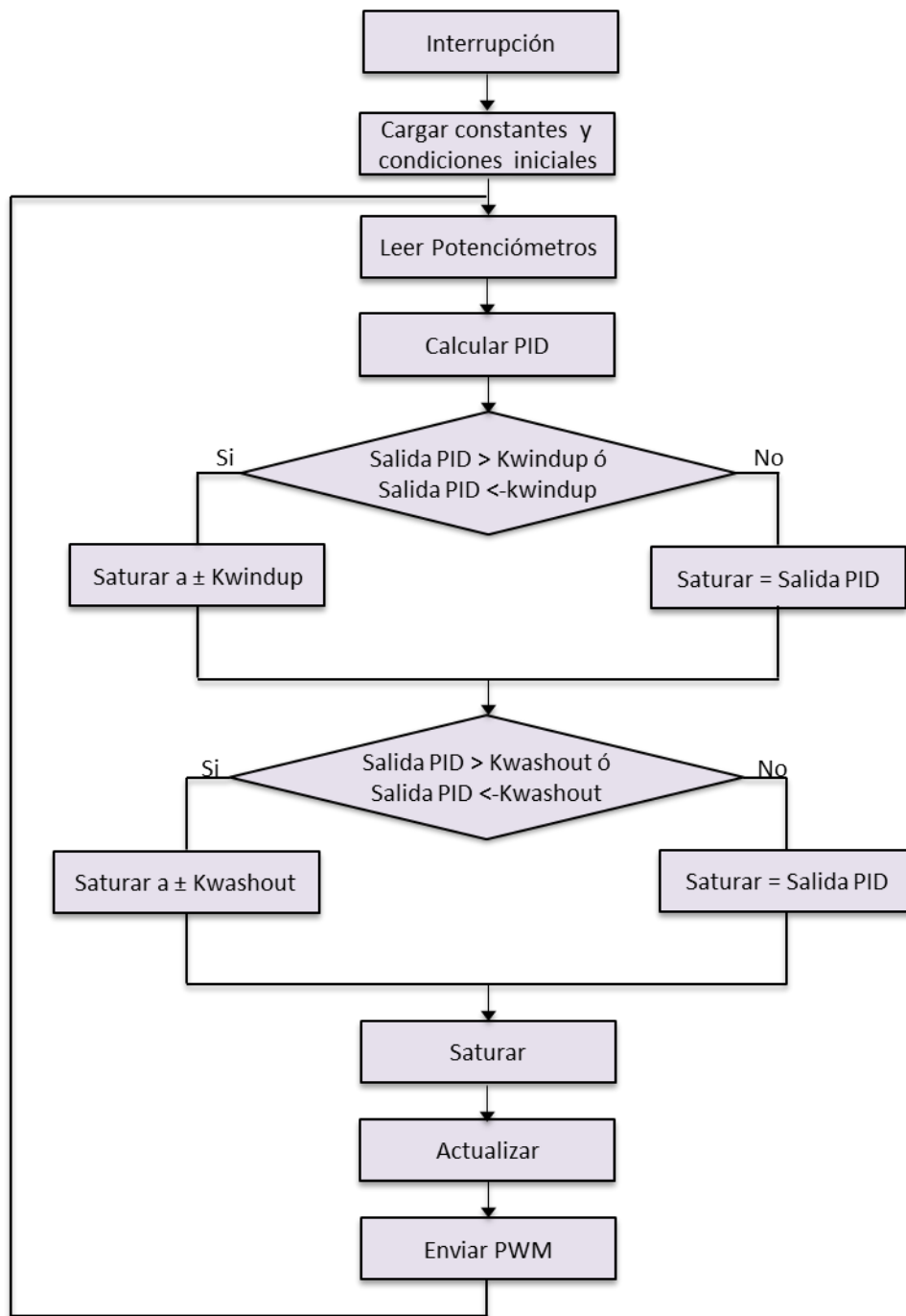


Figura 9. Control posición articulación del robot

Fuente: Autor.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para comenzar el proceso de sintonización se realizaron varias pruebas, esto con el fin de caracterizar los motores correspondientes a las 3 principales articulaciones del robot PUMA, debido a que en literatura no hay información sobre este robot. Entonces se dispuso encontrar la frecuencia de trabajo de los motores, para ello se varió la frecuencia para cada motor con un ciclo de trabajo fijo de 50%; donde cada gráfica representa la posición de cada una de las articulaciones, con diferentes frecuencias.

codo		hombro		cintura	
Frecuencia [Hz]	Velocidad [volts/s]	Frecuencia [Hz]	Velocidad [volts/s]	Frecuencia [Hz]	Velocidad [volts/s]
60	0,000930	155	0,000700	100	0,00181
100	0,001110	250	0,000600	150	0,00186
150	0,001090	350	0,000650	200	0,00160
200	0,000857	450	0,000580	250	0,00166
250	0,000880	550	0,000631	300	0,00160
300	0,000727	650	0,000578	350	0,00166
350	0,000100	750	0,000600	400	0,00181
400	0,000863	850	0,000550	450	0,00186
450	0,001000	950	0,000550	500	0,00133
500	0,000916	1500	0,000450	550	0,00166
550	0,000830	-	-	650	0,00171
600	0,000757	-	-	700	0,00171
650	0,000684	-	-	750	0,00166
700	0,000705	-	-	800	0,00200
750	0,000588	-	-	850	0,00181
800	0,000660	-	-	900	0,00160

Tabla 4. Velocidades de los motores codo, hombro y cintura

Fuente: Autor

Sin embargo, el objetivo es encontrar la frecuencia correspondiente a la mayor velocidad en cada motor; entonces se halló la pendiente a cada una de las

gráficas de posición, los datos obtenidos son los expuestos en la Tabla 4, junto con sus respectivas gráficas en las Figuras 10,11 y 12.

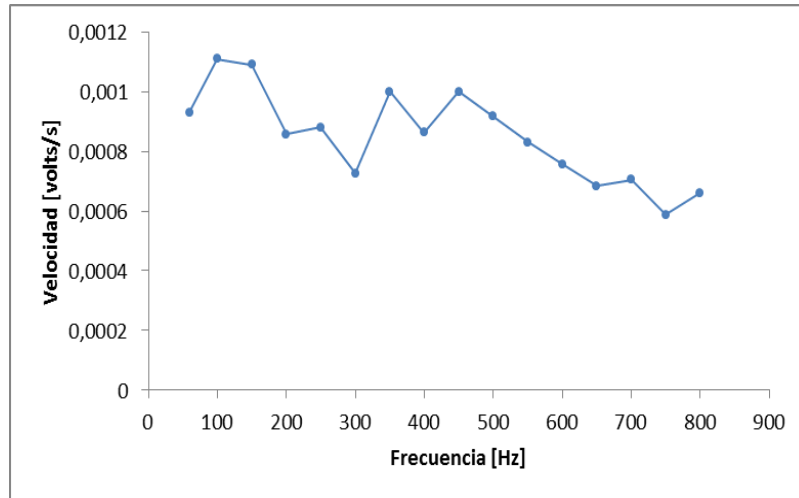


Figura 10. Velocidades vs Frecuencia para el codo
Fuente: Autor

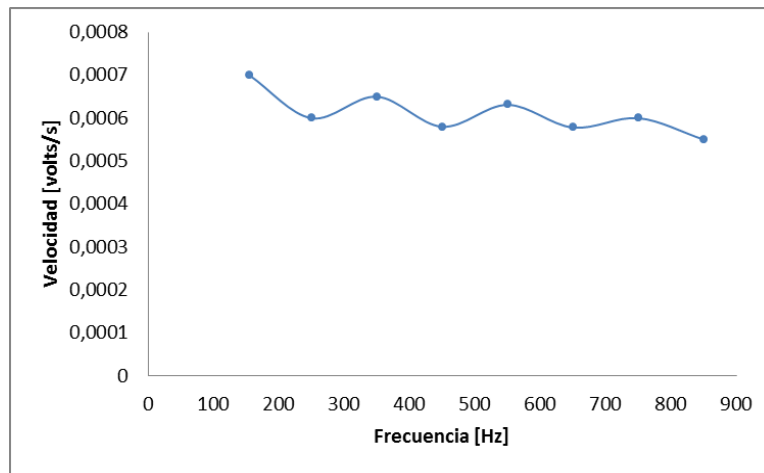


Figura 11. Velocidad vs Frecuencia para el hombro
Fuente: Autor

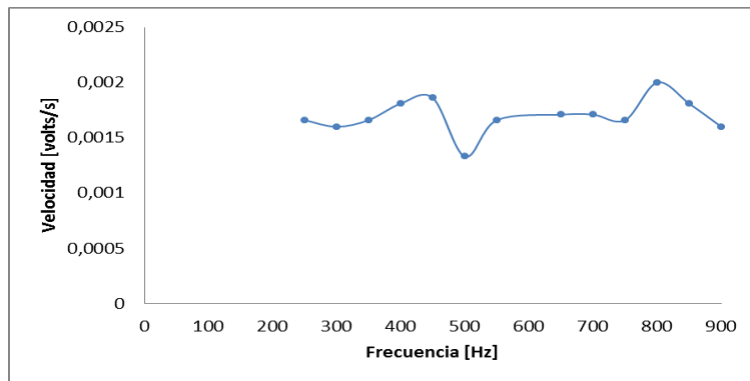


Figura 12. Velocidades vs Frecuencia para la cintura

Fuente: Autor

De las gráficas se infiere que la frecuencia aceptable para las tres articulaciones es de aproximadamente 150Hz. Esta también da un indicio de los valores posibles para la frecuencia del PWM, teniendo en cuenta que 150Hz es el límite inferior para esta selección.

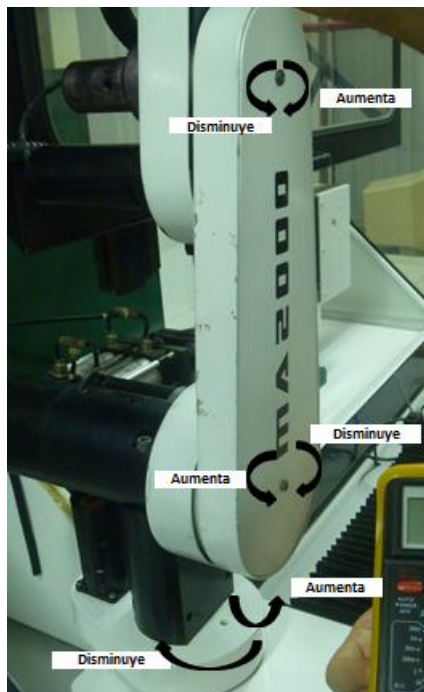


Figura 13. Variación set point para cada articulación del PUMA MA2000

Fuente: Autor

Por otro lado el microcontrolador es de 8 bits, entonces los set points se toman de 0 a 4096, donde 0 es 0° pero también 0 volts y 4096 equivale a 270° o 15 volts. Además para interpretar en que forma crece o aumenta el set point para cada articulación se presenta la Figura 13. A continuación se presentan las pruebas realizadas para el control PID en cada articulación y para diferentes posiciones.

La Tabla 5 muestra el tiempo de asentamiento (t_s) y el sobrepaso (M_p) teniendo en cuenta las tres trayectoria de la cintura para el control PID; además en la Figuras 14, 15 y 16 aparecen los resultados experimentales, donde la línea azul oscura representa la entrada y la línea aguamarina representa la salida.

1. *Posición vertical y oscilando la cintura.*

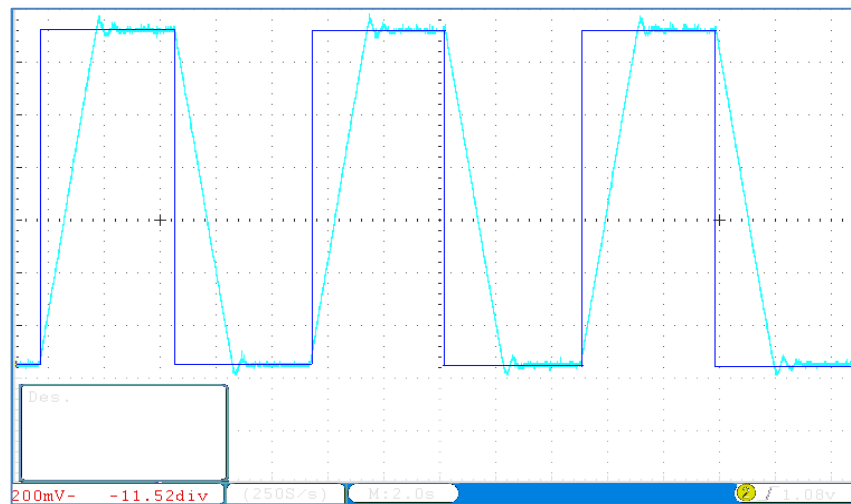


Figura 14. Control PID para la posición vertical del brazo y oscilando la cintura

Fuente: Autor

2. *Posición horizontal y oscilando la cintura.*

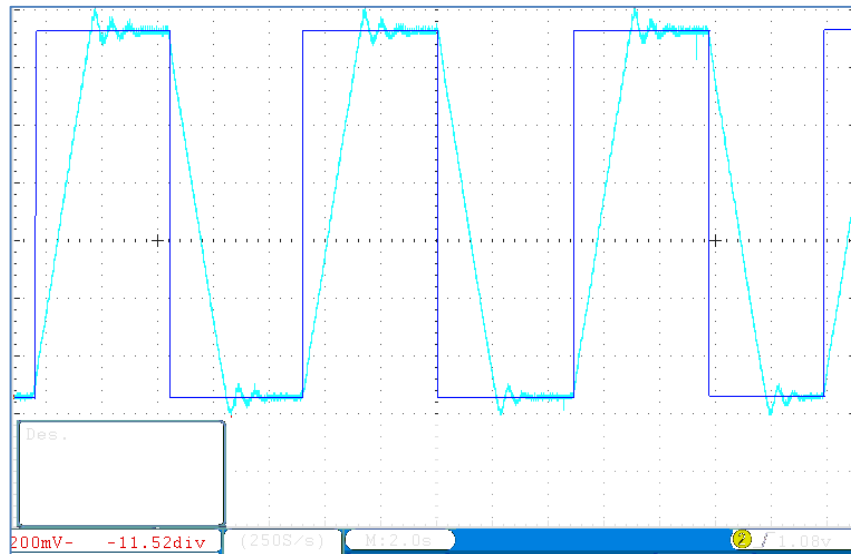


Figura 15. Control PID posición horizontal del brazo y oscilando la cintura
 Fuente: Autor

3. *Posición brazo flexionado oscilando la cintura.*

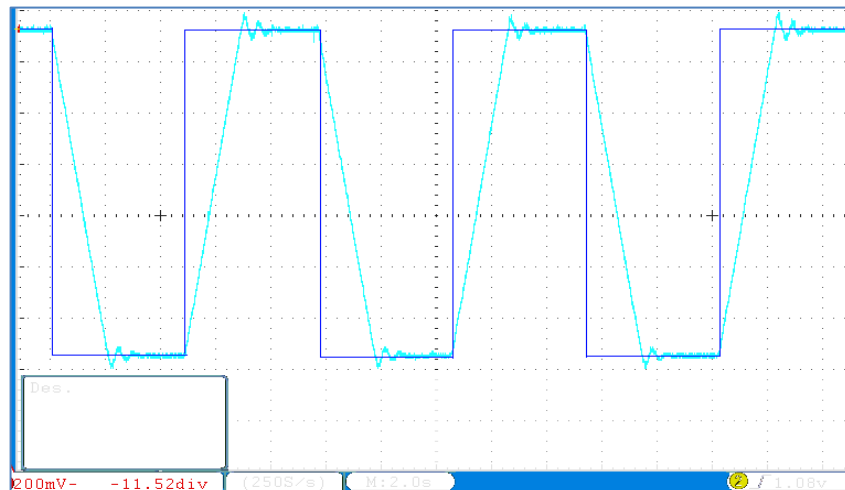


Figura 16. Control PID posición brazo flexionado y oscilando la cintura
 Fuente: Autor

En la Tabla 5 se observa el tiempo de asentamiento (t_s) y el sobrepaso (M_p) teniendo en cuenta las tres trayectoria del codo para el control PID; además en la Figuras 17, 18 y 19 aparecen los resultados experimentales, donde la línea azul oscura representa la entrada y la línea aguamarina representa la salida.

4. *Posición vertical oscilando el codo.*

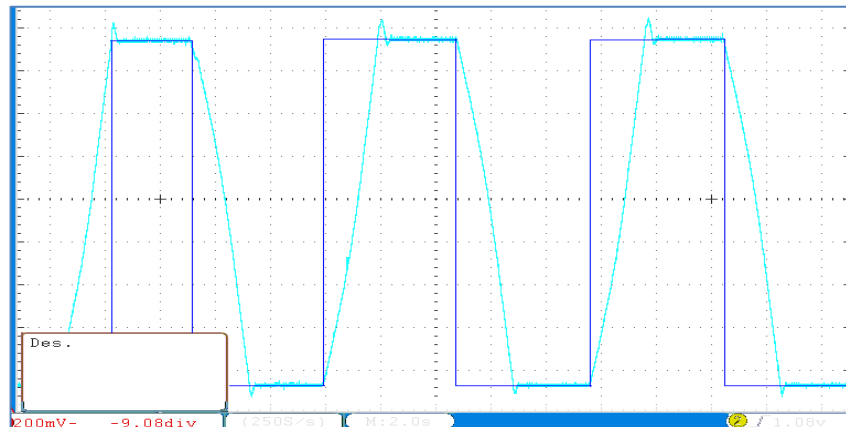


Figura 17. Control PID brazo en posición vertical oscilando el codo

Fuente: Autor

5. *Posición vertical con el codo oscilando para una secuencia.*

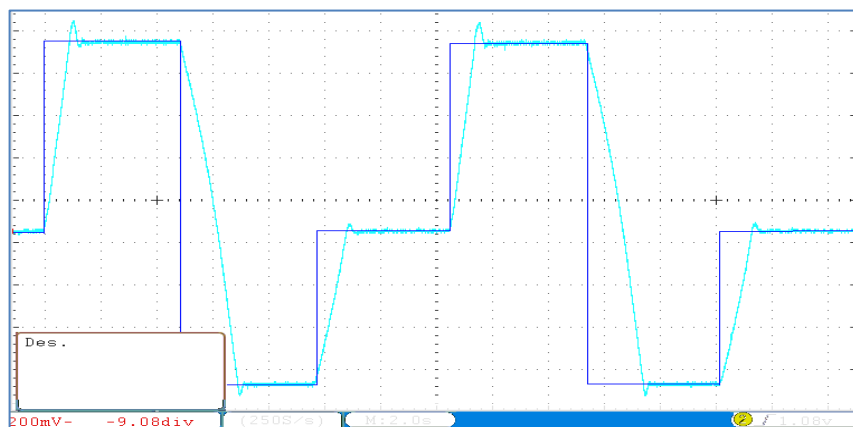


Figura 18. Control PID posición vertical el codo oscilando para una secuencia

Fuente: Autor

6. *Posición vertical con ángulo de aproximadamente 30° el codo oscila en una secuencia.*

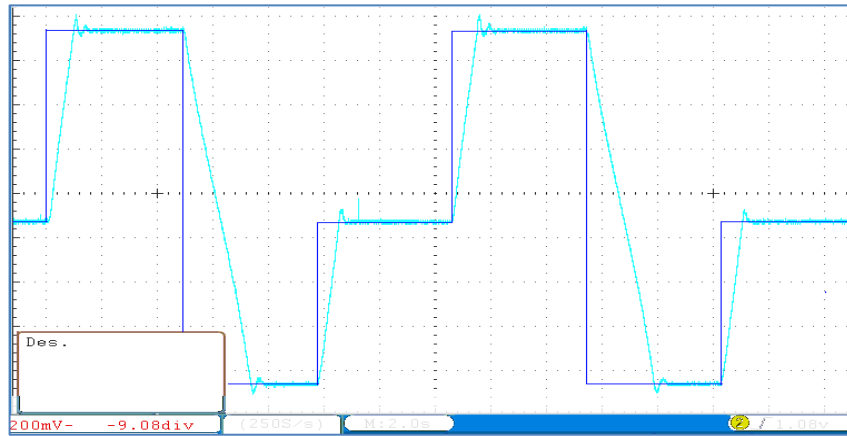


Figura 19. Control PID posición inclinada oscilando el codo para una secuencia

Fuente: Autor

En la Tabla 5 se observa el tiempo de asentamiento (t_s) y el sobrepaso (M_p) teniendo en cuenta las tres trayectoria del hombro para el control PID; además en la Figuras 20 y 21 se observan los resultados experimentales, donde la línea azul oscura representa la entrada y la línea aguamarina representa la salida.

7. *Posición vertical con el hombro oscilando para una secuencia.*

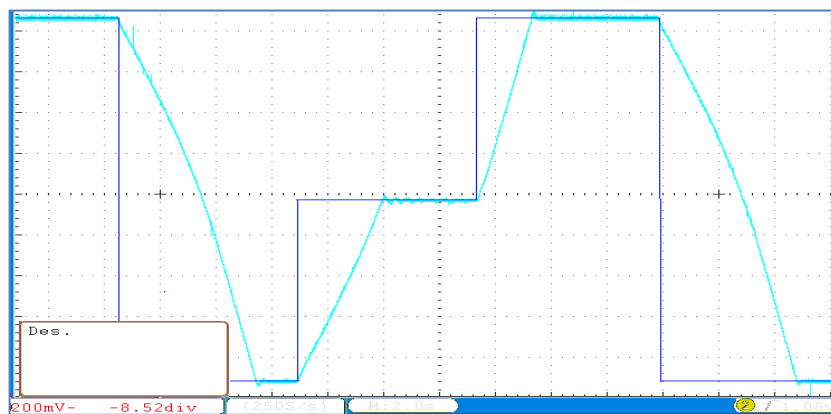


Figura 20. Control PID posición vertical oscilando el hombro para una secuencia

Fuente: Autor

8. Posición brazo flexionado y el codo oscilando para una secuencia.

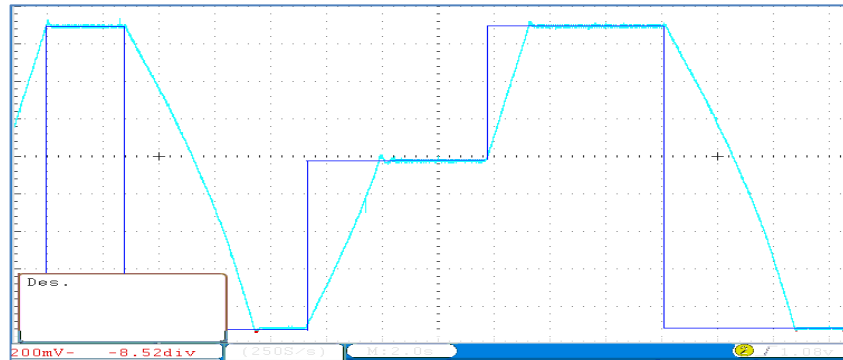


Figura 21. Control PID posición brazo flexionado el codo oscilando para una secuencia

Fuente: Autor

Posición	Trayectoria	Otras articulaciones	M_p [%]	t_s [s]
1	cintura de 65,92° a 197,75°	hombro: 138,42° codo: 131,84°	3,125	3,2
2	cintura de 145,02° a 250,49°	hombro: 65,92° codo: 145,02°	6,25	3,6
3	cintura de 145,02° a 250,49°	hombro: 65,92° codo: 65,92°	4,69	3,2
4	codo de 210,94° a 79,10°	hombro: 138,42° cintura: 257°	4,87	2,4
5	codo de 210,94° a 79,10° a 138,42°	hombro: 138,42° cintura: 257°	4,16 8,69	1,6 1,6
6	codo de 210,94° a 79,10° a 138,42°	hombro: 79,1° cintura: 257°	5,26 9,3	1,2 1,6
7	hombro 210,94° a 65,92° a 138,42°	codo: 138,42° cintura: 131,84°	2,27 2,27	4,4 2,4
8	hombro 197,75° a 65,92° a 138,42°	codo: 138,42° cintura: 131,84°	2,2 2,9	3,2 2

Tabla 5. Resultados control PID

Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta que el modelo del robot es no lineal, el rango de operación del manipulador determinará el desempeño de los controladores PID sintonizados empíricamente para la respectiva articulación. Esto implica que el rendimiento de los controladores será mejor en el punto de operación en el que se sintonizaron, puesto que los métodos están pensados para sistemas lineales o linealizados en un punto de operación.
- La sintonización experimental del PID realizada por el segundo método de las reglas de Ziegler y Nichols cumple satisfactoriamente los objetivos de control de movimiento, asociados con sobre impulso y tiempo de establecimiento.
- A pesar de la dinámica no-lineal de las articulaciones controladas, los controladores PID sintonizados presentan un buen desempeño en la dinámica del robot manipulador.
- Los resultados alcanzados en este trabajo pueden ser referencia para desarrollo o investigaciones asociadas con la sintonización de controladores industriales.

6. RECOMENDACIONES

- Las constantes de sintonización cambian dependiendo de la posición a la que se desplace el brazo, esto debido a las fuerzas de gravedad e inercia que se ejercen sobre la articulación a controlar (perturbaciones) y a la no linealidad del sistema que depende no linealmente del ángulo de la posición de la articulación, por lo que si se quiere una dinámica más controlada, es necesario sintonizar controladores para diferentes posiciones.
- La articulación del hombro demanda mas potencia que las otras articulaciones, por lo tanto, se recomienda un puente H con capacidad de corriente suficiente para soportar la corriente máxima de arranque.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kelly R. y Santibáñez, V. Control de Movimiento de Robots Manipuladores. Person, Prentice Hall. 2003.
- [2] Tecquipment Ltd. Manual de Funcionamiento robot MA2000, 1995.
- [3] Martínez P, E. "Control de un robot tipo PUMA utilizando celdas neuronales analógicas" Tesis de Maestría en Ingeniería Mecatrónica. CENIDET, México, Diciembre del 2008.
- [4] Peña P, G.A y Pérez S, J.G. "Prototipo de un robot tipo PUMA de seis grados de libertad" Tesis de pregrado. Escuela Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Colombia 2005.
- [5] Yi Zuo, and Yaonan Wan. "Robust H_{∞} intelligent tracking control for robot manipulators". IEEE, Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation June 25 - 27, 2008, Chongqing, China.
- [6] G. Wil, N. Sepehri y K. Ziaei, "Design of a hydraulic force motion control system using a generalized predictive control algorithm", In IEE Proc. On Control Theory and Applications. vol 5. págs, 428-436. 1998.
- [7] B. Yao, F. Bu, J. Reedy y G. Chiu, "Adaptive Robust Motion Control of Single-Rod Hydraulic Actuators: Theory and Experiments" In IEEE/ASME Trans. On Mechatronics, vol 5, págs. 79-91, 2000.
- [8] A. Alleyne, R. Liu y H. Wright, "On the limitation of force tracking control for hydraulic active suspensions". In Proc. Of the American Control Conf págs. 43-47, 1998.

- [9] Villamizar M, Rodolfo. Estrategia de control QFT para robot PUMA 560 Universidad Del Norte - Uninorte. Colombia, 2006.
- [10] Correa, R. Villamizar, R. Quiroz, J. De la Sintonización de controladores Ed: División de Publicaciones Universidad Industrial de Santander ISBN: 978-958-8187-82-2 v. 0 págs. 118. Colombia 2008.
- [11] Ogata, Katsuhiko. Ingeniería De Control Moderna. 4ta Ed. Madrid: Prentice Hall. págs. 965, 2003.
- [12] Cieza Aguirre, Oscar Benjamín. "Implementación de una estación de trabajo mediante un robot serial de 3 grados de libertad para el CETAM" Tesis de grado para optar por el titulo de Ingeniero Electrónico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Agosto del 2011. Págs. 60.
- [13] Xiaou Li, Wen Yu. "A systematic tuning method of PID controller for robot manipulators", 2011 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), December, 19 - 21, 2011, Santiago, Chile.
- [14] P. Reynoso Mora y D. Mocencahua Mora. "Sintonización Difusa de un PID para Robots Manipuladores" Facultad de Ciencias de la Electrónica Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Seminario de Control Difuso, Marzo 2004.
- [15] Martínez P, E. "Control de un robot tipo PUMA utilizando celdas neuronales analógicas", Tesis de Maestría en Ingeniería Mecatrónica. CENIDET, México, Diciembre del 2008.
- [16] Pinto F, María Claudia. "Sintonización de Controladores PID utilizando Algoritmos Evolutivos", Tesis de grado para optar por el titulo de Ingeniero Electrónico. Pamplona: Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica, Telecomunicaciones y Sistemas, Mayo 2006.

[17] MC9S08QE32. Reference manual. Freescale. Rev. 7, 9/2011.

[18] Cuadrado, A. Control Digital. Práctica de Regulación Automática I. Mayo 24 de 2004.

ANEXOS

Anexo A. PID discreto lenguaje C

```
float y=0.0, ref=0.0;           /* salida y referencia */
float e[NMAX+1], u[NMAX+1];    /* error y accion de control */
float a[NMAX+1], b[NMAX+1];    /* parametros del regulador */
long int k=0;
int n;                          /* orden del regulador */

void Regulador(void)
{
    y=LecturaConvertorAD();     /* Se toma valor en el convertor A/D */
    e[0] = ref - y;            /* Se calcula el error */

    u[0] = b[0]*e[0];          /* Se calcula la accion de control */
    for (i=1; i <= n; i++)
        u[0] = u[0] + b[i]*e[i] - a[i]*u[i];

    if (u[0] > 4.9976)          /* Tener en cuenta la saturacion */
        u[0] = 4.9976;
    else if (u[0] < -5.0)
        u[0] =-5.0;

    /* Salida de accion de control por convertor D/A */
    EscrituraConvertorDA(u[0]);

    for (i=0; i < n; i++) { /* Se actualizan valores para el siguiente ciclo */
        u[n-i] = u[n-i-1];
        e[n-i] = e[n-i-1];
    }
    k++;
}
```

Anexo B. Programa sintonización

FUNCIONES DEL SISTEMA CONTROLADOR

```
void motores (int vel_elbow, int vel_shoulder, int vel_waist)
{
// esta función permite controlar los niveles de salida hacia los motores
entre -4095 a 4095,
// el signo indica la dirección del motor, y la magnitud el equivalente a
la velocidad, donde:
// 0 corresponde a 0 voltios, y 4096 a Vmax aplicado a los motores.

                                calculo PWM elbow

if (vel_elbow>4096)
{
    (void) (TPM3C3SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C3V = (unsigned short) (4095);           /* Compare 0
value setting */
    PTDD_PTDD7=0;
    PTDD_PTDD0=1;
}
else if (vel_elbow<-4096)
{
    (void) (TPM3C3SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C3V = (unsigned short) (4095);           /* Compare 0
value setting */
    PTDD_PTDD7=1;
    PTDD_PTDD0=0;
}
else if (vel_elbow<0)
{
    (void) (TPM3C3SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C3V = (unsigned short) (-vel_elbow);           /* Compare
0 value setting */
    PTDD_PTDD7=1;
    PTDD_PTDD0=0;
}
else if (vel_elbow==0)
{
    (void) (TPM3C3SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C3V = (unsigned short) (4095);           /* Compare 0
value setting */
    PTDD_PTDD7=0;
    PTDD_PTDD0=0;
}
```

```

    }
else
    {
        (void) (TPM3C3SC == 0);          /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
        TPM3C3V = (unsigned short) (vel_elbow);          /* Compare
0 value setting */
        PTDD_PTDD7=0;
        PTDD_PTDD0=1;
    }

        calculo PWM shoulder

if (vel_shoulder>4096)
    {
        (void) (TPM3C2SC == 0);          /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
        TPM3C2V = (unsigned short) (4095);          /* Compare 0
value setting */
        PTDD_PTDD6=0;
        PTED_PTED7=1;
    }
else if (vel_shoulder<-4096)
    {
        (void) (TPM3C2SC == 0);          /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
        TPM3C2V = (unsigned short) (4095);          /* Compare 0
value setting */
        PTDD_PTDD6=1;
        PTED_PTED7=0;
    }
else if (vel_shoulder<0)
    {
        (void) (TPM3C2SC == 0);          /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
        TPM3C2V = (unsigned short) (-vel_shoulder);          /*
Compare 0 value setting */
        PTDD_PTDD6=1;
        PTED_PTED7=0;
    }
else if (vel_shoulder==0)
    {
        (void) (TPM3C2SC == 0);          /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
        TPM3C2V = (unsigned short) (4095);          /* Compare 0
value setting */
        PTDD_PTDD6=0;
        PTED_PTED7=0;
    }
else
    {
        (void) (TPM3C2SC == 0);          /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */

```

```

    TPM3C2V = (unsigned short)(vel_shoulder);           /*
Compare 0 value setting */
    PTDD_PTDD6=0;
    PTED_PTED7=1;
}

                                calculo PWM waist

if (vel_waist>4096)
{
    (void)(TPM3C1SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C1V = (unsigned short)(4095);           /* Compare 0
value setting */
    PTDD_PTDD5=0;
    PTDD_PTDD1=1;
}
else if(vel_waist<-4096)
{
    (void)(TPM3C1SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C1V = (unsigned short)(4095);           /* Compare 0
value setting */
    PTDD_PTDD5=1;
    PTDD_PTDD1=0;
}
else if (vel_waist<0)
{
    (void)(TPM3C1SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C1V = (unsigned short)(-vel_waist);           /* Compare
0 value setting */
    PTDD_PTDD5=1;
    PTDD_PTDD1=0;
}
else if (vel_waist==0)
{
    (void)(TPM3C1SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C1V = (unsigned short)(4095);           /* Compare 0
value setting */
    PTDD_PTDD5=0;
    PTDD_PTDD1=0;
}
else
{
    (void)(TPM3C1SC == 0);           /* Channel 0 int. flag clearing
(first part) */
    TPM3C1V = (unsigned short)(vel_waist);           /* Compare
0 value setting */
    PTDD_PTDD5=0;
    PTDD_PTDD1=1;
}

```

```

}

void main(void)
{
MCU_init();
ENABLE_ARM=0; //deshabilitamos los drivers de la tarjeta de control
PTDD_PTDD7=0;
PTDD_PTDD0=0;

// se fijan las constantes de control del sistema

KP_elbow=8;
KP_shoulder=10;
KP_waist=6;

EnableInterrupts; // activar las interrupciones para el muestreo

SLEEP_TIME=0;

while(SLEEP_TIME<350)
{
    set_point_elbow=elbow;
    set_point_shoulder=shoulder;
    set_point_waist=waist;
    LED=1;
}

ENABLE_ARM=1; // habilitamos los drivers del brazo

TPM3SC = 9;

set_point_elbow=1500;
SLEEP_TIME=0;
while(SLEEP_TIME<300)
{}
set_point_shoulder=2000;
SLEEP_TIME=0;
while(SLEEP_TIME<300)
{}
set_point_waist=2000;
SLEEP_TIME=0;
while(SLEEP_TIME<300)
{}

set_point_elbow=2200;
set_point_shoulder=2200;
SLEEP_TIME=0;
while(SLEEP_TIME<350)
{}

```

```

// bloque de sintonización por oscilación del sistema

//KP_shoulder=145; // ya oscila el hombro

for(;;)
{

}

}

interrupt VectorNumber_Vrtc void muestrador (void)
{
RTCSC_RTIE=0; // deshabilita la interrupción del RTC
ADCSC1_ADCH=0; // se lee el canal 0 del ADC correspondiente a elbow
while (ADCSC1_COCO==0) // espera que capture la muestra
{}
elbow=ADCR; // se transfiere el dato del ADC a la variable "elbow"

ADCSC1_ADCH=1; // se lee el canal 1 correspondiente a waist
while (ADCSC1_COCO==0)
{}
waist=ADCR;

ADCSC1_ADCH=2; // se lee el canal 2 correspondiente a shoulder
while (ADCSC1_COCO==0)
{}
shoulder=ADCR;

ADCSC1_ADCH=5; // se lee el canal 5 correspondiente al feed back de
corriente del driver 1
while (ADCSC1_COCO==0)
{}
FB1=ADCR;

ADCSC1_ADCH=4; // se lee el canal 4 correspondiente al feed back de
corriente del driver 2
while (ADCSC1_COCO==0)
{}
FB2=ADCR;

ADCSC1_ADCH=9; // se lee el canal 9 correspondiente al feed back de
corriente del driver 3
while (ADCSC1_COCO==0)
{}
FB3=ADCR;

```