

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIRCUITO ELECTRÓNICO DIGITAL Y
MEJORAMIENTO DEL SISTEMA MECÁNICO DE LA SERVOVÁLVULA DEL
MÓDULO FEEDBACK DE NIVEL Y FLUJO PROCON 38-001**

**JUAN DIEGO MUNOZ GONZALEZ
ROSSY ANDREA LIZCANO BOHORQUEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
2009**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIRCUITO ELECTRÓNICO DIGITAL Y
MEJORAMIENTO DEL SISTEMA MECÁNICO DE LA SERVOVÁLVULA DEL
MÓDULO FEEDBACK DE NIVEL Y FLUJO PROCON 38-001**

**JUAN DIEGO MUNOZ GONZALEZ
ROSSY ANDREA LIZCANO BOHORQUEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**Director:
EDGAR BARRIOS URUEÑA
Ing. MSc. Eléctrico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA**

2009

II

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 18 de Septiembre de 2009

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen María por darme fuerza espiritual y hacer posible que tan anhelado sueño sea hoy una realidad.

A mis Padres por su incalculable amor. Gracias a sus consejos y apoyo me han hecho sentir que no hay cosas inalcanzables.

A mis Hermanos por la amistad y comprensión que siempre me han brindado.

A Margarita por su infinito amor y bondad.

A Rossy por su especial amistad y colaboración.

A mi Familia, Amigos y Profesores que han contribuido en mi formación como persona.

Juan Diego Muñoz González

A Dios por todas sus bendiciones y por darme fortaleza cuando más lo he necesitado.

A mi mamá por su entrega e infinito amor.

A mi papá por ayudarme a construir mis sueños y por su gran corazón.

Por ser los mejores papás del mundo, A quienes les debo todo lo que soy, éste triunfo es de ustedes.

A Rafita y Marcelita porque más que hermanos han sido mis amigos, gracias por su apoyo incondicional.

A mis amigos, con todo el corazón por su amistad y por creer en mí.

A Juan Diego, mi gran amigo y compañero.

A todas las personas que están en mi memoria y han pasado por mi vida dejando huella.

Rossy Andrea Lizcano Bohórquez

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan agradecimiento a:

Msc. Edgar Barrios Urueña, Director de ésta tesis, por la paciencia y confianza brindadas.

Dr. Omar Pinzón Ardila, por su disposición y constante colaboración durante la realización de éste proyecto.

Juan Carlos Villamizar, por sus valoraables sugerencias y orientación.

Carlos Gerardo Hernández, por sus contribuciones y su incondicional apoyo en el desarrollo de éste trabajo.

Milton Gerardo Marín, por sus consejos y sugerencias.

INDICE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCION..... | 1 |
| 1 OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL..... | 2 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 2 MARCO TEORICO..... | 3 |
| 2.1 MODULO FEEDBACK DE NIVEL Y FLUJO PROCON 38-001..... | 3 |
| 2.1.1 Principales elementos del módulo..... | 3 |
| 2.1.2 Interfaz de proceso 38-200 | 4 |
| 2.2 VÁLVULAS DE CONTROL..... | 5 |
| 2.2.1 Partes de la válvula | 5 |
| 2.2.2 Tipos de válvulas | 6 |
| 2.3 MICROCONTROLADOR..... | 9 |
| 2.3.1 Familia para control de motores y conversión de potencia..... | 9 |
| 2.3.2 Convertidor análogo digital | 10 |
| 2.3.3 Configuración del módulo analógico digital..... | 14 |
| 2.3.4 Modulo PWM..... | 17 |
| 2.3.5 Generación de tiempo muerto | 25 |
| 2.3.6 Otros recursos del módulo PWM | 26 |
| 2.4 SISTEMAS DE CONTROL..... | 28 |
| 2.4.1 Sistema de control en lazo abierto..... | 28 |
| 2.4.2 Sistema de control en lazo cerrado | 29 |
| 2.4.3 Controlador..... | 30 |
| 2.4.4 Respuesta típica de un sistema de control | 38 |
| 3 METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO | 39 |
| 3.1 ANÁLISIS DEL CONTROL DE LA SERVO VÁLVULA..... | 39 |
| 3.1.1 Características del sistema | 39 |
| 3.1.2 Circuito análogo | 41 |
| 3.2 ANÁLISIS DE LA PARTE MECÁNICA..... | 43 |
| 3.2.1 Descripción del problema | 44 |
| 3.3 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR | 45 |
| 3.3.1 Diseño y simulaciones del circuito digital | 45 |
| 3.3.2 Pruebas | 47 |
| 3.3.3 Programación del algoritmo del PID | 58 |
| 3.4 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA..... | 64 |
| 3.4.1 Función de transferencia del módulo FEEDBACK..... | 64 |
| 3.4.2 Función de transferencia de la servoválvula..... | 67 |
| 3.5 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL FINAL..... | 70 |
| 4 RESULTADOS OBTENIDOS..... | 72 |

| | | |
|----------|------------------------------|-----------|
| 5 | CONCLUSIONES | 74 |
| 6 | RECOMENDACIONES | 75 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 76 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1. MÓDULO DE NIVEL Y FLUJO PROCON 38-001..... | 3 |
| FIGURA 2. CONECTOR DIN DE 7 PINES. | 4 |
| FIGURA 3. VÁLVULA DE CONTROL REPRESENTATIVA. | 5 |
| FIGURA 4. VÁLVULA DE AGUJA..... | 8 |
| FIGURA 5. ESQUEMA POR BLOQUES DEL MÓDULO CONVERTOR ANALÓGICO DIGITAL DE 10 BITS. | 11 |
| FIGURA 6. SECUENCIA DE UNA CONVERSIÓN BÁSICA. | 13 |
| FIGURA 7. ESQUEMA GENERAL DEL MODULO PWM..... | 18 |
| FIGURA 8. PULSO DE ANCHURA VARIABLE..... | 19 |
| FIGURA 9. DIAGRAMA DE LA BASE DE TIEMPO DEL PWM..... | 21 |
| FIGURA 10. MODO DE FUNCIONAMIENTO NORMAL DE LA BASE DE TIEMPO..... | 22 |
| FIGURA 11. SEÑAL DE FLANCO ALINEADO..... | 24 |
| FIGURA 12. EFECTO DEL TIEMPO MUERTO SOBRE LA SALIDA PWM..... | 26 |
| FIGURA 13. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO. | 29 |
| FIGURA 14. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL INDUSTRIAL. | 29 |
| FIGURA 15. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROLADOR DE ENCENDIDO Y APAGADO. | 31 |
| FIGURA 16. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROLADOR PROPORCIONAL. | 31 |
| FIGURA 17. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL. | 32 |
| FIGURA 18. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROLADOR PROPORCIONAL DERIVATIVO..... | 33 |
| FIGURA 19. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO. | 33 |
| FIGURA 20. ESTRUCTURA DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA. | 36 |
| FIGURA 21. ACTUADOR ELÉCTRICO..... | 36 |
| FIGURA 22. APARIENCIA FÍSICA DEL POTENCIÓMETRO..... | 37 |
| FIGURA 23. RESPUESTA TÍPICA DE UN SISTEMA DE CONTROL. | 38 |
| FIGURA 24. RELACIÓN CORRIENTE VS FLUJO..... | 40 |
| FIGURA 25. FOTOGRAFÍA DEL SISTEMA MECÁNICO. | 43 |
| FIGURA 26. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO DIGITAL..... | 47 |
| FIGURA 27. ESQUEMA DE CONEXIONES DEL RCV420..... | 48 |
| FIGURA 28. DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LOS REGULADORES DE VOLTAJE. | 48 |
| FIGURA 29. GRAFICA CORRIENTE VS VOLTAJE..... | 49 |
| FIGURA 30. CONEXIONES DEL LB1641..... | 50 |
| FIGURA 31. RESPUESTA DE LA PLANTA EN LAZO ABIERTO..... | 52 |
| FIGURA 32. RESPUESTA DE LA PLANTA..... | 53 |
| FIGURA 33. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR PID..... | 54 |
| FIGURA 34. RESPUESTA DE LA ACCIÓN PROPORCIONAL..... | 54 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 35. RESPUESTA A LA ACCIÓN PROPORCIONAL INTEGRAL..... | 55 |
| FIGURA 36. RESPUESTA A LA ACCIÓN PID | 55 |
| FIGURA 37. RESPUESTA A LA ACCIÓN DEL PID FINAL..... | 56 |
| FIGURA 38. RELACIÓN DE VOLTAJE CONTRA FLUJO DEL MÓDULO. | 65 |
| FIGURA 39. DIAGRAMA DE LA PLANTA PARA EL CONTROL DEL FLUJO | 65 |
| FIGURA 40. SISTEMA EN LAZO CERRADO CON EL REGULADOR PID PARA EL CONTROL DE CAUDAL..... | 66 |
| FIGURA 41. LGR DE LA PLANTA EN LAZO ABIERTO. | 68 |
| FIGURA 42. LGR DEL SISTEMA. | 68 |
| FIGURA 43. RESPUESTA DEL SISTEMA A UNA ENTRADA ESCALÓN. | 69 |
| FIGURA 44. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE LA SERVOVÁLVULA..... | 70 |
| FIGURA 45. RESPUESTA DEL CIRCUITO DE CONTROL DIGITAL DE LA SERVOVÁLVULA | 71 |
| FIGURA 46. CIRCUITO FINAL DE LA SERVOVÁLVULA..... | 72 |
| FIGURA 47. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO CONSTRUIDO. | 73 |
| FIGURA 48. RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA SERVOVÁLVULA | 73 |
| FIGURA 50. BITS DEL REGISTRO DE CONFIGURACIÓN ADCON1..... | 77 |
| FIGURA 51. BITS DEL REGISTRO DE CONFIGURACIÓN ADCON2..... | 78 |
| FIGURA 52. SE OBSERVAN LOS BITS DEL REGISTRO DE CONFIGURACIÓN ADCON3..... | 80 |
| FIGURA 53. BITS DEL REGISTRO DE CONFIGURACIÓN ADCHS..... | 80 |
| FIGURA 54. BITS DEL REGISTRO DE CONFIGURACIÓN ADCSSL..... | 81 |
| FIGURA 55. REGISTRO PTCON..... | 82 |
| FIGURA 56. REGISTRO PWMCON1..... | 82 |
| FIGURA 57. REGISTRO PWMCON2..... | 83 |
| FIGURA 58. REGISTRO DTCON1 | 83 |
| FIGURA 59. REGISTRO DTCON2 | 84 |
| FIGURA 60. REGISTRO FLTACON..... | 84 |
| FIGURA 61. REGISTRO FLTBCON | 85 |
| FIGURA 62. REGISTRO OVDCON | 85 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. FAMILIA DE MOTORES Y CONVERSIÓN DE POTENCIA..... | 9 |
| TABLA 2. TIPOS DE SEÑALES DE SALIDA PARA CADA MODO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BASE DE TIEMPO..... | 23 |
| TABLA 3. CONECTOR DIN DE 7 PINES..... | 39 |
| TABLA 4. RELACIÓN ENTRADA SALIDA..... | 40 |
| TABLA 5. VALORES DE CONVERSIÓN A/D..... | 45 |
| TABLA 6. DATOS DE ENTRADA Y SALIDA DEL CONVERTIDOR CORRIENTE A VOLTAJE..... | 49 |
| TABLA 7. SALIDA DEL CONTROLADOR PID..... | 61 |
| TABLA 8. RELACIÓN ENTRADA-SALIDA DEL MÓDULO..... | 63 |
| TABLA 9. RELACIÓN VOLTAJE A FLUJO..... | 64 |
| TABLA 10. COMBINACIÓN DE LOS BITS DE VCFG PARA LA SELECCIÓN DEL VOLTAJE DE REFERENCIA..... | 78 |

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. *Registros de control del Módulo A/D del dsPIC30F.*

Anexo B. *Registros de configuración del Módulo PWM.*

Anexo C. *Esquema del circuito análogo de control de la servoválvula.*

Anexo D. *Hoja de especificaciones del dsPIC30F2010.*

Anexo E. *Hoja de especificaciones del Convertidor de Corriente a Voltaje.*

Anexo F. *Hoja de especificaciones de los reguladores de voltaje.*

Anexo G. *Hoja de especificaciones del Puente H; LB1641.*

Anexo H. *Algoritmo en lenguaje ASSEMBLER del sistema de control implementado.*

Anexo I. *Manual de instrucciones para la instalación y operación del circuito y software de control de la servoválvula del Módulo FEEDBACK de Nivel y Flujo PROCON 38-001.*

Anexo J. *Esquema del impreso del circuito de control de la servoválvula.*

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIRCUITO ELECTRONICO DIGITAL Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA MECÁNICO DE LA SERVOVÁLVULA.

AUTORES: JUAN DIEGO MUNOZ GONZALEZ
ROSSY ANDREA LIZCANO BOHORQUEZ

FACULTAD: INGENIERÍA ELECTRONICA

DIRECTOR: MSc. EDGAR BARRIOS URUEÑA

RESUMEN

Éste proyecto modifica el circuito de control análogo de la servoválvula existente, integrado en su mayoría por amplificadores operacionales, por un circuito digital micro controlado, que de acuerdo a un valor de referencia, controla el caudal de agua que circula por el Módulo FEEDBACK de Nivel y Flujo PROCON 38-001.

Se diseñó un circuito de control digital que se adapta de manera precisa a la estructura mecánica existente, de manera que el cambio de control analógico a digital sea una sencilla sustitución del impreso, ya que éste cumple con las condiciones físicas establecidas.

El circuito tiene un conversor de corriente a voltaje, que suministra la tensión de alimentación a los dispositivos empleados, un microcontrolador dsPIC30f2010 que realiza la conversión A/D, una acción de control de tipo PID desarrollada por software que de acuerdo con la respuesta entregada, realiza un control por modulación de ancho de pulso (PWM), también tiene un dispositivo amplificador de potencia (puente H), que direcciona el sentido de giro del motor y un potenciómetro lineal encargado de la realimentación del sistema.

PALABRAS CLAVES: FEEDBACK, PROCON 38-001.

VoBo Director

GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ELECTRONIC CIRCUIT AND DIGITAL SYSTEM IMPROVEMENT OF MECHANICAL SERVO VALVES.

AUTHOR: JUAN DIEGO MUNOZ GONZALEZ
ROSSY ANDREA LIZCANO BOHORQUEZ

FACULTY: ELECTRONIC ENGINEERING.

DIRECTOR: MSc. EDGAR BARRIOS URUEÑA

ABSTRACT

This project modifies the analog control circuit of the existing servo valve, composed mostly of operational amplifiers, digital circuit for a micro controlled, according to a reference value, controls the flow of water flowing through FEEDBACK Module Level 38-001 PROCON and Flow.

We designed a digital control circuit that precisely fits the existing mechanical structure, so that the change in analog to digital control is a simple substitution of the form, and that it complies with the physical conditions established.

The circuit has a current to voltage converter, which supplies voltage to the devices used, dsPIC30f2010 a microcontroller that performs A/D conversion, an action of PID control type developed by software according to the response given, performs a control pulse width modulation (PWM), also has a power amplifier device (bridge H), which directs the direction of rotation of the motor and a linear potentiometer responsible for reactivating the system.

KEY WORDS: FEEDBACK, PROCON 38-001.

VoBo Director

INTRODUCCION

El control de un proceso es el mecanismo básico por el cual un sistema ya sea mecánico, eléctrico o biológico, mantiene su equilibrio. Ésta disciplina se focaliza en modelar matemáticamente diversos sistemas dinámicos y mediante el diseño de controladores lograr un funcionamiento predefinido, de modo que se reduzcan las probabilidades de error y se obtenga el comportamiento deseado en el sistema aplicado.

Teniendo en cuenta lo anterior y debido a que la economía global requiere de un desarrollo tecnológico que se anticipe a las necesidades del mercado aportando soluciones innovadoras en las áreas que integran sistemas electrónicos, automatización de procesos, microprocesadores y control de sistemas, se puede decir que el control, es una de las áreas más importantes de desarrollo de la ingeniería como tal.

La Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga es consciente de esto, por eso, cuenta con un laboratorio dedicado exclusivamente al desarrollo de este campo, el cual está dotado con tarjetas de desarrollo de control de posición, de velocidad y módulos de control de nivel, flujo y temperatura, que le permiten al estudiante de ingeniería electrónica aclarar los conocimientos adquiridos en teoría mediante la familiarización de los procesos presentes en el laboratorio, y a su vez, ampliar el horizonte de trabajo de los estudiantes de pregrado.

En éste caso, nos compete el módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001, específicamente el elemento final de control (servo válvula), ya que al accionar este dispositivo en la ejecución de las prácticas del laboratorio, se presentan fallas frecuentes, las cuales pueden ser de tipo electrónico o mecánico originando el desacople de la estructura mecánica y el deterioro de los elementos electrónicos.

Como parte de la culminación del ciclo básico del curso de ingeniería electrónica, este proyecto analizó el circuito electrónico, sistema mecánico actual de la servo válvula y generó una solución implementando una nueva tecnología al módulo de nivel y flujo, remplazando el circuito básico original análogo de la servo válvula por un sistema de control digital, utilizando un microcontrolador que permite por, medio de un lazo cerrado, disminuir la probabilidad de fallas en la operación del dispositivo, contribuyendo a la mejora de su funcionamiento.

1 OBJETIVOS

1.1 *Objetivo general*

Diseñar y construir un sistema microcontrolado que reemplace el sistema análogo de control de la servo válvula del módulo de FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001.

1.2 *Objetivos específicos*

- Analizar el sistema electrónico y mecánico de control existente de la servo válvula del módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001 del laboratorio de control.
- Diseñar y construir un circuito que se acople a las condiciones que demande el sistema mecánico.
- Elaborar un circuito impreso que se adapte a los requerimientos físicos del sistema actual de control de la servo válvula.
- Establecer para el sistema mecánico actual una solución; ya sea la implementación de mecanismos electromecánicos, el reemplazo o calibración de los engranajes existentes, o la combinación de estas para la protección del sistema en general.
- Determinar la función de transferencia de la servo válvula y el módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001.
- Simular la respuesta del sistema mediante la plataforma de MATLAB SIMULINK.

2 MARCO TEORICO

2.1 MODULO FEEDBACK DE NIVEL Y FLUJO PROCON 38-001

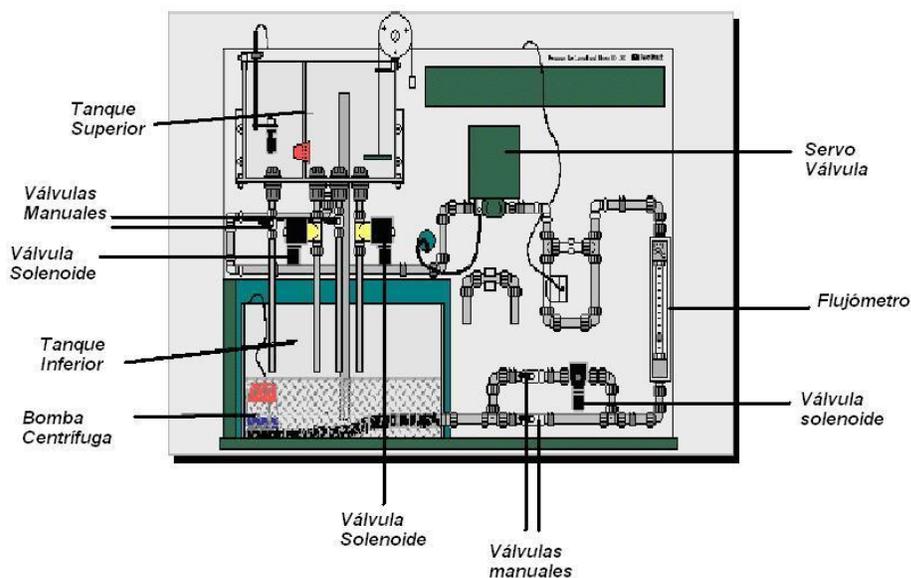
El modulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001 es un sistema de un único lazo que permite el estudio de los principios del control de procesos, usando nivel de líquido y tasas de flujo como las variables medidas del proceso. El sistema es completamente independiente; es un circuito de agua a baja presión que fluye en una estructura acoplada a un panel, haciéndolo apto para el trabajo individual o por grupos.

Consta de un tanque superior de doble compartimiento enlazado a un tanque de desagüe por medio de válvulas manuales y solenoides. El agua es bombeada por el sistema a través del medidor de flujo y la servoválvula. El nivel es medido en el tanque superior y el flujo con un flujómetro ubicado en la parte inferior izquierda de la tubería.¹

2.1.1 PRINCIPALES ELEMENTOS DEL MÓDULO

Los elementos que componen el módulo se pueden observar en la *Figura 1*.

Figura 1. Módulo de Nivel y Flujo PROCON 38-001.



Fuente: Manual: 38-001. Printed in England by FI Ltds. Crowborough.

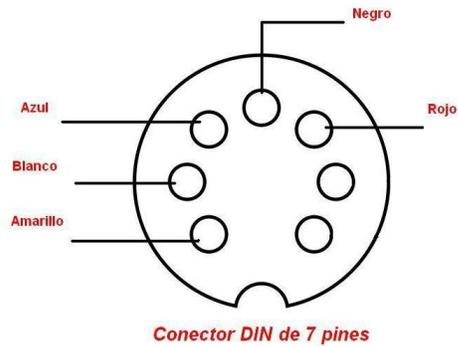
¹ Manual: 38-001. Printed in England by FI Ltds. Crowborough.

2.1.2 INTERFAZ DE PROCESO 38-200

Está conectada al sistema y proporciona todas las alimentaciones necesarias para el módulo, sensores y controlador. Suministra una fuente de corriente de 4–20mA y dos fuentes de Voltaje; positiva y negativa.

La interfaz es conectada al sistema por medio de un conector DIN de 7 pines. La configuración de las conexiones se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Conector DIN de 7 pines.



Fuente: Autor

2.2 VÁLVULAS DE CONTROL²

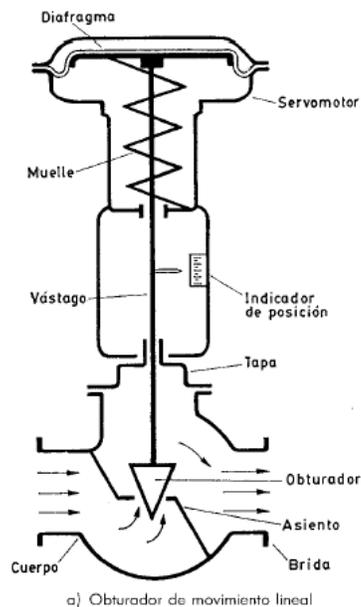
En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador.

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador.

2.2.1 Partes de la válvula

En la *Figura 3* se puede observar una válvula de control típica.

Figura 3. Válvula de control representativa.



Fuente: CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ª ed. España, Marcombo, 1997.p. 430.

Una válvula de control se compone básicamente del cuerpo y el servomotor, éste es accionado por una señal eléctrica de 4-20mA.

² *Ibíd.*,p. 365 - 377

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

La tapa tiene por objeto unir el cuerpo al servomotor. A su través desliza el vástago del obturador accionado por el motor. Este vástago dispone generalmente de un índice que señala en una escala la posición de apertura o de cierre de la válvula.

2.2.2 Tipos de válvulas

Los tipos de válvulas más comunes se describen a continuación.

- 2.2.2.1 **Válvula de globo.** Pueden ser de simple asiento, doble asiento y obturador equilibrado. Las de simple asiento precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas. El cierre estanco se logra con obturadores provistos de una arandela de teflón. En la válvula de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por éste motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento.
- 2.2.2.2 **Válvula de tres vías.** Se emplea generalmente para mezclar fluidos o para derivar de un flujo de entrada dos de salida. Intervienen típicamente en el control de temperatura de intercambiadores de calor.
- 2.2.2.3 **Válvula de jaula.** Consiste en un obturador cilíndrico que desliza en una jaula con orificios adecuados a las características de caudal deseadas. Se caracterizan por el fácil desmontaje del obturador y porque este puede incorporar orificios que permiten eliminar prácticamente el desequilibrio de fuerzas producido por la presión diferencial, favoreciendo la estabilidad del funcionamiento. Por este motivo, este tipo de obturador equilibrado se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. Ésta válvula es muy resistente a las vibraciones y desgaste.

- 2.2.2.4 Válvula de compuerta.** Efectúa su cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al flujo del fluido. Es adecuada generalmente para control todo-nada ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Tiene la ventaja de presentar muy poca resistencia al flujo de fluido cuando está en posición de apertura total.
- 2.2.2.5 Válvula en Y.** Es adecuada como válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal. Posee una característica de auto drenaje cuando está instalada inclinada con un cierto ángulo. Se emplea usualmente en instalaciones criogénicas.
- 2.2.2.6 Válvula de mariposa.** El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta, siempre que la presión diferencial permanezca constante. Se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.
- 2.2.2.7 Válvula de bola.** El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola. La bola tiene un corte adecuado que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada. Se emplea principalmente en el control de caudal de fluidos negros, o fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.
- 2.2.2.8 Válvula de aguja.³** La válvula de aguja es un tipo especial de la válvula de globo con macho en donde éste es una aguja delgada y cónica que asienta en un orificio pequeño de diferente conicidad. El cuerpo puede ser convencional de globo o en ángulo. Otras características de diseño son similares a las de la válvula de globo.

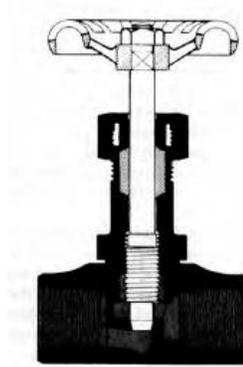
Por lo general, se utilizan como válvulas para instrumentos o en sistemas hidráulicos, aunque no para altas temperaturas. En la *Figura 4*. Se puede observar éste tipo de válvula.

Ventajas. La válvula de aguja está especialmente adaptada para un control muy preciso de bajos volúmenes de flujo.

³ GREENE, Richard W. Válvulas: selección, uso y mantenimiento. McGraw-Hill, 1992, 1997.p. 19-20.

Desventajas. La caída de presión en estas válvulas es considerable.

Figura 4. Válvula de aguja



Fuente: *Ibíd.*³ p. 255.

Éste tipo de válvula de aguja es con la que cuenta el módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001, y será la servoválvula a trabajar durante este proyecto.

2.3 MICROCONTROLADOR⁴

Es un dispositivo electrónico capaz de efectuar procesos lógicos. Un microcontrolador combina los elementos fundamentales con los que cuenta un microcomputador, es decir, la unidad central de procesamiento (CPU), la memoria y los puertos de entrada y salida, en un solo circuito integrado.

2.3.1 Familia para control de motores y conversión de potencia

Esta familia de controladores dsPIC30F está diseñada para soportar variedad de aplicaciones para control de motores, como motores de inducción monofásicos y trifásicos y motores de reactancia conmutada. Los dispositivos poseen desde 20 pines hasta 80 pines, tienen módulo especial para PWM. La descripción de cada una de las características de los dispositivos de la Familia para control de motores y conversión de potencia se encuentran especificadas en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Familia de motores y conversión de potencia.

| Dispositivo | Pines | Memoria de Programa | | SRAM Bytes | EEPROM Bytes | Timer 16-bit | Input Cap | Output Compl Std PWM | Motor Cntrl PWM | A/D 12-bit 100Ksps | Quad Enc | UART | SPI TM | I ² C TM | CAN |
|-------------|-------|---------------------|------|------------|--------------|--------------|-----------|----------------------|-----------------|--------------------|----------|------|-------------------|--------------------------------|-----|
| | | Bytes | Inst | | | | | | | | | | | | |
| dsP130F2010 | 28 | 12K | 4K | 512 | 1024 | 3 | 4 | 2 | 6ch | 6ch | 1 | 1 | 1 | 1 | — |
| dsP130F3010 | 28 | 24K | 8K | 1024 | 1024 | 5 | 4 | 2 | 6ch | 6ch | 1 | 1 | 1 | 1 | — |
| dsP130F4012 | 28 | 48K | 16K | 2048 | 1024 | 5 | 4 | 2 | 6ch | 6ch | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| dsP130F3011 | 40144 | 24K | 8K | 1024 | 1024 | 5 | 4 | 4 | 6ch | 9ch | 1 | 2 | 1 | 1 | — |
| dsP130F4011 | 40144 | 48K | 16K | 2048 | 1024 | 5 | 4 | 4 | 6ch | 9ch | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| dsP130F5015 | 64 | 66K | 22K | 2048 | 1024 | 5 | 4 | 4 | 8ch | 16ch | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| dsP130F6010 | 80 | 144K | 8K | 8192 | 4096 | 5 | 4 | 8 | 8ch | 16ch | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |

Fuente: DS70046E, DsPIC30F, Family Reference Manual. © 2006 Microchip Technology Inc.

De acuerdo a las referencias de dsPIC para control de motores, se deben tener en cuenta los módulos A/D y PWM para la selección del microcontrolador.

⁴ ANGULO USATEGUI, José María, GARCÍA ZAPIRAIN, Begoña, ANGULO MARTÍNEZ, Ignacio, SÁEZ, Javier Vicente. Microcontroladores avanzados dsPIC. España, 2006.

2.3.2 Convertidor análogo digital

Un convertidor analógico digital tiene la misión de convertir señales analógicas, que por su naturaleza son continuas en el tiempo, en digitales que son discretas en el tiempo. Permite convertir una señal analógica de entrada a un número digital de 10 o 12 bits dependiendo de cuál sea su resolución. Los dsPIC30F disponen de un conversor de 10 bits de resolución y de alta velocidad, y otro de 12 bits de alta resolución.

La conversión de señales analógicas en señales digitales se realiza en tres etapas.

Muestreo: consiste en obtener una señal discreta en el tiempo y en amplitud a partir de una señal continua de entrada.

Cuantificación de la señal: consiste en representar la amplitud de las muestras adquiridas mediante un número finito de valores distintos. Si el convertidor es de n bits, habrá 2^n posibles valores.

Codificación: es la representación del valor asignado a la señal en la fase de cuantificación mediante los niveles de tensión '1' y '0'.

2.3.2.1 Convertidor A/D 10 bits.

Las características principales se describen a continuación.

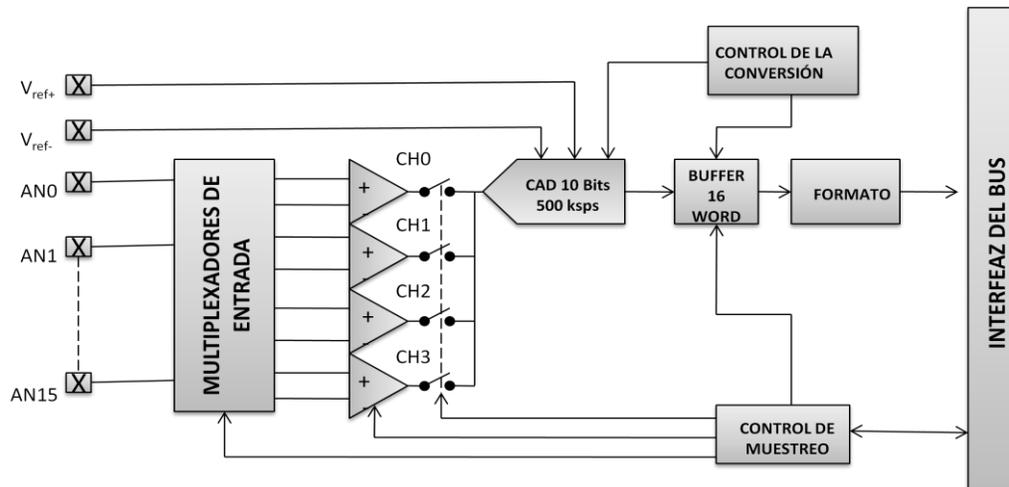
- Resolución de 10 bits.
- Tiempo de muestreo de 154 ns.
- Conversión por aproximaciones sucesivas.
- Velocidad de conversión de hasta 500 ksps a 5 V (2 μ s de tiempo de conversión) y 100 ksps a 2,7V
- Hasta 16 patitas analógicas de entrada (canales).
- Patitas de entrada destinadas a soportar el voltaje de referencia externo.
- Cuatro amplificadores unipolares diferenciales de muestreo y retención.
- Muestreo hasta de cuatro patitas de entrada analógica de forma simultánea.
- Modo automático de exploración de canal.
- Fuente seleccionable del disparador de la conversión.
- Buffer para almacenar el resultado de la conversión de 16 palabras.

- Modos de selección para relleno del buffer.
- Cuatro opciones de alineamiento del resultado.
- Funciona mientras la CPU se encuentra en los modos Sleep e Idle.
- La tensión analógica de referencia puede ser seleccionada por software.
- Alimentación única comprendida entre 2,7 y 5,5 V.

En la *Figura 5*. Se muestra el diagrama por bloques del convertor analógico digital de 10 bits, que puede tener hasta 16 patitas o canales analógicos de entrada, denominados AN0-AN15. Además, existen dos entradas analógicas, que deberán ser compartidas, para poder introducir el voltaje de referencia externo. El número exacto de patitas de entrada y los dedicados a la aplicación de los voltajes de referencia externos dependen del modelo de dsPIC30F.

Las entradas analógicas están conectadas vía multiplexores a cuatro amplificadores de muestreo y retención que se llaman CH0-CH3. Uno, dos o cuatro de estos amplificadores de muestreo y retención deberán estar activos para recoger la información de entrada.

Figura 5. Esquema por bloques del módulo convertor analógico digital de 10 bits.



Fuente: *Ibíd.*, p. 366

Las entradas analógicas están conectadas vía multiplexores a cuatro amplificadores de muestreo y retención que se llaman CH0-CH3. Uno, dos o cuatro de estos amplificadores de muestreo y retención deberán estar activos para recoger la información de entrada.

2.3.2.2 Registros de control⁵

El módulo analógico digital tiene seis registros de control y estado que el usuario debe saber manejar correctamente para su configuración y utilización.

ADCON1: Registro de control analógico digital 1.

ADCON2: Registro de control analógico digital 2.

ADCON3: Registro de control analógico digital 3.

ADCHS: Registro de selección del canal analógico de entrada.

ADPCFG: Registro de configuración del puerto en analógico o digital.

ADCSSL: Registro de selección de entradas para la exploración.

Los registros ADCON1, ADCON2 y ADCON3 son los encargados de controlar la operación del módulo analógico digital, mientras que el registro ADCHS selecciona las patitas de entrada que van a ser conectadas a los amplificadores de muestreo y retención.

El registro ADPCFG se encarga de configurar las patitas como entradas analógicas o como entradas o salidas digitales. Finalmente, el registro ADCSSL se dedica a seleccionar las entradas que serán exploradas secuencialmente.

2.3.2.3 Buffer del resultado de la conversión analógico digital

Está compuesto por un puerto RAM dual de 16 palabras, llamado ADCBUF, para almacenar el resultado de la conversión. La localización de los 16 resultados está referenciada mediante ADCBUFO, ADCBUFI, ADCBUF2,..., ADCBUFE, ADCBUFF y en cada uno de ellos se carga el resultado de cada conversión que ocupará 16 bits. Los buffers de resultado son registros únicamente de lectura.

2.3.2.4 Terminología A/D y secuencia de conversión

El convertidor A/D de 10 bits tiene un total de cuatro canales S/H, que se designan como CH0 hasta CH3. Los canales S/H están conectados a las patitas analógicas mediante un multiplexor analógico de entrada. Dicho multiplexor se controla mediante el registro ADCHS. En este registro existen dos grupos de bits para el control del multiplexor que funcionan del mismo modo. Dichos bits permiten programar dos configuraciones distintas del multiplexor analógico de entrada que se denominan MUX A y MUX B. El convertidor A/D puede ocasionalmente permutar a configuración MUX A, a configuración MUX B y viceversa.

⁵ Anexo A

El tiempo de muestreo es el tiempo en el que el amplificador S/H está conectado a las patitas analógicas de entrada para recibir y capturar la señal a convertir. El tiempo de muestreo puede iniciarse manualmente poniendo a '1' el bit de SAMP (ADCON1<1>) o automáticamente mediante el hardware del convertor A/D. Puede terminar manualmente poniendo a '0' el bit de SAMP o automáticamente mediante la sincronización de la fuente de conversión.

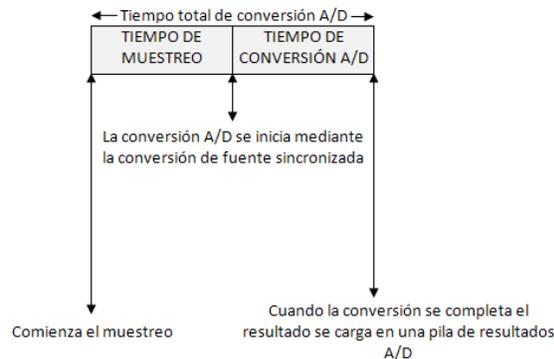
El tiempo de conversión es el tiempo requerido por el convertidor A/D para convertir el voltaje que proviene del amplificador S/H en un valor digital. El convertor A/D se desconecta de las patitas de la entrada analógica al finalizar el tiempo de muestreo.

El convertor A/D necesita un ciclo de reloj A/D (T_{AD}) para convertir cada uno de los bits del resultado, más un ciclo adicional de reloj. Por tanto, se requieren un total de 12 ciclos T_{AD} para la realización de una conversión completa en un CAD de 10 bits. Cuando el tiempo de conversión se completa, el resultado se carga en uno de los 16 registros A/D de resultado (ADCBUF0...ADCBUFF), el S/H puede volverse a conectar a las patitas de entrada, y la CPU podrá generar una interrupción si está programada para ello.

La suma del tiempo de muestreo y el tiempo de conversión A/D da lugar al tiempo total de conversión. Existe un tiempo mínimo de muestreo para asegurarse de que la exactitud dada por amplificador S/H sea la adecuada. Cabe destacar que existen múltiples opciones para seleccionar el reloj interno del convertor A/D. El usuario debe elegir una opción del reloj interno que no viole el valor mínimo del T_{AD} .

El convertor A/D ofrece múltiples posibilidades para seleccionar la secuencia de muestreo y conversión. Dicha secuencia puede resultar ser una secuencia muy simple, tal como se muestra en la *Figura 6*. El ejemplo de dicha figura usa un único amplificador S/H.

Figura 6. Secuencia de una conversión básica.



Fuente: ANGULO USATEGUI, Op. Cit., p. 374.

El número de amplificadores S/H que se utilizan en la secuencia de muestreo y de conversión, queda determinado por los bits de control CHPS. Una secuencia de muestreo y conversión que utiliza múltiples canales S/H puede ser muestreada de forma simultánea o secuencial, siendo controlada por el bit SIMSAM (ADCON1 <3>).

Un muestreo simultáneo se realiza en el mismo instante de tiempo para todas y cada una de las entradas analógicas. Por otro lado, un muestreo secuencial es aquel en el que el tiempo de muestreo para cada una de las entradas analógicas es diferente.

El inicio del muestreo se puede controlar mediante software poniendo a '1' el bit SAMP. También podrá ser controlado automáticamente mediante el propio hardware. Cuando el convertor A/D opera en modo de muestreo automático, el amplificador S/H se vuelve a conectar a las patitas analógicas de entrada cuando termina la secuencia de muestreo y conversión. El muestreo automático se controla por el bit ASAM (ADCON1 <2>).

Una de las fuentes de conversión sincronizada es la de conversión automática. El tiempo necesario entre conversiones automáticas vendrá dado por un contador o un reloj A/D. El modo automático de muestreo y el modo automático de conversión sincronizada pueden ser utilizados a la vez para señalar el final de las conversiones realizadas, sin tener que usar ningún tipo de software.

2.3.3 Configuración del módulo analógico digital

La configuración comprende principalmente la selección del tiempo de muestreo y la de todos los pasos que se deben ejecutar para que el muestreo, retención y posterior codificación se realicen en los canales deseados, siguiendo el orden de la secuencia elegida.

Los pasos que se deben seguir para utilizar el módulo analógico digital a la hora de realizar una conversión son los siguientes:

- Seleccionar las patitas como entradas analógicas, ADPCFG<15:0>.
- Seleccionar la fuente de la tensión de referencia para que coincida el rango de conversión con el de las tensiones de entrada, ADCON2<15:13>.
- Seleccionar el reloj de conversión analógico, respecto al reloj del procesador, ADCON3<5:0>, para que concuerde con la información a adquirir.
- Determinar cuántos canales de muestreo y retención van a ser utilizados, ADCON2<9:8> y ADPCFG<15:0>.
- Determinar cómo ocurrirá el muestreo ADCON1<3> y ADCSSL<15:0>.
- Determinar cómo serán asignadas las entradas a los canales de muestreo y retención, ADCHS<15:0>.

- Seleccionar la secuencia de muestreo y retención apropiada, ADCON1 <7:0> y ADCON3<12:8>.
- Seleccionar cómo se presentarán los resultados de la conversión en el buffer de resultado, ADCON1 <9:8>.
- Seleccionar el número de conversiones que se deben llevar a cabo para que se genere una interrupción, ADCON2<5:9>.
- Encender el módulo analógico digital, ADCON1<15>.

Para la configuración de las interrupciones del módulo se realizan las siguientes acciones:

- Poner a cero el bit ADIF.
- Seleccionar la prioridad de las interrupciones.

2.3.3.1 Selección de la fuente de voltaje de referencia

El voltaje de referencia utilizado en el módulo de conversión analógico digital se selecciona con los bits de control VCFG<2:0> situados en ADCON2< 15:13>.

El voltaje de referencia alto (V_{REFH}) y el voltaje de referencia bajo (V_{REFL}) podrán ser las tensiones internas AV_{DD} y AV_{SS} o las tensiones V_{REF+} Y V_{REF-} , correspondientes a las patitas de entrada. En algunos dispositivos, las patitas de entrada de las tensiones de referencia deben ser compartidas con las entradas AN0 y AN1. Además, el módulo puede realizar conversiones con estas patitas de entrada cuando están siendo compartidas para V_{REF+} Y V_{REF-} .

Los voltajes de referencia que sean aplicados por las patitas anteriormente descritas, deben cumplir con ciertas especificaciones eléctricas, con el fin de no dañar el dispositivo.

2.3.3.2 Selección del reloj de conversión

El módulo analógico digital tiene un límite superior para la velocidad de conversión de datos. Para averiguar dicho límite se utiliza un periodo de reloj, T_{AD} , que es el encargado de determinar el tiempo de conversión, el cual es de 12 periodos de reloj, es decir, 12 T_{AD} por cada dato o muestra.

Para la obtención de esta señal de reloj se puede utilizar una derivación de la señal de reloj del tema, o bien la señal de un circuito RC interno.

La selección del periodo de la señal de reloj de conversión se realiza por software, utilizando para ello los seis bits de control ADCS<5:0>, situados en ADCON3<5:0>, obteniendo una amplia gama de elección entre las 64 opciones posibles.

La siguiente ecuación proporciona el valor de T_{AD} en función de los bits de control ADCS y del periodo de reloj del ciclo de instrucciones T_{CY} .

$$T_{AD} = \frac{T_{CY} * (ADCS + 1)}{2}$$

$$ADCS = \frac{2 * T_{AD} - 1}{T_{CY}}$$

Para una conversión analógica digital satisfactoria, el reloj de conversión analógico digital (T_{AD}) debe estar seleccionado de tal manera que por lo menos garantice un tiempo mínimo T_{AD} de 154 ns.

El conversor analógico digital tiene una fuente de señal de reloj de un circuito RC diseñado especialmente para su uso en conversiones. Esta fuente de señal de reloj deberá usarse cuando el dsPIC30F se encuentre en modo SLEEP ya que en este modo no se procesan instrucciones y ésta será la única señal de reloj disponible. Esta señal de reloj obtenida del oscilador interno se selecciona activando el bit de control ADRC, situado en ADCON3<7>.

2.3.3.3 Requerimientos del muestreo a/d

El tiempo total de muestreo para el conversor A/D se obtiene como la suma de tres tiempos parciales.

- Tiempo de adquisición: tiempo necesario para que la señal se muestree con precisión, es decir, tiempo invertido en atravesar los elementos acondicionadores de señal.
- Tiempo de conversión: tiempo que transcurre desde el momento en que se inicia la conversión de una entrada analógica hasta que se obtiene la salida digital correspondiente.
- Tiempo de transferencia: tiempo necesario para transferir el dato hasta la memoria del sistema.

2.3.4 Modulo PWM⁶

PWM son las siglas de <<Pulse Width Modulation>> o <<Modulación por anchura de Pulso>>. Esto se consigue modulando la anchura de pulso en un tren de pulsos.

2.3.4.1 Control de motores mediante PWM

El movimiento de un motor eléctrico se consigue mediante la variación continua de un campo eléctrico o magnético, dependiendo del tipo de motor, para obtener así un campo rotatorio. Esta variación continua se consigue alimentando adecuadamente los bobinados del rotor o del estator, según el tipo de motor, y variando dicha corriente de alimentación se consigue variar la velocidad del motor.

Mediante PWM se controla la corriente de alimentación del motor. Variando el porcentaje de tiempo de la señal rectangular en estado alto y bajo, es decir, variando la anchura de pulso de la señal, varía la potencia que se entrega al motor, con lo que la velocidad de giro puede ser controlada con mucha precisión.

2.3.4.2 Registros de configuración y control⁷

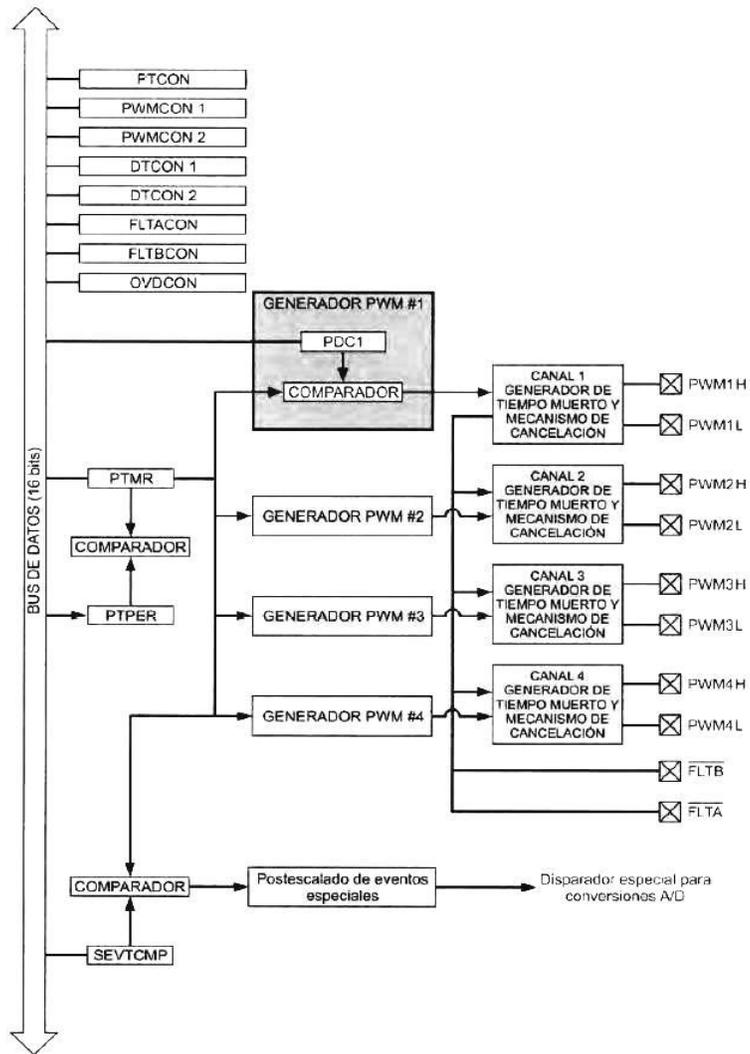
En la parte superior del esquema de la *Figura 7*. Se ubican los registros de configuración y los registros que controlan recursos específicos del módulo. Estos registros se deberán cargar con los valores apropiados en función del tipo de señal que se desee obtener. Todos estos registros están conectados al bus de datos del sistema, que tiene 16 bits, igual que el tamaño de los registros.

Además, existen tres bits de configuración para configurar el estado de Reset inicial y la polaridad de las patitas de entrada y de salida. Estos bits se encuentran en el registro de configuración de dispositivos FBORPOR.

⁶ *Ibíd.* p. 421-440.

⁷ *Anexo B*

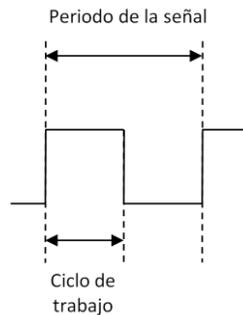
Figura 7. Esquema General del modulo PWM



Fuente: ANGULO USATEGUI, Op. cit., p. 425.

- **Registro PDCx.** Para generar una señal de pulsos de anchura de pulso variable lo primero que hay que determinar es el periodo de la propia señal y su ciclo de trabajo (anchura de pulso) *Figura 8*.

Figura 8. Pulso de anchura variable



Fuente: *Ibíd.* p. 428.

El ciclo de trabajo de la señal se cargará en el registro PDCx. Como el dsPIC tiene cuatro canales de PWM, se deberá cargar el ciclo de trabajo en el registro correspondiente al canal que se vaya a utilizar. Así para el canal 1 se utiliza el registro PDC 1. Dicho ciclo de trabajo no tiene por qué ser el mismo en todos los canales, sino que cada uno tendrá el suyo propio.

- **Registro PTPER.** En este registro se carga el periodo de la señal. El registro PTPER es único para todos los canales, siendo el periodo de la señal el mismo para los cuatro canales de PWM (esto es específico para el control de motores que no sean monofásicos).
- **Registro PTMR.** Este registro es un temporizador de 15 bits que sirve para la generación de la base de tiempo. El valor del temporizador se irá incrementando o decrementando con la señal de reloj que le llega. Dicho temporizador juega un papel importante en el funcionamiento del módulo, ya que su valor se irá comparando con el valor cargado en el PDCx (ciclo de trabajo) y a su vez con el valor de PTPER (periodo) para obtener la anchura de pulso deseada.
- **Registros Buffer.** Cada registro PDCx y el registro PTPER poseen un registro buffer asociado, cuya misión es permitir que cuando se produzcan cambios en el ciclo de trabajo de la señal, o en su periodo, estos cambios no afecten a la señal de salida de forma instantánea, sino que para que se lleven a cabo estos cambios se deben cumplir una serie de condiciones, las cuales se explicarán más adelante.
- **Disparo especial.** Esta señal se utiliza para sincronizar el funcionamiento del convertidor analógico-digital (CAD) con el del módulo PWM.

2.3.4.3 Generación de la base de tiempo

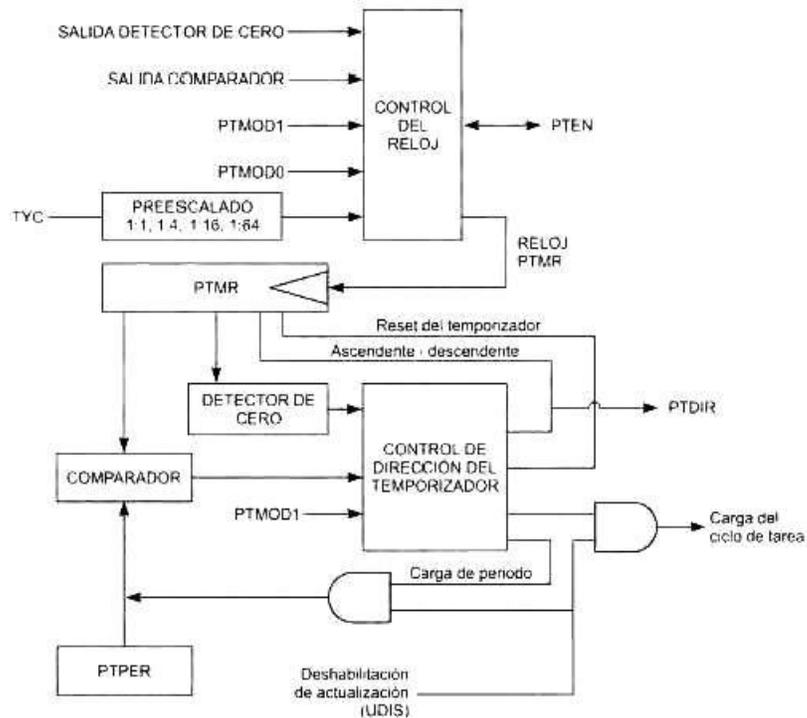
La base de tiempos establece los instantes en que finalizan los ciclos de trabajo, así como los instantes de comienzo de un nuevo periodo para la señal de salida deseada.

La base de tiempo del PWM está provista de un temporizador de 15 bits con un pre escalado y un post escalado. Los 15 bits del temporizador son accesibles a través del registro PTMR. Además, el bit PTDIR de este registro indica la dirección de la cuenta del temporizador. Si PTDIR está a '0', contará ascendentemente y si PTDIR está a '1', lo hará de forma descendente. La base de tiempo se activa o desactiva a través del bit 15 de PTCO.

El usuario podrá definir la base de tiempo estableciendo el periodo y el ciclo de trabajo deseado, valores que deberá cargar en los registros PTPER y PDCx. Hemos de recordar que el dsPIC posee 4 canales, por lo que puede disponer de hasta cuatro ciclos de trabajo diferentes. Además, el contador ofrece una serie de opciones de configuración modificables mediante los bits del registro PTCO.

- **Principio de funcionamiento de la base de tiempo.** El temporizador empieza a contar incrementando el valor de su registro asociado (PTMR), con cada pulso de la señal de reloj que le llega. La frecuencia del reloj puede ser definida por el usuario y podrá ser tan pequeña como la frecuencia de trabajo del dsPIC (FCY). Este valor contenido en el registro PTMR se compara cada TCY (periodo de trabajo del dsPIC) con el periodo de la señal deseada introducido en el registro PTPER. En el momento en el que el valor del temporizador coincida con el valor cargado en PTPER, comenzará un nuevo periodo. Al mismo tiempo, el valor del temporizador se compara cada TCY/2 con el valor del ciclo de trabajo deseado introducido en el registro PDCx. En el momento que el valor del temporizador coincida con el valor cargado en el registro PDCx, la salida cambiará de estado. Si estaba en nivel alto, pasará a nivel bajo y viceversa. En la *Figura 9* se puede observar el diagrama de bloques de la base de tiempo del PWM.

Figura 9. Diagrama de la base de tiempo del PWM.



Fuente: *Ibíd*⁷, p. 430.

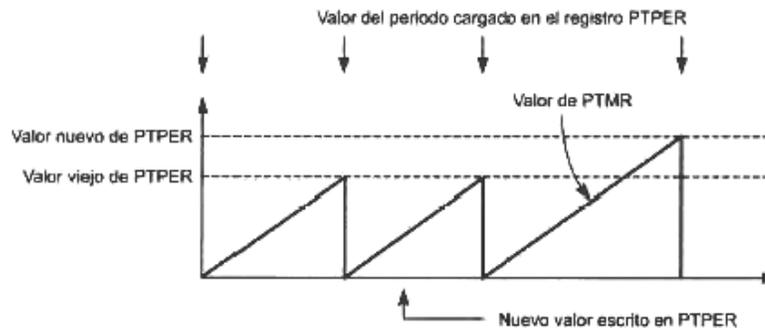
- **Modos de funcionamiento de la base de tiempo.** La base de tiempo del PWM se puede configurar para cuatro modos distintos de funcionamiento mediante los bits PTMOD del registro de control PTCON. El modo normal es el que se adaptó para la configuración del PWM.

Modo normal

En este modo, la base de tiempo de PWM cuenta ascendentemente hasta que se alcanza el valor del periodo contenido en el registro PTPER. Cuando sucede esto, se resetea el registro PTMR, comienza de nuevo la cuenta y se genera una interrupción. Esta secuencia se mantiene mientras el bit PTEN del registro PTCON esté activo. La *Figura 10* muestra éste modo de funcionamiento.

El post-escalado puede ser utilizado en este modo para reducir la frecuencia de las interrupciones.

Figura 10. Modo de funcionamiento normal de la base de tiempo



Fuente: *Ibíd.*⁷ p. 431.

2.3.4.4 Pre-escalado y Post-escalado de la base de tiempo

El pre-escalado lo soporta un divisor de pulsos que está a la salida del reloj y divide el número de pulsos de éste, permitiendo hacer más rápida la señal de salida PWM. El factor de división puede elegirse entre: 1:1, 1:4, 1:16 o 1:64 que se selecciona mediante los bits PTCKPS del registro de control PTCON.

El contador del pre-escalado se pone a '0' cuando ocurre cualquiera de las siguientes situaciones:

Escritura del registro PTMR.

Escritura del registro PTCON.

Reseteo de cualquier dispositivo.

- **Post-escalado.** La salida del detector de cero (que es el que detecta cuándo el PTMR llega a 0) puede ser post-escalada de manera opcional con un control de 4 bits (que permite escalar desde 1:1 hasta 1:16), con lo que se puede acelerar la frecuencia de generación de las interrupciones. El post-escalado es útil cuando el ciclo de tarea de PWM no necesita ser actualizado cada ciclo PWM. Al igual que en el pre-escalado, el contador del post-escalado se pone a '0' cuando se produce cualquiera de las siguientes situaciones:

Escritura del registro PWM.

Escritura del registro PTCON.

Reset de cualquier dispositivo.

2.3.4.5 Selección del periodo y del ciclo de trabajo

Para calcular el valor adecuado que hay que cargar en PTPER y en PDCx para conseguir la señal de salida deseada se deben aplicar las siguientes fórmulas:

$$PTPER = \frac{FCY}{FPWM \times Pre\ escalado} - 1$$

Mediante esta fórmula se obtiene el valor del periodo de la señal de salida deseada que hay que cargar en el registro PTPER en función de la frecuencia de trabajo del dsPIC (FCY), la frecuencia deseada para la señal de salida (FPWM) y el pre-escalado seleccionado.

$$PDCx = PTPER \times Ciclo\ de\ trabajo(\%)$$

Mediante esta fórmula se calcula el valor del ciclo de trabajo de la señal de salida deseada que hay que cargar en el registro PDCx, o lo que es lo mismo, la anchura deseada de los pulsos de la señal de salida. Este valor es función del ciclo de trabajo, dado en tanto por ciento del periodo de la señal y del valor cargado en PTPER hallado con la fórmula anterior.

2.3.4.6 Tipos de señales de salida.

El tipo de señal de salida de los generadores PWM depende del modo de funcionamiento establecido para la base de tiempo. Para cada modo de funcionamiento, el tipo de señal de salida será diferente, como se muestra en la *Tabla 2*.

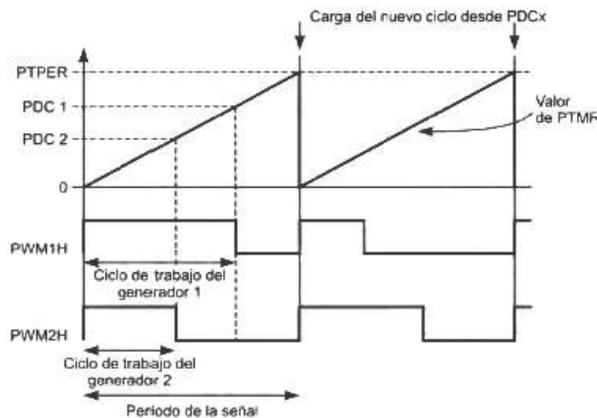
Tabla 2. Tipos de señales de salida para cada modo de funcionamiento de la base de tiempo

| Modo de funcionamiento de la base de tiempo | Tipo de señal de salida |
|---|-------------------------|
| Normal | Flanco alineado |
| Evento único | Pulso único |
| Conteo ascendente/descendente (los dos tipos) | Centro alineado |
| <i>Fuente: Ibíd.⁷ p. 434</i> | |

- **Flanco alineado.** El periodo y el ciclo de tarea de las señales de salida de los canales PWM, vienen especificados en los registros PTPER y PDCx respectivamente. El periodo es el mismo para todos los canales pero el ciclo de trabajo es específico de cada uno de ellos.

Cuando la base de tiempo trabaja en régimen normal, las salidas de todos los canales PWM que se encuentren habilitados, se activarán por nivel alto al comienzo del periodo PWM, es decir, cuando el PTMR valga 0. La salida de cada canal se desactivará cuando el valor de PTMR coincida con el valor del ciclo de trabajo cargado en su respectivo registro PDCx, esto se observa en la Figura 11.

Figura 11. Señal de flanco alineado.



Fuente: *Ibíd.* p.435.

Si el valor cargado en el registro PDCx es cero, la salida correspondiente estará inactiva durante todo el periodo PWM y si dicho valor es mayor que el contenido en el registro PTPER, la salida estará activada durante todo el periodo.

2.3.4.7 Modos de salida

Todos los canales PWM tienen dos salidas diferentes, la alta PWMxH y la baja PWMxL. El módulo PWM puede ser configurado para que estas salidas trabajen en modo complementario o en modo independiente.

- **Modo independiente.** En el modo independiente las dos salidas de un mismo canal son iguales. Este modo es seleccionado activando el bit PMOD correspondiente en el registro PWMCON 1. Los generadores de tiempos muertos son deshabilitados cuando se trabaja en este modo.
- **Modo complementario.** En el modo complementario, la salida PWMxL es la inversa de PWMxH. Este modo se selecciona poniendo a cero el bit PMODx correspondiente del registro PWMCON1. Cuando el dsPIC trabaja en este modo se pueden introducir en la señal tiempos muertos, que son cortos periodos de tiempo durante los cuales ambas salidas estarán inactivas.

2.3.5 GENERACIÓN DE TIEMPO MUERTO

La generación de tiempo muerto se habilita automáticamente siempre que el dsPIC trabaja en modo complementario.

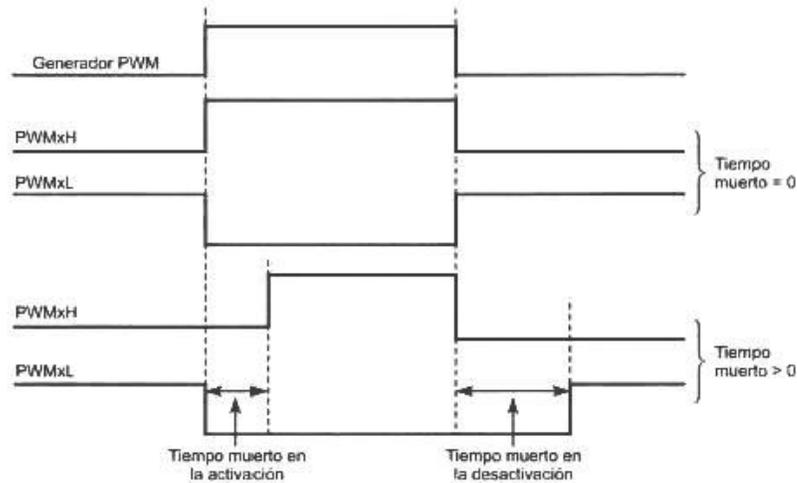
El dsPIC no puede hacer que las salidas PWMxH y PWMxL conmuten al mismo tiempo, por ello se introduce un tiempo muerto o tiempo de espera entre la activación/desactivación de una y la desactivación/activación de la otra.

- **Generadores de tiempo muerto.** Cada canal de PWM tiene un generador de tiempo muerto en el cual se pueden cargar dos valores diferentes para determinar dicho tiempo muerto. Estos valores se cargan en los seis bits DTB (unidad B) y DTA (unidad A) del registro DTCON 1.

El tiempo muerto a utilizar está determinado por los bits DTSxA (para la señal activa) y DTSxI (para la señal inactiva o inversa) del registro DTCON2. En función de estos bits se carga el valor de la unidad A o B en un contador descendente de 6 bits.

Además, cada unidad de tiempo muerto dispone de un detector de flanco ascendente y descendente conectado a la salida del comparador del ciclo de trabajo. De esta forma, cuando comienza un ciclo de trabajo (flanco ascendente) se pondrá en marcha el contador y se retrasará el inicio de la señal activa (PWMxH) hasta que éste llegue a cero. Y de la misma manera cuando termina un ciclo de trabajo (flanco descendente) se retrasará el final de la señal inactiva (PWMxL). Esta secuencia se puede ver claramente en la *Figura 12*.

Figura 12. Efecto del tiempo muerto sobre la salida PWM



Fuente: *Ibíd.* p. 438.

- **Cálculo de los valores de tiempo muerto.** El cálculo de los valores del tiempo muerto que se cargarán en DTB y en DTA viene definido por la siguiente fórmula:

$$DT = \frac{\text{Tiempo muerto}}{\text{Valor pre escalado} \times T_{CY}}$$

Existen cuatro posibles valores de pre escalado (1:1, 1:2, 1:4, 1:8) para la entrada de reloj que permiten establecer el rango adecuado para los tiempos muertos. La opción de pre escalado se puede seleccionar de forma independiente para cada uno de los dos valores de tiempo muerto (DTA y DTB) y los valores se eligen mediante los bits de DTAPS (para DTA) y DTBPS (para DTB) del registro de control DTCON1.

2.3.6 OTROS RECURSOS DEL MÓDULO PWM

- **Cambio manual.** Las señales de salida de los canales de PWM (PWMxH y PWMxL) normalmente evolucionan de manera automática según el tipo de configuración que se haya cargado en los registros correspondientes. Pero estas salidas también pueden ser puestas a '1' o a '0' por el programador 'manualmente'.

El registro OVDCON es el encargado de controlar este recurso. Posee 8 bits (POVDxH y POVDxL) que establecen por quién es controlada la salida, por el módulo PWM o por el

programador y otros 8 bits (POUTxH y POUTxL), donde el programador indicará el estado deseado para la señal de salida (nivel alto o bajo).

Habrá que tener cuidado cuando se trabaje en modo complementario, ya que no se podrán poner las salidas PWMxH y PWMxL en el mismo nivel. En caso de hacerlo, la salida PWMxH tendrá prioridad sobre la salida PWMxL.

Además, el cambio manual se puede sincronizar con la generación de la base de tiempo para que las salidas evolucionen según el tiempo controlado por el registro PTMR. Para ello se deberá poner a 1 el bit OSYNC del registro PWMCON2

- **Disparo especial.** El módulo PWM tiene un disparador especial que le permite sincronizar la base de tiempo con el convertidor analógico-digital. Este disparador se usa cuando el ciclo de trabajo viene dado por una señal analógica del exterior y nos interesa disponer de ella cada cierto intervalo de tiempo ya que la señal analógica (ciclo de trabajo) se convierte a formato digital aplicable al dsPIC en los instantes deseados, y este valor se puede cargar en el registro PDCx (registro del ciclo de trabajo). El tiempo de adquisición y conversión A/D puede ser programado para que se produzca en cualquier punto del periodo de PWM. Este disparador permite al usuario minimizar el retardo entre el instante en que se obtienen los resultados de la conversión de A/D y el instante en que se actualiza el valor del ciclo de tarea. El módulo PWM siempre producirá la señal de disparo y puede ser utilizada opcionalmente por el módulo A/D. Este disparador tiene asociado un post-escalado que permite un escalado de 1:1 a 1:16. El post-escalado es útil cuando no se necesita realizar conversiones A/D cada ciclo PWM. La salida del post-escalado se pone a cero cuando:

Se escribe en el registro SEVTCMP.

Se resetea un dispositivo.

El dsPIC posee un registro dedicado a este recurso, es el SEVTCMP. Este registro dispone de 15 bits en los que se carga el valor que se compara con PTMR (recordar que PTMR es un temporizador de 15 bits). El bit SEVDIR sólo se utiliza en caso de que la base de tiempo trabaje en modo ascendente/descendente e indica si el disparo se produce en la cuenta ascendente (SEVDIR=0) o en la descendente (SEVDIR=1)

2.4 SISTEMAS DE CONTROL⁸

El control automático se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de fabricación.

Los avances en la teoría y la práctica del control automático proporcionan los medios para conseguir un comportamiento óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad, simplificar el trabajo de muchas operaciones manuales repetitivas y rutinarias, así como de otras actividades.

Los términos básicos manejados en los sistemas de control son:

Variable controlada y variable manipulada: La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado.

Planta: Puede ser una parte de un equipo; tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular.

Proceso: Operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un propósito determinado; es cualquier operación que se va a controlar.

Perturbación: Una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida del sistema.

Control realimentado: es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia.

2.4.1 Sistema de control en lazo abierto⁹

Es el sistema en el que la salida no tiene efecto sobre la acción de control; es decir; no se realimenta la salida para compararla con la entrada; el diagrama de bloques correspondiente al sistema de control en lazo abierto se observa en la *Figura 13*.

En el sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la

⁸ OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. 4ª ed. España: PEARSON EDUCACIÓN, 2003. p. 2-3.

⁹ *Ibíd.*⁸ p.6.

presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada.

Figura 13. Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo abierto.



Fuente: Autor.

2.4.2 Sistema de control en lazo cerrado¹⁰

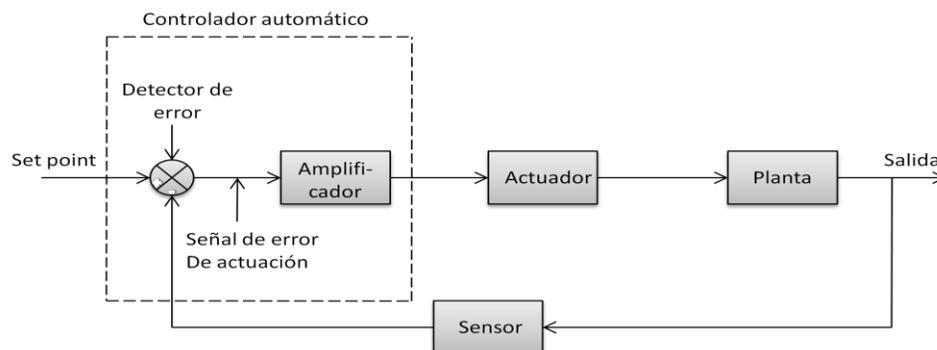
También llamado sistema de control realimentado. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado.

En la *Figura 14*. Se observa un diagrama de bloques de un sistema de control industrial en lazo cerrado que consiste en un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición).

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado respecto del de lazo abierto es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema.

Un buen sistema de control de lazo cerrado reduce la señal de error a cero, o un valor muy cercano a cero.

Figura 14. Diagrama de bloques de un sistema de control industrial.



Fuente: *Ibíd.*⁸ p.62.

¹⁰ *Ibíd.*⁸ p.7.

El controlador detecta la señal de error, que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficientemente alto. La salida de un controlador automático alimenta a un actuador, tal como un motor o una válvula neumática, un motor hidráulico o eléctrico.

2.4.3 Controlador¹¹

Es un componente que compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia, determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control.

El tipo de controlador debe decidirse basándose en la naturaleza de la planta y las condiciones de operación.

2.4.3.1 Modos de control en sistemas industriales de lazo cerrado¹²

La forma en la que el controlador reacciona ante una señal de error es una muestra del modo de control. Resulta algo complicado realizar clasificaciones estrictas y rápidas de los modos de control, pero generalmente se acepta que existen cinco modos básicos:

1. Encendido-Apagado.
2. Proporcional.
3. Proporcional más integral.
4. Proporcional más derivativo.
5. Proporcional más integral más derivativo.

¹¹ *Ibid.*⁸ p.62.

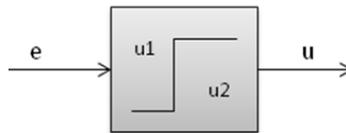
¹² MALONEY, Timothy J, MENDOZA BARRAZA, Carlos, GONZÁLEZ POZO, Virgilio. *Electrónica industrial moderna*. 5ª ed. México. 2006. p. 357 - 358

➤ **Encendido apagado (on/off)**

En el modo de control Encendido-Apagado, el dispositivo de corrección final sólo tiene dos posiciones o estados de operación. Por este motivo, el control Encendido-Apagado también es conocido como control de dos posiciones y como control bang-bang. Si la señal de error es positiva, el controlador envía al dispositivo de corrección final a una de sus dos posiciones. Si la señal de error es negativa, el controlador envía al dispositivo de corrección final a la otra posición.

La Figura 15 muestra el diagrama de bloques del control on/off

Figura 15. Diagrama de bloques de un controlador de encendido y apagado.



Fuente: Autor.

➤ **Control proporcional**¹³

En el sistema de posición proporcional, existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. La Figura 16 muestra el diagrama de bloques de éste tipo de controlador.

Figura 16. Diagrama de bloques de un controlador proporcional.



Fuente: Autor

Una de las ventajas de la acción de control proporcional frente al control encendido y apagado es que elimina la oscilación constante alrededor del punto de ajuste.¹⁴

¹³ CREUS SOLÉ, Op. cit., p. 490.

¹⁴ MALONEY, Op. cit., p. 366.

➤ Control Proporcional Integral

La parte del control proporcional posiciona la válvula en proporción con el error que existe. Luego la parte del control integral detecta que un pequeño error sigue persistiendo. A medida que transcurre el tiempo, la parte integral desplaza la válvula adicionalmente en la misma dirección, ayudando de éste modo a reducir el offset.¹⁵ El diagrama de éste controlador se puede observar en la Figura 17.

Con acciones de control Proporcional Integral no hay error de estado estable (offset) y la respuesta del controlador es estable y diferente de cero, pero puede producir oscilaciones de amplitud decreciente lenta.¹⁶

Figura 17. Diagrama de bloques de un controlador Proporcional Integral.



Fuente: Autor.

Donde T_i es el tiempo integral.

➤ Control Proporcional Derivativo

En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control; es decir, el movimiento de la válvula es proporcional a la velocidad de cambio de la variable.¹⁷

Proporciona en el sistema una mayor estabilidad relativa que se traduce en una respuesta transitoria con menor sobre impulso; sin embargo cuando la influencia del control proporcional derivativo es muy grande, el sistema de control tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta.¹⁸

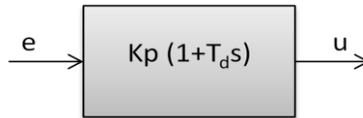
¹⁵ Ibid.¹⁴ p. 371.

¹⁶ Ibid.¹⁴ p. 374.

¹⁷ CREUS SOLÉ, Op. cit., p. 498.

¹⁸ MÁNUEL, Antoni, OLIVÉ, Joaquim, ROBERTLIVE BIEL, Soleanchez, SÁNCHEZ, Francesc J, LÁZARO, A.M, BIEL SOLÉ, Domingo, PRAT, Jordi. Instrumentación virtual: adquisición, procesado y análisis de señales. Cataluña. 2001. p. 219.

Figura 18. Diagrama de bloques de un controlador Proporcional Derivativo.



Fuente: Autor

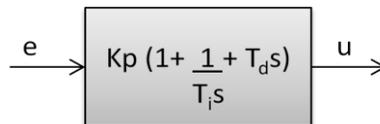
Donde T_d es el tiempo derivativo.

➤ Control Proporcional Integral Derivativo

Cuenta con las 3 acciones de control, para éste tipo de sistemas, un cambio en el ajuste de una acción influirá en las otras.¹⁹

La acción de este controlador permite eliminar el error en estado estacionario y conseguir así una buena estabilidad relativa del sistema de control. La mejora de estabilidad relativa implica una respuesta transitoria con tiempos de adquisición y de máximo sobre impulso pequeños.²⁰

Figura 19. Diagrama de bloques de un controlador Proporcional Integral Derivativo.



Fuente: Autor

2.4.3.2 Actuador

Es un dispositivo de potencia que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal de salida se aproxime a la señal de entrada de referencia.²¹

Generalmente la selección del actuador es el último paso en la escogencia del sistema de control.

¹⁹ CREUS SOLÉ, Op. cit., p. 504.

²⁰ MÁNUEL, OLIVÉ, ROBERTLIVE BIEL, SÁNCHEZ, LÁZARO, A.M, BIEL SOLÉ, PRAT, Op. cit., p. 220.

²¹ OGATA, Op. cit., p.63.

Hay cuatro tipos básicos de actuadores para control de estrangulación disponibles para los muchos estilos de válvulas:²²

➤ **Resorte y diafragma**

El actuador neumático de resorte y diafragma, muy común y muy sencillo es de bajo costo y muy confiable. Los tipos disponibles incluyen resortes ajustables o una amplia selección de resortes para adaptar el actuador a la aplicación. Los actuadores de resorte y diafragma tienen menos piezas movibles que se puedan dañar y, por ello, son muy confiables. Si tienen alguna falla, el mantenimiento es fácil. La mayor ventaja de estos actuadores es que son de falla sin peligro. Cuando se aplica el aire en la cubierta del actuador, el diafragma mueve la válvula y comprime el resorte. La energía del resorte mueve la válvula otra vez a su posición original cuando se corta el aire. En caso de pérdida de señal de presión en el instrumento o en el actuador, el resorte mueve la válvula a la posición original de falla sin peligro. En estos actuadores la válvula puede quedarse abierta o cerrada por falla debida a pérdida de la señal de presión. La principal desventaja de estos actuadores es su capacidad un tanto limitada. Gran parte del empuje del diafragma lo recibe el resorte y no produce ninguna salida.

➤ **Pistón neumático**

Son los más económicos en cuanto a la fuerza producida para accionar válvulas automáticas de control. Suelen funcionar con presión de entrada entre 50 y 150 psi. Aunque algunos tienen resortes de retorno, esta construcción tiene capacidad limitada. Los actuadores de pistón para servicio de estrangulación deben tener ubicadores de doble acción que en forma simultánea apliquen y quiten la carga en los lados opuestos del pistón para que se mueva hacia el lado de presión más baja. El ubicador detecta el movimiento del pistón y cuando llega a la posición requerida, iguala las presiones opuestas en el pistón para producir equilibrio. El actuador de pistón, neumático, es una excelente elección cuando se requiere un aparato compacto y de alto empuje. También puede ser muy eficaz cuando las condiciones variables del servicio necesitan una amplia gama de fuerzas de salida. Sus desventajas principales son que requieren aire a alta presión, la necesidad de emplear ubicadores en servicio de estrangulación y la carencia de sistemas integrados para falla sin peligro.

➤ **Hidráulicos o electrohidráulicos**

Tienen un motor y una bomba para enviar líquido a alta presión a un pistón que produce la fuerza de salida. El actuador electrohidráulico es excelente para servicio de estrangulación por su elevada rigidez (resistencia al cambio en las fuerzas en el cuerpo de la válvula) y su compatibilidad con las señales analógicas. La mayor parte de los actuadores electrohidráulicos puede producir empujes elevados, Sin embargo, tienen la desventaja de alto costo inicial, complejidad y tamaño. Los actuadores hidráulicos, aunque en esencia son lo mismo que los electrohidráulicos, difieren en que reciben la potencia desde una unidad externa de bombeo. Una instalación hidráulica central puede

²² GREENE, Op. cit., p. 172.

suministrar líquido a una presión de hasta 3000 psi. El control del actuador se logra con un servoamplificador y un sistema de válvulas hidráulicas. Este sistema puede dar máximo rendimiento como: rigidez excepcional, carrera rápida, empuje muy elevado y muy buenas características de respuesta dinámica. Pero su precio es muy elevado.

➤ **Motor eléctrico**

Consisten, por lo general, en motores con trenes de engranes y están disponibles para una amplia gama de torsiones de salida. Son muy ventajosos para instalaciones remotas en las cuales no hay disponible ninguna otra fuente de potencia.

Los actuadores sólo son económicos en tamaño pequeño y para aplicaciones normales. Los actuadores grandes funcionan con lentitud y pesan mucho más que sus equivalentes neumáticos. En la actualidad, no hay actuadores eléctricos de alto empuje, económicos que tengan acción de falla sin peligro, excepto el cierre en la última posición. Los actuadores para estrangulación tienen limitaciones de capacidad y disponibilidad. En aplicaciones para acción continua, de cuadro cerrado, en que se requieren cambios frecuentes en la posición de la válvula de control, quizá no resulte adecuado el actuador eléctrico debido, principalmente, a su limitado ciclo de trabajo.

2.4.3.3 Motor de continua.²³

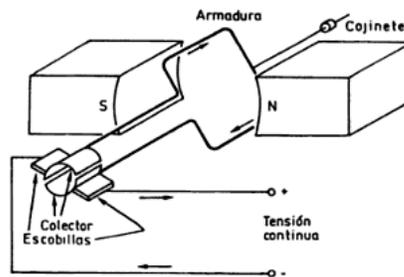
Un motor de continua es un actuador electromecánico que hace girar un eje basándose en la interacción entre dos dipolos magnéticos, uno fijo y otro dispuesto sobre una pieza que puede girar, denominada rotor. El dipolo fijo puede ser un imán permanente o un electroimán alimentado por corriente continua. El dipolo móvil es un electroimán consistente en una bobina, denominada armadura devanada sobre un soporte ferro magnético y alimentada por una corriente continua cuya polaridad se invierte a cada semiciclo de rotación por la acción de un conmutador.

Las características fundamentales de un motor son el par de arranque, la velocidad, el par de salida en régimen permanente, y su regulación de velocidad. Para las aplicaciones de baja potencia que requieran una velocidad pequeña, se comercializan modelos que incorporan ya engranajes reductores, pues las velocidades del eje directo son muy grandes.

Los pequeños motores de corriente continua de la *Figura 20*; alimentados directamente por una fuente de tensión continua (5, 12, 24 y 48 V son valores habituales) son unos de los actuadores más frecuentes en sistemas de baja potencia, y en particular en equipos informáticos periféricos. El objetivo de las señales de control que reciben es regular su par o su velocidad y el sentido de giro.

²³ PALLÁS ARENY, Ramón. Adquisición y distribución de señales. España: Marcombo. 1993. p. 51.

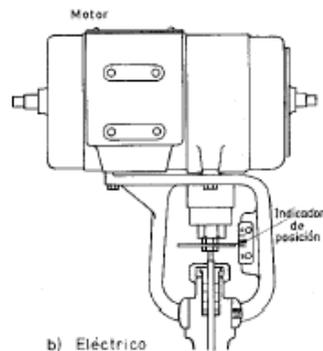
Figura 20. Estructura de un motor de corriente continua.



Fuente: *Ibíd.*²³ p. 52.

- **Servomotor eléctrico.** El servomotor eléctrico es un motor eléctrico acoplado al vástago de la válvula a través de un tren de engranajes como se puede observar en la *Figura 21*. El motor se caracteriza fundamentalmente por su par y por el tiempo requerido para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada y viceversa.²⁴

Figura 21. Actuador eléctrico



Fuente: CREUS SOLÉ, *Op. cit.*, p. 400.

2.4.3.4 Posicionador o elemento de medición

Es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, como un desplazamiento, una presión o un voltaje, que pueda usarse para comparar la salida con

²⁴ *Ibíd.* p. 412.

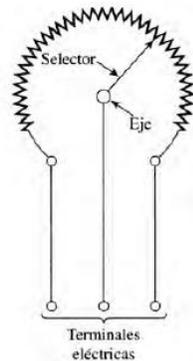
la señal de entrada de referencia. Este elemento está en la trayectoria de realimentación del sistema en lazo cerrado. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de realimentación del sensor o del elemento de medición.²⁵

➤ **Potenciómetro**²⁶

Es el transductor eléctrico más común. Se pueden utilizar aisladamente, o se pueden conectar a un sensor mecánico para convertir un movimiento mecánico en una variación eléctrica. Un potenciómetro es muy simple en concepto. Consiste de un elemento resistivo y un contacto móvil que puede posicionar en cualquier lugar a lo largo del elemento. Este elemento se denomina leva, selector o deslizador.

En la *Figura 22*, el elemento resistivo se dibuja en forma circular; esta representación sugiere la construcción física de la mayoría de los potenciómetros, en la cual el elemento resistivo realmente es circular y abarca un ángulo de alrededor de 300°. La posición del selector es entonces ajustada al girar el eje al cual el selector está adjunto.

Figura 22. Apariencia física del potenciómetro



Fuente: MALONEY, Op. cit., p. 401.

La gran mayoría de los potenciómetros son lineales. El término lineal significa que un movimiento mecánico dado del selector produce un cambio determinado en la resistencia, sin importar el lugar en que el selector se encuentre sobre el elemento. En otras palabras, la resistencia del elemento se distribuye uniformemente a lo largo del elemento.

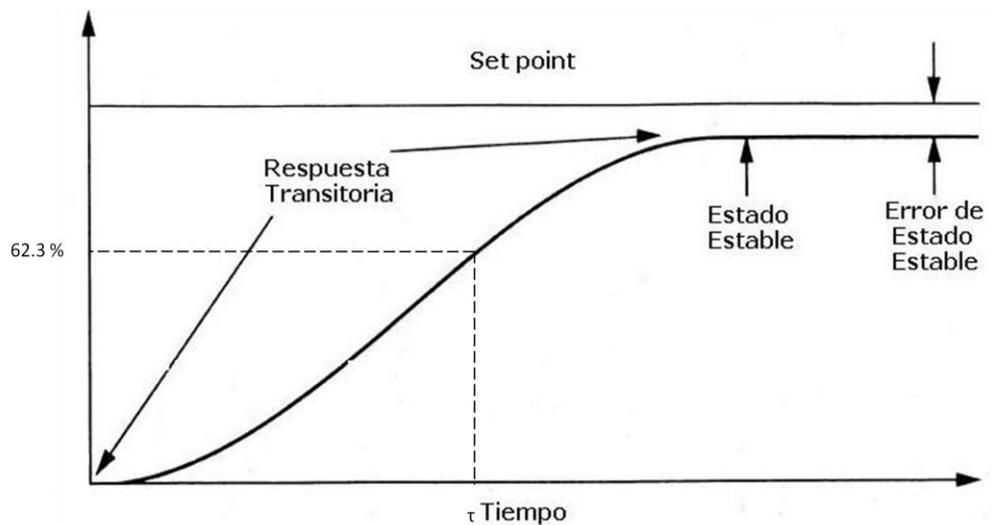
²⁵ OGATA, Op. cit., p.63.

²⁶ MALONEY, Op. cit., p. 400-401.

2.4.4 RESPUESTA TÍPICA DE UN SISTEMA DE CONTROL

En la *Figura 23* se muestra la respuesta típica de un sistema de control a una entrada escalón y sus respectivas características.

Figura 23. Respuesta típica de un sistema de control.



Fuente: Autor.

Valor deseado: O también llamado set point, es el valor de punto de ajuste, al cual se quiere llegar mediante la acción de control.

Respuesta transitoria: Se refiere a la respuesta que va del estado inicial al estado final.

Respuesta de estado estable: Es la manera como se comporta la salida del sistema conforme el tiempo tiende a infinito.

Error de estado estable: es la diferencia final entre el valor medido y el punto de ajuste o valor deseado.

Constante de tiempo (τ): Valor en el tiempo para el cual la salida alcanza el 62.3% del set point.

3 METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Buscando soluciones inmediatas que empleen menor tiempo en el mantenimiento de la servoválvula para que no interfieran con el proceso de aprendizaje del estudiante, el presente trabajo analiza el funcionamiento actual de la servoválvula proponiendo una nueva alternativa de tipo digital que permite ejercer un control más preciso sobre el dispositivo, logrando una disminución del riesgo del desacople mecánico y reduciendo los errores del sistema.

3.1 ANÁLISIS DEL CONTROL DE LA SERVO VÁLVULA

En el primer paso del desarrollo del proyecto se realizaron algunas prácticas propuestas en el Laboratorio de Control para comprender el principio de funcionamiento de la servoválvula, función y comportamiento dentro del sistema de control.

De estas prácticas se tomaron los datos que caracterizan al sistema que fueron útiles al momento de implementar el nuevo sistema de control digital:

3.1.1 Características del sistema

- Interfaz de proceso 38-200 que suministra una fuente de corriente gradual de 4 – 20mA.
- Conector DIN de 7 pines que enlaza la señal de la interfaz con la servoválvula. En la Tabla 3 se muestra la configuración del conector DIN.

Tabla 3. Conector DIN de 7 pines

| No. pin | Señal de salida de la Interfaz | |
|---------|--------------------------------|---------------------|
| 3 | Rojo | 15.11 |
| 4 | Negro | GND |
| 5 | Azul | -15.11 |
| 7 | Amarillo | Fuente de corriente |

Fuente: Autor.

- Motor de 12Vdc como actuador del sistema.

- Potenciómetro lineal de 10k de 10 vueltas que realimenta el sistema.
- Relación lineal entre la entrada y la salida.

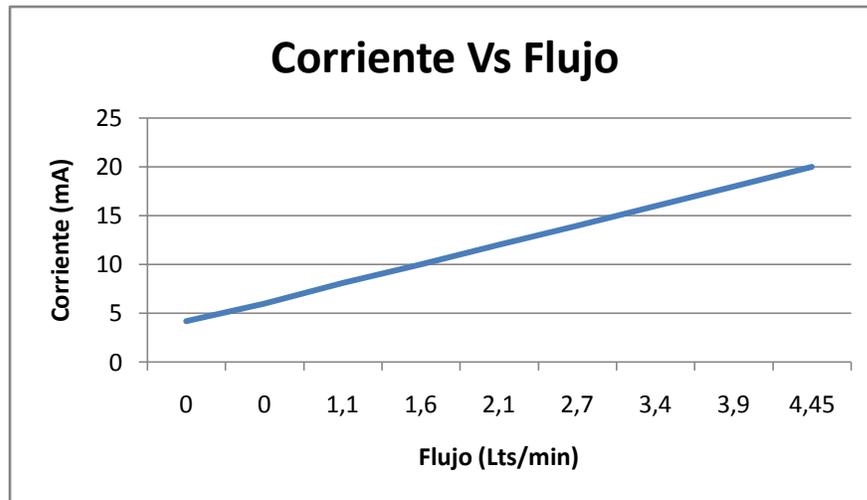
La *Tabla 4* muestra la relación entre Corriente y Flujo.

Tabla 4. Relación entrada salida.

| Datos del Módulo I Vs Flujo | |
|------------------------------------|----------------------|
| I (mA) | Flujo (Lts/m) |
| 4.2 | 0 |
| 6 | 0 |
| 8.1 | 1.1 |
| 10 | 1.6 |
| 12 | 2.1 |
| 14 | 2.7 |
| 16 | 3.4 |
| 18 | 3.9 |
| 20 | 4.45 |
| <i>Fuente: Autor</i> | |

Estos datos se tomaron con el fin de observar la respuesta del sistema, como se muestra en la *Figura 24*. Se tiene un comportamiento lineal, esto debido a que la relación de engranajes es 1:1.

Figura 24. Relación Corriente Vs Flujo



Fuente: Autor

3.1.2 CIRCUITO ANÁLOGO

Debido a que en el momento de realizar el análisis de ésta etapa, el circuito existente no se encontraba en funcionamiento, se optó por simular dicho sistema. Durante el proceso de simulación, surgieron inconvenientes en diferentes etapas del circuito. En el Anexo C se muestra el esquema del circuito.

A continuación se describe un análisis aproximado de la antigua etapa de control analógica de la servoválvula.

El set point proviene de un transmisor de 4-20mA que está acoplado al circuito por medio de un amplificador de instrumentación. La señal de realimentación viene desde un potenciómetro lineal adaptado a la servoválvula. Este potenciómetro está alimentado por una fuente estable de voltaje conformada por una referencia de tensión de 5V y un amplificador no inversor.

La señal de entrada y la realimentación provenientes de la salida del amplificador de instrumentación y del potenciómetro respectivamente, llegan a un amplificador operacional configurado como sumador inversor, de esta forma se puede calcular el error haciendo una comparación de voltaje.

Otra de las etapas del circuito es el control proporcional, la salida de éste amplificador actúa sobre la realimentación del controlador bidireccional de la salida.

Por último la etapa de salida que va directamente al motor, está principalmente conformada por un amplificador operacional de potencia en configuración no inversor y unos diodos que protegen al dispositivo de la saturación.

3.2 ANÁLISIS DE LA PARTE MECÁNICA

Teniendo un concepto general del funcionamiento de la servoválvula se procedió a analizar el acople mecánico de los elementos que integran el sistema:

3 piñones acoplados a la base del motor, al vástago de la válvula y al selector del potenciómetro lineal, una relación de engranajes 1:1. En la Figura 25 se muestra el sistema mecánico.

El potenciómetro posee dos topes mecánicos para su protección; se observó que el valor de resistencia del potenciómetro no utiliza toda la escala para la que viene diseñado (10 vueltas), El selector se desliza sólo un total de 5 vueltas.

El tipo de válvula implementada en el módulo es una válvula de aguja; éste tipo de válvulas son usadas para control preciso de bajos volúmenes de flujo.

Los topes mecánicos de la válvula respecto al potenciómetro son ajustables ya que los puntos inicial y final de resistencia se pueden ubicar manualmente.

De acuerdo al diseño propuesto, el impreso actual debe tener las mismas dimensiones del circuito del control análogo para que no interfiera con la estructura mecánica actual; éstas medidas son 5.5cm X 10.5cm.

Figura 25. Fotografía del sistema mecánico.



Fuente: Autor

3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El principal problema que presentaba la válvula era el desacople mecánico cuando la válvula llegaba a sus topes máximo y mínimo de apertura. El objetivo fue buscar una solución mecánica que redujera las fallas por desacople de los engranajes y que complementara la acción de control digital para obtener una mejor respuesta del sistema mecánico.

3.2.1.1 Solución al problema mecánico

Antes de la ejecución de las pruebas, una de las primeras condiciones que requiere el sistema mecánico es el ajuste del rango del potenciómetro, que consiste en asegurar valores máximo y mínimo de resistencia proporcionales al posicionamiento del vástago de la válvula evitando llegar a los topes mecánicos del potenciómetro.

Como primera opción se propuso el desplazamiento del piñón del vástago de la válvula, dándole un rango más amplio de movimiento en el eje y permitiendo que en la máxima apertura de la válvula el área de contacto de los piñones sea mayor.

Se observó que al momento de cerrar, la servoválvula tiene un sistema de autoprotección que consiste en un caucho que reviste al eje del motor, permitiendo, que en caso de cerrarse completamente la válvula y el motor se mantenga energizado, se produzca un deslizamiento del piñón en el eje del motor que protege al sistema mecánico de un sobreesfuerzo.

Caso contrario, al finalizar la prueba de apertura, este arreglo mecánico permitió que el sistema siguiera acoplado, produciendo la ruptura del tope mecánico del potenciómetro, debido a que el motor se mantuvo energizado.

Una segunda opción fue la ampliación del ancho del piñón acoplado al potenciómetro para lograr que en la máxima apertura de la válvula los piñones siguieran ensamblados.

Analizadas las dos opciones se procedió a evaluar las ventajas y desventajas de cada una de ellas, concluyendo que el desacople es una alternativa de protección del potenciómetro, por lo tanto, se descartó la segunda opción propuesta.

Debido a lo mencionado anteriormente, no se realizó ninguna modificación al sistema mecánico ya que cualquier variación perjudica directamente el funcionamiento del potenciómetro de realimentación.

3.3 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

De acuerdo al estudio de la parte mecánica y electrónica, se adopta un dsPIC30F4013 para el inicio del modelado del control del sistema, ya que este integrado es el más conocido en el medio.

La primera prueba fue comprobar el modo de funcionamiento del módulo de conversión A/D mediante unos leds ubicados a la salida del puerto B y con ellos, corroborar el equivalente en binario del valor de voltaje muestreado en una de las entradas análogas del dispositivo.

Los datos obtenidos para esta prueba se pueden observar en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Valores de conversión A/D

| Decimal | Binario | | | | | | | |
|---------|---------|---|---|---|---|---|---|---|
| 5V | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3.75V | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5V | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.25V | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0V | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: Autor.

Una vez verificados los valores equivalentes en binario de los voltajes, se realizó el muestreo de 2 canales de entrada y su comparación.

Una vez realizada esta prueba, se optó por cambiar el microcontrolador al dsPIC30F2010, debido a que éste cuenta con un módulo especial para el control de motores y a su vez es de menores dimensiones físicas, lo cual, permite la optimización del espacio en del diseño del impreso final.

El Anexo D define Las características y especificaciones del dsPIC30F2010.

3.3.1 Diseño y simulaciones del circuito digital

Tomando como base las condiciones que exige el sistema mecánico y habiendo definido el micro controlador, se especificaron otros elementos necesarios para el diseño.

3.3.1.1 Convertidor de Corriente a Voltaje

El integrado seleccionado fue el RCV420, que es un dispositivo que convierte una señal de entrada de 4-20mA en una señal de salida de 0-5V.

En este caso la señal de entrada es suministrada por la Interfaz de proceso 38-200 y la salida es el valor de referencia (set point) que va al micro controlador.

El RCV420 debe tener unos voltajes de alimentación de +12V y -12V, esto hace necesaria la implementación de unos reguladores de voltaje, ya que la fuente suministrada por la Interfaz es de +15V y -15V.

3.3.1.2 Reguladores

El diseño propuesto cuenta con tres reguladores; dos encargados de la alimentación del conversor corriente a voltaje, como se mencionó anteriormente y uno más que regula el voltaje de alimentación de 5V para el micro controlador.

Las referencias utilizadas son:

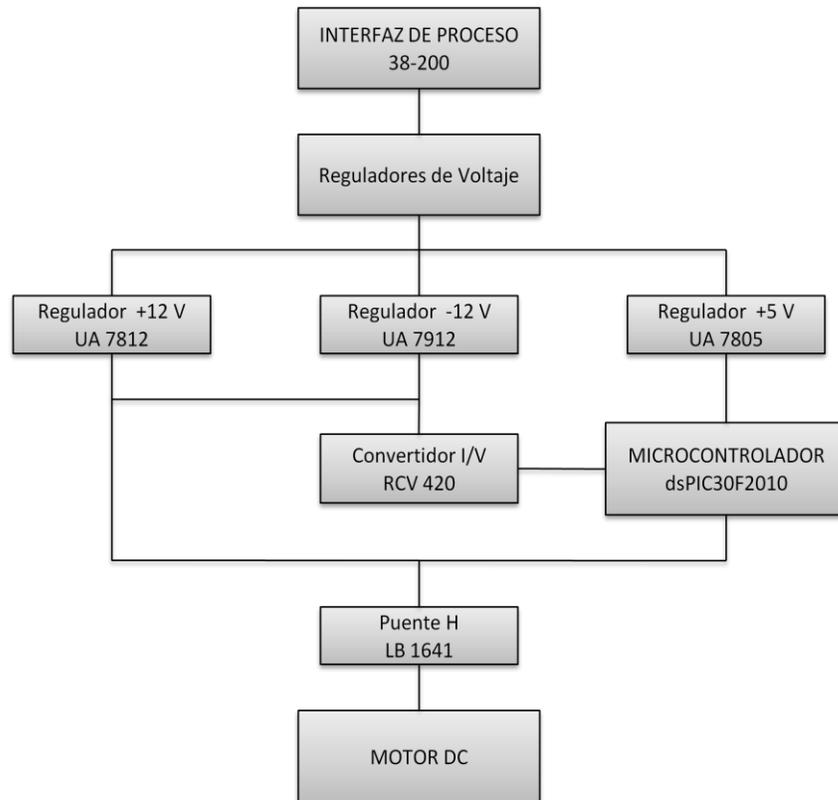
- ua7812: +12V
- ua7912: -12V
- ua7805: +5V

3.3.1.3 Controlador bidireccional del motor

El integrado utilizado es el LB1641, que contiene un puente H encargado de controlar el sentido de giro del motor de acuerdo a los datos enviados desde el micro controlador.

En la Figura 26 se observa el diagrama de bloques del diseño del circuito a implementar.

Figura 26. Diagrama de bloques del circuito digital



Fuente: Autor

Teniendo definidos los componentes necesarios, como primer paso para el desarrollo del proyecto se hicieron las pruebas correspondientes a cada uno de los dispositivos incluidos en el diseño.

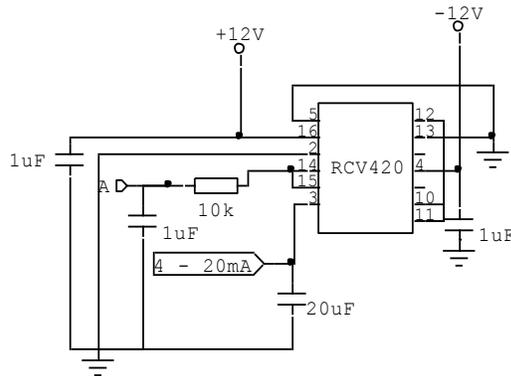
A continuación se describen las pruebas de los dispositivos mencionados anteriormente.

3.3.2 Pruebas

3.3.2.1 Prueba del convertidor Corriente a Voltaje (RCV420)

El diagrama de conexiones del RCV420 se muestra en la *Figura 27*.

Figura 27. Esquema de conexiones del RCV420.

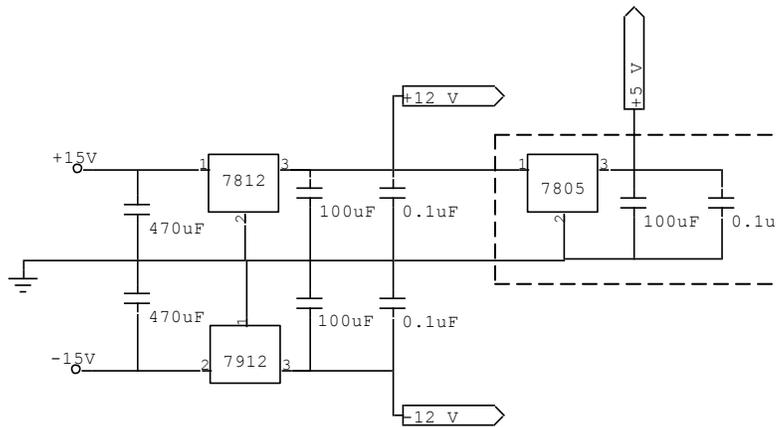


Fuente: Anexo E

➤ **Reguladores de voltaje**

Ya que la fuente de alimentación proveniente de la interfaz es de +15V y -15V, se implementó el esquema de la *Figura 27*. Que consiste en tres reguladores de voltaje para obtener las tensiones de alimentación requeridas por el RCV420 (+12V y -12V) y el dsPIC30F2010 (5V).

Figura 28. Diagrama de conexiones de los reguladores de voltaje.



Fuente: Anexo F

Los datos obtenidos de la prueba del RCV420 se muestran en la Tabla 6.

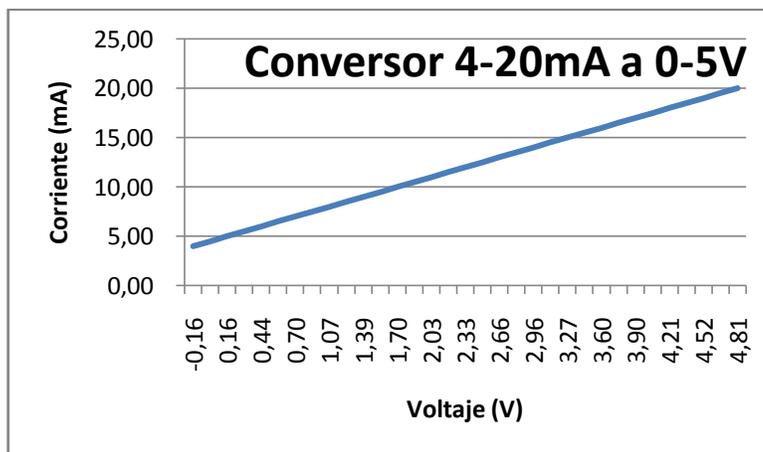
Tabla 6. Datos de entrada y salida del convertidor corriente a voltaje.

| DATOS CONVERTOR 4-20mA / 0-5V | |
|-------------------------------|--------|
| V[v] | I [mA] |
| 0 | 4.00 |
| 0.16 | 5.00 |
| 0.44 | 6.00 |
| 0.70 | 7.00 |
| 1.07 | 8.00 |
| 1.39 | 9.00 |
| 1.70 | 10.00 |
| 2.03 | 11.00 |
| 2.33 | 12.00 |
| 2.66 | 13.00 |
| 2.96 | 14.00 |
| 3.27 | 15.00 |
| 3.60 | 16.00 |
| 3.90 | 17.00 |
| 4.21 | 18.00 |
| 4.52 | 19.00 |
| 4.81 | 20.00 |

Fuente: Autor.

La gráfica obtenida se muestra en la *Figura 29*.

Figura 29. Grafica Corriente Vs Voltaje.



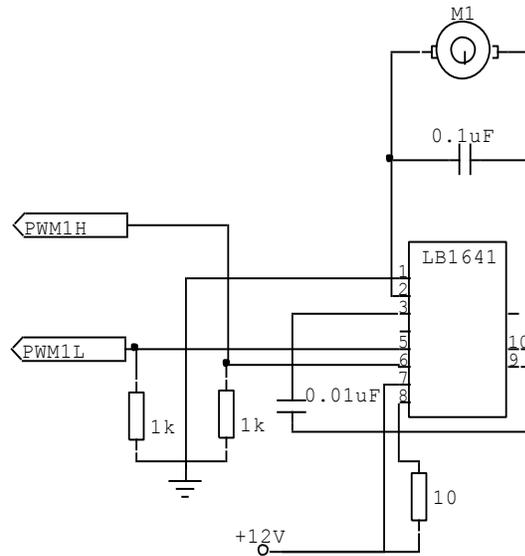
Fuente: Autor.

3.3.2.2 Prueba del Puente H (LB1641)

El LB1641 es un dispositivo controlador de dos entradas y dos salidas lógicas; su principio de funcionamiento consiste en: si la entrada uno está activa se acciona la salida uno haciendo girar el motor en un sentido, si la entrada dos está en uno, se produce la activación de la salida dos y el motor gira en sentido contrario, en caso de que las dos entradas estén en cero, el motor se desenergiza. Se debe tener en cuenta que en ningún momento las dos entradas deben coincidir, ya que esto produce un corto.

Las conexiones se muestran en la Figura 30.

Figura 30. Conexiones Del LB1641.



Fuente: Anexo G.

3.3.2.3 Pruebas del dsPIC30F2010

Inicialmente se configuró el módulo A/D para muestrear dos entradas análogas correspondientes a la señal de referencia proveniente del convertor corriente a voltaje (set point), y a la señal del potenciómetro (realimentación). Por programación se estableció que estas señales serían muestreadas 10 veces cada 10ms con el objetivo de obtener un valor más acertado de conversión, obteniendo un periodo de muestreo final T de 100ms.

Una vez configurado el módulo A/D del micro controlador se creó un algoritmo de control on/off; que permitió la observación del comportamiento del sistema mecánico con respecto al circuito electrónico; basado en éstas observaciones se ajustó manualmente

el estado inicial y final de resistencia del potenciómetro para evitar que un sobre esfuerzo mecánico lo afecte.

Después de fijar mecánicamente los toques del potenciómetro se acopló la válvula al módulo Feedback para hacer las pruebas de la relación entrada de corriente y salida de flujo. Por programación se establecieron valores supuestos máximos y mínimos de voltaje en el potenciómetro, que correspondían al cierre y apertura de la válvula; es decir, los valores de corriente para los cuales el flujo era 0Lts/min y 4.5Lts/min; a partir de estos valores, el sistema mecánico se frena con el fin de establecer una protección electrónica del potenciómetro, (elemento de realimentación del sistema).

Para el control on/off éste sistema es más vulnerable debido a que sólo permite que la válvula esté 100% abierta o 100% cerrada. Las primeras pruebas se realizaron con la intención de asegurar los verdaderos valores de voltajes de salida del potenciómetro para garantizar que a los puntos máximos y mínimo de apertura, los engranajes se mantuvieran acoplados, evitando inconvenientes con el sistema de control final a implementar; estos valores de voltajes inicialmente fueron de 4.51V máximo y 0.6V mínimo.

Posteriormente se implementó un algoritmo de control que posicionaba el potenciómetro basado en comparaciones al valor de la referencia. Al analizar el comportamiento del sistema se observó que se ejercía un control sobre la válvula, pero con rangos de variación de la referencia muy grande, también, se observó que al variar de una posición completamente cerrada a una completamente abierta el sistema permanecía oscilando.

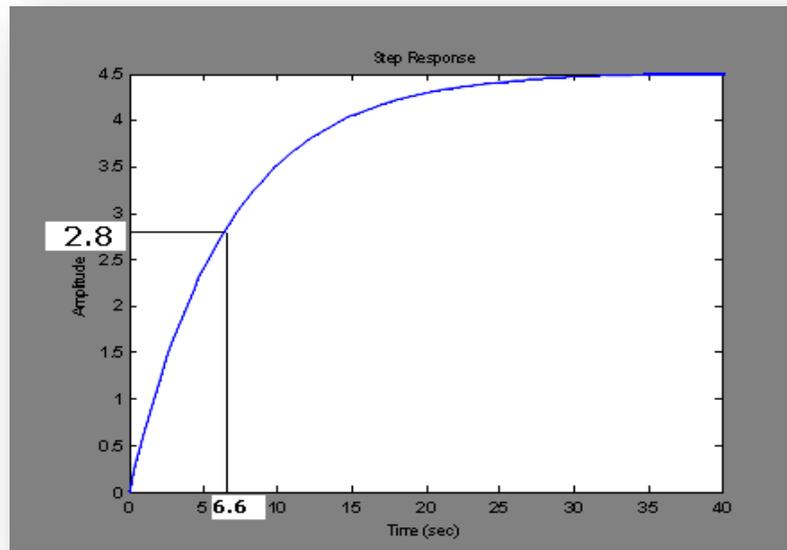
De acuerdo a los resultados obtenidos con las pruebas anteriores se optó por utilizar MATLAB para hallar el controlador adecuado. Previamente se debió hallar la ecuación de la planta.

El procedimiento para obtener la ecuación de la planta se describe a continuación.

Se tomó la respuesta del motor en lazo abierto; se graficó la respuesta y se obtuvieron los datos de voltaje y tiempo correspondientes al estado estacionario. De acuerdo a la respuesta obtenida se ubicó el valor equivalente al 62.3% del valor final y geoméricamente se halló el punto correspondiente a la constante de tiempo τ .

En base al comportamiento del sistema en lazo abierto se determinó el orden de la planta. La gráfica de la respuesta de la planta en lazo abierto se muestra en la Figura 31.

Figura 31. Respuesta de la planta en lazo abierto.



Fuente: Autor

Puede observarse que, el sistema es de orden 1 por lo que la ecuación de la planta es de la forma:

$$G(p) = \frac{K}{\tilde{T}s + 1}$$

Donde:

K = Valor de voltaje al cual la salida se hace constante.

\tilde{T} = Constante de tiempo.

De acuerdo a la *Figura 32* se tiene:

$$K = 4.51V$$

$$62.3\%(k) = 2.8V$$

Por gráfica se obtiene $\tilde{T} = 6.6s$

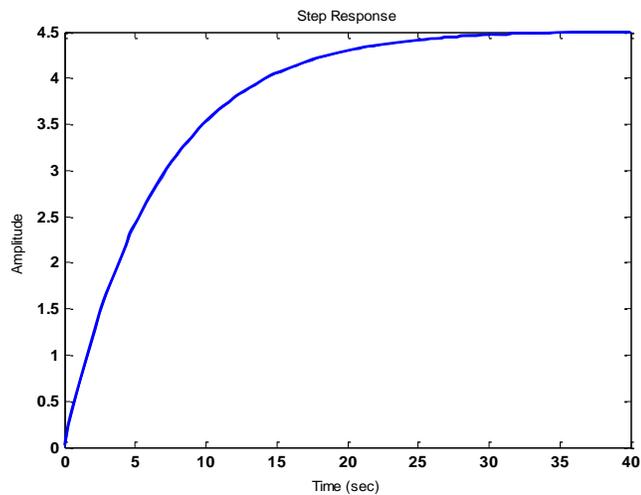
La ecuación de la planta es:

$$G(p) = \frac{4.51}{6.6s + 1}$$

Teniendo la ecuación de la planta se procedió, mediante MATLAB y con una entrada escalón unitario, a calcular la respuesta del sistema como se muestra en la *Figura 32*.

```
>> num=[4.51];  
>> den=[6.6 1];  
>> p=tf(num,den)  
Transfer function:  
4.51  
-----  
6.6 s + 1  
>> step(p)
```

Figura 32. Respuesta de la planta.

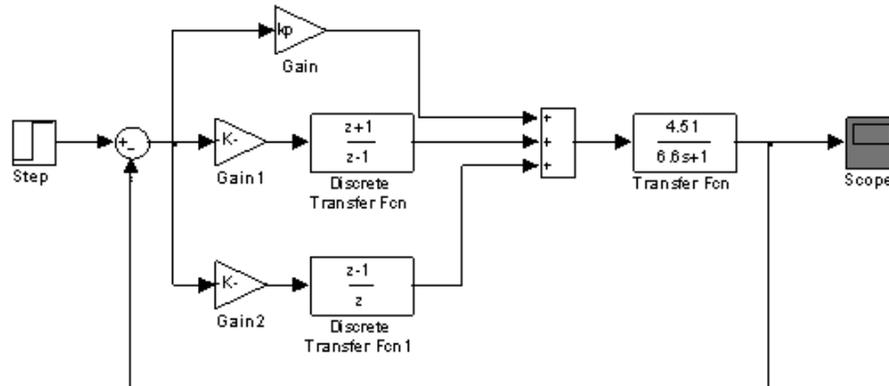


Fuente: Autor.

De acuerdo a la simulación de la planta, se determinó el uso del controlador PID ya que esta acción de control es la más completa en sistemas de éste tipo.

La Figura 33 muestra el esquema de simulación en SIMULINK del controlador PID y la servoválvula.

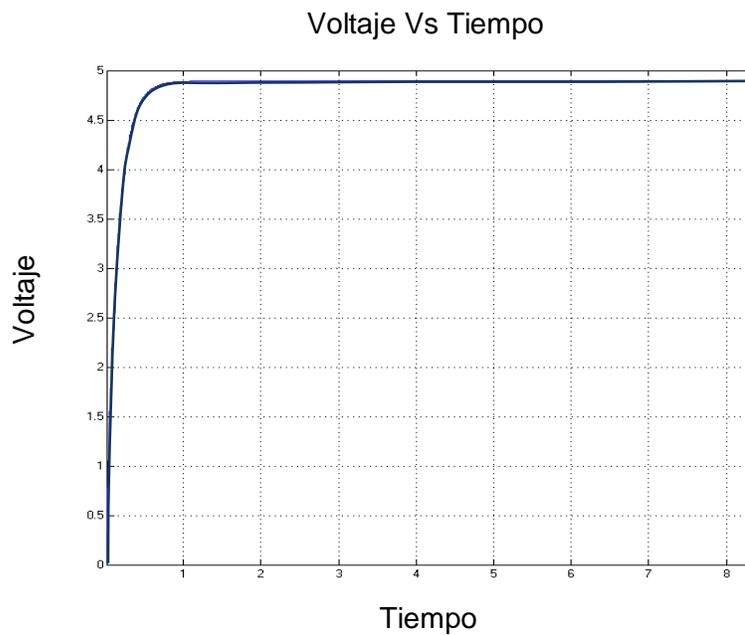
Figura 33. Diagrama de bloques del controlador PID



Fuente: Autor

Teniendo el modelo del controlador, en MATLAB, se le dieron valores a las constantes utilizadas. Como primer paso se usó sólo la acción proporcional, la salida del sistema se puede observar en la *Figura 34*.

Figura 34. Respuesta de la acción proporcional.

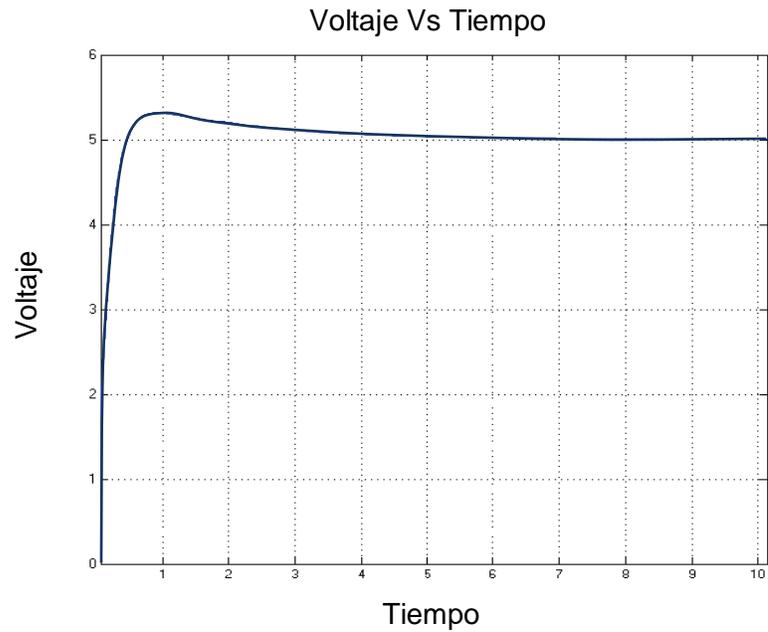


Fuente: Autor

Durante el proceso de simulación, se observó que al variar la constante K_p la respuesta tiende a generar un error de estado estacionario e_{ss} . En la *Figura 35* se observa que al incorporar la acción integral se corrige el e_{ss} . Pero se observó que al incrementar el valor de la Constante Integral (k_i) se presenta un valor de overshoot en la respuesta, un aumento en el tiempo de establecimiento t_s , y la respuesta del sistema emplea mayor tiempo en alcanzar el estado estable.

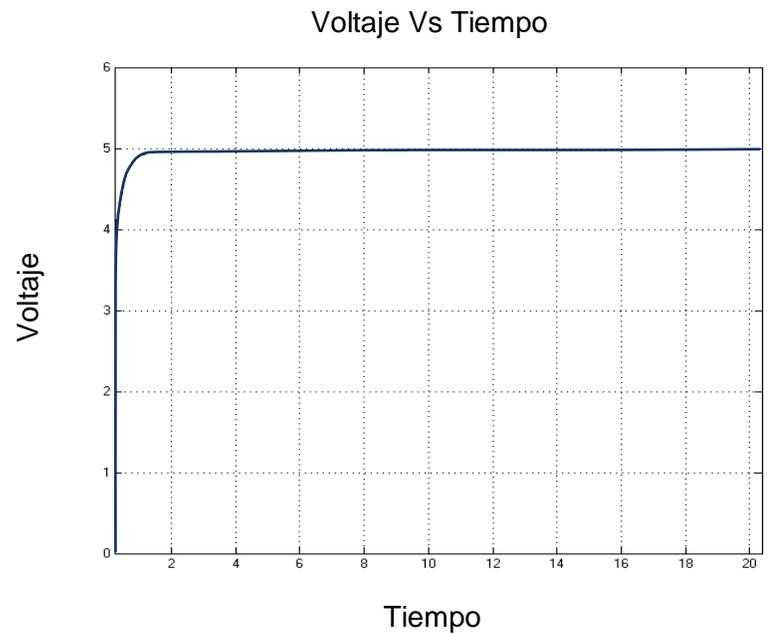
Para obtener una respuesta más conveniente del sistema se adaptó la acción derivativa que aumenta el tiempo de establecimiento pero disminuye el overshoot y alcanza en un menor tiempo el estado estable como se muestra en la Figura 36.

Figura 35. Respuesta a la acción proporcional integral.



Fuente: Autor

Figura 36. Respuesta a la acción PID



Fuente: Autor

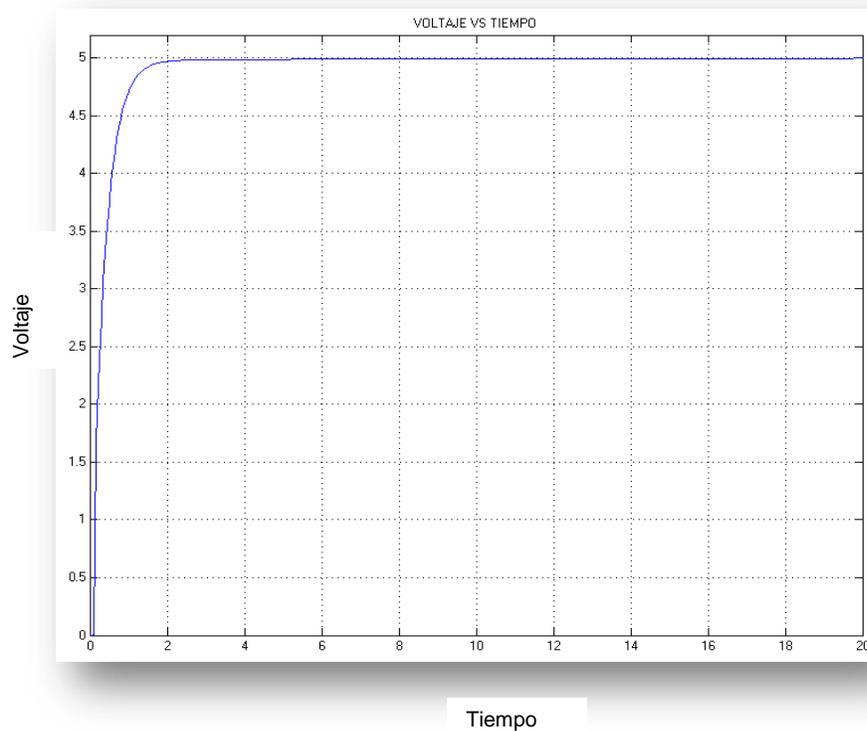
Estudiando los tipos de respuesta, el control más conveniente para implementar al sistema de la servoválvula es el PID y de acuerdo a los valores obtenidos en la simulación, cabe mencionar que los valores más adecuados para una buena respuesta del sistema son:

$$K_p = 6$$

$$K_i = 0.75$$

$$K_d = 0.3$$

Figura 37. Respuesta a la acción del PID final.



Fuente: Autor

De acuerdo a la *Figura 37*, la respuesta del sistema no presenta overshoot, ni e_{ss} , el tiempo de establecimiento es aproximadamente de 3 segundos y alcanza el estado estacionario en 4 segundos.

Una vez obtenidos los valores para los cuales la respuesta del sistema es buena, es necesario crear un algoritmo correspondiente a la ecuación del controlador PID.

El algoritmo del controlador PID digital en el plano Z, se muestra a continuación.

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = K_p + K_i \frac{T Z + 1}{2 Z - 1} + K_d \frac{Z - 1}{T_z}$$

$$D(z) = \frac{K_p(Z^2 - Z) + K_i \left(\frac{T}{2}\right)(Z^2 + Z) + \left(\frac{K_d}{T}\right)(Z^2 - 2Z + 1)}{Z^2 - Z}$$

$$M(Z)(Z^2 - Z) = \left[K_p(Z^2 - Z) + K_i \left(\frac{T}{2}\right)(Z^2 + Z) + \left(\frac{K_d}{T}\right)(Z^2 - 2Z + 1) \right] E(Z)$$

$$M(Z)(1 - Z^{-1}) = \left[K_p(1 - Z^{-1}) + K_i \left(\frac{T}{2}\right)(1 + Z^{-1}) + \left(\frac{K_d}{T}\right)(1 - 2Z^{-1} + Z^{-2}) \right] E(Z)$$

Ésta ecuación en el tiempo será:

$$m(k) = m(k - 1) + \left[K_p + K_i \left(\frac{T}{2}\right) + \left(\frac{K_d}{T}\right) \right] E(k) + \left[K_i \left(\frac{T}{2}\right) - K_p - 2 \left(\frac{K_d}{T}\right) \right] E(k - 1) + \left(\frac{K_d}{T}\right) E(k - 2)$$

De donde:

$m(k)$ = Salida actual

$m(k - 1)$ = Salida anterior

K_p = Constante proporcional

K_i = Constante integral

K_d = Constante derivativa

$E(k)$ = Error actual

$E(k - 1)$ = Error anterior

$E(k - 2)$ = Error dos veces anterior

3.3.3 Programación del algoritmo del PID

Al organizar la ecuación del PID se tiene:

$$FACTOR_E_K = K_p + K_i \left(\frac{T}{2} \right) + \left(\frac{K_d}{T} \right)$$

$$FACTOR_E_K_1 = K_i \left(\frac{T}{2} \right) - K_p - 2 \left(\frac{K_d}{T} \right)$$

$$FACTOR_E_K_2 = \frac{K_d}{T}$$

Teniendo la ecuación reducida de la forma:

$$m(k) = m(k-1) + FACTOR_E_K * E(k) + FACTOR_E_K_1 * E(k-1) + FACTOR_E_K_2 * E(k-2)$$

Se calcularon los valores aproximados de los términos descritos y se declararon como constantes al inicio del programa. A medida que el micro controlador hace nuevos muestreos y conversiones el programa actualiza los valores de las variables que intervienen en la ecuación del controlador.

3.3.3.1 PARÁMETROS GENERALES

De acuerdo a la información recopilada durante las etapas anteriores se seleccionan los parámetros de funcionamiento del dsPIC.

➤ **Reloj primario**

Para establecer el periodo del reloj se tuvo en cuenta una alta frecuencia de procesador debido a que las señales análogas se muestrean constantemente, por lo tanto, es indispensable emplear el menor tiempo posible en las operaciones necesarias del programa.

Para la implementación del diseño se empleó una frecuencia externa de XT= 4Mhz, dado que ésta frecuencia no es suficientemente alta para cumplir las condiciones anteriores, se determinó la configuración interna del dispositivo por medio de un PLL para llegar a la frecuencia deseada. Para el caso específico se estableció un PLL de 8 para obtener una frecuencia final de $F_{osc} = 32\text{Mhz}$ dado lo siguiente:

FCY (Frecuencia de un ciclo de instrucción)

$$FCY = \frac{F_{osc}}{4} = \frac{XT * PLL}{4} = \frac{4Mhz * 8}{4} = 8Mhz$$

TCY (Periodo de un ciclo de instrucción)

$$TCY = \frac{1}{FCY} = 125ns$$

De este modo, la base de tiempo del PWM se define:

$$Base\ de\ tiempo\ del\ PWM = TCY * prescaler = 125ns * 16 = 2\mu s$$

Y los valores para Periodo y Frecuencia para el PWM son respectivamente:

$$T_{m\acute{a}x\ PWM} = 2\mu s * 65536 = 131.072\ ms$$

$$F_{min\ PWM} = 7.62\ Hz$$

Se seleccionó esa frecuencia para las pruebas iniciales y a medida que se avanzó en el proyecto se determinó un incremento en la Frecuencia para tener un mejor control de la servoválvula.

De acuerdo al máximo valor de la salida del PID se asumieron diferentes valores de periodo PWM que fueron cargados al registro PTPER, se determinó un valor de 1200 como Periodo PWM.

Siendo PTPER 1200,...Véase el numeral 2.3.4.5...entonces la Frecuencia con la que definió el proyecto se calculó:

$$1200 = \frac{8\ Mhz}{F_{pwm} * 16} - 1$$

$$F_{pwm} = 416,6\ Hz$$

Debido a que la respuesta característica del sistema es muy lenta, (alrededor de 8 segundos) si se tiene un periodo de PWM muy pequeño en comparación con esta respuesta, se obtiene un mejor comportamiento.

En función de los topes mecánicos de la servo válvula, tanto para la máxima apertura así como para la mínima, se definen los valores de voltaje de realimentación que son directamente proporcionales al valor de resistencia del potenciómetro.

$$\text{Umbral máximo} = 4.51V$$

$$\text{Umbral mínimo} = 0.6V$$

La máxima respuesta en magnitud del controlador PID se da con la diferencia de estos dos valores umbrales, que corresponderá al máximo error de entrada al sistema.

El modulo conversor análogo digital del procesador seleccionado tiene una resolución de 10 bits, lo cual proporciona un máximo valor de conversión de $2^{10} = 1024$.

La resolución en voltios para un voltaje de referencia de 5V será:

$$\text{Resolución} = \frac{5}{1024} = \mathbf{4.88mV}$$

Para los umbrales se tiene entonces,

$$\text{Umbral digital máximo} = \frac{4.51}{\frac{5}{1024}} \cong 924$$

$$\text{Umbral digital mínimo} = \frac{0.6}{\frac{5}{1024}} \cong 123$$

De esta forma se tiene:

$$\text{Umbral digital máximo} = 924$$

$$\text{Umbral digital mínimo} = 123$$

De acuerdo a los valores digitales correspondientes a los valores umbrales se obtiene un máximo error de:

$$\text{Error máximo} = \text{Umbral}_{\text{Máx}} - \text{Umbral}_{\text{Mín}} = 924 - 123 = 688$$

Para calcular el máximo valor de salida del PID se introduce este valor de error máximo a la ecuación haciendo uso de Excel. *Tabla 7.*

Tabla 7. Salida del controlador PID

| CONTROLADOR PID | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|
| Salida Anterior PID | m(k-1) | 0 |
| Factor Proporcional | kp | 6 |
| Factor Integral | ki | 0.75 |
| Factor Diferencial | kd | 0.3 |
| Periodo de muestreo | T | 0.1 |
| Error actual | e(k) | 688 |
| Error anterior | e(k-1) | 0 |
| Error dos veces anterior | e(k-2) | 0 |
| Salida del Controlador PID | m(k) | 6217.8 |
| <i>Fuente: Autor</i> | | |

Teniendo el valor máximo de salida del controlador PID, se calculó un periodo inicial de prueba para el PWM aplicando la formula descrita a continuación:

$$T_{\text{inicial del PWM}} = \text{Base de tiempo PWM} * \text{máximo valor de salida del PID}$$

$$T_{\text{inicial del PWM}} = 2\mu\text{s} * 6217.8 = 12.4\text{ms}$$

Con éste Periodo inicial de PWM se realizaron las primeras pruebas del controlador, seguidamente se configuró el valor de salida del PID como el valor del ciclo de trabajo del PWM.

En condiciones ideales, a medida que el error tiende a cero la respuesta del controlador disminuye y de ésta manera se asume que el motor sigue moviéndose hasta que el

error sea cero, pero después de realizadas las primeras pruebas se observa que se necesita una cantidad de energía mínima suministrada al motor para que se mantenga en movimiento; es así como se estableció un mínimo valor de ciclo de trabajo que permitió mantener la energía necesaria al motor para que éste venciera su inercia. Después de las correcciones anteriores se observó que cuando el error se aproximaba a cero y se mantenía el mínimo de energía anteriormente justificado, el motor se mantenía en movimiento constante y prolongado hasta que el error es cero.

Cuando la servo válvula se llevaba de 100% abierta a 100% cerrada o viceversa, se observaban fluctuaciones en el motor que trataban de frenar el movimiento, al producirse este problema, se bajó el Periodo del PWM a la mitad para analizar lo que estaba ocurriendo; de ésta manera si se seguía presentando el problema se asumía que el periodo debería estar en un rango menor a 3100 ($\leq 6.2\text{ms}$) si se corregía el problema, entonces el rango del periodo debería estar entre 3100 y 6217 (6.2 y 12.4ms).

Al disminuir el Periodo a la mitad la respuesta mejoró notablemente; el movimiento fue más permanente y las fluctuaciones menores, de esta manera se continuó disminuyendo el Periodo del PWM hasta encontrar la mejor respuesta del sistema.

El valor del ancho de pulso se incrementó para obligar al motor a llegar a anular el error en menor tiempo.

Se observó que el motor después de alcanzar la posición deseada, por motivo del movimiento mecánico generaba un error de signo contrario, este valor generaba en la respuesta del PID una magnitud de signo opuesto invirtiendo el giro del motor.

Para corregir esto, se establece una tolerancia en el error, de manera que cuando la servo válvula se ubique dentro de éste valor de tolerancia, el motor se frene gracias a la inhabilitación del PWM.

Inicialmente cuando el error no era cero debido a que el motor no estaba lo suficientemente energizado para alcanzar ese valor, se mantenía un valor mínimo de ancho de pulso, el cual se tomó como referencia para el mínimo ancho de pulso inicial en las pruebas.

En éste punto la servoválvula respondía de forma aceptable pero se demoraba mucho para alcanzar el error cero.

Para obtener una respuesta rápida de posicionamiento de la servoválvula se disminuyó el periodo a 1200 y el mínimo ciclo de trabajo a 1000, obteniendo así un rango de control de PID muy pequeño. Esto quiere decir que la energía suministrada al motor será suficiente para posicionarlo de forma rápida dentro del rango de tolerancia y en el mínimo tiempo en función de la respuesta del PID.

El periodo de muestreo se disminuyó a 50ms; con esto se obtiene una mejor respuesta del controlador PID; esto se debe a que al incrementar la frecuencia de muestreo al doble se obtiene un mejor control del valor del error en referencia a la tolerancia de error prefijada.

Después de corregir los errores electrónicos presentados y de tener el sistema probado en protoboard, al probar el impreso de prueba, se presentaron fallas, al intentar variar

parámetros por software; se optó por probar la parte mecánica de otra válvula de las que cuenta la Universidad y se observó que la servoválvula trabajada anteriormente presentaba problemas de tipo mecánico; esto se pudo verificar al probar el diseño electrónico con la parte mecánica de otra válvula; el funcionamiento del sistema fue notablemente mejor. Para lograr que el nuevo acople no tuviera inconvenientes, se ajustaron algunos parámetros tanto en la parte mecánica como en la electrónica tales como los topes mecánicos del potenciómetro y los valores de voltajes umbrales.

Los nuevos valores de voltajes umbrales fueron máximo 3.93 V y mínimo 0.66V.

Los datos de corriente (entrada) y Flujo (salida) obtenidos, están referenciados en la *Tabla 8*.

Tabla 8. Relación entrada-salida del módulo.

| Relacion entrada/salida del modulo | |
|------------------------------------|-----------------|
| Corriente (mA) | Flujo (Lts/min) |
| 4 | 0 |
| 5 | 0 |
| 8 | 0.3 |
| 9 | 0.7 |
| 10 | 1.2 |
| 11.4 | 1.9 |
| 12.2 | 2.2 |
| 13.1 | 2.7 |
| 14.2 | 3.2 |
| 16.6 | 4 |
| 20 | 4.5 |
| <i>Fuente: Autor</i> | |

3.4 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

3.4.1 Función de transferencia del módulo FEEDBACK

El sensor de caudal se encarga de medir la velocidad o flujo del agua en Litros por minuto (Lts/min). La función de transferencia del sensor es una ganancia o constante y esta se determina mediante una grafica de la curva de voltaje que entrega el sensor frente al caudal en (L/min).²⁷ De acuerdo a los datos experimentales de la Tabla 9. Se determina según la siguiente ecuación la característica de funcionamiento del sensor.

$$V = K_c Q + V_o$$

Tabla 9. Relación Voltaje a Flujo.

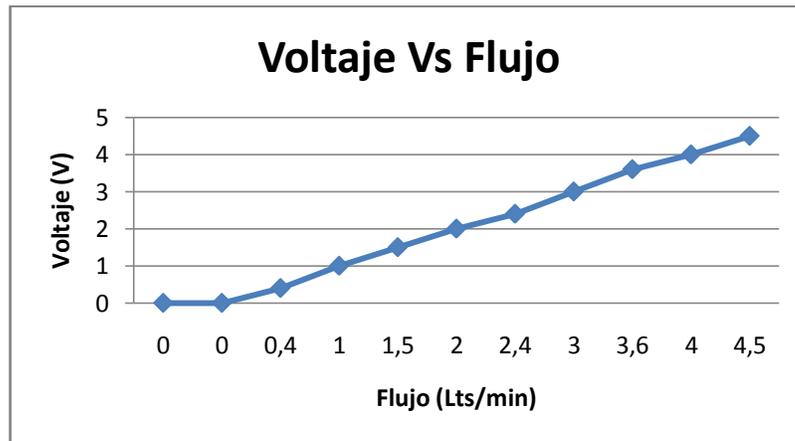
| Voltaje (V) | Flujo (Lts/min) |
|-------------|-----------------|
| 0.61 | 0 |
| 0.61 | 0 |
| 1.23 | 0.4 |
| 1.54 | 1 |
| 1.83 | 1.5 |
| 2.29 | 2 |
| 2.55 | 2.4 |
| 2.85 | 3 |
| 3.2 | 3.6 |
| 3.9 | 4 |
| 3.93 | 4.5 |

Fuente: Autor.

Donde K_c es igual a la pendiente de la curva, V_o corresponde al corte con el eje Y, Q el flujo (Lts/min) y V representa la señal de voltaje. Con la ecuación anterior se determina la constante del sensor, despejando, el resultado K_c , es de 0.685 V/ (Lts/min). En la Figura 38 se muestra la curva característica de Voltaje Vs Flujo, que es cerca de ser una línea recta.

²⁷ Fuente: VANEGAS RANGEL, Juan David. Control del módulo didáctico de nivel y caudal PROCON 38-001 de la empresa FEEDBACK Utilizando la herramienta REAL TIME WINDOWS TARGET de MATLAB. Bucaramanga. 2008, 56 – 59 p. Monografía (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingeniería y Administración. Departamento de Ingeniería Electrónica.

Figura 38. Relación de Voltaje contra flujo del módulo.



Fuente: Autor.

Donde se obtiene:

$$V_0 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{2.29 - 1.83}{2 - 1.5} = 0.92$$

$$Y - Y_0 = K_c(X - X_0) = Y - 2.55 = 0.92(X - 2.4)$$

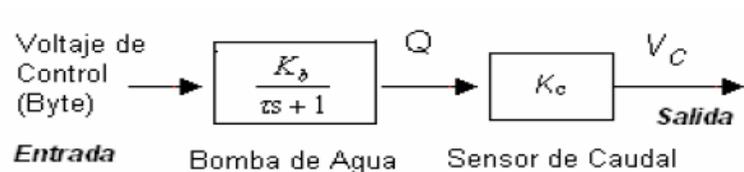
$$Y = 0.92X + 4.76$$

Se reemplazan los datos obtenidos en la ecuación de la característica de funcionamiento del sensor.

$$K_c = \frac{V - V_0}{Q} = \frac{2.29 - 0.92}{2} = 0.685$$

La figura 39 corresponde al diagrama de bloques de la planta para el control de flujo.

Figura 39. Diagrama de la planta para el control del flujo



Fuente: *Ibíd.*²⁷

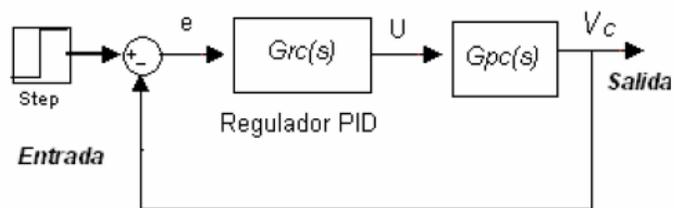
Donde K_b es 0.0213 Lts/ (min*V) y corresponde a la sensibilidad estática del motor de la bomba de agua, la constante de tiempo τ es aproximadamente igual a 0.16 segundos²⁸ y de acuerdo al procedimiento realizado anteriormente, la constante del sensor de flujo K_c es 0.685 (min*V)/Lts

De la siguiente ecuación se obtiene la Función de Transferencia de la planta para el control de Flujo.

$$G(p) = \frac{V_c}{\text{Voltaje de Control}} = \frac{K_b * K_c}{\tau s + 1} = \frac{0.0146}{s + 6.25}$$

En la Figura 40 se observa el diagrama de bloques del módulo Feedback de Nivel y Flujo PROCON 38-001, de acuerdo con éste esquema se determinó la Función de Transferencia del mismo.

Figura 40. Sistema en lazo cerrado con el regulador PID para el control de caudal



Fuente: *Ibíd.*²⁷

Con base en la ecuación del PID referenciada anteriormente,...Véase el numeral 4.3.2.3...Mediante MATLAB se obtiene la Función de Transferencia del módulo:

```
>>funcionz=feedback(C*gpz,1)
```

```
Zero/pole/gain:
0.0075351 (z-0.5024) (z-0.9937)
-----
(z-1) (z-0.7293) (z+0.005158)
```

²⁸ *Ibíd.*²⁷

3.4.2 Función de transferencia de la servoválvula

Mediante MATLAB se hizo el análisis correspondiente al lazo de control de la servoválvula, ya que el sistema es digital el estudio del proceso se realiza en tiempo discreto. El procedimiento se observa a continuación.

1. Teniendo la función de transferencia de la planta en laplace se procedió a llevarla al dominio de z.

```
>> n=4.51;
>> d=[6.6 1];
>> ps=tf(n,d)

Transfer function:
  4.51
-----
6.6 s + 1

>> pz=c2d(ps,0.05)

Transfer function:
  0.03404
-----
z - 0.9925

Sampling time: 0.05
```

2. Con base en la ecuación del PID referenciada anteriormente, ...Véase el numeral 4.3.2.3...y con los valores obtenidos para las constantes k_p , k_i , k_d y T , se genero la ecuación del controlador en el dominio de z.

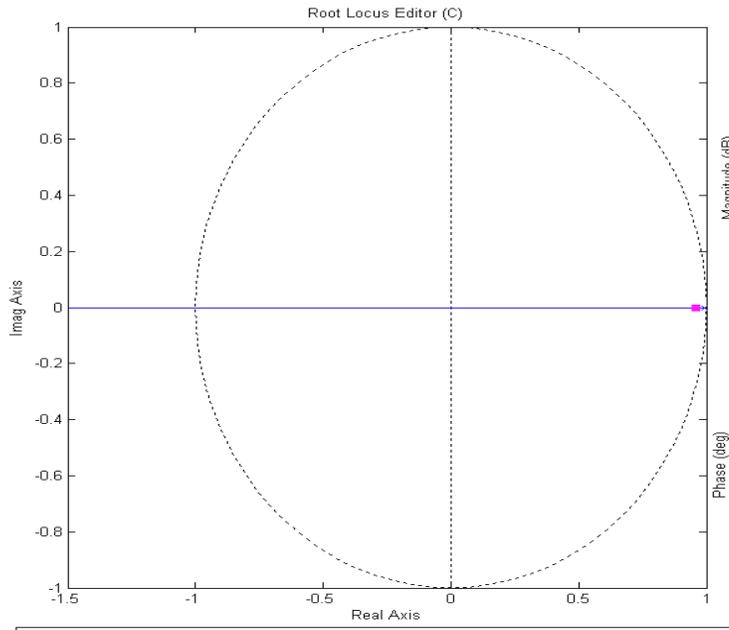
$$\gg C = 6 + 0.01875 \cdot \frac{(z+1)}{(z-1)} + 6 \cdot \frac{(z-1)}{z}$$

$$\begin{array}{c} \text{Zero/pole/gain:} \\ 12.0188 (z-0.5024) (z-0.9937) \\ \hline z (z-1) \end{array}$$

3. Utilizando la herramienta sisotool y teniendo la ecuación de la planta en Z, se puede observar la grafica del lugar geométrico de las raíces de la función de transferencia en lazo abierto en la *Figura 41*.

```
>> sisotool(pz)
```

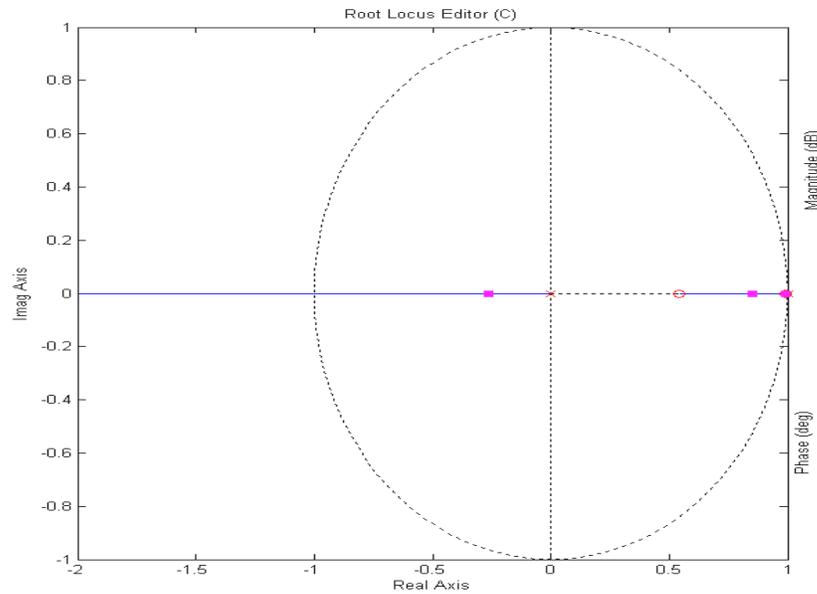
Figura 41. LGR de la planta en lazo abierto.



Fuente: Autor

- Mediante la herramienta de edición del compensador y conociendo los polos y ceros del controlador en el dominio de Z, se genero la nueva grafica del lugar geométrico de las raíces *Figura 42* con la acción del controlador sobre la planta.

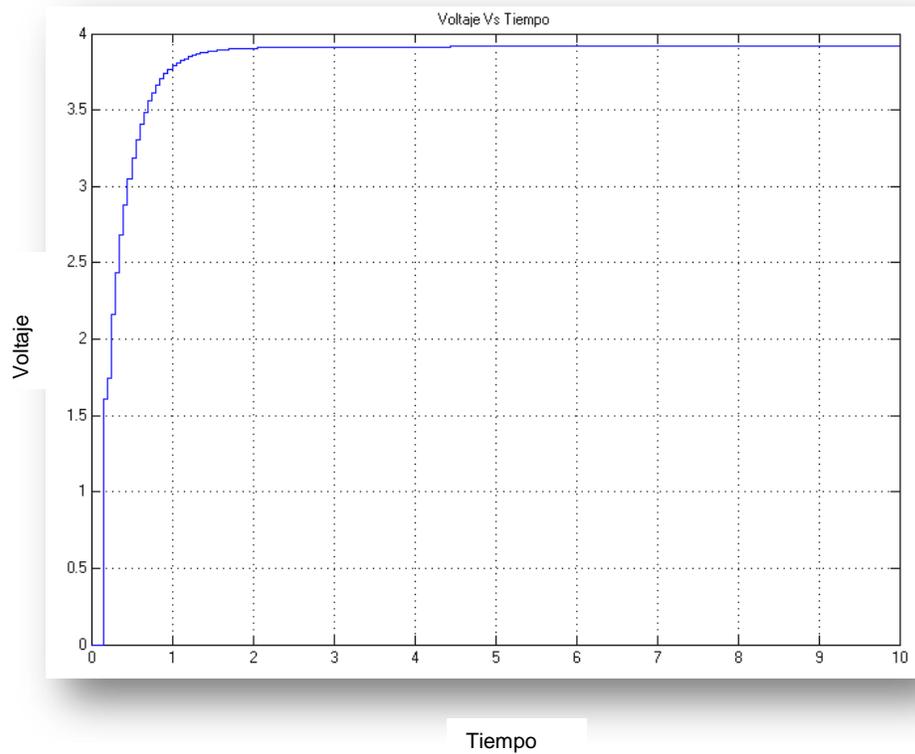
Figura 42. LGR del sistema.



Fuente: Autor

A continuación en la Figura 43 se observa la respuesta del sistema diseñado a una entrada escalón de 3.93V de amplitud.

Figura 43. Respuesta del sistema a una entrada escalón.



Fuente: Autor

5. Entonces se tiene que la Función de Transferencia de la servoválvula está dada por:

$$\gg \text{gz}=\text{feedback}(\text{C}*\text{pz},1)$$

Zero/pole/gain:

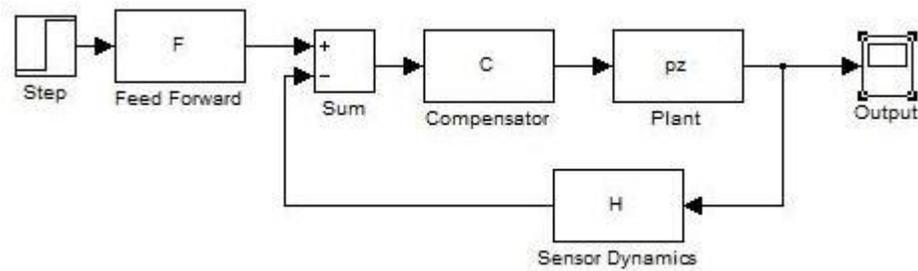
$$0.40909 (z-0.9937) (z-0.5024)$$

$$\frac{\quad}{(z+0.246) (z-0.8356) (z-0.9937)}$$

3.5 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL FINAL

El siguiente diagrama de bloques muestra el sistema final de control de la servoválvula. Diseñado en SIMULINK

Figura 44. Diagrama de bloques del sistema de la servoválvula.



Fuente: Autor

Donde:

>> C

Zero/pole/gain:

12.0188 (z-0.5024) (z-0.9937)

z (z-1)

>> pz

Transfer function:

0.03404

z - 0.9925

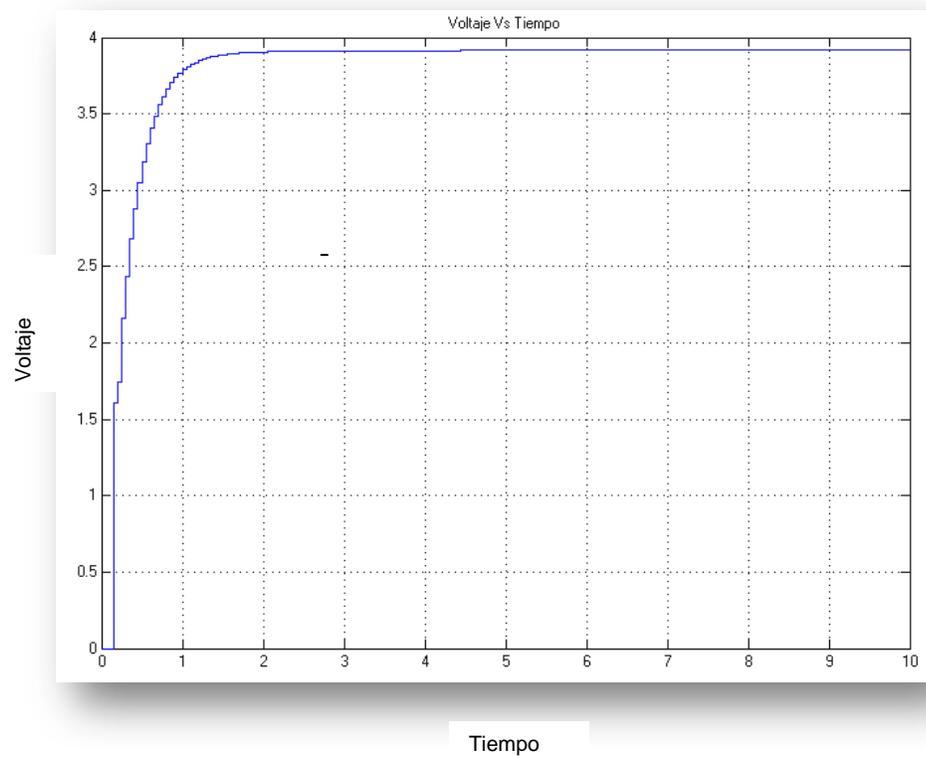
>> H

Zero/pole/gain:

1

Por lo tanto, la simulación de la respuesta del sistema está representada en la Figura 45.

Figura 45. Respuesta del circuito de control digital de la servoválvula



Fuente: Autor.

El Anexo J. muestra el esquema del impreso del circuito de control de la servoválvula.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

Del proyecto de grado se obtuvo un circuito y software de control de la servoválvula del módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001; el principio de funcionamiento es un controlador PID digital que se rige por las especificaciones originales del sistema y que cumple con las condiciones físicas particulares del módulo.

La *Figura 46* muestra el hardware del sistema implementado.

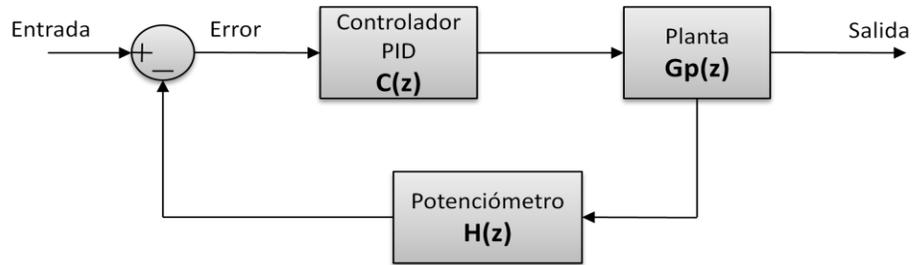
Figura 46. Circuito final de la servoválvula.



Fuente: Autor

La *Figura 47* se muestra el diagrama de bloques del circuito resultante, el circuito construido está constituido por un dispositivo convertidor de corriente a voltaje de referencia **RCV420**, un seguidor de tensión encargado de hacer un acople de impedancias entre la fuente y el microcontrolador **LM741**, un **dsPIC30F2010** cuya función es el control programable del sistema mediante la utilización de los módulos A/D y PWM, una etapa de potencia a cargo de un puente H de referencia **LB1641** que direcciona el sentido de giro del motor y por último, como elemento posicionador del sistema, un potenciómetro lineal encargado de realimentar el proceso.

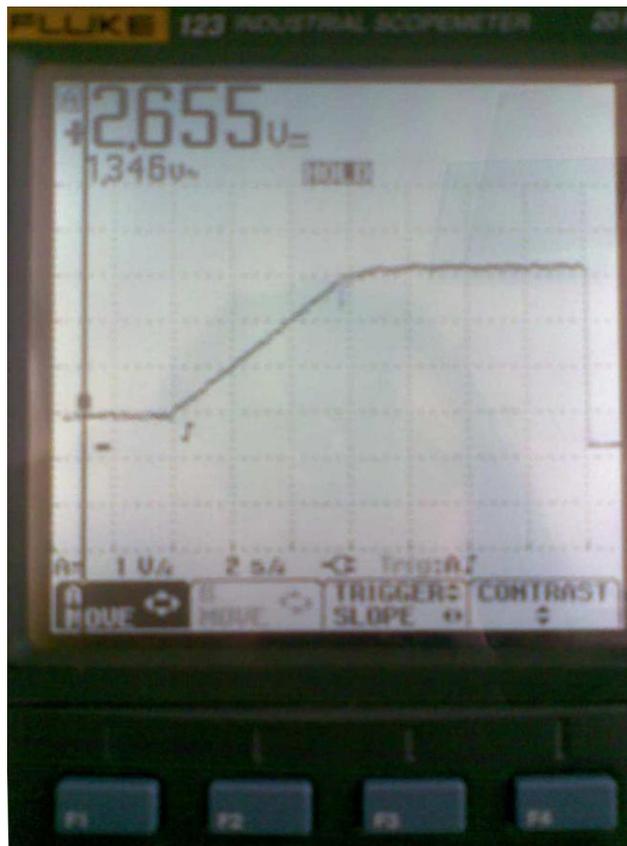
Figura 47. Diagrama de Bloques del circuito construido.



Fuente: Autor

En la *Figura 48* se puede observar la señal de salida del nuevo control de la servoválvula, de donde se especifican las características de la respuesta del sistema de primer orden que representa. De la gráfica se determina que la respuesta no presenta overshoot, posee un error de estado estable menor al 1%, tiene un tiempo de establecimiento alrededor de los 4 segundos y alcanza el estado estacionario aproximadamente a los 8 segundos, lo que deja en evidencia un sistema de velocidad de respuesta media pero que ofrece un buen control del posicionamiento de la servoválvula.

Figura 48. Respuesta del sistema de control de la servoválvula



Fuente: Autor

5 CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un circuito digital que controla la posición de apertura de la servoválvula que tiene un error de estado estable menor al 1%, un tiempo de establecimiento alrededor de los 4 segundos; una respuesta que alcanza el estado estacionario aproximadamente a los 8 segundos y cumple los requerimientos físicos del módulo. Éste circuito manipula el flujo que circula a través de la tubería de manera proporcional a la variación del set point obteniendo como resultado un dispositivo que cumplirá de manera similar con las funciones del circuito de fábrica.

Mediante la acción de control Proporcional Integral Derivativa y el módulo PWM del dsPIC se logró obtener una respuesta continua de la energía entregada al motor en función de la salida del controlador.

Se logró llevar al sistema al estado estacionario en aproximadamente 8 segundos, a pesar de que la respuesta es un poco demorada; se obtuvo un mejor desempeño de la servoválvula, ya que al hacer que el sistema respondiera en un menor tiempo la posición final del elemento de realimentación no era la adecuada por presentar fluctuaciones indeseables.

Se diseñó un algoritmo que realiza una acción de control PID y evita el desacople mecánico de los engranajes y protege los elementos que conforman el sistema.

Se implementó en el impreso diseñado un programador **incircuit** que facilita la reprogramación del dsPIC en caso necesario.

Uno de los objetivos propuestos en éste proyecto era el mejoramiento de la parte mecánica del sistema, pero debido a las pruebas realizadas se determinó que éste acople mecánico viene especialmente diseñado para proteger al potenciómetro de un sobre esfuerzo inducido por el motor, que anule los topes del elemento posicionador.

6 RECOMENDACIONES

Es primordial como primer paso para la instalación del circuito de control digital, el estudio del Anexo I; manual de instrucciones para la instalación y operación del circuito y software de control de la servoválvula del Módulo FEEDBACK de Nivel y Flujo PROCON 38-001.

La aplicación desarrollada puede ser mejorada mediante la implementación de una interfaz gráfica, de manera que se pueda obtener la respuesta del PID, los valores de set point y realimentación del sistema.

Desarrollar nuevas prácticas de laboratorio donde se puedan por medio de una aplicación software realizar cambios en los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa y programar diferentes valores de periodo del PWM, variar la tolerancia del error y modificar el valor de ancho de pulso mínimo para el mantenimiento del motor en marcha.

Utilizar el circuito de control diseñado como herramienta de estudio del control digital, ya que con éste modelo se podrán analizar las diferentes ventajas que presenta este tipo de control frente al análogo convencional.

BIBLIOGRAFÍA

ANGULO USATEGUI, José María, GARCÍA ZAPIRAIN, Begoña, ANGULO MARTÍNEZ, Ignacio, SÁEZ, Javier Vicente. Microcontroladores avanzados dsPIC. España, 2006. P. 361-377, 421-440.

CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ª ed. España: Marcombo, 1997.p. 400, 430.

DS70046E, DsPIC30F, Family Reference Manual. © 2006 Microchip Technology Inc.

FEEDBACK INSTRUMENTS LTDS, 990620, Manual: 38-001. England.

GREENE, Richard W. Válvulas: selección, uso y mantenimiento. McGraw-Hill, 1992, 1997.p. 19-20, 172, 255.

MALONEY, Timothy J, MENDOZA BARRAZA, Carlos, GONZÁLEZ POZO, Virgilio. Electrónica industrial moderna. 5ª ed. México. 2006. p. 357-358, 371, 374, 400-401.

MÁNUEL, Antoni, OLIVÉ, Joaquim, ROBERTLIVE BIEL, Soleanchez, SÁNCHEZ, Francesc J, LÁZARO, A.M, BIEL SOLÉ, Domingo, PRAT, Jordi. Instrumentación virtual: adquisición, procesado y análisis de señales. Cataluña. 2001. p. 219-220.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. 4ª ed. España, 2003. p. 2-7, 62-63.

PALLÁS ARENY, Ramón. Adquisición y distribución de señales. España: Marcombo. 1993. p. 51-52.

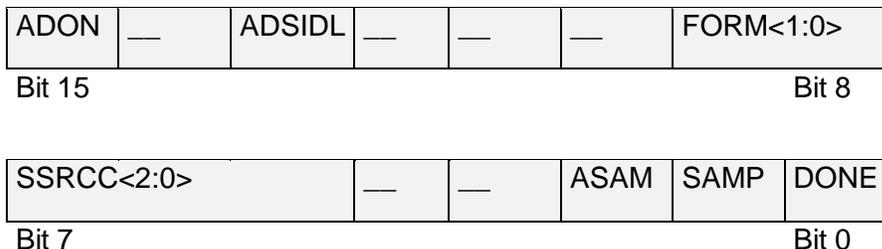
VANEGAS RANGEL, Juan David. Control del módulo didáctico de nivel y caudal PROCON 38-001 de la empresa FEEDBACK Utilizando la herramienta REAL TIME WINDOWS TARGET de MATLAB. Bucaramanga. 2008, 56 – 59 p. Monografía (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingeniería y Administración. Departamento de Ingeniería Electrónica.

Anexo A.

Registros de control del Módulo A/D del dsPIC30F.

ADCON1. En la *Figura 1* se describen los bits que contiene el registro ADCON1.

Figura 49. Bits del registro de configuración ADCON1.



Fuente: Autor

- **ADON:** Es el bit que controla el funcionamiento del conversor analógico digital.
1 = El módulo A/D está operativo.
0 = El módulo A/D está apagado.
- **ADSIDL:** Bit dedicado a permitir el funcionamiento en modo IDLE.
1 = Detención del módulo cuando se entra en modo IDLE.
0 = Continúa funcionando el módulo en modo IDLE.
- **SIMSAM:** Bit que indica muestreo simultáneo (sólo aplicable cuando CHPS = 01 o 1X).
1 = Muestra CH0, CH1, CH2, CH3 de forma simultánea si CHPS = 1X, pero si el valor CHPS = 01 muestra CH0 y CH1 de forma simultánea.
0 = Muestra múltiples canales individualmente de forma secuencial.
- **ASAM:** Es el bit de auto-inicio de muestreo del conversor.
1 = La captura comienza inmediatamente después de que finalice la última conversión. El bit SAMP es manejado automáticamente.
0 = La captura se inicia cuando el bit SAMP se pone a uno.
- **SAMP:** Es el bit que permite el comienzo del muestreo.
1 = Al menos uno de los amplificadores de muestreo y retención está tomando muestras.
0 = Los amplificadores de muestreo y retención no están en funcionamiento.

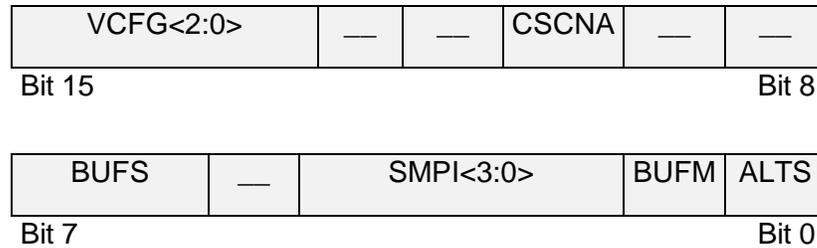
Cuando ASAM = 0, si se escribe un '1' comienza el muestreo, y cuando SSRC = 000, escribiendo un '0' finaliza el muestreo y comienza la conversión.

- DONE: Es el bit de estado que indica el final de la conversión.
1 = La conversión ha sido realizada.
0 = La conversión no ha sido completada.

Es puesto a cero por software o al comenzar una nueva conversión y el cambio de este bit durante el funcionamiento normal no afecta a las conversiones en proceso.

ADCON2. En la *Figura 2* se describen los bits que contiene éste registro.

Figura 50. Bits del registro de configuración ADCON2.



Fuente: Autor

- VCFG<2:0>: Bits encargados de configurar el voltaje de referencia, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 10. Combinación de los bits de VCFG para la selección del voltaje de referencia.

| | A/D V _{REFH} | A/D V _{REFL} |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 000 | AV _{DD} | AV _{SS} |
| 001 | V _{REF+} externa | AV _{SS} |
| 010 | AV _{DD} | V _{REF-} externa |
| 011 | V _{REF+} externa | V _{RF-} externa |
| 1XX | AV _{DD} | AV _{SS} |
| <i>Fuente: Autor</i> | | |

- CSCNA: Exploración de entradas seleccionadas.
1 = Entradas exploradas.

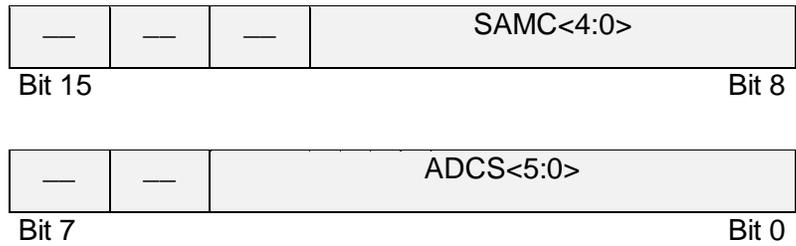
- 0 = Entradas no exploradas.
- CHPS<1:0>: Son los bits que indican qué canales están siendo utilizados en la conversión.
 - 1X = Convierte los canales CH0, CH1, CH2 y CH3
 - 01 = Convierte los canales CH0 y CH1.
 - 00 = Convierte el canal CH0.

Cuando el bit SIMSAM (ADCON1<3>) vale 0, varios canales son muestreados simultáneamente.

- BUFS: Bit que indica el estado de llenado del buffer. Sólo es válido cuando BUFM = 1 (ADDRESS queda dividido en dos buffers).
 - 1 = Las posiciones del buffer que se están llenando ocupan el rango 0x8-0xF. El usuario debe acceder a la información refiriéndose a 0x0-0x7.
 - 0 = Las posiciones del buffer que se están llenando comprenden el rango 0x0-0x7. El usuario debe acceder a la información refiriéndose a 0x8-0xF.
- SMP1<3:0>: Son los bits encargados para la generación de una interrupción con un número concreto de muestreos y conversiones.
 - 1111 = Se genera una interrupción con la finalización de la 16^a secuencia de muestreo y conversión.
 - 1110 = Se genera una interrupción con la finalización de la 15^a secuencia de muestreo y conversión.
 - 0001 = Se genera una interrupción con la finalización de la 2^{da} secuencia de muestreo y conversión.
 - 0000 = Se genera una interrupción con la finalización de la secuencia de muestreo y conversión.
- BUFM: Bit empleado para seleccionar el modo en el que quedará configurado el buffer.
 - 1 = El buffer quedará configurado como dos buffers de palabras de 8 bits (ADCBUF (15...8), ADCBUF (7...0)).
 - 0 = El buffer quedará configurado como un buffer de palabras de 16 bits (ADCBUF (15...0)).
- ALTS: Es el bit que indica la selección de una entrada alternativa del modo de muestreo.
 - 1 = Utiliza la configuración del multiplexor de entrada MUXA para el primer muestreo, para luego alternar entre los multiplexores de entrada MUXB y MUXA.
 - 0 = Utiliza en todo momento el multiplexor MUXA.

ADCON3. En la Figura 3 se observan los bits del registro ADCON3.

Figura 51. Se observan los bits del registro de configuración ADCON3.



Fuente: Autor

- SAMC<4:0>: Indican el tiempo del muestreo automático.

$$11111 = 31 T_{AD}$$

$$00001 = 1 T_{AD}$$

$$00000 = 0 T_{AD}$$

- ADRC: Es el indicador de la fuente del reloj de conversión.
1 = Señal de reloj RC interna del módulo A/D.
0 = Señal de reloj obtenida de la señal de reloj del sistema.
- ADCS<5:0>: Son los bits que realizan la selección del reloj de conversión.

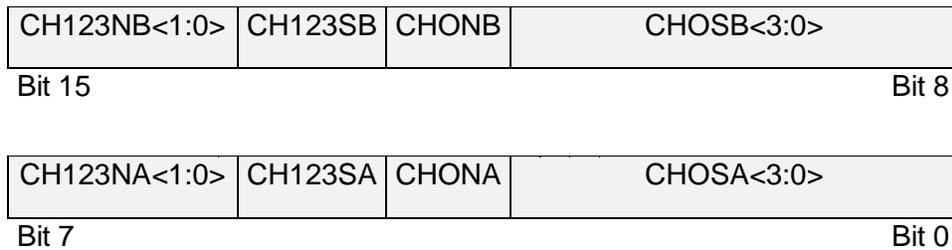
$$111111 = T_{CY/2} \cdot (ADCS<5:0> + 1) = 32 \cdot T_{CY}$$

$$000001 = T_{CY/2} \cdot (ADCS<5:0> + 1) = T_{CY}$$

$$000000 = T_{CY/2} \cdot (ADCS<5:0> + 1) = T_{CY/2}$$

ADCHS. El registro ADCHS se encarga de seleccionar los pines de entrada que van a ser conectados a los amplificadores de muestreo y retención. Figura 4.

Figura 52. Bits del registro de configuración ADCHS.



Fuente: Autor

- CHONA: Selección de entrada negativa del canal 0 para la configuración del multiplexor MUXA (igual que CHONB, pero para el multiplexor MUXA).

$$1 = \text{El CH0 negativo es la entrada AN1.}$$

$$0 = \text{El CH0 negativo es la entrada } V_{REF}.$$

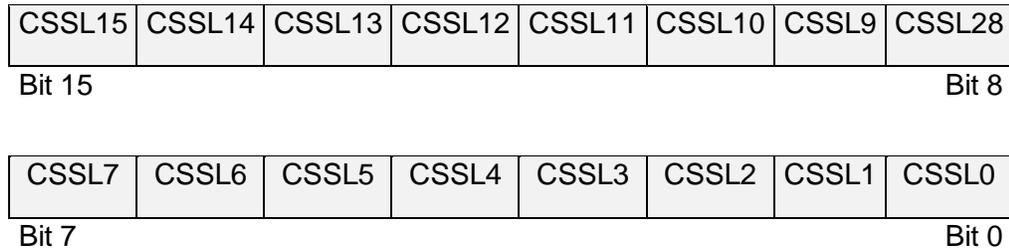
- CHOSA<3:0>: Selección de entrada positiva del canal 0 para la configuración del multiplexor MUXA (igual que CHOSB<3:0>, pero para el multiplexor MUXA).

1111 = El CH0 negativo es la entrada AN15.
 1110 = El CH0 negativo es la entrada AN14.
 1101 = El CH0 negativo es la entrada AN13.
 0001 = El CH0 negativo es la entrada AN1.
 0000 = El CH0 negativo es la entrada AN0.

Nota: El multiplexor analógico de entrada soporta dos posibles configuraciones, denominadas MUX A y MUX B. ADCHS< 15:8> determina la configuración para el multiplexor MUX B, mientras que ADCHS<7:0> determina la configuración para el multiplexor MUX A. La función de los bits de control para ambos multiplexores es idéntica.

ADCSSL. Este registro, se dedica a seleccionar el orden en el que las entradas serán secuencialmente exploradas. Utiliza todos sus bits para desempeñar dicha función. En la Figura 5 se muestran los bits que lo forman.

Figura 53. Bits del registro de configuración ADCSSL.



Fuente: Autor

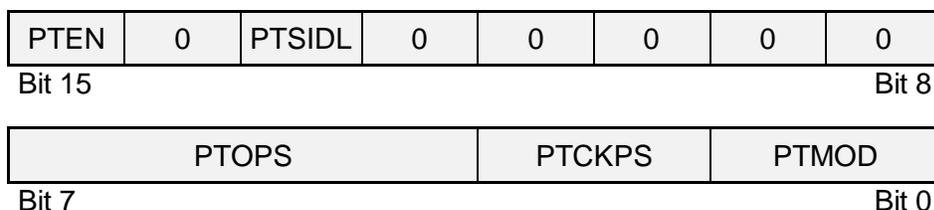
- CSSL<15:0>: Son los bits de selección de exploración de los pines de entrada.
 - 1 = Selecciona el canal correspondiente, ANx, para ser explorado.
 - 0 = No selecciona canal.

Anexo B.

Registros de configuración del Módulo PWM.

PTCON. Registro de control de la base de tiempo (Véase Figura 6).

Figura 54. Registro PTCON

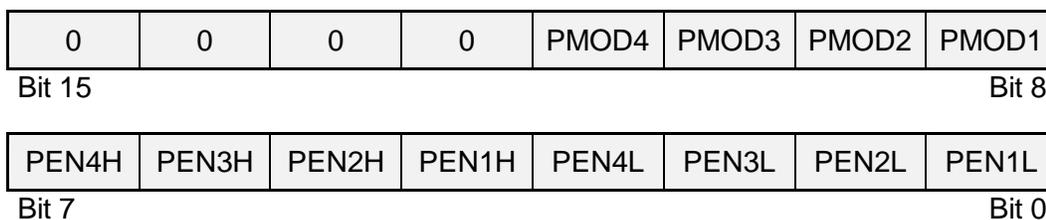


Fuente: Autor

- PTEN<15>: cuando es 1 la base de tiempo está activada y cuando se pone a 0 se desactiva.
- PTSIDL<13>: cuando es 1 se para la base de tiempo y si se pone a 0 vuelve a funcionar.
- PTOPS<7:4>: sirven para seleccionar el valor del post-escalado (1:1, 1:2,..., 1:16).
- PTCKPS<3:2>: Seleccionan el pre-escalado del periodo de entrada del reloj (1:1,1:4,1:16,1:64).
- PTMOD<1:0>: Seleccionan el modo de funcionamiento de la base de tiempo.
 - 00= Modo normal.
 - 01= Modo de evento único.
 - 10= Modo ascendente/descendente.
 - 11= Modo ascendente/descendente con doble interrupción.

PWMCON1. La Figura 7 muestra los bits que conforman el registro PWMCON1.

Figura 55. Registro PWMCON1

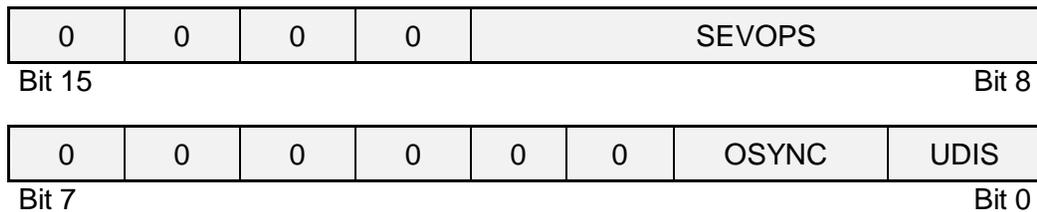


Fuente: Autor

- PMOD4-PMOD1<11:8>: indican el modo de salida del par de patitas PWM. Si se ponen a 1, el modo de salida será independiente y si están a 0, el modo de salida será complementario.
- PEN4H-PEN1H<7:4>: activan las patitas PWMxH como salidas si se ponen a 1, si están a 0, la patita será de propósito general I/O.
- PEN4L-PEN1L<3:0>: activan las patitas PWMxL como salidas si se ponen a 1, si están a 0, la patita será de propósito general I/O.

PWMCON2. Los bits del registro de configuración PWMCON2 se observan en la siguiente Figura (Figura 8).

Figura 56. Registro PWMCON2

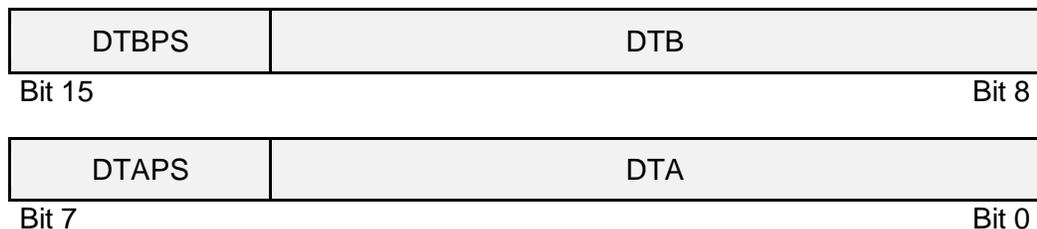


Fuente: Autor

- SEVOPS<11:8>: 4 bits que sirven para seleccionar el post escalado del disparador de PWM (1:1,1:2,1:4,1:8,1:16).
- OSYNC<1>: cuando se pone a 1, la salida está sincronizada con la base de tiempo y si está a 0, la salida se produce en el siguiente ciclo (TCY).
- UDIS<0>: cuando se pone a 1 deshabilita la actualización de PWM y si se pone a 0 la habilita.

DTCON1. El registro DTCON1 cuenta con unos bits de configuración que se muestran a continuación en la Figura 9.

Figura 57. Registro DTCON1

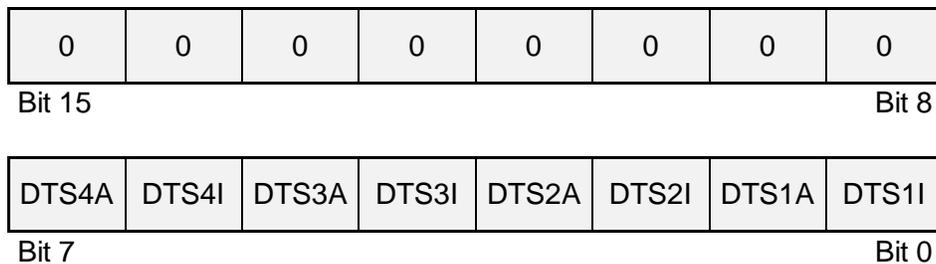


Fuente: Autor

- DTBPS<15:9>: para seleccionar el pre-escalado del tiempo muerto de la unidad B (1:1.1:2,1:4,1:8).
- DTB<8>: bits sin signo que indican el valor del tiempo muerto de la unidad B.
- DTAPS<7:1>: bits para seleccionar el pre-escalado del tiempo muerto de la unidad A (1:1,1:2,1:4,1:8).
- DTA<0>: bits sin signo que indican el valor del tiempo muerto de la unidad A.

DTCON2. Los bits que conforman éste registro, se pueden observar en la *Figura 10*.

Figura 58. Registro DTCON2

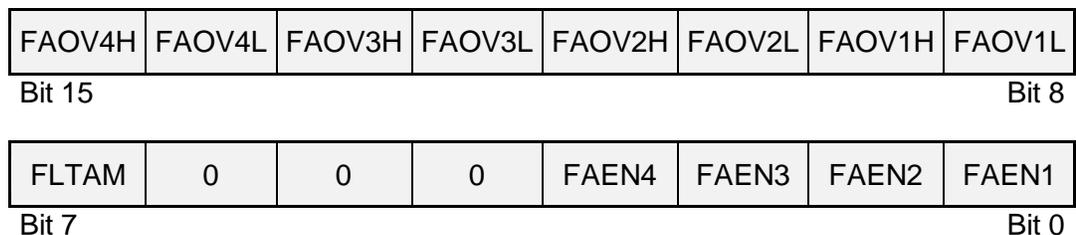


Fuente: Autor

- DTSIA<1>: selección del tiempo muerto para la señal activa PWM 1.
- DTSII<0>: selección del tiempo muerto para la señal inactiva PWM1.

FLTACON. Los bits de configuración de éste registro se pueden ver a continuación (*Figura 11*).

Figura 59. Registro FLTACON

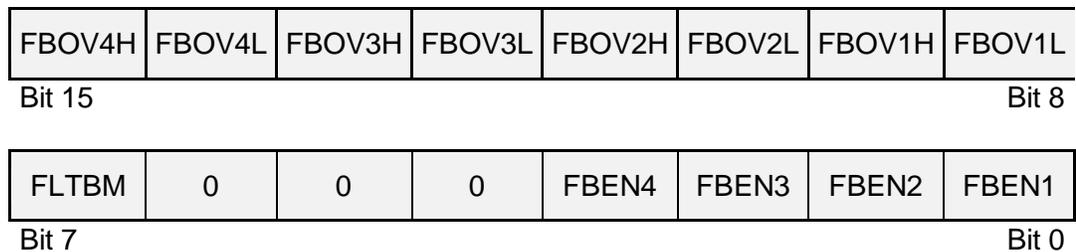


Fuente: Autor

- FAOV4H-FAOV1L<15:8>: indican la activación o desactivación de la patita de salida de PWM ante un evento de fallo externo en la patita A.
- FLTAM<7>: indica el modo de funcionamiento de la patita A de entrada de fallo.
- FAEN1<0>: indica que el par de pines PWM1H/PWM1L son controlados por la patita de entrada de fallo A cuando FAEN1=1.

FLTBCON. En la *Figura 12* se observan los bits de configuración del registro FLTBCON.

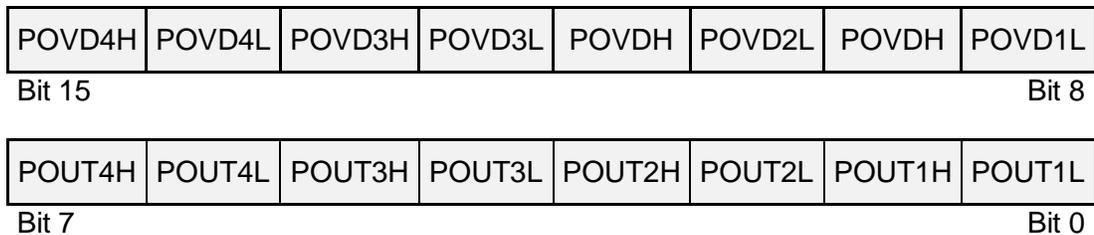
Figura 60. Registro FLTBCON



Fuente: Autor

OVDCON. La *Figura 13* muestra los bits que componen el registro OVDCON.

Figura 61. Registro OVDCON

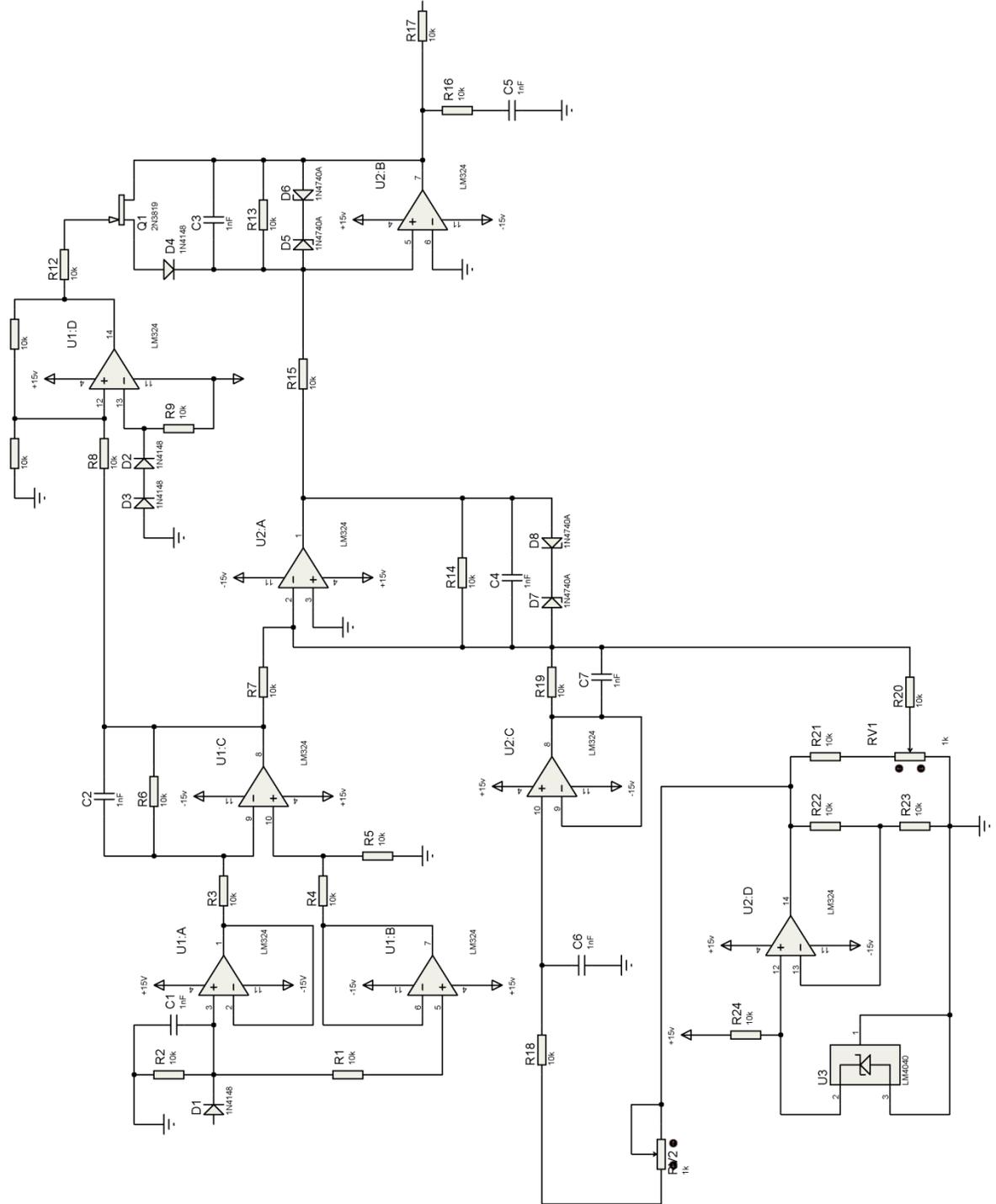


Fuente: Autor

- POVD4H-POVD1L<15:8>: indican según su valor por quién es controlada la salida PWMxH/L. Si está a 1, por el generador PWM y si están 0 por el bit correspondiente POUTxH/L.
- POUT4H-POUT1L<7:0>: indican el valor de la salida (1 o 0) cuando el bit correspondiente POVDxH/L esté a 0.

Anexo C

Esquema del circuito análogo de control de la servoválvula.



Anexo D

Hoja de especificaciones del dsPIC30F2010.



dsPIC30F2010

High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controller

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "dsPIC30F/33F Programmer's Reference Manual" (DS70157).

High-Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture
- 83 base instructions with flexible addressing modes
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 12 Kbytes on-chip Flash program space
- 512 bytes on-chip data RAM
- 1 Kbyte nonvolatile data EEPROM
- 16 x 16-bit working register array
- Up to 30 MIPS operation:
 - DC to 40 MHz external clock input
 - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 27 interrupt sources
- Three external interrupt sources
- Eight user-selectable priority levels for each interrupt
- Four processor exceptions and software traps

DSP Engine Features:

- Modulo and Bit-Reversed modes
- Two 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single-cycle hardware fractional/integer multiplier
- Single-cycle Multiply-Accumulate (MAC) operation
- 40-stage Barrel Shifter
- Dual data fetch

Peripheral Features:

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Three 16-bit timers/counters; optionally pair up 16-bit timers into 32-bit timer modules
- Four 16-bit capture input functions
- Two 16-bit compare/PWM output functions
 - Dual Compare mode available
- 3-wire SPI modules (supports 4 Frame modes)
- I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- Addressable UART modules with FIFO buffers

Motor Control PWM Module Features:

- Six PWM output channels
 - Complementary or Independent Output modes
 - Edge and Center-Aligned modes
- Four duty cycle generators
- Dedicated time base with four modes
- Programmable output polarity
- Dead-time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for synchronized A/D conversions

Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (ADC) with:
 - 1 Msps (for 10-bit A/D) conversion rate
 - Six input channels
 - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Reset

28-Pin SDIP and SOIC

| | | | |
|--------------------------------------|----|----|----------------------------|
| MCLR | 1 | 28 | AV _{DD} |
| EMUD3/AN0/V _{REF+} /CN2/RB0 | 2 | 27 | AV _{SS} |
| EMUC3/AN1/V _{REF-} /CN3/RB1 | 3 | 26 | PWM1L/RE0 |
| AN2/SS1/CN4/RB2 | 4 | 25 | PWM1H/RE1 |
| AN3/INDX/CN5/RB3 | 5 | 24 | PWM2L/RE2 |
| AN4/QEA/IC7/CN6/RB4 | 6 | 23 | PWM2H/RE3 |
| AN5/QEB/IC8/CN7/RB5 | 7 | 22 | PWM3L/RE4 |
| V _{SS} | 8 | 21 | PWM3H/RE5 |
| OSC1/CLKI | 9 | 20 | V _{DD} |
| OSC2/CLKO/RC15 | 10 | 19 | V _{SS} |
| EMUD1/SOSCI/T2CK/U1ATX/CN1/RC13 | 11 | 18 | PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2 |
| EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14 | 12 | 17 | PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3 |
| V _{DD} | 13 | 16 | FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8 |
| EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1 | 14 | 15 | EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0 |

Anexo E

Hoja de especificaciones del Convertidor de Corriente a Voltaje.



RCV420

Precision 4mA to 20mA CURRENT LOOP RECEIVER

FEATURES

- COMPLETE 4-20mA TO 0-5V CONVERSION
- INTERNAL SENSE RESISTORS
- PRECISION 10V REFERENCE
- BUILT-IN LEVEL-SHIFTING
- $\pm 40V$ COMMON-MODE INPUT RANGE
- 0.1% OVERALL CONVERSION ACCURACY
- HIGH NOISE IMMUNITY: 86dB CMR

APPLICATIONS

- PROCESS CONTROL
- INDUSTRIAL CONTROL
- FACTORY AUTOMATION
- DATA ACQUISITION
- SCADA
- RTUs
- ESD
- MACHINE MONITORING

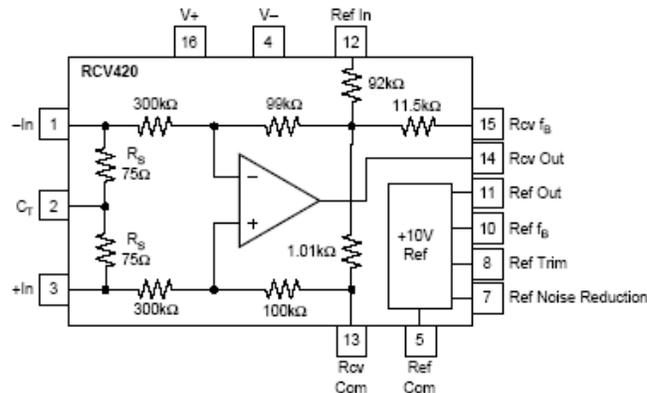
DESCRIPTION

The RCV420 is a precision current-loop receiver designed to convert a 4–20mA input signal into a 0–5V output signal. As a monolithic circuit, it offers high reliability at low cost. The circuit consists of a premium grade operational amplifier, an on-chip precision resistor network, and a precision 10V reference. The RCV420 features 0.1% overall conversion accuracy, 86dB CMR, and $\pm 40V$ common-mode input range.

The circuit introduces only a 1.5V drop at full scale, which is useful in loops containing extra instrument burdens or in intrinsically safe applications where

transmitter compliance voltage is at a premium. The 10V reference provides a precise 10V output with a typical drift of 5ppm/ $^{\circ}C$.

The RCV420 is completely self-contained and offers a highly versatile function. No adjustments are needed for gain, offset, or CMR. This provides three important advantages over discrete, board-level designs: 1) lower initial design cost, 2) lower manufacturing cost, and 3) easy, cost-effective field repair of a precision circuit.



SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

At T = +25°C and V_G = ±15V, unless otherwise noted.

| CHARACTERISTICS | RCV420KP, JP | | | UNITS |
|---|--------------|----------|-------|----------------|
| | MIN | TYP | MAX | |
| GAIN | | | | |
| Initial | | 0.3125 | | V/mA |
| Error | | 0.05 | 0.15 | % of span |
| Error—JP Grade | | | 0.25 | % of span |
| vs Temp | | 15 | | ppm/°C |
| Nonlinearity ⁽¹⁾ | | 0.0002 | 0.002 | % of span |
| OUTPUT | | | | |
| Rated Voltage (I _O = +10mA, -5mA) | 10 | 12 | | V |
| Rated Current (E _O = 10V) | +10, -5 | | | mA |
| Impedance (Differential) | | 0.01 | | Ω |
| Current Limit (To Common) | | +40, -13 | | mA |
| Capacitive Load (Stable Operation) | | 1000 | | pF |
| INPUT | | | | |
| Sense Resistance | 74.25 | 75 | 75.75 | Ω |
| Input Impedance (Common-Mode) | | 200 | | kΩ |
| Common-Mode Voltage | | | ±40 | V |
| CMR ⁽²⁾ | 70 | 80 | | dB |
| vs Temp (DC) (T _A = T _{MIN} to T _{MAX}) | | 78 | | dB |
| AC 60Hz | | 80 | | dB |
| OFFSET VOLTAGE (RTO)⁽³⁾ | | | | |
| Initial | | | 1 | mV |
| vs Temp | | 10 | | μV/°C |
| vs Supply (±11.4V to ±18V) | 74 | 90 | | dB |
| vs Time | | 200 | | μV/mo |
| ZERO ERROR⁽⁴⁾ | | | | |
| Initial | | 0.025 | 0.075 | % of span |
| Initial—JP Grade | | | 0.15 | % of span |
| vs Temp | | 10 | | ppm of span/°C |
| OUTPUT NOISE VOLTAGE | | | | |
| f _B = 0.1Hz to 10Hz | | 50 | | μVp-p |
| f _O = 10kHz | | 800 | | nV/√Hz |
| DYNAMIC RESPONSE | | | | |
| Gain Bandwidth | | 150 | | kHz |
| Full Power Bandwidth | | 30 | | kHz |
| Slew Rate | | 1.5 | | V/μs |
| Settling Time (0.01%) | | 10 | | μs |
| VOLTAGE REFERENCE | | | | |
| Initial | 9.99 | | 10.01 | V |
| Trim Range ⁽⁵⁾ | | ±4 | | % |
| vs Temp | | 5 | | ppm/°C |
| vs Supply (±11.4V to ±18V) | | 0.0002 | | %/V |
| vs Output Current (I _O = 0 to +10mA) | | 0.0002 | | %/mA |
| vs Time | | 15 | | ppm/kHz |
| Noise (0.1Hz to 10Hz) | | 5 | | μVp-p |
| Output Current | +10, -2 | | | mA |
| POWER SUPPLY | | | | |
| Rated | | ±15 | | V |
| Voltage Range ⁽⁶⁾ | -5, +11.4 | | ±18 | V |
| Quiescent Current (V _O = 0V) | | 3 | 4 | mA |
| TEMPERATURE RANGE | | | | |
| Specification | 0 | | +70 | °C |
| Operation | -25 | | +85 | °C |
| Storage | -40 | | +85 | °C |
| Thermal Resistance, θ _{JA} | | 80 | | °C/W |

Anexo F

Hoja de especificaciones de los reguladores de voltaje.

μ A7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS058E – MAY 1976 – REVISED JULY 1999

- 3-Terminal Regulators
- Output Current up to 1.5 A
- Internal Thermal-Overload Protection
- High Power-Dissipation Capability
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation
- Direct Replacements for Fairchild μ A7800 Series

description

This series of fixed-voltage monolithic integrated-circuit voltage regulators is designed for a wide range of applications. These applications include on-card regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. Each of these regulators can deliver up to 1.5 A of output current. The internal current-limiting and thermal-shutdown features of these regulators essentially make them immune to overload. In addition to use as fixed-voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable output voltages and currents, and also can be used as the power-pass element in precision regulators.

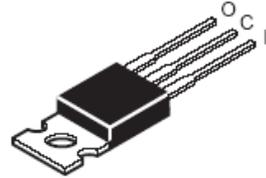
The μ A7800C series is characterized for operation over the virtual junction temperature range of 0°C to 125°C.

KC PACKAGE
(TOP VIEW)

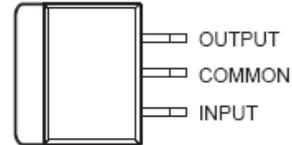


The COMMON terminal is in electrical contact with the mounting base.

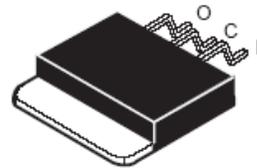
TO-220AB



KTE PACKAGE
(TOP VIEW)



The COMMON terminal is in electrical contact with the mounting base.



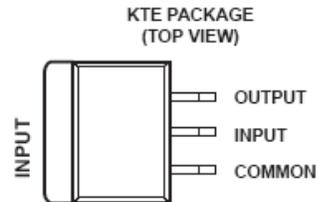
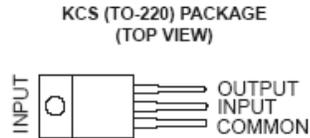
μA7900 SERIES NEGATIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS058D – JUNE 1976 – REVISED APRIL 2004

- 3-Terminal Regulators
- Output Current Up To 1.5 A
- No External Components
- Internal Thermal Overload Protection
- High-Power Dissipation Capability
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation

description/ordering information

This series of fixed-negative-voltage integrated-circuit voltage regulators is designed to complement Series μA7800 in a wide range of applications. These applications include on-card regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. Each of these regulators can deliver up to 1.5 A of output current. The internal current limiting and thermal shutdown features of these regulators essentially make them immune to overload. In addition to use as fixed-voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable output voltages and currents and also as the power-pass element in precision regulators.



ORDERING INFORMATION

| T_J | $V_{O(NOM)}$ (V) | PACKAGE† | | ORDERABLE PART NUMBER | TOP-SIDE MARKING |
|--------------|---------------------|------------------------------|--------------|--------------------------|---------------------|
| 0°C to 125°C | -15 | Power Flex (KTE) | Reel of 2000 | μA7915CKTER | μA7915C |
| | | TO-220, short shoulder (KCS) | Tube of 50 | μA7915CKCS | μA7915C |
| | -12 | Power Flex (KTE) | Reel of 2000 | μA7912CKTER | μA7912C |
| | | TO-220, short shoulder (KCS) | Tube of 50 | μA7912CKCS | μA7912C |
| | -8 | Power Flex (KTE) | Reel of 2000 | μA7908CKTER | μA7908C |
| | | TO-220, short shoulder (KCS) | Tube of 50 | μA7908CKCS | μA7908C |
| | -5 | Power Flex (KTE) | Reel of 2000 | μA7905CKTER | μA7905C |
| | | TO-220, short shoulder (KCS) | Tube of 50 | μA7905CKCS | μA7905C |

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.

Anexo G

Hoja de especificaciones del Puente H (LB1641).

Monolithic Digital IC



LB1641

Bidirectional Motor Driver

Overview

The LB1641 is a bidirectional motor driver IC. Since it has a 2-input logic circuit and performs the functions of bidirectional driving and braking, it is capable of direct driving 6V, 9V, 12V motors. The output voltage can be varied by using an external zener diode.

Features

- 2-input logic can be used to exercise control of bidirectional driving and braking.
- On-chip elements to absorb dash current of motor.
- Input interfaceable to MOS LSI.
- Output voltage variable by use of external zener diode.

Specifications

Absolute Maximum Ratings at Ta = 25°C

| Parameter | Symbol | Conditions | Ratings | Unit |
|-----------------------------|---------------------|------------|-------------------------|------|
| Maximum supply voltage | V _{CC} max | | 18 | V |
| Input voltage | V _{IN} | | -0.3 to V _{CC} | V |
| Output current | I _{OUT} | | ±1.8 | A |
| Allowable power dissipation | P _d max | | 1.2 | W |
| Operating temperature | T _{opr} | | -25 to +75 | °C |
| Storage temperature | T _{stg} | | -55 to +125 | °C |

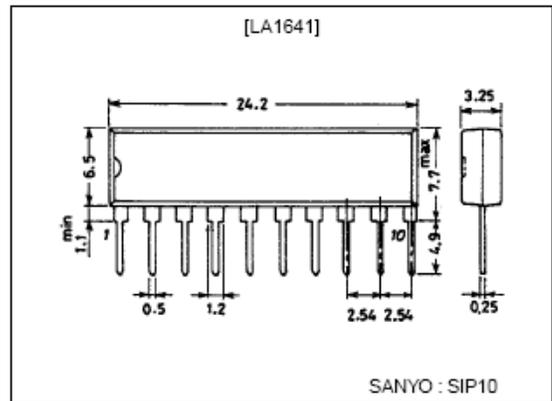
Operating Conditions at Ta = 25°C

| Parameter | Symbol | Conditions | Ratings | Unit |
|----------------|------------------|------------|---------|------|
| Supply voltage | V _{CC1} | | 7 to 18 | V |
| | V _{CC2} | | 5 to 18 | V |

Package Dimensions

unit:mm

3043A-SIP10



Operating Characteristics at Ta = 25°C

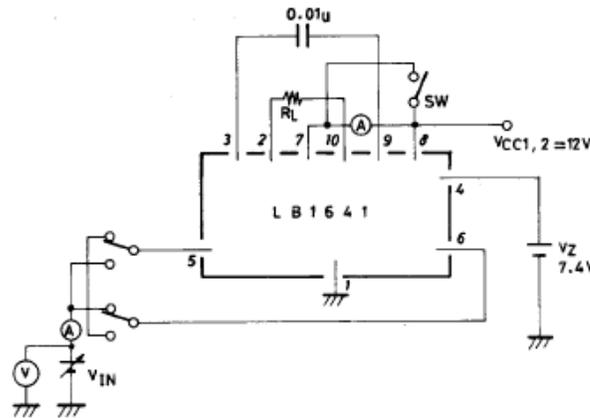
| Parameter | Symbol | Conditions | Ratings | | | Unit |
|--------------------------------|-----------------|---|---------|------|------|------|
| | | | min | typ | max | |
| Input threshold voltage | Vth | R _L = ∞ | 1.1 | 1.3 | 1.5 | V |
| Minimum input on-state current | I _{IN} | R _L = ∞ | | 10 | 15 | μA |
| Output voltage | V _O | R _L = 80Ω, V _Z = 7.4V | 6.6 | 7.2 | 7.4 | V |
| Output leakage current | I _{OL} | Pins 5, 6 GND, R _L = ∞ | | 0.01 | 1.0 | mA |
| Current drain | I _{CC} | Pins 5, 6 GND, R _L = ∞ | 3 | 6 | 10 | mA |
| Saturation voltage (upper) | Vsat1 | V _{CC} = 12V, I _{OUT} = 300mA | | 1.9 | 2.2 | V |
| | Vsat1 | V _{CC} = 12V, I _{OUT} = 500mA | | 1.9 | 2.3 | V |
| Saturation voltage (lower) | Vsat2 | V _{CC} = 12V, I _{OUT} = 300mA | | 0.25 | 0.5 | V |
| | Vsat2 | V _{CC} = 12V, I _{OUT} = 500mA | | 0.4 | 0.65 | V |

Truth Table

| Input | | Output | | Operation |
|-------|-----|--------|------|-------------------------|
| IN1 | IN2 | OUT1 | OUT2 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | Braking |
| 1 | 0 | 1 | 0 | Forward (reverse) drive |
| 0 | 1 | 0 | 1 | Reverse (forward) drive |
| 1 | 1 | 0 | 0 | Braking |

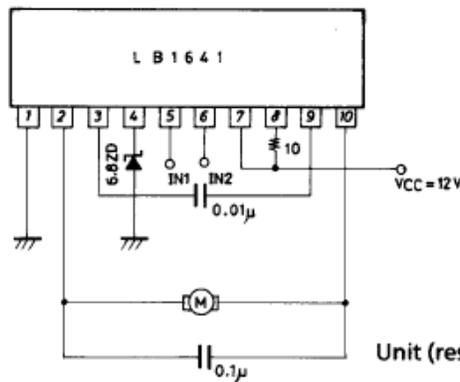
Input level 1 : 2.0V or greater
0 : 0.7V or less

Test Circuit



Unit (capacitance: F)

Sample Application Circuit : 6V motor circuit



Unit (resistance: Ω, capacitance: F)

Anexo H

Algoritmo en lenguaje ASSEMBLER del sistema de control implementado

```
.EQU __30F2010, 1
.INCLUDE "p30f2010.inc"
.title "CONTROL PID SERVO VALVULA"

.global __OscillatorFail
.global __AddressError
.global __StackError
.global __MathError
.global __reset
.global __T1Interrupt

config __FOSC, CSW_FSCM_OFF & XT_PLL8
config __FWDT, WDT_OFF
config __FBORPOR, PBOR_ON & BORV_27 & PWRT_16 & MCLR_DIS
config __FGS, CODE_PROT_ON

.equ FCY, #8000000 ;32MHz/4
.equ TCY, #125 ;1/(FCY) = 125nS un ciclo de instrucción.
.equ PERIODO_1mS, #1000000/TCY ;8000 ciclos de instrucción.
.equ PERIODO_1uS, #1000/TCY ;8 ciclos de instrucción.
.equ cant_sample, #10 ;número de muestras a promediar
.equ UMBRAL_UP, #903 ;4,41V
.equ UMBRAL_LO, #115 ;0.6V
.equ T_PWM, #1200 ;periodo PWM
.equ T_SAMPLE, #50 ;periodo muestreo en ms
.equ MIN_PDC, #1000 ;minimo ciclo de trabajo
.equ TOLERANCIA, #100 ;tolerancia de respuesta al error del PID

.equ FACTOR_E_K, #9 ;(kp+ki*T/2+kd/T)
.equ FACTOR_E_K_1, #12 ;(ki*(T/2)-kp-2*(kd/T))
.equ FACTOR_E_K_2, #3 ;kd/T

.equiv flg_control, #0
.equiv flg_fin_muestreo, #1
.equiv flg_err_neg, #2
.equiv flg_err_cero, #3

.equiv flg_tmr1, #0

; Sección de variables no inicializadas en la RAM X
.section .xbss, bss, xmemory ;inicia en 0x800

WTEMP1_INT: .space 2
FLG_RTN: .space 2
FLG_INT: .space 2
TEMPORAL2: .space 2
TEMPORAL3: .space 2
```

```

RETARDO:          .space 2
CONTADOR:         .space 2
PRODH:            .space 2
PRODL:            .space 2
MULTIPLICANDO:   .space 2
MULTIPLICADOR:   .space 2
FEED_BACK:        .space 2
SET_POINT:        .space 2
M_K:              .space 2      ;salida del controlador
M_K_1:            .space 2      ;salida anterior
ERROR_K:          .space 2      ;error actual
ERROR_K_1:        .space 2      ;error anterior
ERROR_K_2:        .space 2      ;error dos veces anterior
TERMINO_1_H:      .space 2
TERMINO_1_L:      .space 2
TERMINO_2_H:      .space 2
TERMINO_2_L:      .space 2
TERMINO_3_H:      .space 2
TERMINO_3_L:      .space 2

```

; Sección de variables no inicializadas en la RAM Y

```
.section .ybss, bss, ymemory ;inicia en 0x0C00 y termina en 0x0FFF
```

```
vary1: .space 2 ;0xFFE
```

; INICIO DE CÓDIGO

```

.text
__reset:    mov     #__SP_init, W15
            mov     #__SPLIM_init, W0
            mov     W0, SPLIM
            nop
_wreg_init: clr     W0
            mov     W0, W14
            repeat #12
            mov     W0, [++W14]
            clr     W14
            bclr   INTCON1, #NSTDIS
            clr     T1CON
            clr     TMR1
            mov     #PERIODO_1mS, w0
            mov     w0, PR1
            bclr   IFS0, #T1IF
            bset   IEC0, #T1IE
            bset   T1CON, #TON
;A/D 10bits
            bset   TRISB, #RB0
            bset   TRISB, #RB1
            mov     #0x80E0, W0
            mov     W0, ADCON1
            mov     #0x0000, W0
            mov     W0, ADCON2
            mov     #0x0127, W0
            mov     W0, ADCON3

```

```

mov          #0xFFF8, W0
mov          W0, ADPCFG
mov          #0x0000, W0
mov          W0, ADCSSL
mov          #0x0000, W0
mov          W0, ADCHS
bclr        IFS0, #ADIF
bclr        IEC0, #ADIE

;PWM
mov          #0x8008, W0
mov          W0, PTCON
clr         PTMR
mov          #T_PWM,w0
mov          w0, PTPER
mov          #0b0000000100010001,w0
mov          W0,PWMCON1
mov          #0b0000000000000100,w0
mov          W0,PWMCON2
mov          #0x0001,w0
mov          W0,DTCON1 ;00000000 00000001
mov          #0x0000,w0
mov          W0,FLTACON
mov          #0x0300,w0
mov          W0,OVDCON
clr         PDC1

;--
clr         FLG_RTN
clr         FLG_INT
bset        FLG_RTN, #flg_fin_muestreo
clr         M_K
clr         M_K_1
clr         ERROR_K
clr         ERROR_K_1
clr         ERROR_K_2
clr         TERMINO_1_H
clr         TERMINO_1_L
clr         TERMINO_2_H
clr         TERMINO_2_L
clr         TERMINO_3_H
clr         TERMINO_3_L
MAIN:      btsc        FLG_INT, #flg_tmr1
call       ISR_TMR1
goto      MAIN

;rutina cada 1ms
ISR_TMR1:  inc         CONTADOR
mov        CONTADOR,W0
sub        #T_SAMPLE,w0
bra        N,fin_isr_tmr1
clr        CONTADOR
sample_setpoint: bset        ADCHS,#0
call       SAMPLE_PROMEDIO
mov        w0,SET_POINT
mov        #UMBRAL_UP, W0

```

```

                                cp          SET_POINT
                                bra         N,comp_low
                                mov        w0, SET_POINT
                                bra         sample_feedback
comp_low:                       mov        #UMBRAL_LO, W0
                                cp          SET_POINT
                                bra         NN,sample_feedback
                                mov        w0, SET_POINT
sample_feedback:                bclr      ADCHS,#0
                                call       SAMPLE_PROMEDIO
                                mov        w0,FEED_BACK
                                mov        M_K,W0
                                mov        w0,M_K_1
                                mov        ERROR_K_1,w0
                                mov        w0,ERROR_K_2
                                mov        ERROR_K,w0
                                mov        w0,ERROR_K_1
calcular_error:                 bclr      FLG_RTN, #flg_err_neg
                                bclr      FLG_RTN, #flg_err_cero
                                mov        FEED_BACK, W0
                                sub        SET_POINT
                                mov        SET_POINT,w0
                                mov        w0,ERROR_K

; M_K = M_K_1 + (FACTOR_E_K * E_K) + (-FACTOR_E_K_1 * E_K_1) + (FACTOR_E_K_2 * E_K_2)
;          termino 1      termino 2      termino 3

;calcular termino 1
                                mov        #FACTOR_E_K,W0
                                mov        w0, MULTIPLICANDO
                                mov        ERROR_K,W0
                                mov        w0, MULTIPLICADOR
                                call       MULT_16BITS
                                mov        PRODH,W0
                                mov        w0,TERMINO_1_H
                                mov        PRODL,W0
                                mov        w0,TERMINO_1_L

;calcular termino 2
                                mov        #FACTOR_E_K_1,W0
                                mov        w0, MULTIPLICANDO
                                mov        ERROR_K_1,W0
                                mov        w0, MULTIPLICADOR
                                call       MULT_16BITS
                                mov        PRODH,W0
                                mov        w0,TERMINO_2_H
                                mov        PRODL,W0
                                mov        w0,TERMINO_2_L

;calcular termino 3
                                mov        #FACTOR_E_K_2,W0
                                mov        w0, MULTIPLICANDO
                                mov        ERROR_K_2,W0
                                mov        w0, MULTIPLICADOR
                                call       MULT_16BITS
                                mov        PRODH,W0

```

```

mov          w0,TERMINO_3_H
mov          PRODL,W0
mov          w0,TERMINO_3_L

;(M_K_1 + termino 1 + termino 3) - termino 2
mov          M_K_1,w0
add          TERMINO_1_L
btsc        SR,#C
inc         TERMINO_1_H

mov          TERMINO_1_L,w0
add          TERMINO_3_L
btsc        SR,#C
inc         TERMINO_3_H
mov          TERMINO_1_H,w0
add          TERMINO_3_H

mov          TERMINO_2_L,w0
sub          TERMINO_3_L
btss        SR,#C
dec         TERMINO_3_H
mov          TERMINO_2_H,w0
sub          TERMINO_3_H

mov          TERMINO_3_L,W0
mov          W0,M_K
btsc        M_K, #15
bset        FLG_RTN, #flg_err_neg
btsc        M_K, #15
neg         M_K,WREG
mov          WREG,PDC1

mov          #TOLERANCIA,w0
CP          PDC1
bra         N,off_pwm
mov          #MIN_PDC,W0
ADD         PDC1
eval_PID_cero: mov          M_K
btss        SR,#Z
bra         eval_open
off_pwm:    bclr        OVDCON,#POVD1L
bclr        OVDCON,#POVD1H
bra         fin_isr_tmr1
eval_open: btss        FLG_RTN, #flg_err_neg
bra         set_open
bset        OVDCON,#POVD1L
bclr        OVDCON,#POVD1H
bra         fin_isr_tmr1
set_open:  bset        OVDCON,#POVD1H
bclr        OVDCON,#POVD1L
bra         fin_isr_tmr1
fin_isr_tmr1: bclr        FLG_INT,#flg_tmr1
return

```

```

SAMPLE_PROMEDIO: clr          TEMPORAL2
                  mov          #cant_sample,w0
                  mov          w0, TEMPORAL3
sample_:          call         SAMPLE_1
                  call         SAMPLE_1
                  add          TEMPORAL2
                  dec          TEMPORAL3
                  bra          NZ,sample_
                  mov          TEMPORAL2,w2
                  mov          #cant_sample,w4
                  repeat       #17
                  div.u        W2, W4
                  return

```

; Muestreo de 1 ciclo de conversión

```

SAMPLE_1:         bset        ADCON1, #ASAM
                  btss       ADCON1, #DONE
                  bra        $-2
                  bclr       ADCON1, #DONE
                  bclr       ADCON1, #ASAM
                  mov        ADCBUF0, W0
                  return
__T1Interrupt:   push.d     W0
                  push.d     W2
                  push        WTEMP1_INT
                  dec        RETARDO
                  bset       FLG_INT,#flg_tmr1
f_int_tmr1:      bclr       IFS0, #T1IF
                  pop        WTEMP1_INT
                  pop.d      W2
                  pop.d      W0
                  retfie
MULT_16BITS:     mov        MULTIPLICADOR,W0
                  mul        MULTIPLICANDO
                  mov        w3, PRODH
                  mov        w2, PRODL
                  return
                  .end

```

Anexo I

MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA LA INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DEL CIRCUITO Y SOFTWARE DE CONTROL DE LA SERVOVÁLVULA DEL MÓDULO FEEDBACK DE NIVEL Y FLUJO PROCON 38-001.

Antes de poner en funcionamiento la tarjeta en cualquier estructura mecánica se debe tener en cuenta:

1. Aislar el impreso de la estructura metálica de la servoválvula antes de ajustarlo.
2. El piñón del vástago de la válvula debe ubicarse aproximadamente a un (1) milímetro de la base de la estructura cuando la válvula se encuentre completamente cerrada.
3. El piñón del potenciómetro debe quedar a ras con la parte inferior de la perilla del mismo.
4. Antes de hacer el acople mecánico de los engranajes, hay que ajustar un valor de resistencia mínimo del potenciómetro de $R = 1\text{ K}\Omega$ para el cual la válvula esté completamente cerrada.
5. Asegurarse que la estructura mecánica al momento de encajarse quede bien acoplada.

Una vez armada la estructura de la válvula se deben realizar las siguientes pruebas antes de montarla al Moduló.

6. Conectar la servoválvula a la interfaz 38-200.
7. Poner en funcionamiento la servoválvula. Verificar una vez se halla posicionado la válvula, los pines 25 y 26 del dsPIC y asegurarse que no hay señal alguna.

*NOTA: En caso de no cumplirse esta condición, mediante el dispositivo PICKIT2 de Microchip y el programador InCircuit incluido en el impreso, variar los valores de las etiquetas **T_PWM**, y **MIN_PDC** hasta que la señal en estos pines sea eliminada.*

8. Instalar la servoválvula en el Módulo.
9. El mantenimiento que se debe realizar a la servoválvula es el recomendado por el fabricante.

Anexo J

Esquema del impreso del circuito de control digital de la servoválvula.

