



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

**“CARACTERIZACIÓN Y DESARROLLO DE CONTROL DE UN
ACTUADOR HIDRÁULICO DE DOBLE EFECTO ROTATIVO”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. CARLOS ENRIQUE VARGAS HERMO

ASESOR

DR. IGNACIO JUÁREZ CAMPOS

CO-ASESOR

DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

ABRIL DEL 2013



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA
FACULTAD DE
INGENIERÍA MECÁNICA

**“CARACTERIZACIÓN Y DESARROLLO DE CONTROL DE UN
ACTUADOR HIDRÁULICO DE DOBLE EFECTO ROTATIVO”**

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por haberme guiado y acompañado a lo largo de esta experiencia, por ser mi fortaleza en momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le doy gracias a mis padres Janet y Roberto por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida.

A mis hermanos por ser parte importante de mi vida, por haberme apoyado en las buenas y en las malas, por llenar mi vida de alegrías. A Nayeli por ser un ejemplo a seguir, por su paciencia y amor incondicional.

Le agradezco la confianza, apoyo y dedicación a mis asesores: Dr. Ignacio Juárez Campos y el Dr. Gilberto González Avalos. Por haber compartido conmigo sus conocimientos y su amistad.

Gracias a la U.M.S.N.H en especial al departamento de posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por creer en mí y haberme brindado la oportunidad de desarrollar este proyecto. Por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y aprender cosas nuevas.

A mis abuelos, por haber creído en mí hasta el último momento, por su comprensión y motivarme a seguir adelante en momentos de debilidad.

A toda mi familia y amigos, gracias por su apoyo y sobre todo su amistad. Por todos los momentos que pasamos juntos. Por la confianza que en mí depositaron.

A mi novia por todo el apoyo brindado, por aguantarme y por siempre buscar la manera de tenerme de buenas. Por soportar mis ratos de histeria y por ser una excelente amiga.

ÍNDICE

ÍNDICE	III
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	XI
GLOSARIO.....	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Justificación.....	4
1.2. Objetivos de la investigación.....	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos particulares	5
1.3. Hipótesis	6
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	8
2.1. Actuadores Hidráulicos	8
2.1.1. Cilindro de presión dinámica	8
2.1.2. Cilindro de efecto simple	9
2.1.3. Cilindro de doble efecto	9
2.1.4. Motor hidráulico	10
2.1.5. Motor con pistón eje inclinado	10
2.1.6. Motor de Engranaje	11
2.2. Trabajos similares	12
2.2.1. Proyecto: “Air Muscle”	13
2.2.2. Proyecto: “Mang Flex”	13
2.2.3. Proyecto: “Hydraulic pressure actuator”	14
2.3. Sistemas de control.....	15
2.3.1. Estrategia de control.....	17
2.3.2. Métodos de diseño.	18
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL SISTEMA HIDRÁULICO.....	21
3.1. Análisis cilindro de doble efecto rotativo	21
3.2. Componentes del sistema hidráulico.....	28

3.2.1	Selección y análisis de componentes	30
3.3.	Sistema hidráulico completo	36
CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN CINEMÁTICA DEL AHDR		41
4.1.	Diseño geométrico del modelo	41
4.2.	Características cinemáticas del AHDR.....	44
4.2.1.	Conexiones entre elementos.	45
4.2.2.	Condiciones iniciales.	47
4.3.	Simulación cinemática del AHDR.....	47
CAPÍTULO 5. DISEÑO DE CONTROL DE VÁLVULA DIRECCIONAL ON/OFF .		53
5.1.	Componentes del sistema a controlar	53
5.1.1.	Cilindro de doble efecto	53
5.1.2.	Bomba hidráulica	55
5.1.3.	Válvula direccional ON/OFF	57
5.1.4.	Sensor retroalimentación (codificador óptico absoluto)	58
5.2.	Funciones del control con válvula direccional ON/OFF.....	60
5.3.	Programación del sistema de control de válvula direccional ON/OFF.....	62
5.3.1.	Inicialización del microcontrolador.....	65
5.3.2.	Interpretación y conversión de la señal de retroalimentación.	68
5.3.3.	Programación de la señal de entrada.....	71
5.3.4.	Consideraciones de estados en el sistema a controlar.....	73
5.3.5.	Despliegue y visualización de datos.....	78
5.4.	Ajuste de señal eléctrica del sistema de control.....	80
5.4.1.	Circuito optoacoplador.....	80
5.4.2.	Interfaz de potencia (salida del sistema).	81
5.5.	Simulación del sistema de control.....	84
5.6.	Prueba física del circuito de control.....	86
CAPÍTULO 6. DISEÑO DE CONTROL DE VÁLVULA DIRECCIONAL PROPORCIONAL		89
6.1.	Componentes del sistema a controlar	89
6.2.	Programación del sistema de control proporcional.	91
6.2.1.	Ajuste matemático de la señal de retroalimentación.....	92

6.2.2. Cálculo de la señal a suministrar	94
6.2.3. Inicialización de Microcontrolador Atmega 2560.....	97
6.2.4. Consideraciones especiales del control proporcional.....	97
6.3. Ajuste de señal eléctrica.	101
6.4. Simulación control proporcional.	103
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	107
7.1. Resultados	107
7.2. Conclusiones.....	109
7.3. Aportaciones	110
7.4. Trabajo a futuro y recomendaciones	111
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS	117
Anexo I. Publicaciones.....	117
Anexo II. Hoja de datos Cilindro Hidráulico de doble efecto	126
Anexo III. Hoja de datos Válvula direccional ON/OFF.....	127
Anexo IV. Hoja de datos Válvula proporcional	128
Anexo V. Hoja de datos Bomba hidráulica.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Cilindro de presión dinámica [1].	9
Figura 2.2.- Cilindro de simple efecto [5].	9
Figura 2.3.- Cilindro de doble efecto [6].	10
Figura 2.3.- Motor hidráulico pistón eje inclinado [7].	11
Figura 2.4.- Motor hidráulico de engranaje [8].	11
Figura 2.5.- Diseño del actuador de doble efecto rotativo.	12
Figura 2.6.- Actuador “Air Muscle” [9].	13
Figura 2.7.- Actuador “Mang Flex” [10].	14
Figura 2.8.- Actuador Hidráulico de Presión [11].	15
Figura 2.9.- Esquema general de un sistema de control [13].	16
Figura 2.10.- Lazo abierto vs Lazo cerrado [13].	18
Figura 3.1.- Diseño del actuador perspectiva lateral.	21
Figura 3.2.- Proyección del diseño del actuador de doble efecto rotativo.	22
Figura 3.3.- Triángulo desplazamiento lineal.	23
Figura 3.4.- Proyección de puntos sobre cara del elemento rotativo.	24
Figura 3.5.- Gráfica del movimiento lineal-movimiento angular del actuador.	26
Figura 3.6.- Análisis matemático del actuador de doble efecto rotativo.	27
Figura 3.7.- Diseño del sistema hidráulico.	28
Figura 3.8.- Diagrama completo del sistema a controlar.	29
Figura 3.9.- Velocidad y desplazamiento en un cilindro [7].	30
Figura 3.10.- Comportamiento de una válvula con corredera cuadrada [15].	32
Figura 3.11.- Válvula direccional ON/OFF 4/3 (vías/posiciones) [15].	33
Figura 3.12.- Especificaciones de una bomba hidráulica.	34
Figura 3.13.- Sistema hidráulico completo.	36
Figura 3.14.- Simulación de sistema apertura de válvula al 100% sin carga	37
Figura 3.15.- Simulación con grada externa en el cilindro.	38
Figura 4.1.- Diseño AHDR.	41
Figura 4.2.- Geometría del proyecto.	42
Figura 4.3.- Ángulo punto unión barra-rotor.	44
Figura 4.4.- Conexiones principales del AHDR.	45
Figura 4.5.- Conexiones esféricas del modelo.	46
Figura 4.6.- Simulación sin limitaciones	48
Figura 4.7.- Pantalla de simulación Workbench Ansys.	49
Figura 4.8.- Máximo avance del modelo.	50
Figura 4.9.- Movimiento barra de conexión.	51
Figura 5.1.- Medidas del Cilindro hidráulico de doble efecto.	54
Figura 5.2.- Cilindro hidráulico de doble efecto.	55
Figura 5.3.- Bomba hidráulica.	56

Figura 5.4.- Símbolo válvula direccional ON/OFF.	57
Figura 5.5.- Válvula direccional ON/OFF.....	58
Figura 5.6.- Codificador óptico absoluto 10 bits.	59
Figura 5.7.- Sistema a controlar.	60
Figura 5.8.- Microcontrolador Atmega16.	63
Figura 5.9.- Diagrama secuencia de programación.....	64
Figura 5.10.- Código de inicialización de microcontrolador.	67
Figura 5.11.- Conversión y lectura de salida del sistema a controlar.	70
Figura 5.12.- Esquemático de botones de entrada del sistema de control [25].....	71
Figura 5.13.- Detección por cambio de flancos.	72
Figura 5.14.- Código de detección de flancos.	73
Figura 5.15.- Código de programación parte 1.....	76
Figura 5.16.- Código de programación parte 2.....	77
Figura 5.17.- Pantalla LCD 16x4.	79
Figura 5.18.- Optoacoplador 4n30.....	81
Figura 5.19.- Transistor TIP120.....	82
Figura 5.20.- Circuito equivalente transistor TIP120.	83
Figura 5.21.- Construcción circuito simulado.....	84
Figura 5.22.- Simulación cambio de posición voluntario.	86
Figura 5.23.- Circuito controlador.....	87
Figura 6.1.- Válvula Proporcional.	90
Figura 6.2.- Atmega 2560.....	91
Figura 6.3.- Código de ajuste matemático de la señal de retroalimentación.	93
Figura 6.4.- Ecuaciones dentro de la programación.....	95
Figura 6.5.- Ejemplo de comportamiento no lineal.	96
Figura 6.6.-Código control proporcional parte 1.	99
Figura 6.7.- Código control proporcional parte 2.	100
Figura 6.8.- Diagrama de conexión DAC0808.....	102
Figura 6.9.- Amplificador Inversor.	103
Figura 6.10.- Circuito simulado control proporcional.	104
Figura 6.11.- Funcionamiento sistema de control proporcional.	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Simbología de trazos y puntos del diseño.....	23
Tabla 4.1.- Medidas del modelo a simular.....	43
Tabla 5.1.- Funciones elementos de sistema a controlar.....	61
Tabla 5.2.- Configuración de periféricos.....	66
Tabla 6.1.- Inicialización de periféricos Atmega 2560.....	97

RESUMEN

Este proyecto presenta el diseño de una tarjeta de control para la operación de un actuador de doble efecto rotativo, utilizando elementos electrónicos programables y el sistema hidráulico necesario para la operación del artefacto. El actuador de doble efecto rotativo (AHDR) es un actuador novedoso sin antecesores, cuyo diseño se basa en un cilindro de doble efecto común, el cual conectado por medio de un sistema de barras a un rotor transforma un movimiento lineal en un movimiento angular. Es la novedad del sistema la que obliga al análisis de su comportamiento así como de su caracterización para el desarrollo de control.

Este sistema de control es desarrollado a base de un sistema hidráulico, conformado de varios elementos (cilindro, válvula, bomba, controlador, etc.), que en su conjunto permiten desarrollar este trabajo. La variedad de características en los elementos centra el estudio en dos tipos de controles: controlador de válvula direccional ON/OFF y controlador de válvula direccional proporcional.

Para la configuración de la tarjeta de control (controlador) se evalúan las características del actuador de doble efecto rotativo de manera matemática y en simulación, con el fin de conocer su modo de operación y sus limitantes, necesarias para la programación del sistema de control. A su vez, el sistema hidráulico es evaluado por medio de su simulación para obtener y descartar acciones en el controlador.

El desarrollo de control requiere de un sensor para la salida del sistema, en este caso una posición angular; la cual se obtiene con un sensor óptico absoluto de 10 bits de resolución, que permite obtener el movimiento del rotor en el sistema a controlar.

La programación del sistema de control se logra con la configuración de microcontroladores de la familia ATmel, para cada uno de los casos. La electrónica de ajuste a la señal que manejan los componentes, se logra con el diseño de circuitos, su simulación y pruebas de la tarjeta de control.

Utilizando elementos de medición eléctrica se comprueba la obtención de señales capaces de activar los elementos del sistema hidráulico que controlan y permiten la operación del actuador de doble efecto rotativo, programado por medio de la tarjeta de control para cada uno de los casos planteados.

ABSTRACT

This work presents the design of a control card for the operation of a double acting rotary actuator, using programmable electronics and hydraulic system needed to operate the device. The double acting rotary actuator (DARA) is a new actuator without predecessors, whose design is based on a common double-acting cylinder, which connected by a rod system to a rotor, transforms a linear motion in an angular motion. The innovation in the system requires the analysis of its functioning and the characterization of the movements, to develop the control card.

This control system is developed based on a hydraulic system compounded of several elements (cylinder, valve, pump, controller, etc.), which together enable the development of this work. The variety of features in elements focused the study in two types of controls: ON / OFF directional valve controller and proportional directional valve controller.

For the configuration of the control card (controller), this work evaluates the characteristics of double acting rotary actuator mathematically and in simulation, to know how it operates and its limitations, which are necessary for programming the control system. The hydraulic system is evaluated through its simulation to obtain or dismiss actions in the controller.

The development of the control card requires a sensor for the system output, in this case an angular position sensor, which is obtained with a 10-bit resolution Encoder, that allows to know the movement of the rotor for the control system.

The programming of the control system is achieved by using microcontrollers ATmel, for each case. The adjustment of the driving signal is achieved with electronic components, their circuit design, simulation and tests of the control card.

Using electric measuring elements the driving signal is checked obtaining signals capables of activating the hydraulic system and allows controlling the

operation of double-acting rotary actuator by the programmed control card for each case.

GLOSARIO

Actuador: Dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado.

ADC: Convertidor de señales analógicas a digitales.

AHDR: Actuador hidráulico de doble efecto rotativo

Bomba hidráulica: Dispositivo tal que recibiendo energía mecánica de una fuente exterior la transforma en una energía de presión transmisible de un lugar a otro de un sistema hidráulico.

Capacitor: Dispositivo que almacena carga eléctrica.

Caracterización: Determinación de los atributos de un cosa, de modo que se distinga claramente de las demás.

Circuitería: Conjunto de conductores, resistencias y otros elementos por el que circula la corriente eléctrica.

Codificador óptico absoluto: Transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de impulsos digitales.

DAC: Conversor digital-analógico.

DC: Corriente directa.

DIP: “*Dual in-line package*”, es una forma de empaquetamiento de dispositivos electrónicos de forma rectangular con dos filas paralelas de pines de conexiones.

Instrumento: Objeto simple o formado por una combinación de piezas y que es adecuado para un uso concreto

Led: Por sus siglas en inglés diodo emisor de luz.

LCD: Pantalla de cristal líquido (sigla del inglés *liquid crystal display*) es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora.

Microcontrolador: Dispositivo electrónico capaz de llevar a cabo procesos lógicos. Estos procesos o acciones son programados por el usuario y son introducidos en éste a través de un programador.

Op-amp: Amplificador operacional.

Planta: También llamada sistema controlado. En general es el objeto, proceso o máquina, de la cual una cantidad o condición en particular debe ser controlada.

Precisión: Capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones.

Resistencia: Elemento que causa oposición al paso de la corriente, causando que en sus terminales aparezca una diferencia de tensión (un voltaje).

Retroalimentación: Proceso por el que una cierta proporción de la señal de salida de un sistema se dirige de nuevo a la entrada.

Sensor: Dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, que sea capaz de ser cuantificada y manipulada.

Sistema: Arreglo de componentes físicos conectados o relacionados de tal manera que forman o actúan como un todo.

VCD: Voltaje de corriente directa.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseosa. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas.

Existen tres tipos de actuadores:

- Hidráulicos
- Neumáticos
- Eléctricos

Los actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos son usados para manejar aparatos mecatrónicos. Por lo general, los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, y los neumáticos son simples posicionamientos. Sin embargo, los hidráulicos requieren demasiado equipo para suministro de energía, así como de mantenimiento periódico. Por otro lado, las aplicaciones de los modelos neumáticos también son limitadas desde el punto de vista de precisión y mantenimiento [1].

Los actuadores eléctricos también son muy utilizados en los aparatos mecatrónicos, como por ejemplo, en los robots. Los servomotores sin escobillas se utilizarán en el futuro como actuadores de posicionamiento preciso debido a la demanda de funcionamiento sin tantas horas de mantenimiento [1].

Los actuadores se utilizan en una gran gama de campos, tanto en robótica, sistemas tele-operados, prótesis etc. [2, 3, 4]. Este tipo de proyectos requieren un sistema de actuación con características específicas, las cuales son obtenidas con la unión de varios tipos de actuadores en la mayoría de los casos.

En disposición de realizar un actuador novedoso en comparación con los existentes; aprovechando el buen rendimiento de los actuadores lineales, se propone el diseño de un actuador de doble efecto rotativo para obtener dos tipos de movimiento. El diseño del actuador se basa en un cilindro de doble efecto (véase *anexo II*) que desplaza un émbolo, éste a su vez unido a un elemento de rotación por medio de un sistema de barras, genera un desplazamiento angular en el actuador.

1.1. Justificación

La selección y utilización de un instrumento o elemento en un sistema, implica el conocimiento de sus características de operación y sus especificaciones de servicio, lo que permite al usuario en cuestión, aprovechar al máximo el potencial del artefacto. Sin el estudio previo del comportamiento de los componentes de un sistema cualquiera, sería imposible conocer previamente a su uso, los alcances y limitaciones del mismo.

En comparación con los actuadores eléctricos y neumáticos, los sistemas hidráulicos proporcionan una potencia de trabajo de gran magnitud en proporción a sus dimensiones, lo que los convierte en actuadores aptos para ciertas aplicaciones en diferentes campos.

Al contar con un equipo nuevo, es imprescindible conocer la forma de operación del instrumento, así como sus alcances y limitaciones, conforme a sus dimensiones y diseño. Para conseguir conocer todas las capacidades del nuevo actuador, es necesario la construcción e implementación de un sistema de control para su operación, que permita observar y cuantificar la funcionalidad del equipo, conformando así una serie de especificaciones propias de su diseño, que mostrará la viabilidad del equipo para su uso.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

- Caracterizar el desplazamiento lineal o angular y modo de operación de un actuador hidráulico de doble efecto rotativo por medio de la implementación de un sistema de control electrónico.

1.2.2. Objetivos particulares

- Diseñar un sistema de control electrónico para el actuador basándose en dispositivos de adquisición de datos.
- Realizar la programación del sistema de control y su implementación en el diseño del actuador.
- Analizar el comportamiento del actuador para condiciones de diseño, cargas, etc. por medio de la simulación cinemática del actuador.
- Analizar y controlar el tiempo de respuesta del actuador con diferentes condiciones iniciales por medio de software de programación del control electrónico.
- Evaluar las capacidades y limitantes del actuador con la ayuda de software a fin de determinar posibles aplicaciones.

1.3. Hipótesis

Es posible caracterizar el desplazamiento lineal y/o angular y el modo de operación, de un actuador hidráulico de doble efecto rotativo, por medio del análisis cinemático y la simulación dinámica del diseño, e implementar un sistema electrónico capaz de controlar el movimiento del actuador a base de diferencias de entrada y salida en el sistema.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1. Actuadores Hidráulicos

Los actuadores hidráulicos, que son los de mayor antigüedad, pueden ser clasificados de acuerdo con la forma de operación, funcionan en base a fluidos a presión. Existen tres grandes grupos:

- cilindro hidráulico
- motor hidráulico
- motor hidráulico de oscilación

De acuerdo con su función se puede clasificar a los cilindros hidráulicos en dos tipos: de efecto simple y de acción doble. En el primer tipo se utiliza fuerza hidráulica para empujar y una fuerza externa, diferente, para contraer. El segundo tipo se emplea la fuerza hidráulica para efectuar ambas acciones. El control de dirección se lleva a cabo mediante un solenoide [1].

2.1.1. Cilindro de presión dinámica

Lleva la carga en la base del cilindro. Los costos de fabricación por lo general son bajos ya que no hay partes que entren en contacto dentro del cilindro [1].

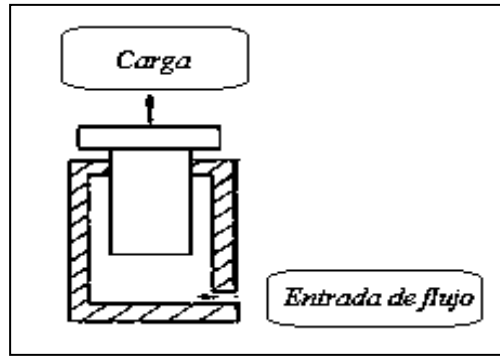


Figura 2.1.- Cilindro de presión dinámica [1].

2.1.2. Cilindro de efecto simple

La barra está sólo en uno de los extremos del pistón, el cual se contrae mediante resortes o por la misma gravedad. La carga puede colocarse sólo en un extremo del cilindro [1].

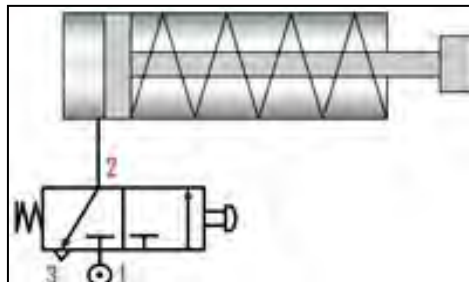


Figura 1.2.- Cilindro de simple efecto [5].

2.1.3. Cilindro de doble efecto

La carga puede colocarse en cualquiera de los lados del cilindro. Se genera un impulso debido a la diferencia de presión entre los extremos del pistón [1].

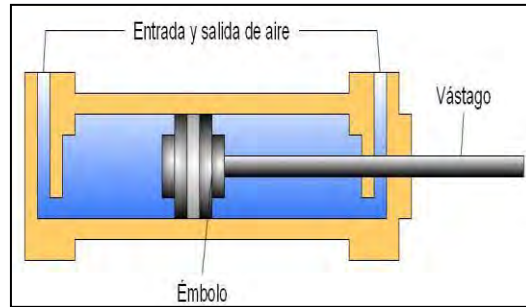


Figura 2.3.- Cilindro de doble efecto [6].

2.1.4. Motor hidráulico

En los motores hidráulicos el movimiento rotatorio es generado por la presión. Estos motores se pueden clasificar en dos grandes grupos: el primero es uno de tipo rotatorio en el que los engranes son accionados directamente por aceite a presión, y el segundo, de tipo oscilante, el movimiento rotatorio es generado por la acción oscilatoria de un pistón o percutor; este tipo tiene mayor demanda debido a su mayor eficiencia [7].

2.1.5. Motor con pistón eje inclinado

El aceite a presión que fluye desde la entrada empuja el pistón contra la brida y la fuerza resultante en la dirección radial hace que el eje y el bloque del cilindro giren en la dirección de la flecha. Este tipo de motor es muy conveniente para usos a alta presión y a alta velocidad. Es posible modificar su capacidad al cambiar el ángulo de inclinación del eje [7].

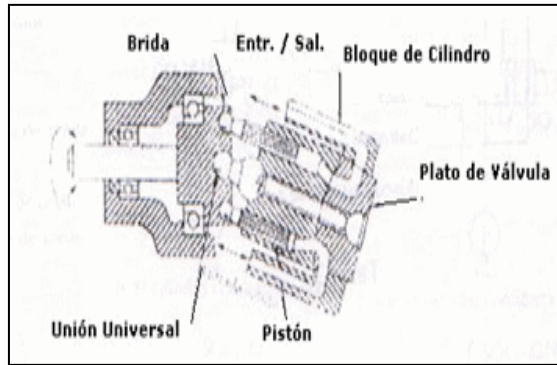


Figura 2.2.- Motor hidráulico pistón eje inclinado [7].

2.1.6. Motor de Engranaje

El aceite a presión fluye desde la entrada que actúa sobre la cara dentada de cada engranaje generando torque en la dirección de la flecha. La estructura del motor es simple, por lo que es muy recomendable su uso en operaciones a alta velocidad. [7]

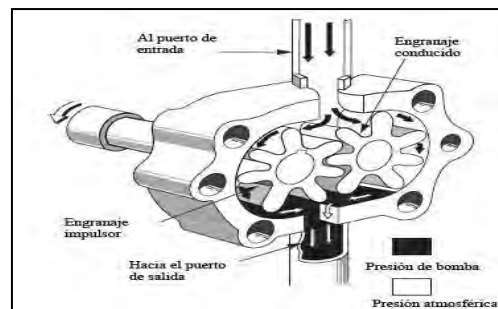


Figura 2.3.- Motor hidráulico de engranaje [8].

Estos son algunos de los muchos tipos de variaciones que existen de actuadores hidráulicos comunes, es decir, aquellos que fueron los pioneros en su construcción y utilización, en base a los principios de funcionamiento de estos modelos se han desarrollado muchos otros tipos con diferentes características de diseño y ahí es donde a partir de un nuevo diseño se da paso a la realización de este proyecto.

El diseño del actuador que se analiza en este trabajo se observa en la figura 2.6, siendo un diseño que envuelve la utilización de un cilindro de doble efecto al que a su pistón se le une el émbolo del actuador de doble efecto rotativo.

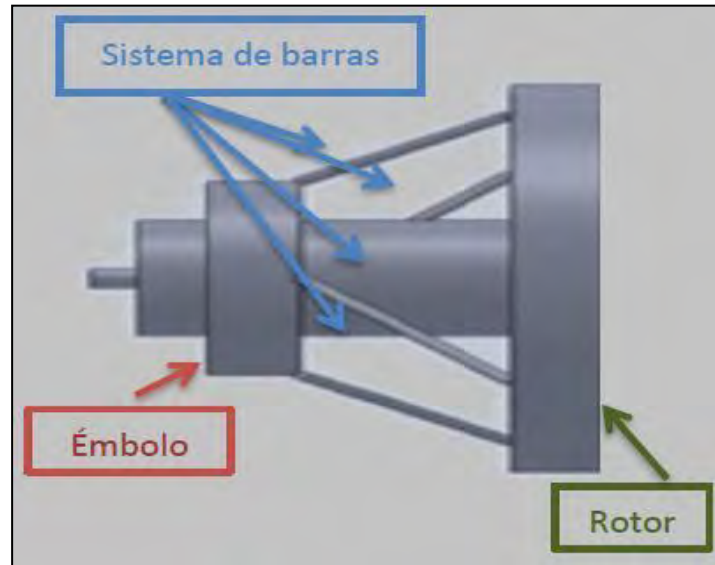


Figura 2.4.- Diseño del actuador de doble efecto rotativo.

El émbolo que se aprecia en la figura 2.4 está unido por medio de un sistema de barras a un rotor, en conjunto con el movimiento lineal generado por el émbolo se obtiene un movimiento angular en el rotor; el movimiento se logra con las peculiaridades de diseño en el sistema de barras.

2.2. Trabajos similares

Dentro de la innovación de los sistemas convencionales se han desarrollado diversos trabajos en la creación y por consecuencia la caracterización del funcionamiento de actuadores hidráulicos alrededor del mundo. Por mencionar algunos ejemplos se muestra una pequeña reseña de cada trabajo.

2.2.1. Proyecto: "Air Muscle"

Desarrollado en Montreal Canadá (04/07/2002). Actuador flexible abierto, el cual comprende una cámara de expansión definida por una pared interna de una faja expandible, la faja se encuentra conectada a 2 puntos de anclaje.

El actuador está adaptado para transformar la presión del fluido que se presenta en la faja de la pared interna en fuerza para desplazar uno de los extremos del actuador. La caracterización del actuador depende del volumen de fluido introducido a la cámara, siendo proporcional a la distancia que se mueve uno de los extremos [9].

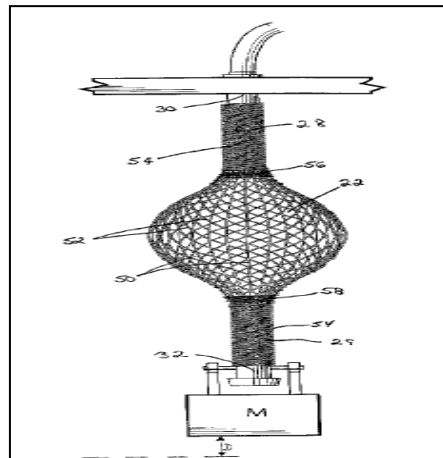


Figura 2.5.- Actuador "Air Muscle" [9].

2.2.2. Proyecto: "Mang Flex"

Desarrollado en The B.F. Goodrich Company, E.U (09/12/1995). Dispositivo actuador formado por un tubo elástico reforzado y con cordones longitudinales resistentes a la tensión a lo largo de un solo lado del tubo. En el estado de reposo el tubo permanece estirado, al introducir fluido presurizado el tubo se dobla por el

lado que contiene los cordones reforzados y se mantiene en este estado hasta la liberación de presión [10].

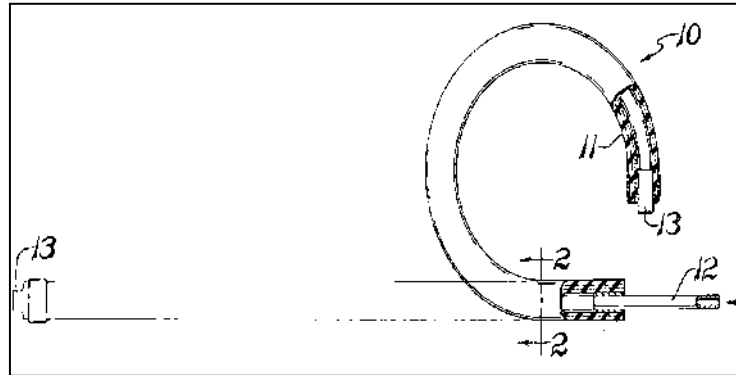


Figura 2.6.- Actuador "Mang Flex" [10].

2.2.3. Proyecto: "Hydraulic pressure actuator"

Desarrollado en Hitachi Medical Corporation, Tokyo (27/11/2007). Actuador hidráulico de presión con cámara interna y recubrimiento de malla exterior expandible, a partir de la presión que se introduce en la cámara interna del tubo la cámara se expande, lo que contribuye a movimientos de extensión y retracción del tubo. Este actuador es usado para el manejo de aparatos de movimiento pasivo continuo, utilizados en la rehabilitación de pacientes con operaciones articulares [11].

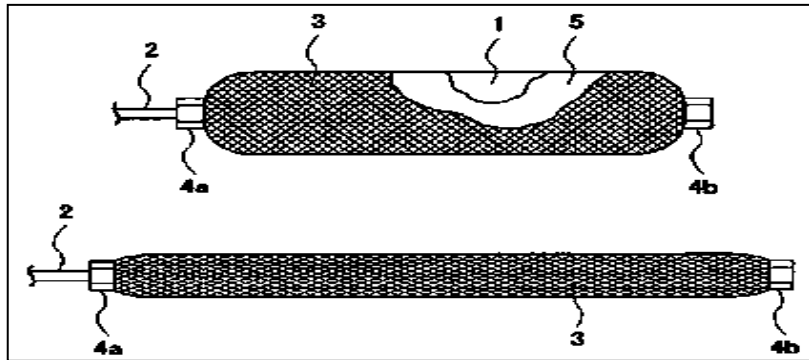


Figura 2.7.- Actuador Hidráulico de Presión [11].

2.3. Sistemas de control

Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que éstas alcancen unos valores prefijados (consigna) [12].

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.

2. Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido.

Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.

3. Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de una computadora [12].

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- Sensores. Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.

- Controlador. Utilizando los valores determinados por los sensores y la señal de consigna, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia.

- Actuador. Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control [12].

Un esquema general de los sistemas de control donde se muestran los elementos mencionados se puede apreciar en la figura 2.8. Cabe mencionar que dentro de estos se considera tanto al actuador y el sistema la planta de todo el sistema.

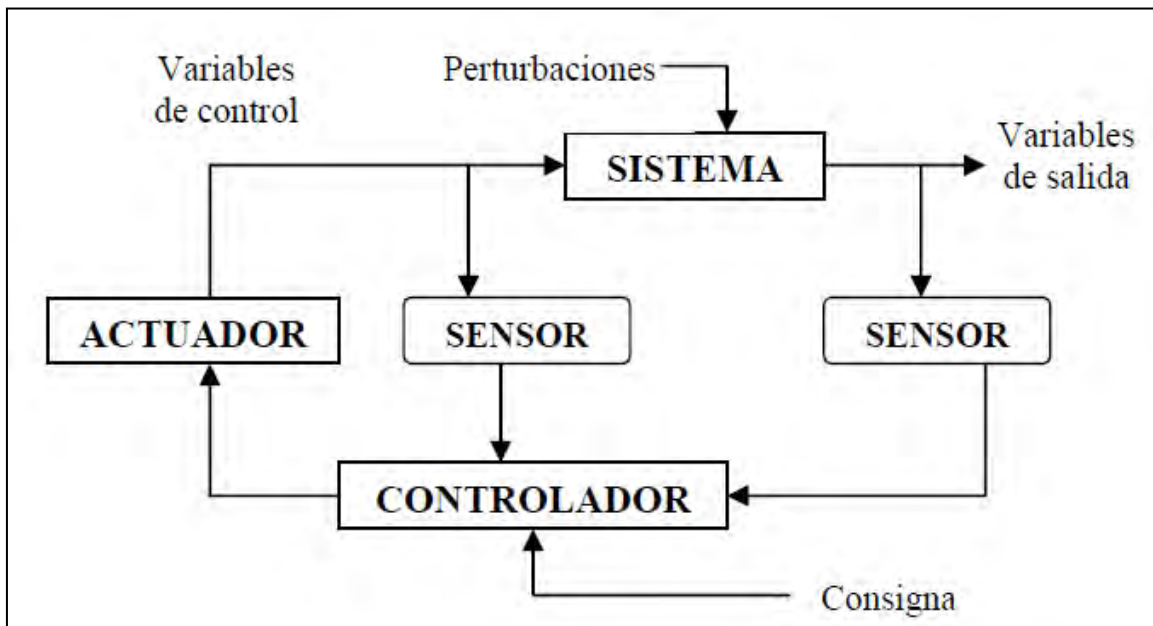


Figura 2.8.- Esquema general de un sistema de control [13].

2.3.1. Estrategia de control

La estrategia de control hace referencia a la naturaleza y la dirección de los lazos existentes entre las variables medidas y/o controladas y las variables de control.

Se distinguen dos tipos de estrategias en función de la naturaleza de la información utilizada para calcular la acción de control del sistema, lazo abierto y lazo cerrado.

Lazo abierto: La acción de control se calcula conociendo la dinámica del sistema, las consignas y estimando las perturbaciones. Esta estrategia de control puede compensar los retrasos inherentes del sistema anticipándose a las necesidades del usuario. Sin embargo, el lazo abierto generalmente es insuficiente, debido a los errores del modelo y a los errores en la estimación de las perturbaciones. Por ello, es común la asociación de lazo cerrado-lazo abierto, de modo que el lazo cerrado permite compensar los errores generados por el lazo abierto.

Lazo cerrado: La acción de control se calcula en función del error medido entre la variable controlada y la consigna deseada. Las perturbaciones, aunque sean desconocidas son consideradas indirectamente mediante sus efectos sobre las variables de salida. Este tipo de estrategia de control puede aplicarse sea cual sea la variable controlada. La gran mayoría de los sistemas de control que se desarrollan en la actualidad son en lazo cerrado.

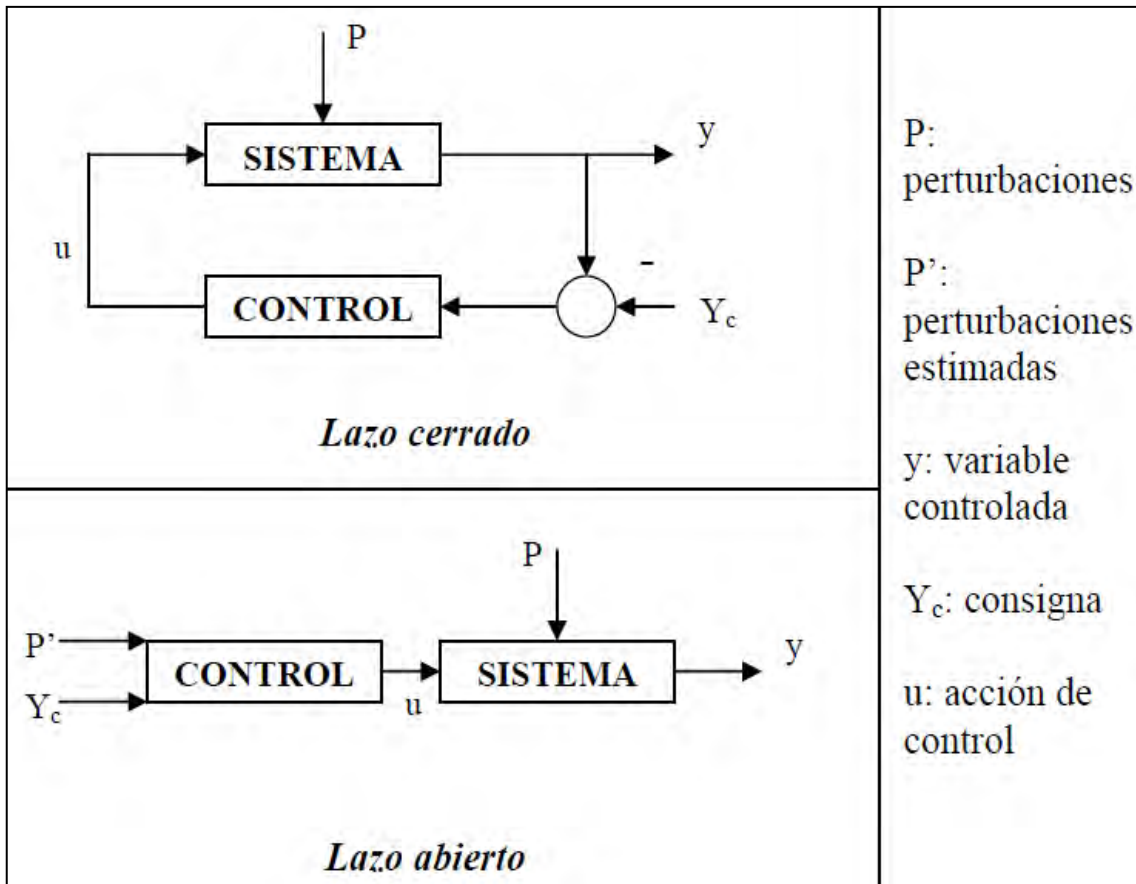


Figura 2.9.- Lazo abierto vs Lazo cerrado [13].

Como se observa en la figura 2.9 la principal diferencia entre las estrategias de control es la retroalimentación que existe en el lazo cerrado, lo que permite compensaciones a la señal de control.

2.3.2. Métodos de diseño.

Los métodos de análisis de sistemas y de diseño de los controladores han evolucionado del mismo modo que la mayoría de las herramientas utilizadas en ingeniería. La evolución en los sistemas informáticos ha permitido que actualmente estén disponibles entornos en los que se pueden realizar

simulaciones dinámicas. Es por ello que en los últimos años, estos progresos han permitido que las investigaciones y aplicaciones en la teoría de control automático hayan pasado de utilizar una implementación analógica y mono-variable a una implementación digital y multi-variable.

En un esquema analógico, todas las variables son función de un tiempo continuo; en cambio, en un esquema digital las variables se conocen en unos instantes determinados, en un tiempo discreto [12].

Los sistemas de control digital presentan una serie de ventajas como son una menor susceptibilidad al deterioro debido al transcurso del tiempo o a factores del entorno, presenta unos componentes menos sensibles a los ruidos y a las vibraciones en las señales, tienen una mayor flexibilidad a la hora de programar, o poseen una mejor sensibilidad frente a la variación de parámetros. En cambio, la evolución de las computadoras y de sus capacidades de cálculo permite reducir los inconvenientes que presentan los controladores digitales, por lo que últimamente su uso se ha extendido en gran número [12].

Las variables medidas en el sistema mediante los sensores llegan al controlador en forma analógica, de modo que en el caso de un controlador digital es necesario utilizar dos convertidores de señal, uno analógico-digital, que permite discretizar la señal para que el controlador pueda realizar los cálculos necesarios, y uno digital-analógico para poder convertir las órdenes de control calculadas por el controlador en señales continuas, de modo que los actuadores puedan ejecutar los cambios precisos.

CAPÍTULO 3

ÁNÁLISIS DEL SISTEMA

HIDRÁULICO

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL SISTEMA HIDRÁULICO

3.1. Análisis cilindro de doble efecto rotativo

Para diseñar el sistema de control necesario para el actuador, se debe tomar en cuenta el comportamiento del mismo, por lo que conocer la ecuación que describe su funcionamiento es parte esencial del proyecto.

Basándose en el diseño del actuador que se puede apreciar en las figuras 2.6 y 3.1, se consideran las propiedades para relacionar el movimiento lineal que el émbolo realiza junto con el movimiento angular generado en el rotor; que para fines del proyecto es la salida del sistema.

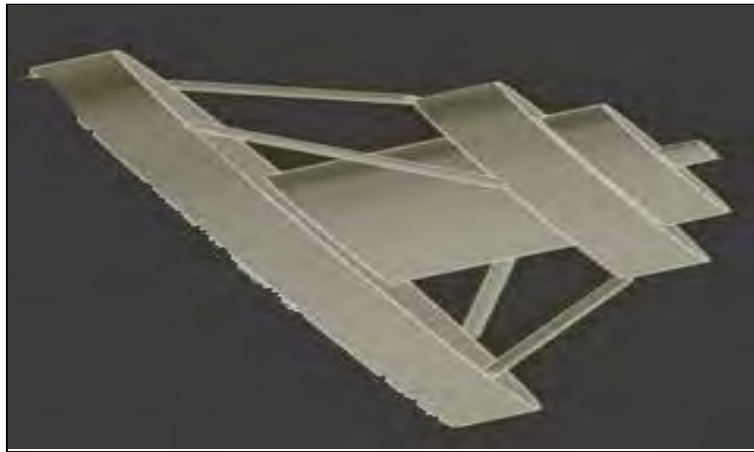


Figura 3.1.- Diseño del actuador perspectiva lateral.

Partiendo del diseño del actuador estudiado en este proyecto, el análisis dinámico del mismo depende del desplazamiento lineal del émbolo, siendo éste la entrada del comportamiento del artefacto y el cual genera el movimiento giratorio del rotor (salida del artefacto). En la figura 3.2 se aprecia el diseño del actuador plasmado en trazos para la obtención del análisis.

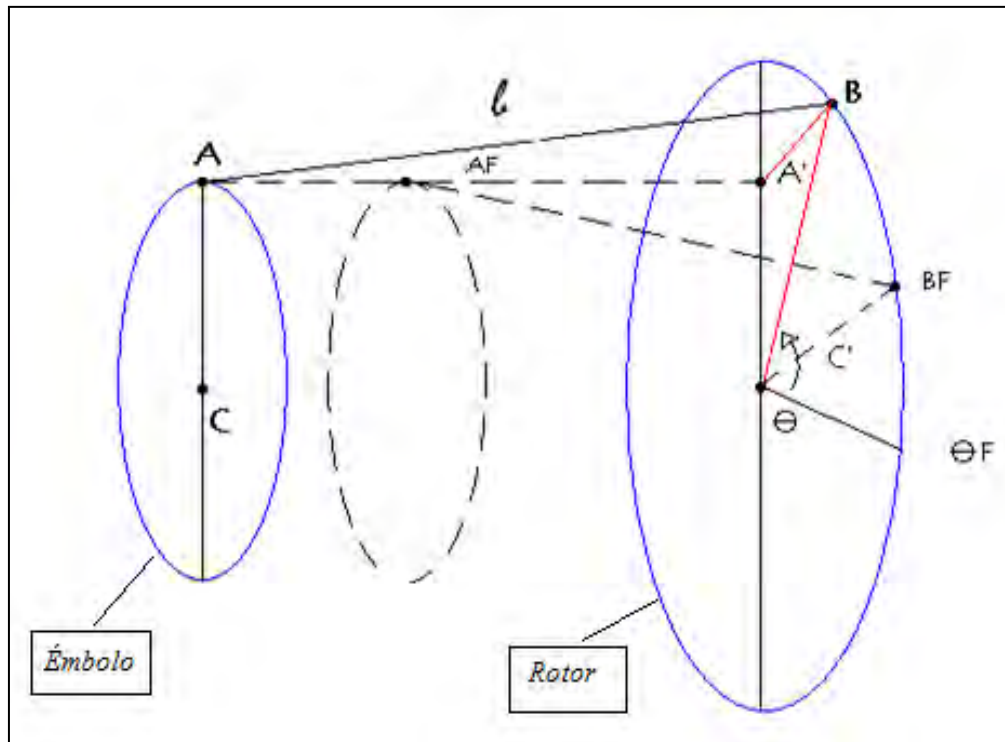


Figura 3.2.- Proyección del diseño del actuador de doble efecto rotativo.

En la figura 3.2 se observan los puntos y trazos más importantes de la geometría del diseño del AHDR (actuador hidráulico de doble efecto rotativo), con la utilización de estos es posible obtener una relación entre el movimiento lineal y el movimiento angular del diseño; el concepto de estos puntos y trazos se pueden apreciar en la tabla 3.1.

Símbolo	Concepto

Tabla 3.1.- Simbología de trazos y puntos del diseño.

Como se aprecia en la figura 3.2 el punto A se proyecta sobre una de las caras del elemento rotativo (rotor) como A', la distancia entre estos dos puntos, representa el desplazamiento lineal del actuador; de igual manera, la distancia entre el punto A y B es la longitud () real del elemento de unión entre el émbolo y el elemento rotativo del actuador (barra de conexión).

Considerando la longitud entre el punto A' y el punto B, la cual permanece constante durante la operación del AHDR se obtiene un triángulo rectángulo con las 2 longitudes mencionadas en el párrafo anterior, el cual se observa en la figura 3.3, a partir de esta geometría se relaciona el cambio de posición del émbolo con la longitud de la conexión y con la cara del rotor.

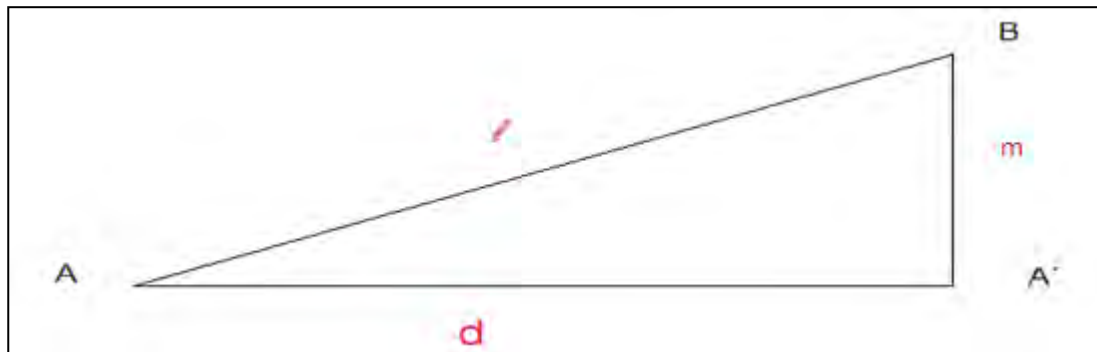


Figura 3.3.- Triángulo desplazamiento lineal.

Utilizando el teorema de Pitágoras se obtiene la relación entre los lados del triángulo, la cual nos da un primer paso para relacionar el desplazamiento del émbolo en el actuador, a partir de este desarrollo se obtiene:

$$(3.1)$$

Uno de los pasos más importantes para el análisis dinámico del artefacto es relacionar el cambio de distancia entre el émbolo y el rotor con el desplazamiento angular que el AHDR genera.

Si los puntos que se trasladan hacia la cara del elemento rotativo se obtiene un triángulo con el cual se observa el movimiento angular que el actuador realizará.

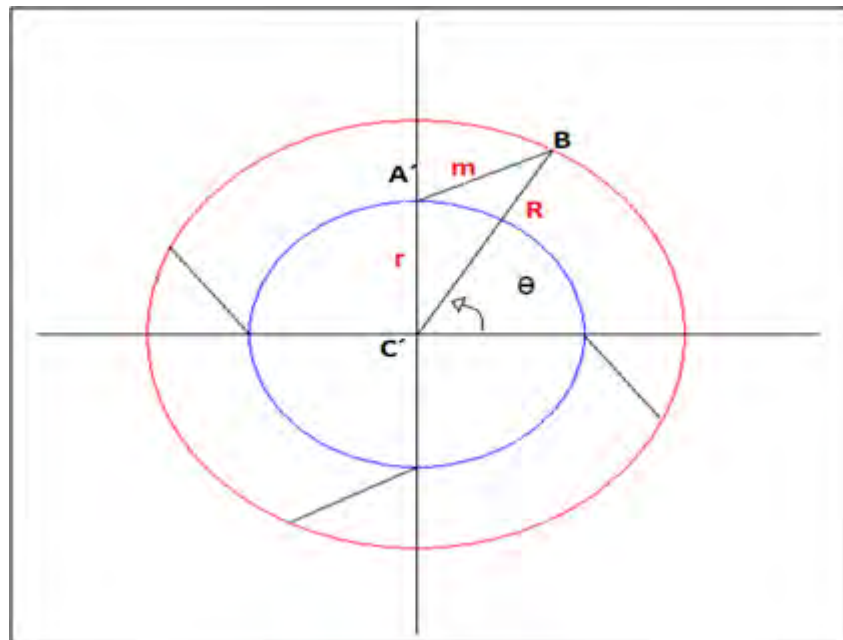


Figura 3.4.- Proyección de puntos sobre cara del elemento rotativo.

En la figura 3.4 se observa que el triángulo formado en la cara del elemento rotativo comparte un lado en común con el triángulo antes analizado, la longitud “ m ”; es a partir de esta similitud con la que se relaciona la distancia lineal de desplazamiento “ s ” con el movimiento angular “ θ ”.

Gracias a este elemento común entre los dos triángulos del análisis, es posible relacionar la distancia lineal que el émbolo se desplaza con el ángulo de movimiento del elemento rotativo y así obtener la ecuación que describe el movimiento del actuador, la cual es necesaria para continuar con los cálculos y diseño del control del proyecto.

Para esto se utiliza el lado “ ” que se ve en la figura 3.4 y utilizando la ley de cosenos se obtiene:

$$\text{Utilizando la siguiente identidad trigonométrica} \quad (\quad) \quad (3.2)$$

$$\text{La ecuación se simplifica en:} \quad (\quad) \quad (3.3)$$

$$(3.4)$$

Es necesario relacionar la distancia de desplazamiento de la parte lineal del actuador con el movimiento angular, por lo que al despejar la función seno se obtiene:

$$\underline{\hspace{10em}} \quad (3.5)$$

Despejando θ que es la salida del sistema se obtiene:

$$\left(\text{—————} \right) \quad (3.6)$$

La ecuación 3.6 es la que describe el funcionamiento del actuador de doble efecto rotativo, que es la parte principal para el desarrollo del control del sistema.

Para observar de una manera más concreta el tipo de comportamiento del actuador se evalúa la ecuación 3.6 que corresponde al comportamiento del actuador en el software Mathematica 7, en la figura 3.5 se observa el resultado de evaluar el comportamiento del actuador.

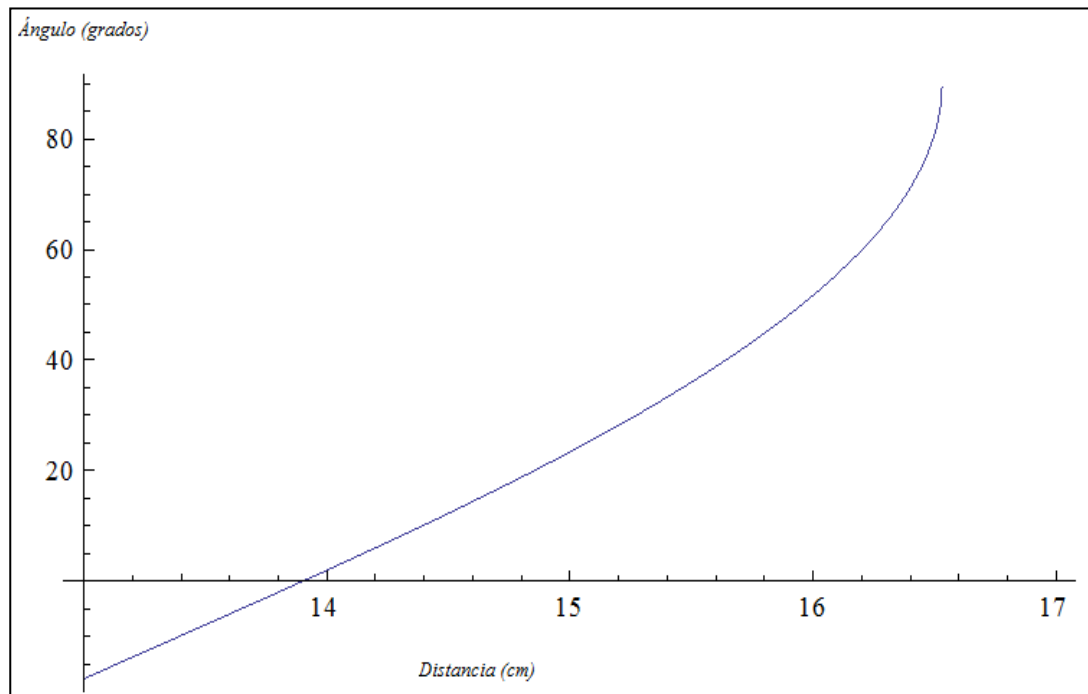


Figura 3.5.- Gráfica del movimiento lineal-movimiento angular del actuador.

La gráfica de la figura 3.5 muestra el comportamiento del AHDR con las medidas de diseño basadas en los elementos para su construcción que se ven en el anexo II.

En la figura 3.5 se representa el movimiento angular en la vertical y el movimiento lineal en la horizontal de la gráfica. Como se puede observar el comportamiento del actuador no es lineal, lo que por consecuencia dificulta el diseño del control por las teorías clásicas. Aquí se concluye que para desplazamientos pequeños (el émbolo se encuentra más alejado del elemento rotativo) existe un mayor desplazamiento angular, que a medida que el émbolo se acerca al rotor.

Debido a esta situación es muy importante contar con un control que sea lo más sensible posible para que la precisión del movimiento del actuador tenga mayor resolución.

En la figura 3.6 se aprecia un resumen de la obtención de ecuaciones necesarias para el análisis practicado al AHDR basado en las proyecciones y la geometría del diseño del mismo.

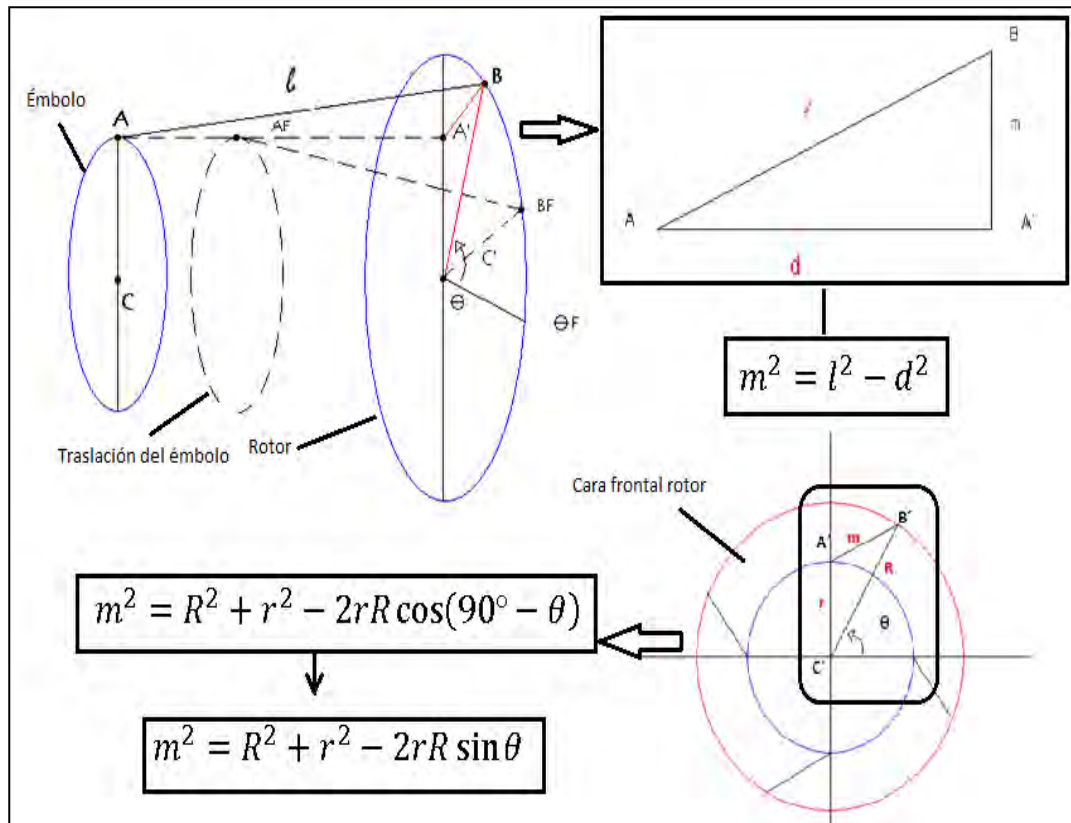


Figura 3.6.- Análisis matemático del actuador de doble efecto rotativo.

3.2 Componentes del sistema hidráulico

El desarrollo del control del actuador requiere de diversos componentes, es muy importante señalar que para el control a desarrollar en este proyecto son necesarios varios componentes los cuales se muestran a continuación.

- Bomba hidráulica
- Válvula
- Cilindro hidráulico de doble efecto rotativo
- Codificador óptico absoluto (ENCODER)

Estos componentes representan en grupo, el sistema a controlar de manera completa el cual se muestra en la figura 3.7.

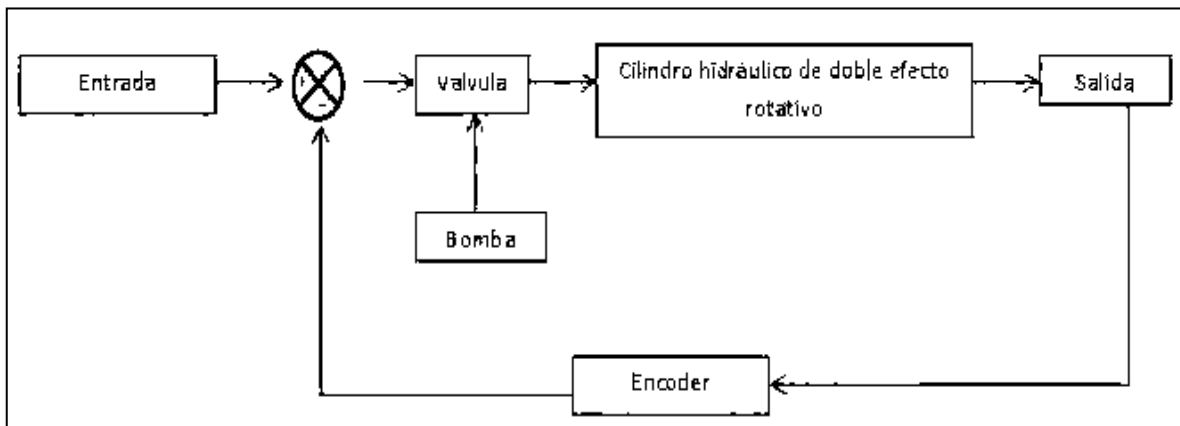


Figura 3.7.- Diseño del sistema hidráulico.

La figura 3.7 muestra un diagrama de como funcionará el sistema a controlar, por principio de cuentas se cuenta con la entrada, en este caso se refiere a una señal que junto con la retroalimentación obtenida por el codificador óptico absoluto, proporcionan la señal de error para hacer funcionar la válvula que a su vez accionará el cilindro hidráulico, una peculiaridad que se observa en el

diagrama es la bomba, ésta sirve de alimentación y suministro de la línea hidráulica del sistema; es decir, **válvula, cilindro (actuador) y bomba representan la planta a controlar.**

Cabe destacar que a este diagrama hay que incluir el controlador a seleccionar y diseñar en este proyecto, el cual interpreta la señal de error del sistema y entrega la señal de control en la válvula del sistema. El diagrama completo se muestra en la figura 3.8.

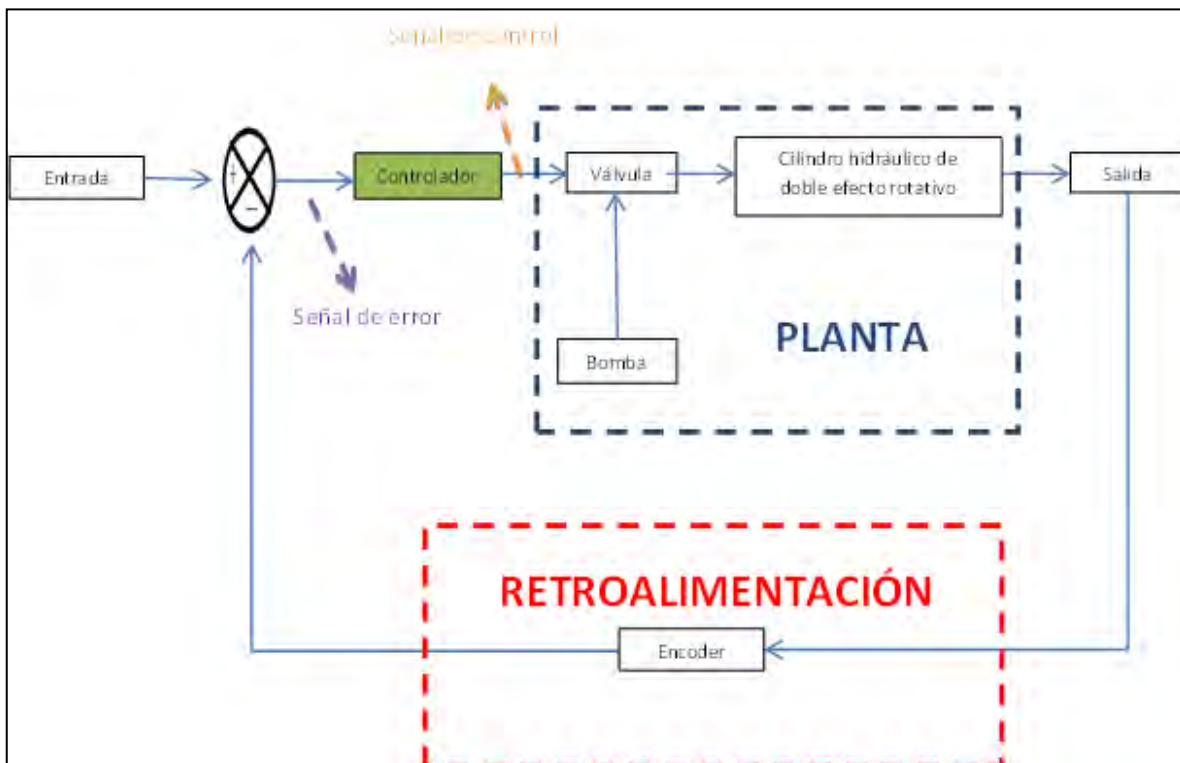


Figura 3.8.- Diagrama completo del sistema a controlar.

Como se observa en la figura 3.8 la planta a controlar se compone de distintos elementos, esto nos lleva a la selección de los mismos para relacionar las ecuaciones que gobiernan estos componentes con la ecuación que se obtuvo del actuador hidráulico del proyecto (ecuación 3.6).

Para esto es necesario analizar los elementos y saber que variable se va a obtener como salida de cada uno de ellos.

3.2.1 Selección y análisis de componentes

El diseño del sistema de control dependerá del caudal de la línea hidráulica de la planta, esto debido a que para un cilindro hidráulico la distancia que su émbolo se desplaza de manera lineal está representada por la ecuación:

$$— \tag{3.7}$$

Donde:

En la figura 3.9 se observa el análisis de la ecuación 3.7 que se utilizará para complementar el análisis [7].

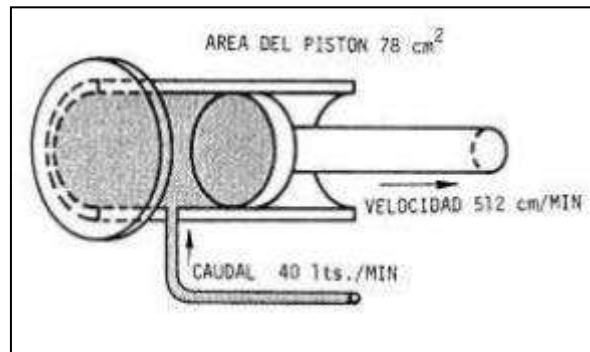


Figura 3.9.- Velocidad y desplazamiento en un cilindro [7].

- Válvula

Existen muchos tipos de válvulas, sin embargo, para fines de este proyecto se limita en base a las necesidades del proyecto, a las electro-válvulas, éstas son accionadas por una señal de voltaje o corriente eléctrica y pueden ser de distintos tipos (direccionales, reguladoras, ON-OFF, seguridad, mando manual, etc.), sin embargo, para su uso se enfoca el desarrollo del trabajo en dos tipos: la válvula direccional reguladora de caudal y la válvula direccional ON/OFF.

En este tipo de válvulas es importante relacionar el caudal con la señal de entrada para esto se utiliza una válvula estranguladora proporcional, basándose en el modelo de FESTO Fluidsim-hydraulic que indica que para modificar el caudal que atraviesa la válvula, la sección transversal de la válvula estranguladora es manipulada eléctricamente con la ayuda de un amplificador proporcional. La tensión de control debe hallarse entre 0 y 5 volts [14].

En la figura 3.10 se observa el movimiento de la corredera de una válvula proporcional, la cual apartir de una señal electrica permite el paso de cierta cantidad de caudal suministrado; para el proyecto desarrollado en este trabajo se utiliza una válvula con un comportamiento lineal, es decir, con el máximo de la señal electrica de entrada la válvula permite el máximo caudal posible.

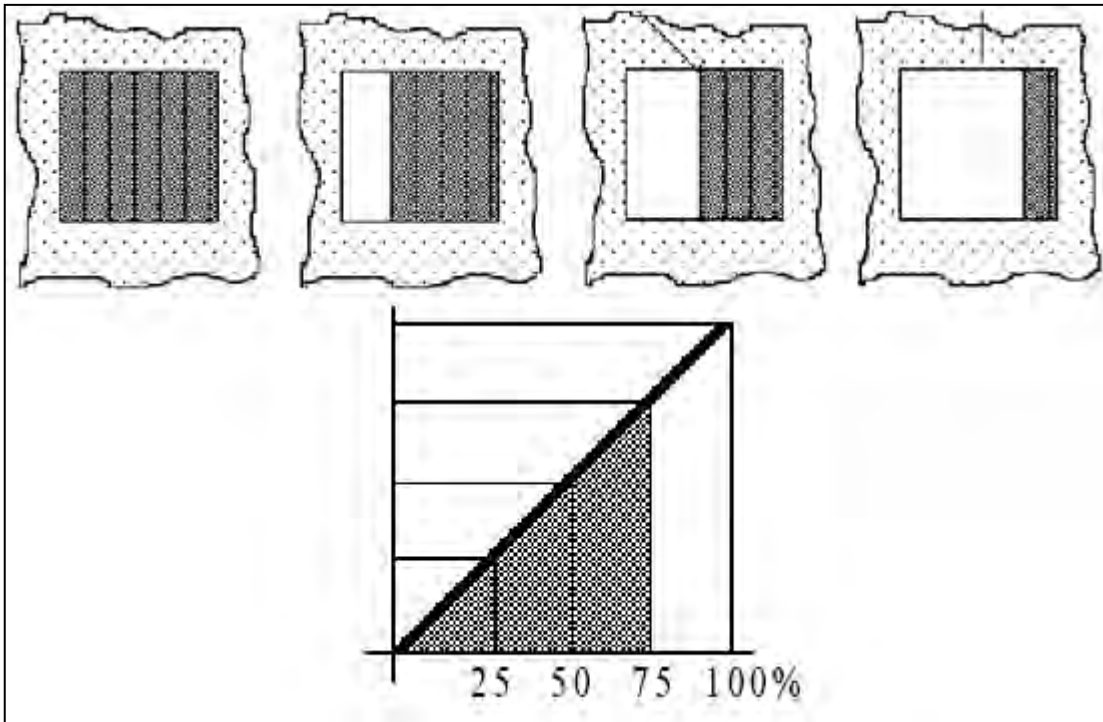


Figura 3.10.- Comportamiento de una válvula con corredera cuadrada [15].

El desplazamiento de la corredera es proporcional a la tensión aplicada. A 0 volts la válvula estará completamente cerrada [15]. La válvula corresponde al anexo III en el que se observan las características de la misma.

Para el caso de la válvula ON/OFF su comportamiento es más sencillo, ésta sólo requiere una señal de accionamiento para dejar pasar el fluido que alimenta al sistema, como en este proyecto se controla un cilindro de doble efecto, la válvula que se requiere es la que se muestra en la figura 3.11.

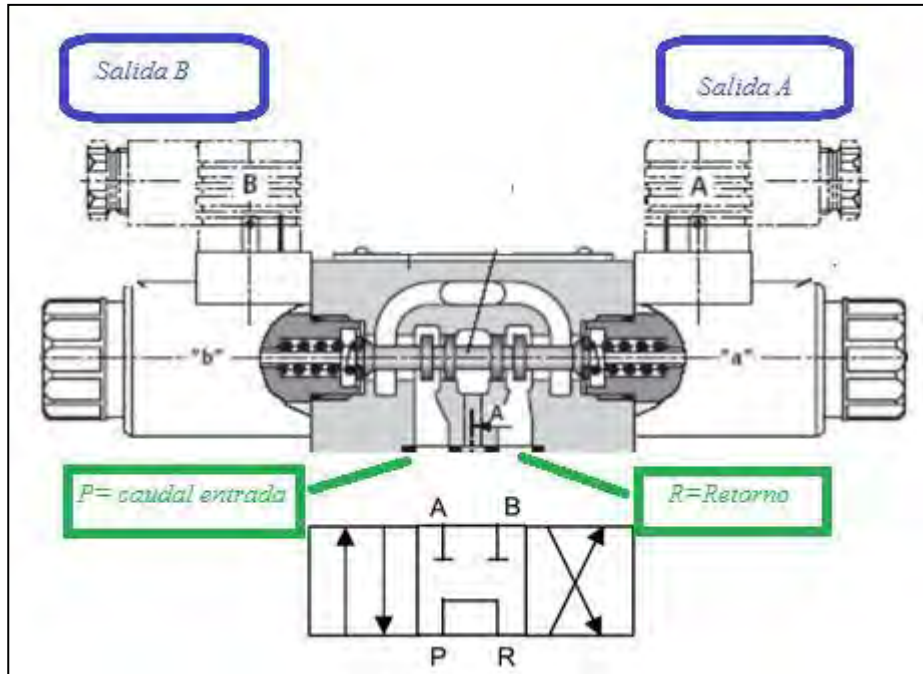


Figura 3.11.- Válvula direccional ON/OFF 4/3 (vías/posiciones) [15].

Las posiciones que maneja la válvula mostrada en la figura 3.11 son 3: alimentación conducto A-liberación conducto B, alimentación conducto B-liberación conducto A y bloqueo de conductos (A y B)- flujo en retorno (de P a R); con este tipo de válvula una señal de control eléctrica indica la activación de las posiciones en el artefacto.

Con ayuda de las figuras 3.10 y 3.11 se puede obtener la ecuación gobernante de la válvula para el sistema, la cual relaciona la señal de voltaje con el caudal que la válvula permite pasar.

$$(3.8)$$

Donde:

La ecuación gobernante es aplicable a los dos tipos de válvulas, ya que lo que varía es la cantidad de voltaje para abrir el paso de flujo donde en el caso ON/OFF es fijo y que en la válvula reguladora es variable.

- Bomba hidráulica

Una bomba hidráulica es una máquina generadora que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía hidráulica del fluido incompresible que mueve. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos como puede ser el hormigón antes de fraguar o la pasta de papel.

Para efectos del proyecto es muy importante señalar que una bomba **trabaja con un caudal constante, éste dependiendo de sus especificaciones; es decir, la bomba NO produce presión en la línea hidráulica**, la presión se produce por acción de la resistencia al flujo [7].

Un ejemplo se puede observar en la figura 3.12 donde se aprecia las especificaciones de trabajo de una bomba y con las cuales se calcula el caudal que entregará al estar trabajando.

Bombas – Desplazamiento fijo

Engranajes

PGP 500, 600



- Extraordinario rendimiento
- Alta eficiencia
- Bajo ruido de funcionamiento a elevadas presiones de trabajo
- Formatos y conexiones internacionales
- Capacidades de válvula integrada
- Configuraciones de bombas múltiples con una entrada común


 zp 44

Tamaño bastidor	PGP 502	0008	0012	0016	0021	0025	0033	0036	0043	0048	0058	0062	0079
Desplazamiento (cm ³ /rev)		0,8	1,2	1,6	2,1	2,5	3,3	3,6	4,3	4,8	5,8	6,2	7,9
Presión máx. cont. (bar)		275	275	275	275	275	275	250	210	160	160	150	120
Veloc. máx. trabajo (rpm)		4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	3500	3000	3000	3000	2500
Peso (kg)		1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6

Figura 3.11.- Especificaciones de una bomba hidráulica.

Con los datos encerrados en el recuadro de la figura 3.12 se observa que una bomba trabaja a una máxima presión en el sistema de 275 bar., y con el desplazamiento de la bomba y la velocidad en rpm se calcula el caudal que entrega la bomba de la siguiente manera:

$$(3.9)$$

$$(3.10)$$

Integrando el comportamiento de todos los componentes se calcula la ecuación final del sistema a controlar, para esto se sustituye primeramente la ecuación (3.7) en (3.6) obteniendo:

$$\left(\frac{(-)}{(-)} \right) \quad (3.11)$$

Se sabe que **el caudal es constante** gracias a las especificaciones de la bomba, sin embargo, el flujo que controlará el movimiento del actuador depende del comportamiento de la válvula, por lo cual se sustituye (3.8) en (3.11) y así se obtiene la ecuación final.

$$\left(\frac{(-)}{(-)} \right) \quad (3.12)$$

De la ecuación 3.12 **se concluye que la salida del sistema es (movimiento angular) y la entrada (voltaje).**

3.3. Sistema hidráulico completo

Los elementos analizados en la sección 3.2 conjuntan la planta a controlar en este proyecto. Si bien lo que se pretende es controlar el AHDR por medio de elementos electrónicos, **es imposible realizarlo sin la presencia de los componentes hidráulicos**; centrando la atención en la ecuación 3.12 que describe el modo de operación del sistema completo.

En la figura 3.13 se puede apreciar el sistema hidráulico a controlar que es simulado en el software FESTO Fluidsim-hydraulic, en él se puede ver que existe un elemento eléctrico que sirve de generador de señales de activación hacia la válvula, ésta a su vez permite el paso de la línea hidráulica para el funcionamiento del cilindro.

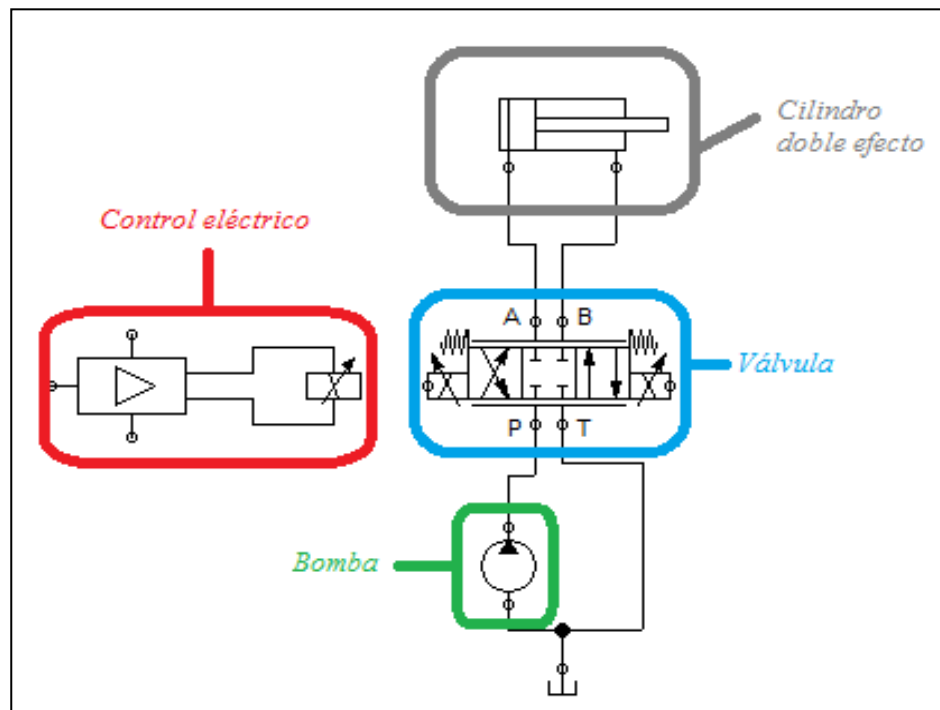


Figura 3.13.- Sistema hidráulico completo.

La válvula que se observa en la figura 3.13 representa los dos tipos de válvula propuesta ya que el software permite manipular la entrada eléctrica de la válvula produciendo un comportamiento proporcional o de ON/OFF.

En un sistema hidráulico existen muchas maneras de controlar o hacer funcionar sus elementos; en este caso, el propósito es controlar el flujo que suministra la bomba hidráulica de manera constante, por medio de la apertura y posición en la válvula. Sin embargo, existen diferentes perturbaciones en sistemas de este tipo como la presión, fuerza, etc. generadas en el sistema y es necesario su estudio ya sea para descartarlas o considerarlas en el desarrollo del control del actuador.

La validación del sistema a controlar se obtuvo utilizando el software FESTO FluidSim Hidráulica, con el fin de apreciar que es posible regular el tiempo en el que un cilindro hidráulico llega a su posición final, por medio de una electroválvula, además de comprobar que la carga y presión generada en el cilindro no influye en este tiempo.

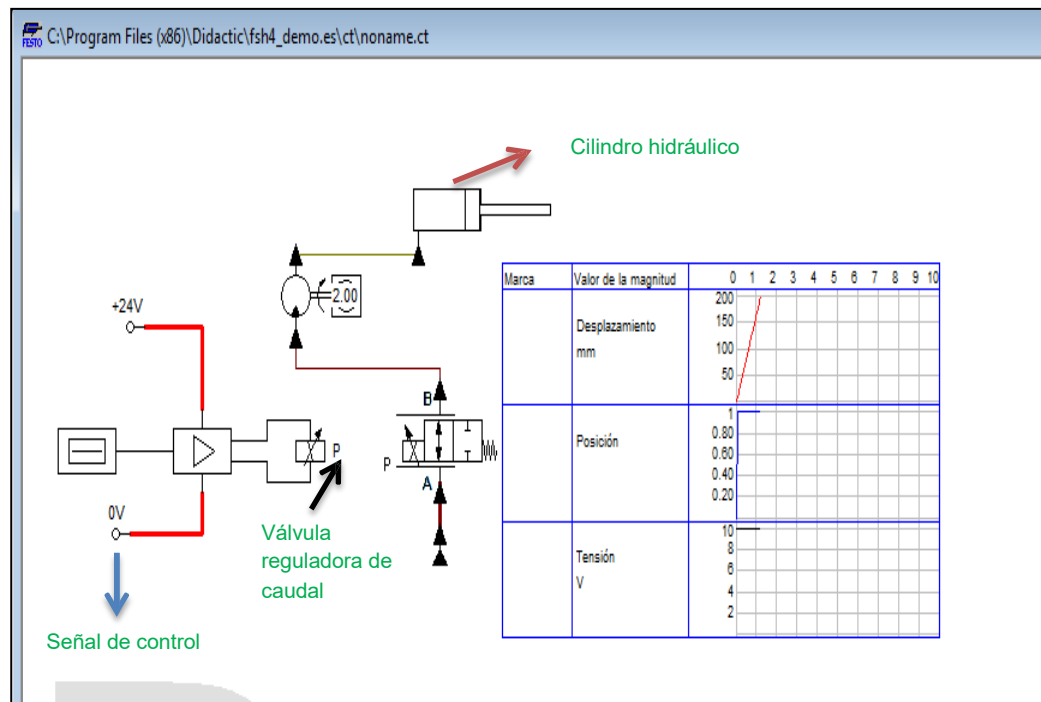


Figura 3.14.- Simulación de sistema apertura de válvula al 100% sin carga

Como se aprecia en la figura 3.14 el sistema está controlado por una señal de voltaje constante, con la cual la apertura de la válvula está al 100% permitiendo al cilindro estar alimentado con el máximo caudal posible, generando un desplazamiento total del cilindro en aproximadamente 1.3 segundos para este ejemplo.

Modificando los parámetros de carga se obtienen los resultados mostrados en la figura 3.14, con lo que se validan las ecuaciones obtenidas para desarrollar el control del sistema. Además de que permite observar que el diseño del sistema hidráulico y de sus componentes es el correcto para el desarrollo de este proyecto [14].

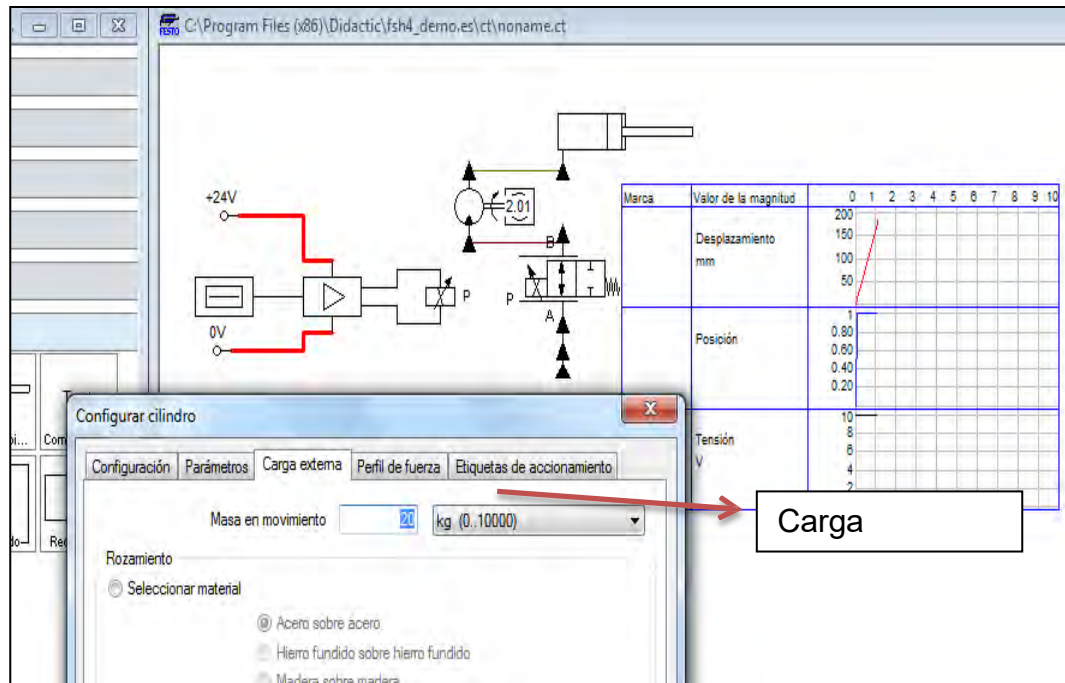


Figura 3.15.- Simulación con grada externa en el cilindro

Como se observa en la figura 3.15, cada elemento permite modificar ciertas condiciones de uso [14], **al modificar la carga del cilindro se observa que el tiempo en que logra su desplazamiento total, es el mismo que sin carga**, lo que valida el análisis del sistema; además existe la posibilidad de modificar la

forma de onda de la señal de control, dando diferentes resultados en el movimiento del cilindro, lo que permite asegurar que **la entrada del sistema es una señal de voltaje variable o constante y que el movimiento del cilindro depende del caudal de entrada proporcionado por la bomba.**

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN CINEMÁTICA

DEL AHDR

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN CINEMÁTICA DEL AHDR

4.1. Diseño geométrico del modelo

La caracterización cinemática del actuador se refiere a la visualización del movimiento que realizará físicamente el artefacto; para conseguirlo se utilizó el software Workbench Ansys, con el fin de obtener el comportamiento del actuador estudiado en este trabajo.

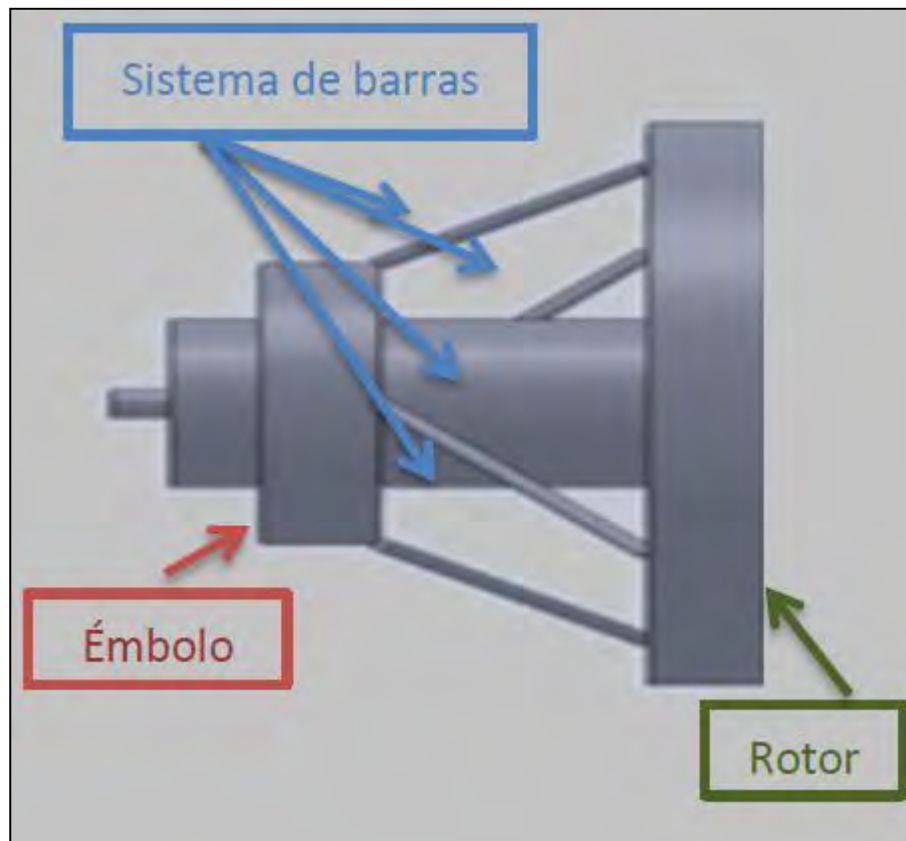


Figura 4.1.- Diseño AHDR

Tomando como punto de partida el diseño presentado en la figura 4.1, se construye la geometría del AHDR; como se puede ver en el diseño el sistema de barras que sirve de unión entre el émbolo y el rotor consta de cuatro barras; sin embargo, ya que **la caracterización es meramente cinemática**, es decir, no se

tomarán en cuenta las fuerzas que se presenten entre los elementos, es posible construir la simulación con una sola barra de conexión lo que simplifica su geometría.

Utilizando las herramientas de dibujo con las que cuenta el software [16], se construye la geometría del actuador que se observa en la figura 4.2.

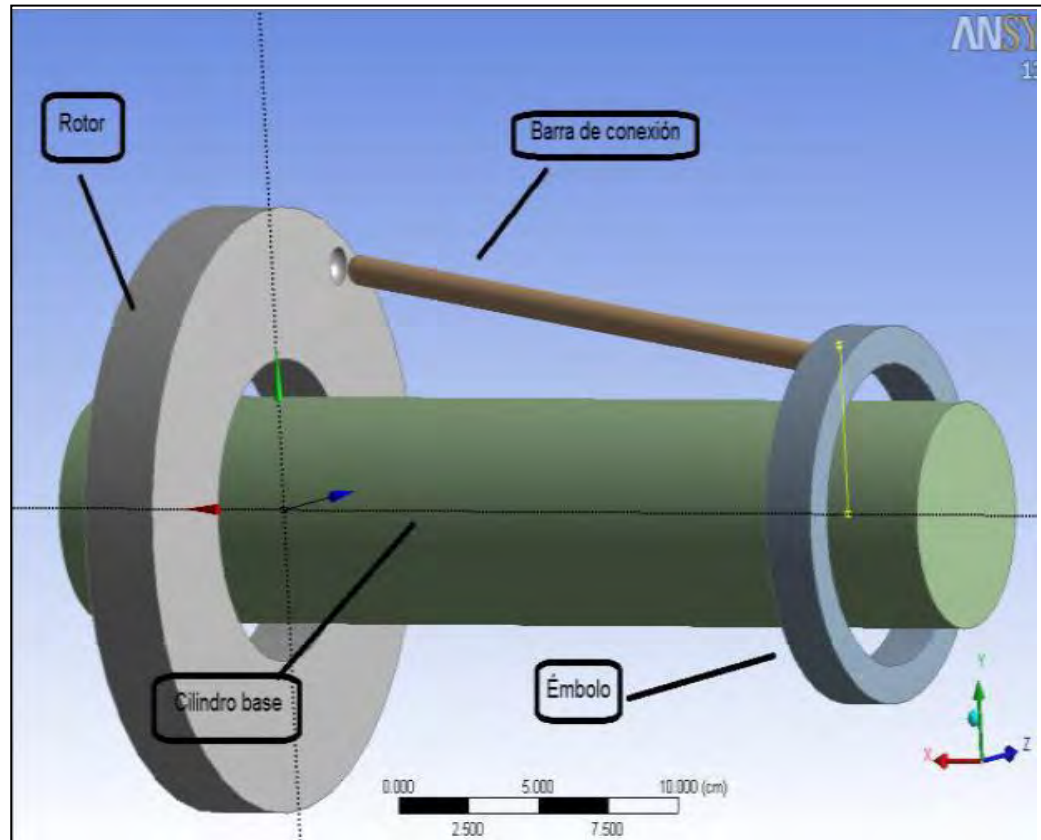


Figura 4.2.- Geometría del proyecto.

Como se aprecia en la figura 4.2 la geometría consta de cuatro elementos: el rotor, donde el actuador tendrá su movimiento angular; el émbolo, parte del diseño que se mueve de manera lineal; barra de conexión, elemento que une al émbolo y rotor, a partir de esta unión es posible el cambio de movimiento de traslación a rotación y el cilindro base el cual permitirá el paso del vástago del cilindro de doble efecto en el que se basa el diseño del AHDR (véase *anexo II*).

La construcción de la geometría envuelve evidentemente las dimensiones con las que se pretende construir físicamente el actuador, estas dimensiones están basadas en un cilindro de doble efecto de 126 mm de longitud con una carrera de su vástago de 75 mm (véase *anexo II*) y en los rodamientos que fungirán como el émbolo y el rotor que tienen medidas de 40 mm y 60 mm de diámetro respectivamente; con estos datos se construye el modelo a simular, las dimensiones de los elementos se observan en la tabla 4.1.

Elemento	Medidas (mm)
Radio exterior del Rotor	30
Radio interior del Rotor	17.5
Ancho del Rotor	10
Radio exterior del Émbolo	20
Radio interior del Émbolo	17.5
Ancho del Émbolo	10
Radio Cilindro base	15
Longitud Cilindro base	170
Radio Barra de conexión	4
Longitud Barra de conexión	13.5

Tabla 4.1.- Medidas del modelo a simular.

Las medidas presentadas en la tabla 4.1 se basan en los modelos reales de los elementos a utilizar en la construcción del AHDR; es importante señalar que la longitud del cilindro base se encuentra sobredimensionada para una mejor visualización, su longitud real es de 150 mm.

Al tomar como referencia la cara del rotor, el punto de unión de la barra de conexión y el rotor forma **un ángulo de 33.7° con la vertical** del sistema de coordenadas sobre el rotor el cual se aprecia en la figura 4.3.

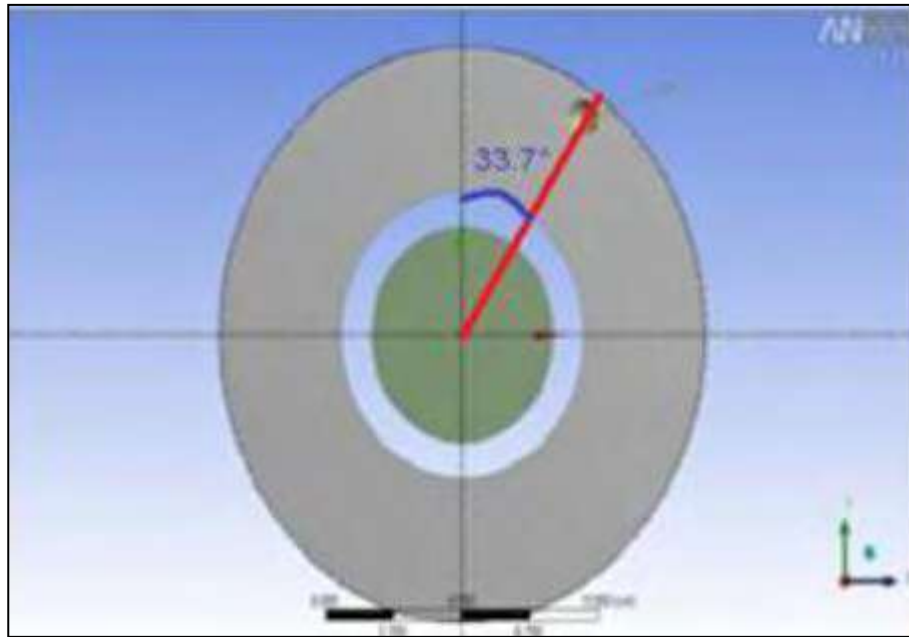


Figura 4.3.- Ángulo punto unión barra-rotor.

La determinación de la posición de la conexión de la barra es elegida por la simpleza de localizarla, **es una medida con el fin de determinar únicamente el comportamiento del artefacto**; la conexión de la barra al émbolo, se encuentra sobre el eje “Y” tomando en cuenta como referencia la cara del émbolo.

La unión de la barra al rotor, presenta una inclinación con respecto a la vertical tomando como referencia el cilindro base, esta inclinación facilita el movimiento de rotación deseado en el actuador (*Figura 4.3*).

4.2. Características cinemáticas del AHDR

Después de construir la geometría del modelo a observar, se indican las características que el diseño tiene; estas características se refieren a las condiciones de movimiento que cada elemento del modelo a simular permite.

Para determinar las características el software permite agregar conexiones o relaciones entre los elementos [16]. Para comprobar el funcionamiento del

artefacto a analizar son necesarias varias especificaciones, que sin ellas la simulación no es posible de realizarse.

4.2.1. Conexiones entre elementos.

Las relaciones entre los elementos o conexiones como son llamados en el software, permiten limitar los movimientos que cada elemento realizará; las características principales del actuador son los movimientos de traslación (lineal) del émbolo y el de rotación (angular) en el rotor.

Para cumplir con las características principales es necesario colocar una conexión fija en el cilindro base; es decir, que este elemento **no tendrá movimiento** en ninguna dirección durante la simulación. Las siguientes conexiones son las del movimiento de traslación (émbolo-cilindro base), la cual permitirá un movimiento lineal del émbolo sobre el cilindro base y la conexión rotacional (rotor-cilindro base), donde se obtendrá el movimiento deseado en el actuador.

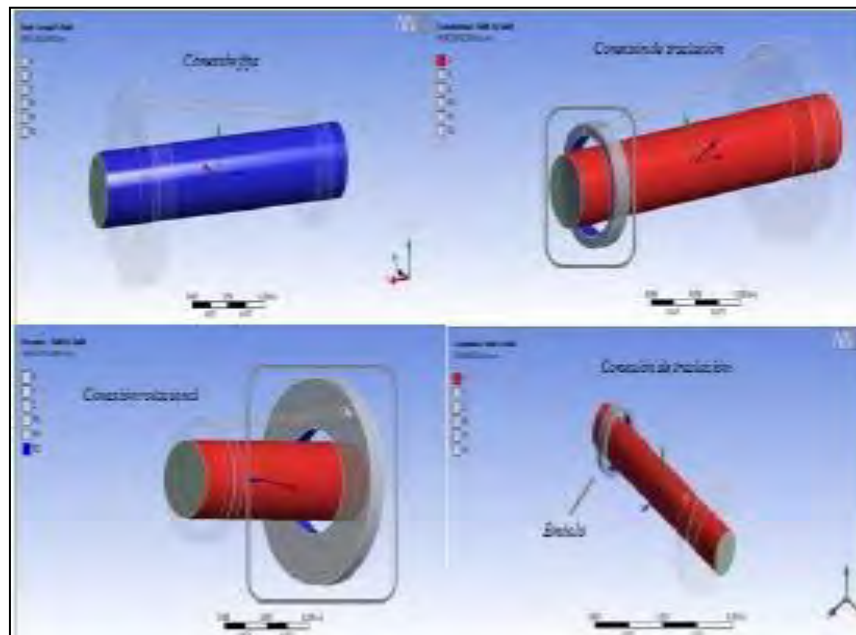


Figura 4.4.- Conexiones principales del AHDR.

En la figura 4.4 se pueden apreciar las conexiones principales del artefacto a simular las cuales envuelven el concepto básico del diseño estudiado en este trabajo, que es el de a partir de un movimiento lineal la obtención de un movimiento giratorio. Sin embargo, **las conexiones más importantes dentro de la simulación son las que se dan en la barra de conexión con el émbolo y el rotor.**

El software permite diferentes tipos de conexiones que permiten libertad de movimientos en diferentes sentidos y direcciones; las condiciones necesarias para que el actuador funcione de la manera deseada son: **las conexiones deben permitir movimientos en todas direcciones** ya que con alguna limitación en las conexiones el movimiento del actuador no es posible.

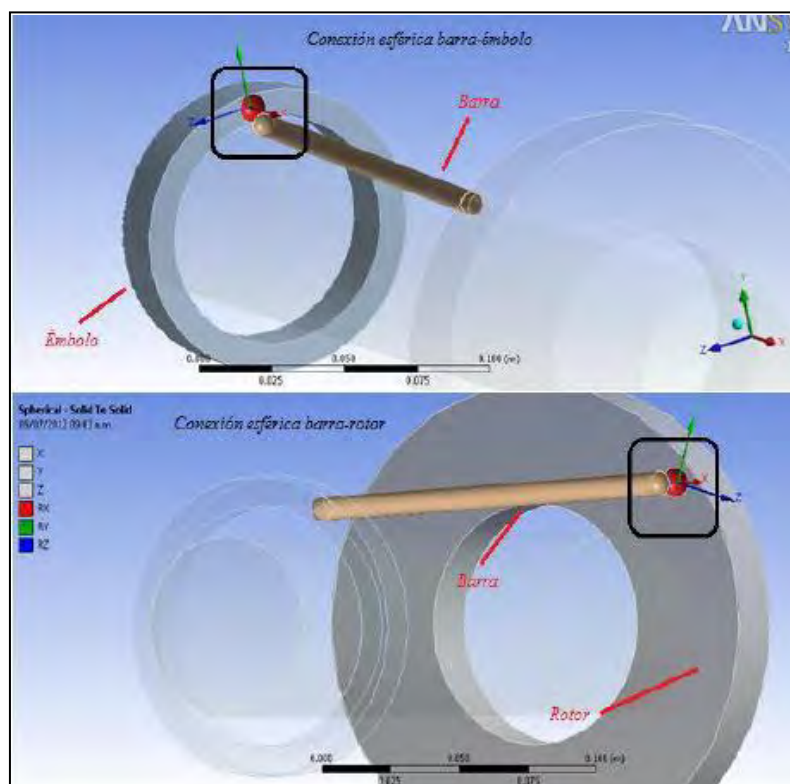


Figura 4.5.- Conexiones esféricas del modelo.

En la figura 4.5 se pueden apreciar las conexiones esféricas de la barra con el émbolo y el rotor respectivamente; y son estas relaciones las que permiten la transformación de un movimiento lineal a un movimiento de rotación ya que este tipo de conexión es la que permite movimiento en toda dirección [16].

4.2.2. Condiciones iniciales.

Como se mencionó en el capítulo 3 el diseño de este nuevo artefacto (AHDR) se basa en el movimiento lineal del vástago de un cilindro de doble efecto común, por lo que en la simulación es necesario introducir esta característica como condición inicial, para esto se agrega un desplazamiento lineal en el émbolo con lo que se podrá visualizar el movimiento en el actuador.

El desplazamiento se obtiene colocando una condición de velocidad en el émbolo ya que se requiere observar en el tiempo continuo que sucede para el análisis; **la magnitud de la velocidad no es importante para efectos del movimiento ya que es constante** y sólo afecta que tan rápido o lento el actuador se movería.

4.3. Simulación cinemática del AHDR.

Con las características configuradas en la sección 4.2 se procede a resolver la simulación de la geometría de la simulación. En la figura 4.6 se observa el primer resultado de la simulación.

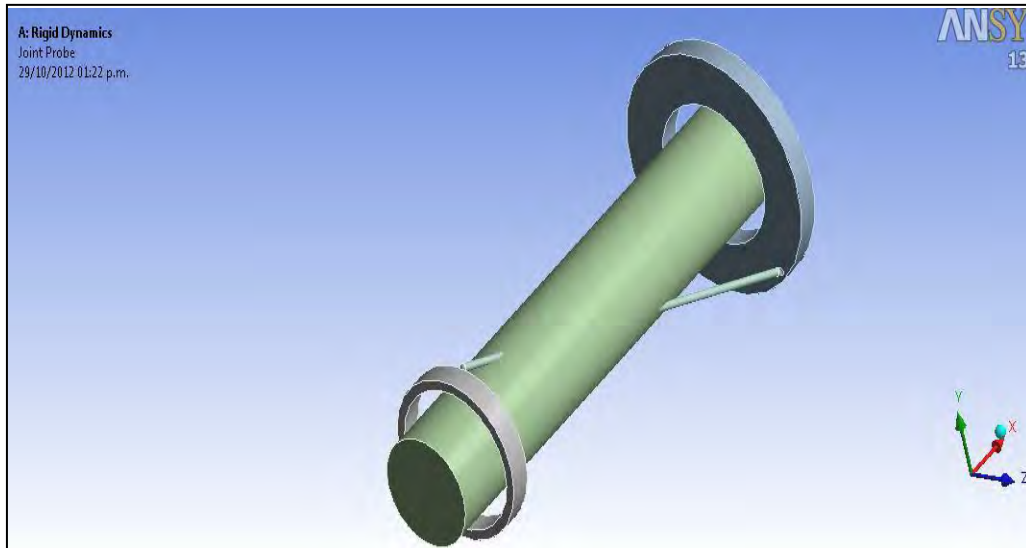


Figura 4.6.- Simulación sin limitaciones

Como se puede observar en la figura 4.6, **el movimiento del actuador se encuentra limitado a un máximo avance de rotación** (para las medidas utilizadas), ya que físicamente la barra de conexión chocaría con el cilindro base por lo tanto, **para efectos del diseño de control del actuador es necesario conocer el máximo avance para agregar la condición de limitante al control** a utilizar en el mismo.

Para su obtención se utiliza las herramientas que el software nos permite al poder dividir el tiempo en “steps” o pasos y observar en que punto se encuentra el máximo desplazamiento angular.

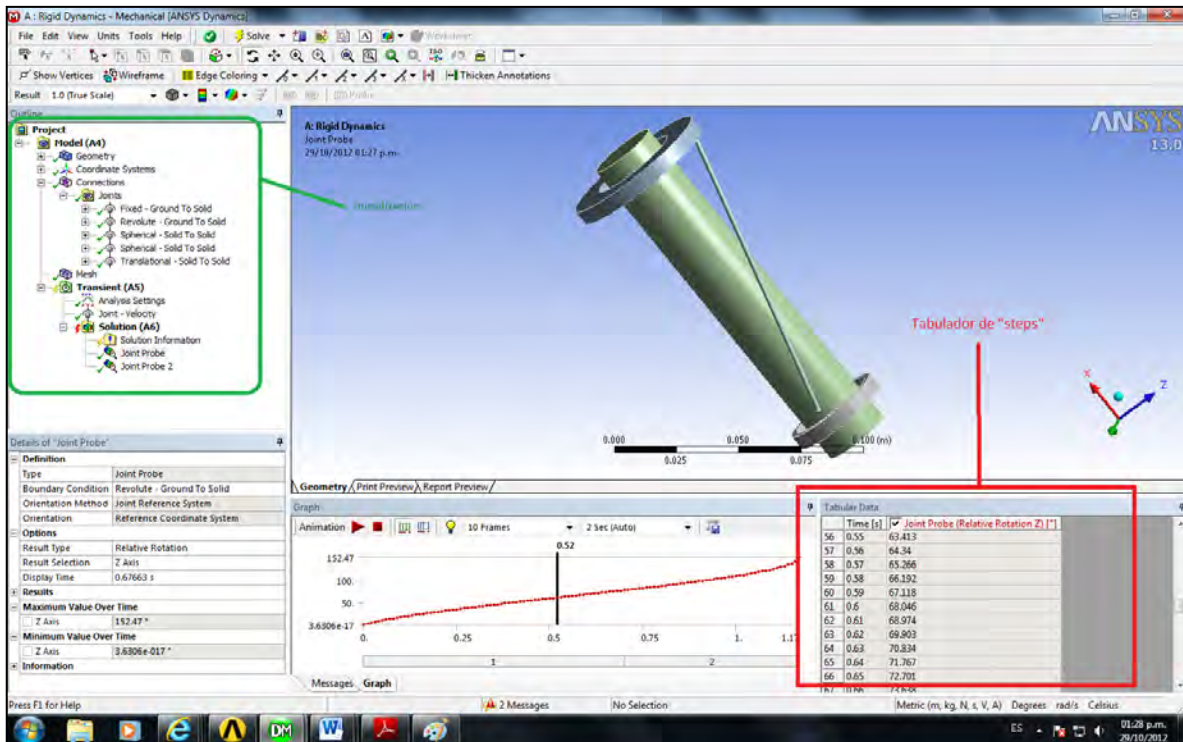


Figura 4.7.- Pantalla de simulación Workbench Ansys.

En la figura 4.7 se observa la pantalla de trabajo, se puede apreciar las conexiones, las condiciones iniciales y las puntas de pruebas en el recuadro de inicialización y por medio del tabulador de "steps" se encuentra **el máximo avance el cual corresponde a un ángulo de 75° aproximadamente** tomando como referencia la vertical de la cara del rotor.

Tomando en cuenta el ángulo inicial del punto de conexión de la barra con el rotor visto en la figura 4.3, la conexión terminaría con un ángulo de 105.7° con respecto a la vertical.

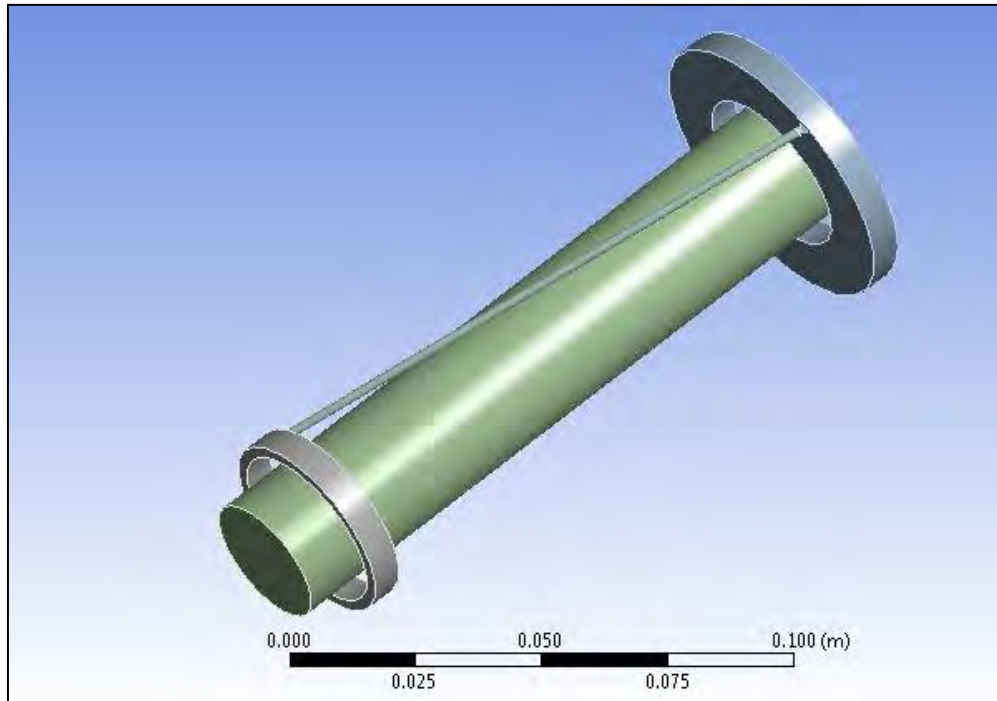


Figura 4.8.- Máximo avance del modelo.

El desplazamiento angular máximo se puede apreciar en la figura 4.8 donde se aprecia que no existe contacto entre la barra de conexión y el cilindro base, dándose así un dato importante a considerar en el diseño de control del AHDR.

Otro aspecto importante a considerar en la caracterización cinemática es el movimiento de la barra de conexión, ya que ésta en sus extremos cuenta con libertad de movimiento en todas direcciones. Para su visualización se agrega una pequeña pestaña a la geometría de la barra.

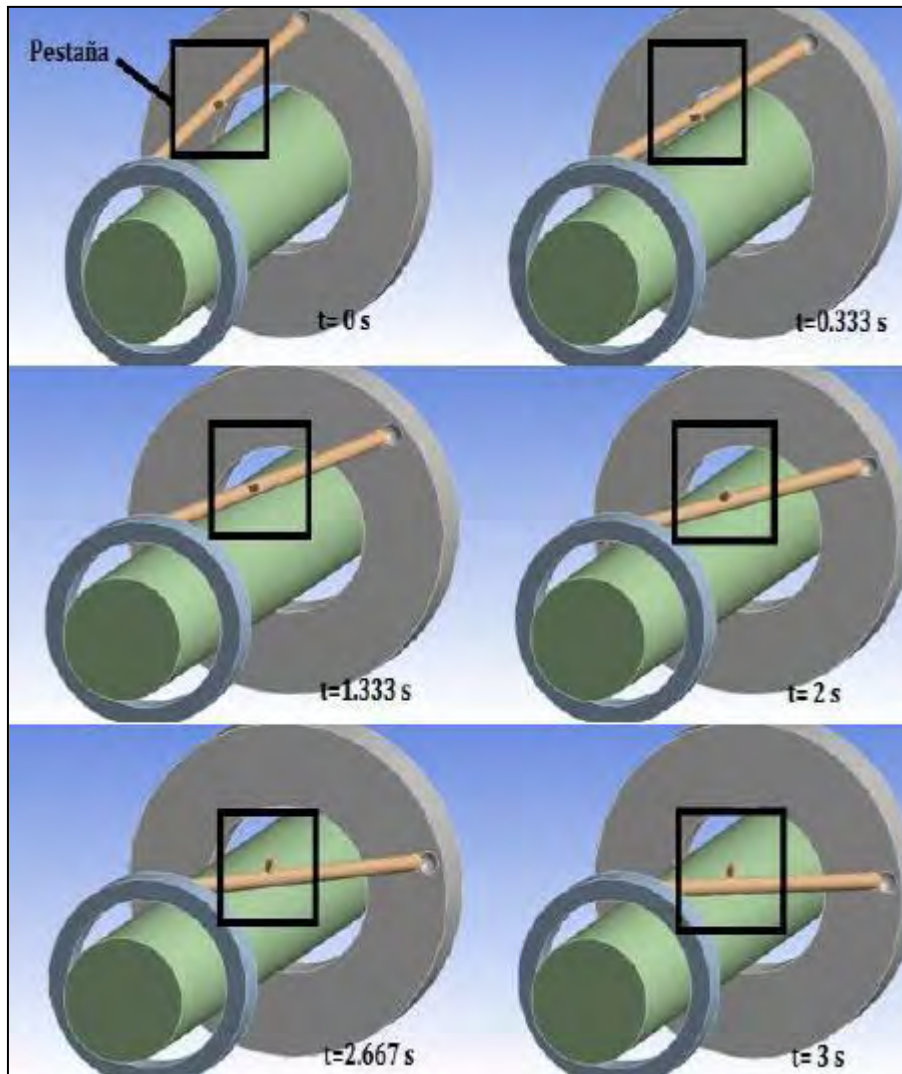


Figura 4.9.- Movimiento barra de conexión.

En la figura 4.9 se observa una secuencia de imágenes en diferentes tiempos de la simulación, donde se puede concluir que **la barra de conexión tiene un movimiento giratorio con relación a su eje.**

Esta característica permite descartar la utilización de una geometría curva en la barra de conexión ya que **entre mayor sea su radio de giro la posibilidad de contacto con el cilindro base aumenta.**

CAPÍTULO 5

DISEÑO DE CONTROL DE

VÁLVULA DIRECCIONAL ON/OFF

CAPÍTULO 5. DISEÑO DE CONTROL DE VÁLVULA DIRECCIONAL ON/OFF

5.1. Componentes del sistema a controlar

El diseño del control depende de las características de funcionamiento de los elementos del sistema hidráulico, que representan la planta del sistema total a controlar, así como de los elementos de retroalimentación y componentes eléctricos.

Los componentes del sistema hidráulico son: bomba hidráulica, válvula direccional ON/OFF y cilindro de doble efecto; los tres elementos forman la planta del sistema a controlar, estos elementos cuentan con características de operación propias que se deben tomar en cuenta para el diseño del control del sistema que acciona el AHDR.

5.1.1. Cilindro de doble efecto

El cilindro hidráulico de doble efecto que se utilizará tiene las medidas que se presentan en la figura 5.1 y en el anexo II, estas medidas se seleccionan con el fin de que las medidas del AHDR sean lo más pequeñas posibles, además de que su máxima presión de operación sea lo suficientemente grande para soportar las cargas que se presenten en sus posibles aplicaciones.

La presión máxima soportable por este cilindro es de 140 bar o 2030 psi; sin embargo, **las características físicas del cilindro no son de relevancia para el control con válvula ON/OFF ya que el funcionamiento no depende de sus medidas.**

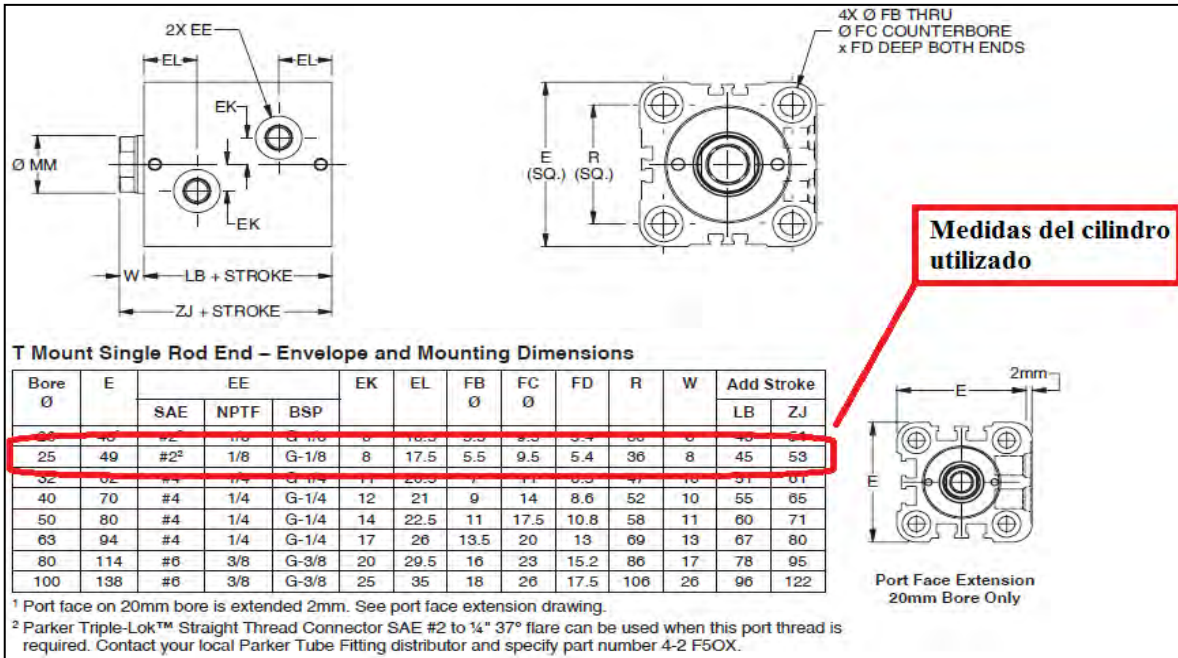


Figura 5.1.- Medidas del Cilindro hidráulico de doble efecto.

Las medidas del cilindro hidráulico de doble efecto se muestran en la figura 5.2; este elemento será conectado al émbolo del AHDR que representa el movimiento lineal del actuador estudiado en este trabajo.



Figura 5.2.- Cilindro hidráulico de doble efecto.

En la figura 5.2 se puede apreciar las entradas del cilindro, estas funcionan también como salidas dependiendo el sentido del movimiento ya sea el despliegue del vástago o su retorno.

5.1.2. Bomba hidráulica

La bomba hidráulica es el suministro del fluido a la planta del sistema, la utilizada en este proyecto tiene un número de serie 108AMS25HRR1H2525 que se puede ver en el anexo V; las características que son de interés para el desarrollo del control a mostrar en esta sección son únicamente sus características eléctricas; la figura 5.3 muestra la bomba hidráulica a utilizar en el sistema a controlar.



Figura 5.3.- Bomba hidráulica.

Como se aprecia en la figura 5.3 las conexiones eléctricas son tres, esto debido a que la bomba cuenta con un circuito reversible, es decir, que el sentido del motor de la bomba cambia al conectar el cable azul o el cable verde utilizando el cable negro como tierra eléctrica, haciendo que los orificios de salida y retorno cambien su sentido.

Las características de alimentación eléctrica de la bomba son de 12 VCD con un consumo variable de corriente dependiendo de la presión de operación que el sistema le demande. Cabe destacar que **la presión será conocida únicamente al saber la aplicación a la que el sistema será sometido.**

5.1.3. Válvula direccional ON/OFF

Sin duda alguna **el elemento más importante para el desarrollo del control ON/OFF es la válvula** a utilizar en la planta del sistema, ya que ésta es la que permite el paso de fluido o detiene la continuidad del mismo y por lo tanto, acciona o detiene el movimiento del actuador analizado en este trabajo.

La válvula que se utilizará en este control tiene un número de serie D1VW008CNJC, se puede ver en el anexo III, esta válvula es de 4 vías 3 posiciones su símbolo se puede observar en la figura 5.4.

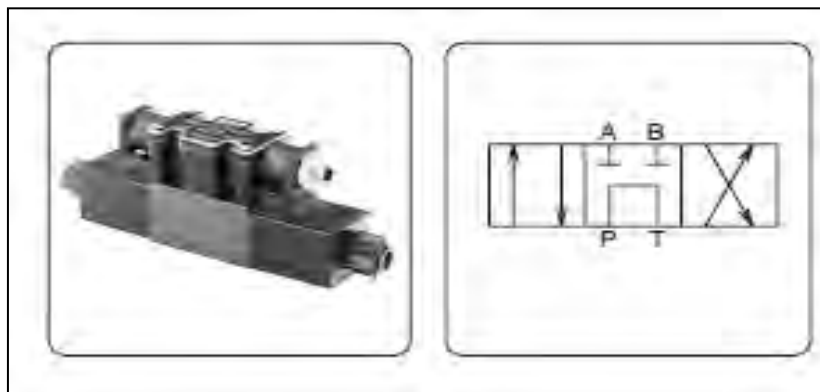


Figura 5.4.- Símbolo válvula direccional ON/OFF.

Como se observa en la figura 5.4 al estar en la posición de reposo la presión se conecta al retorno, es decir, el movimiento de flujo es constante por lo tanto, no es necesario la desactivación de la bomba hidráulica.

Las características que involucran al diseño del **control desarrollado en esta sección son el accionamiento del paso de flujo en un sentido u en otro.**

La válvula direccional utilizada requiere una señal de voltaje de 24 VCD en el solenoide para accionar el cambio de posición, lo que permitirá accionar o

detener el movimiento del AHDR. En la figura 5.5 se observa la válvula a utilizar físicamente.



Figura 5.5.- Válvula direccional ON/OFF.

5.1.4. Sensor retroalimentación (codificador óptico absoluto)

Conocer la salida de un sistema a controlar es una parte fundamental para cualquier trabajo de control; para conocer que está sucediendo en un sistema se utilizan sensores a la salida de los actuadores ya sean sensores de presión, velocidad, flujo, posición etc. [17].

En el caso de este trabajo la salida del sistema será una posición angular, ya que el AHDR genera un movimiento de rotación como ya se ha observado en capítulos 2 y 3. Para conocer la posición angular final se utiliza un codificador óptico absoluto de posición.

El codificador óptico absoluto, también llamado codificador del eje o generador de pulsos, suele ser un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor. Estos dispositivos se utilizan en robótica, en lentes fotográficas de última generación, en dispositivos de entrada de ordenador (tales

como el ratón y el trackball), y en plataformas de radar rotatorias. Hay dos tipos principales: *absoluto* e *incremental* (relativo) [18].

En el desarrollo de este proyecto se utiliza un codificador óptico absoluto de 10 bits de resolución, es decir, este sensor entrega una señal digital (unos y ceros) con una capacidad de detectar cambios de $.3515625^\circ$, el cual se puede observar en la figura 5.6.



Figura 5.6.- Codificador óptico absoluto 10 bits.

Este sensor requiere una alimentación de 12VCD entregando una señal digital del mismo voltaje en cada uno de sus pines de salida. El código de entrega es en código Gray.

El código Gray es un código binario con la característica de que el aumento de una cifra sólo se distingue por un bit, es decir, no tiene magnitudes asignadas a las posiciones de los bits y no es un código aritmético [19].

El uso del código Gray por parte de este sensor es una característica importante para desarrollar el control del sistema, ya que el controlador debe interpretar una posición entregada por el codificador óptico absoluto.

5.2. Funciones del control con válvula direccional ON/OFF.

El desarrollo de un sistema de control representa conocer la operación de todo el sistema a controlar, es decir, el modo de operación de cada elemento de la planta, así como del comportamiento de los sensores que interpretan la salida del sistema [20].

En el caso del control desarrollado en esta sección se basa en el sistema hidráulico presentado en la figura 5.7, donde se aprecian todos los elementos necesarios para el funcionamiento del AHDR.

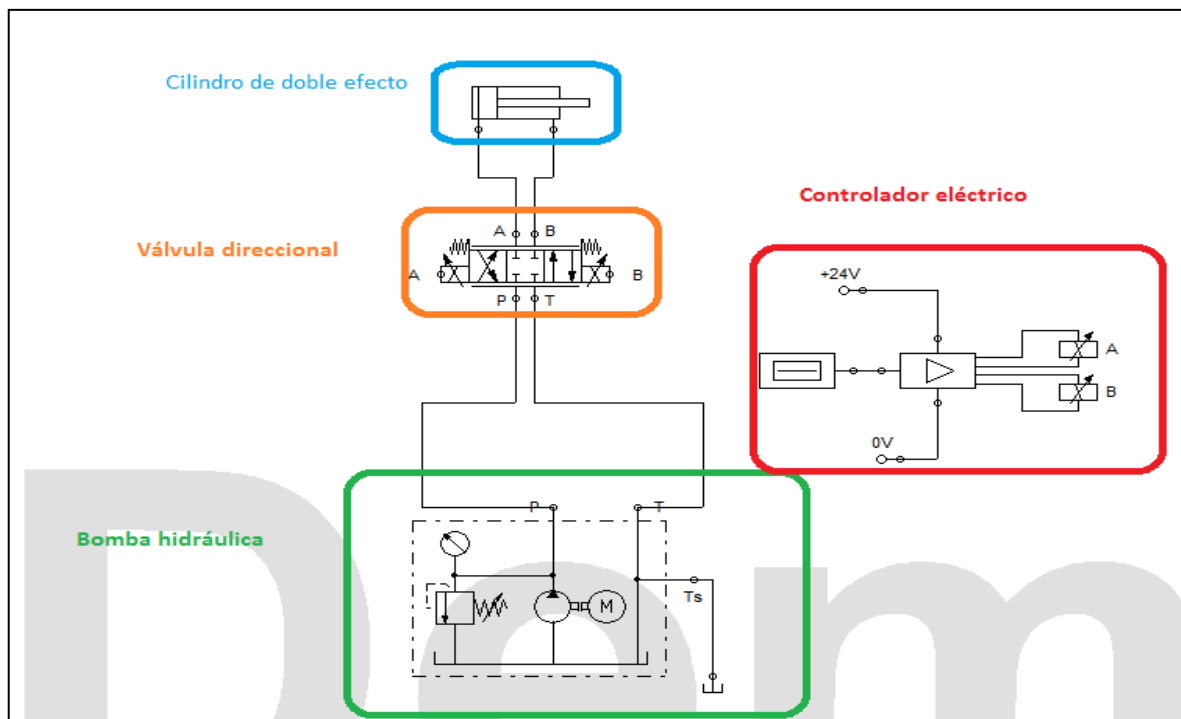


Figura 5.7.- Sistema a controlar.

En la figura 5.7 se observa la representación de los elementos a utilizar en la planta, con los que se conseguirá el movimiento del actuador estudiado en este trabajo; la falta del elemento de retroalimentación deja incompleto el sistema total, así como los elementos electrónicos en los sistemas de accionamiento de la válvula.

Las funciones a realizar por los elementos de todo el sistema (planta, retroalimentación, controlador etc.) se observan en la tabla 5.1, éstas se encuentran descritas por sus principios y simpleza del sistema a controlar; cabe destacar que la bomba presentada en la sección 5.1.2 está representada en la figura 5.7 por un grupo motriz, esto debido a que la bomba a utilizar cuenta con su tanque propio y sus elementos de retorno al mismo [21].

Elemento	Funciones
Bomba hidráulica	Suministro de fluido por el sistema hidráulico y retorno del mismo.
Válvula direccional ON/OFF	Paso de fluido en la dirección deseada del controlador.
Cilindro de doble efecto	Movimiento lineal del AHDR.
Tarjeta electrónica de control.	Administración de señales eléctricas de accionamiento de válvula, interpretación de salida del sistema y obtención de señal de error.
Codificador óptico absoluto	Obtención de posición final del AHDR y su entrega al controlador electrónico.

Tabla 5.1.- Funciones elementos de sistema a controlar.

Como se puede observar en la tabla 5.1, las funciones de los elementos hidráulicos y de retroalimentación son propios de sus características de diseño de los mismos; **dejando al desarrollo de control la parte de la interpretación, accionamiento y regulación de todo el sistema.**

Para el desarrollo del control electrónico es necesario conocer lo que este elemento tendrá que **realizar de manera específica**; su desarrollo se basa en un microcontrolador Atmega16, el cual por medio de su programación realizará la administración de las señales eléctricas a utilizar en todo el sistema.

5.3. Programación del sistema de control de válvula direccional ON/OFF.

El desarrollo del control se basa en un microcontrolador Atmega16 de la familia ATMEL, este microcontrolador cuenta con 40 pines, puede trabajar a una velocidad de 8 MHz, cuenta con 8 canales de ADC habilitados en uno de los 4 puertos de entrada/salida con los que cuenta.

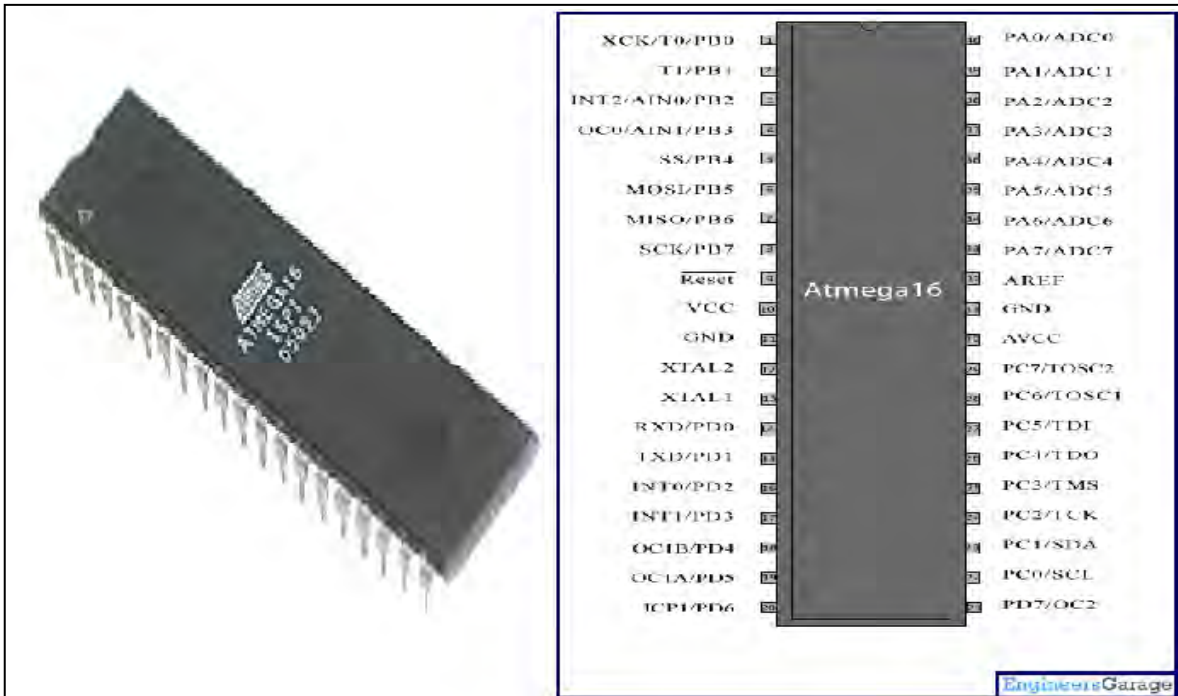


Figura 5.8.- Microcontrolador Atmega16.

La programación del microcontrolador envuelve una serie de interpretaciones de los elementos de todo el sistema a controlar, estructurar la secuencia de trabajo del microcontrolador se basa en las funciones de los elementos que se muestran en la tabla 5.1.

La estructura y funciones del programa se muestran en el diagrama de la figura 5.9; se observa que la programación del sistema de control se refiere a la interpretación de la señal de retroalimentación, configurar una salida del sistema deseada, obtención e interpretación de la señal error y accionamiento de válvula direccional.

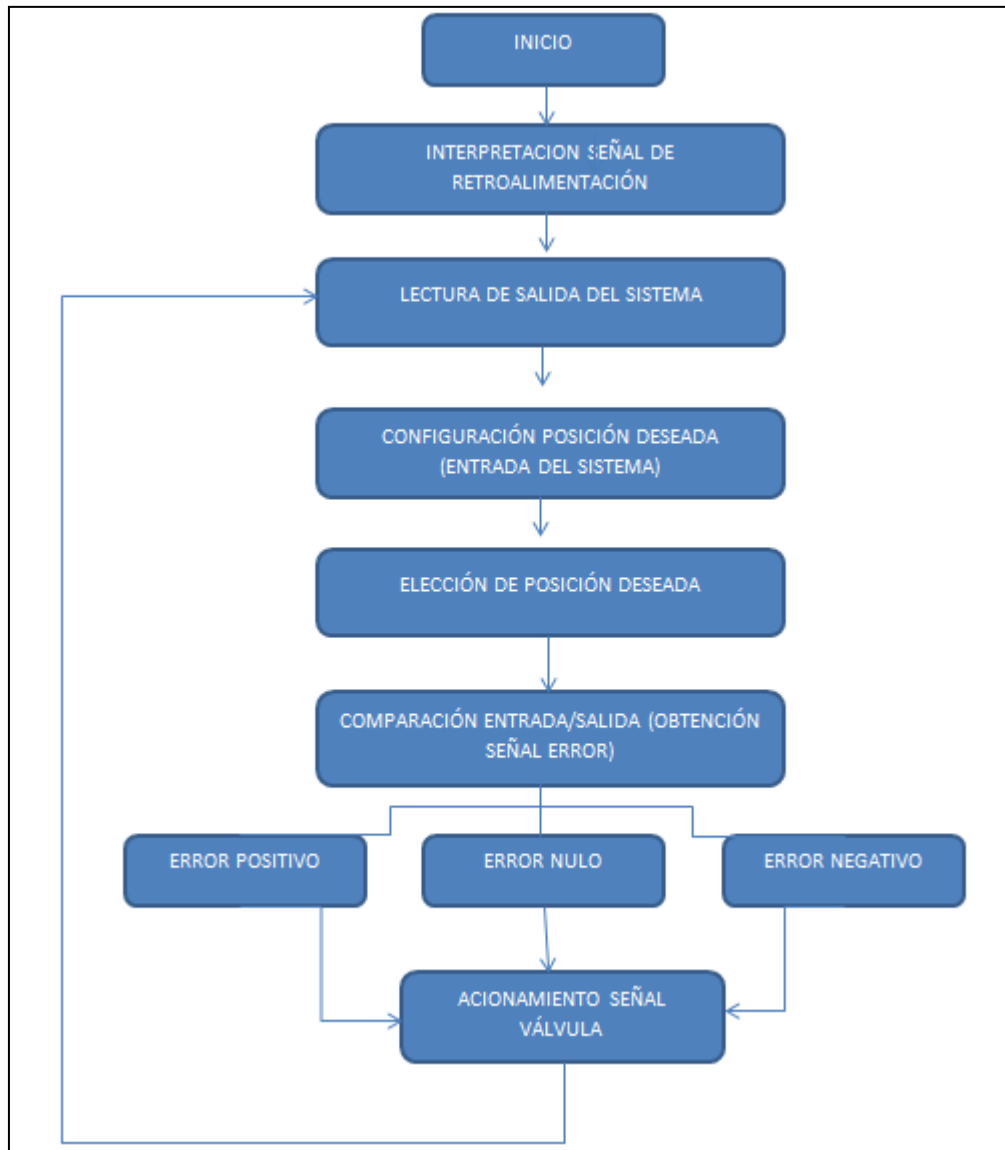


Figura 5.9.- Diagrama secuencia de programación.

Como se puede apreciar en la figura 5.9 la programación **es un ciclo continuo lo que permite estar evaluando la posición actual del sistema con la entrada deseada del mismo**, permitiendo hacer ajustes en la salida del sistema ya sea por una acción deseada o un evento inesperado.

El accionamiento de la válvula que se muestra en la figura 5.9 **no es el mismo para cada tipo de error**, en el caso de los errores positivos y negativos existe un accionamiento a la válvula en un sentido o en otro por medio de una

señal de voltaje, es decir, que se utilizan pines de salidas distintos para cada error; en el caso del error nulo, representa el estado ideal del sistema siendo su función la desactivación de las señales hacia la válvula activando su posición de retorno.

5.3.1. Inicialización del microcontrolador.

El primer paso a realizar es la inicialización del microcontrolador, es decir, activar los periféricos del mismo como entradas o salidas dependiendo del programa que se desea realizar, así como de la frecuencia de trabajo, el despliegue de datos, etc.

Para el control desarrollado en esta sección se consideran como entradas del sistema la retroalimentación del codificador óptico absoluto y las entradas para la elección de una posición final deseada en el sistema a controlar. La retroalimentación como se observó en la sección 5.1.4 entrega una señal digital de 10 bits; en el caso de la posición deseada se necesita entradas de aumento y disminución de la posición, así como una entrada de inicio para que el microcontrolador inicie su proceso.

Las salidas del sistema son dos, cada una accionando una posición que permita el paso de flujo en una dirección u otra por medio de la válvula, además se agregaran 3 salidas indicativas para observar en que sentido se encuentra el sistema hidráulico ya sea positivo, negativo o en retorno.

Por lo tanto, la inicialización del microcontrolador necesita 13 pines de entrada y 5 pines de salida; la configuración y programación del sistema de control se realiza por medio del software CodeVisionAVR. En la tabla 5.2 se muestran las características de la configuración del sistema de control.

Microcontrolador Atmega16	
Frecuencia de Trabajo	1 MHz.
Entradas codificador óptico absoluto (10 bits)	Puerto B y Puerto C
Entradas Posición deseada e inicio	Puerto A (pines A3, A4 y A5)
Salidas del sistema.	Puerto A (pines A0,A1,A2, A5 y A7)
Despliegue de datos LCD	Puerto D

Tabla 5.2.- Configuración de periféricos.

En la tabla 5.2 se observa el concepto “despliegue de datos en una pantalla de cristal líquido por sus siglas en inglés: LCD”; para utilizar este elemento es necesario configurar un puerto en su totalidad que se explicará en la sección 5.3.5. Para la inicialización dentro del software se utiliza una ventana para la configuración donde se indica las características del microcontrolador y del sistema, esta configuración y el código que se genera se muestra en la figura 5.10.

The screenshot shows the CodeWizardAVR interface with the following components:

- Peripheral Selection:** A grid of checkboxes for various peripherals. The 'Bit-Banged' and 'Alphanumeric LCD' options are selected.
- Port Configuration:** A table showing the configuration for ports A, B, C, and D. Port A is selected, and its bits are configured as follows:

Port A	Port B	Port C	Port D
Bit 0	In	T	Bit 0
Bit 1	In	T	Bit 1
Bit 2	In	T	Bit 2
Bit 3	In	T	Bit 3
Bit 4	In	T	Bit 4
Bit 5	In	T	Bit 5
Bit 6	In	T	Bit 6
Bit 7	In	T	Bit 7

Inicialización de periféricos y funciones.

```

void main(void)
{
// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization
// Port A initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=Out Func0=Out
// State7=F State6=F State5=F State4=F State3=F State2=F State1=0 State0=0
PORTA=0x30;
DDRA=0x07;

// Port B initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=F State6=F State5=F State4=F State3=F State2=F State1=F State0=F
PORTB=0xFF;
DDRB=0x00;

// Port C initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=F State0=F
PORTC=0x03;
DDRC=0x00;

// Port D initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=
PORTD=0x00;
DDRD=0x00;

ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;

// ADC initialization
// ADC disabled
ADCSRA=0x00;

// SPI initialization
// SPI disabled
SPCR=0x00;

// TWI initialization
// TWI disabled
TWCR=0x00;

// Alphanumeric LCD initialization
// Connections are specified in the
// Project|Configure|C Compiler|Libraries|Alphanumeric LCD menu:
// RS - PORTD Bit 0
// RD - PORTD Bit 1
// EN - PORTD Bit 2
// D4 - PORTD Bit 4
// D5 - PORTD Bit 5
// D6 - PORTD Bit 6
// D7 - PORTD Bit 7
// Characters/line: 20
lcd_init(20);

```

Código generado para entras y salidas.

Código para uso de LCD.

Figura 5.10.- Código de inicialización de microcontrolador.

En la figura 5.10 se observa la ventana de inicialización para todas las funciones que el sistema puede manejar, el código que se observa en la figura 5.10 sólo muestra las inicializaciones que son de importancia para el programa ya que los temporizadores, gráficas, interrupciones, etc. no son de interés en el sistema de control.

Con la inicialización de los periféricos del microcontrolador se desarrolla el sistema de control para el sistema tratado en este trabajo, **es importante considerar todas las características y situaciones que el sistema de control enfrentará en un uso continuo.**

5.3.2. Interpretación y conversión de la señal de retroalimentación.

El primer paso del control es conocer la salida del sistema, ésta se obtendrá de un codificador óptico absoluto de 10 bits, con la particularidad de que este sensor entrega un cambio de posición en código Gray. Por esta razón es necesario realizar operaciones dentro de la programación para interpretar el dato en código binario y su despliegue sea en números decimales.

Para convertir de código Gray a Binario, se aplican las siguientes reglas:

- El bit más significativo (el más a la izquierda) en código binario es el mismo que el bit correspondiente en el código Gray.
- Sume cada bit generado del código binario al bit del código Gray en siguiente posición adyacente. Descarte acarreo.

Ejemplo:

Paso 1. El dígito del código binario más a la izquierda es el mismo que el dígito del código Gray más a la izquierda.

1 1 0 1 1 Gray
1 Binario

Paso 2. Sume el último bit del código binario que se acaba de generar al bit del código Gray en la siguiente posición. Descarte acarreo. (En negrilla bit que se suman).

1 **1** 0 1 1 Gray
1 0 Binario

Paso 3. Sume el último bit del código binario que se acaba de generar al bit del código Gray en la siguiente posición.

1 1 **0** 1 1 Gray
1 **0** 0 Binario

Paso 4. Sume el último bit del código binario que se acaba de generar al bit del código Gray en la siguiente posición.

1 1 0 **1** 1 Gray
1 0 **0** 1 Binario

Paso 5. Sume el último bit del código binario que se acaba de generar al bit del código Gray en la siguiente posición. Descarte acarreo.

1 1 0 1 **1** Gray
1 0 0 **1** 0 Binario

La conversión ha sido completada; el código binario es 10010; como se ha observado la conversión es un simple **corrimiento a la derecha del mismo número que se quiere convertir y una operación lógica XOR.** [22, 23]

Este tipo de conversión entrega un número en binario, que a su vez se convierte en un número decimal para poder desplegarlo y utilizarlo en el programa más adelante.

El código utilizado para el desarrollo de la conversión de la señal de retroalimentación se muestra en la figura 5.11.

```

50 gradosp=grados;
51 a=PINC.1;
52 b=(PINC.1^PINB.0);
53 c=(PINC.0^PINB.7);
54 d=(PINB.7^PINB.6);
55 e=(PINB.6^PINB.5);
56 f=(PINB.5^PINB.4);
57 g=(PINB.4^PINB.3);
58 h=(PINB.3^PINB.2);
59 i=(PINB.2^PINB.1);
60 j=(PINB.1^PINB.0);
61
62 total=(a*512)+(b*256)+(c*128)+(d*64)+(e*32)+(f*16)+(g*8)+(h*4)+(i*2)+(j*1);
63
64 grados=total*0.3515625;
65

```

Lectura de entrada y conversión a binario.

Conversión de binario a decimal

Posición real del Encoder

Figura 5.11.- Conversión y lectura de salida del sistema a controlar.

En la figura 5.11 se aprecia que la lectura de entrada del codificador óptico absoluto se realiza por medio de la escritura PINX.Y, lo que el microcontrolador interprete ya sea un 1 u 0 lógico. La conversión se realiza con un corrimiento a la derecha del mismo número y una operación XOR bit a bit con el operador “^”, que sirve para esta operación en el lenguaje de programación [24].

En la figura 5.11 el bit más significativo es la entrada PINC.1 y el menos significativo es el PINB.0 por lo que el corrimiento y las operaciones se realizan con la secuencia que se observan en la figura 5.11; la conversión a decimal se logra multiplicando las variables obtenidas por la cantidad que corresponde a cada posición del sistema binario. Como se puede observar existe una operación que corresponde a la resolución del codificador óptico absoluto que entrega la posición que la retroalimentación captura.

5.3.3. Programación de la señal de entrada.

La señal de entrada del control es regulada con tres “Push botton” como los que se muestran en la figura 5.12, estos botones representan un aumento y disminución en la posición deseada, esta posición cambia con la misma resolución con la que el codificador óptico absoluto entrega los cambios de posición, es decir, que **cada presión de los botones genera un cambio de .3515625 desde la posición deseada original.**

El tercer botón es un botón de inicio, el cual con su accionamiento se indica el principio de la acción de comparación entre señal entrada/salida.

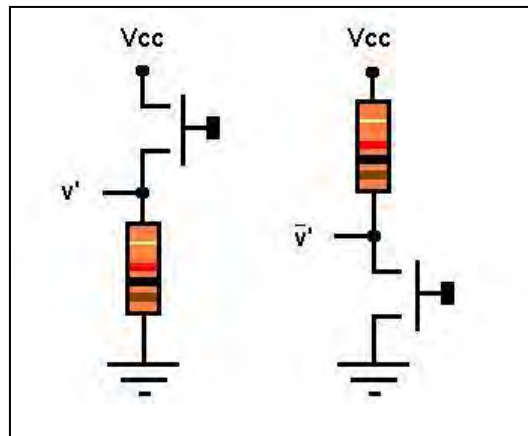


Figura 5.12.- Esquemático de botones de entrada del sistema de control [25].

Uno de los problemas más comunes al utilizar un aumento mediante el cambio de señal lógica en las entradas de los microcontroladores, es que la velocidad de procesamiento del mismo es muy alta, por lo tanto, detecta muchos más cambios en la entrada que los deseados; esta situación se elimina detectando el cambio de flancos entre las entradas. Si se desea que se modifique el valor sólo una vez cuando se presione el botón, deberá hacerse que funcione por flancos, es decir, cuando cambie el pin de 1 a 0. Vea el diagrama de la figura 5.13.


```
C:\cvavr2\bin\programas\control.c
Notes uno.c val.c control.c x
87
88     if (PINA.4==0){ //detección de cambio de flancos boton aumento
89         botona=0;
90     };
91     if (PINA.4==1)
92         botona=1;
93     if ((botonp==1)&&(botona==0)) //hubo cambio de flanco de 1 a 0
94     {
95         tetad=Pdes+0.3515625; //aumento en la cuenta de la posición deseada
96         delay_ms(40); //Se coloca retardo de 40mS para eliminar rebotes
97     };
98     if ((botonp==0)&&(botona==1)) //hubo cambio de flanco de 0 a 1
99         delay_ms(40); //Se coloca retardo de 40mS para eliminar rebotes
100    if (PINA.3==0)//detección del flanco del botón de inicio
101        inicia=0;
102    else
103        inicia=1;
104    if(PINA.5==0)//detección de cambio de flancos botones disminuir
105        botonm=0;
106    else
107        botonm=1;
108    if ((botonh==1)&&(botonm==0)) //hubo cambio de flanco de 1 a 0
109    {
110        tetad=Pdes-0.3515625; //disminución en la cuenta de la posición deseada
111        delay_ms(40); //Se coloca retardo de 40mS para eliminar rebotes
112    };
113    if ((botonh==0)&&(botonm==1)) //hubo cambio de flanco de 0 a 1
114        delay_ms(40); //Se coloca retardo de 40mS para eliminar rebotes
```

Figura 5.14.- Código de detección de flancos.

En la figura 5.14 se observan las partes del código correspondientes a cada botón, esto gracias a los comentarios que se pueden agregar a la programación; con este código el cambio de cuenta se detecta una sola vez con cada presión del botón, eliminando errores en el programa y aumentando o disminuyendo la variable de la posición deseada en valores de .3515625 por cada presión en los botones.

5.3.4. Consideraciones de estados en el sistema a controlar.

Las diferentes situaciones a las que se enfrentará el sistema a controlar en uso son el tema central de la programación del control electrónico, estos cambios

corresponden a dos situaciones generales: Error entre la señal de entrada/salida (positivo o negativo) y Error nulo.

Sin embargo, dentro de las dos condiciones generales existen diferentes cambios que pueden causar un mal funcionamiento en el control del sistema, estos cambios pueden ser voluntarios o causados por medio de perturbaciones externas en el sistema (cambio de posición final por cambio de carga en la salida del sistema, acarreo de error en el sensor de retroalimentación, etc.); las principales condiciones que hay que resolver son:

- Máximo avance del AHDR
- Elección de posición deseada dentro del rango de movimiento del AHDR
- Indicación de inicio de cambio de posición
- Detección de errores (positivo, negativo y nulo)
- Detección de errores en la posición real del sistema

La primer variable para resolver los casos presentados es la detección del error, para esto se utilizan dos variables dentro del programa, una para la posición real (*grados*) y otra para la posición deseada por el usuario (*tetad*), con una operación de resta entre ellos se obtiene el error del sistema. **La instrucción principal del control electrónico es el accionamiento de la válvula, así que para cada tipo de error se genera una salida diferente en el sistema de control.**

Se debe considerar el máximo avance posible del AHDR visto en el capítulo 4, este avance máximo es de 75° , **sin embargo, debido a la resolución del sistema se debe considerar una posición aproximada**, esto es, que el codificador óptico absoluto pueda leer en este caso un máximo avance que es de 74.8828125° ; por lo tanto, una posición real mayor al inicio del uso del sistema, una posición deseada mayor o negativa y un error en la lectura del sensor deben considerarse como una **condición “no posible” del sistema.**

Sin embargo, las perturbaciones externas pueden causar un error en el sistema a controlar, por lo cual **su compensación debe ser lo más rápido posible**, es decir, si existe un cambio no deseado en el sistema la válvula debe permitir el paso de fluido en un sentido u otro para lograr la posición deseada, considerando que el AHDR tiene un máximo avance, pero éste puede ser afectado por perturbaciones externas; debe existir compensación de posición de manera inmediata evitando daño en el sistema a controlar.

Como se ha visto, existen diferentes condiciones que afectan a una misma situación, por lo tanto, se usará la función “ if “ que observa situaciones particulares y en el caso de los movimientos deseados se incluye la función “while” con lectura de posición real impidiendo que los cambios en la señal del error generen un error de programación. El código de programación, es decir, el controlador del sistema se observa en la figura 5.15 y figura 5.16.

```

C:\cvavr2\bin\programas\control.c
Notes uno.c val.c control.c
24 #include <mega16.h>
25 #include <stdio.h>
26 #include <delay.h>
27 #include <float.h>
28
29
30 // Alphanumeric LCD functions
31 #include <alcd.h>
32
33 // Declare your global variables here
34 bit botona;
35 bit botonp;
36 bit botonm;
37 bit botonh;
38 bit inicioa;
39 bit iniciop;
40 int i=0, j=0, a=0, b=0, c=0, d=0, e=0, f=0, g=0, h=0, z=1;
41 float Pdes=45;
42 float total=0;
43 float factor=0.3515625;
44 float grados=0, error=0, tetad=0, gradosp=0;
45 char lcd_buffer[33];
46
47 void conver_grey()
48 {
49
50     gradosp=grados;
51     a=PINC.1;
52     b=(PINC.1^PINC.0);
53     c=(PINC.0^PINB.7);
54     d=(PINB.7^PINB.6);
55     e=(PINB.6^PINB.5);
56     f=(PINB.5^PINB.4);
57     g=(PINB.4^PINB.3);
58     h=(PINB.3^PINB.2);
59     i=(PINB.2^PINB.1);
60     j=(PINB.1^PINB.0);
61
62     total=(a*512)+(b*256)+(c*128)+(d*64)+(e*32)+(f*16)+(g*8)+(h*4)+(i*2)+(j*1);
63
64     grados=total*0.3515625;
65     if ((grados>75) && (grados!=tetad))
66     {
67         {
68             PORTA.0=1;
69             PORTA.6=1;
70             PORTA.1=0;
71             PORTA.7=0;
72             PORTA.2=0;
73             tetad=0;
74             sprintf(lcd_buffer, "No posible "); //declarar variable char
75             lcd_gotoxy(0,3); //situar el cursor en la parte superior izquierda
76             lcd_puts(lcd_buffer); //pone la variable a imprimir
124     if ((grados>tetad) && (tetad>=0) && (iniciop==0) && (inicioa==1)) {
125         while ((grados!=tetad) && (grados<75)) {
126             a=PINC.1;
127             b=(PINC.1^PINC.0);
128             c=(PINC.0^PINB.7);
129             d=(PINB.7^PINB.6);
130             e=(PINB.6^PINB.5);
131             f=(PINB.5^PINB.4);
132             g=(PINB.4^PINB.3);
133             h=(PINB.3^PINB.2);
134             i=(PINB.2^PINB.1);
135             j=(PINB.1^PINB.0);
136
137             total=(a*512)+(b*256)+(c*128)+(d*64)+(e*32)+(f*16)+(g*8)+(h*4)+(i*2)+(j*1);
138
139             gradosp=total*0.3515625;

```

Figura 5.15.- Código de programación parte 1.

```

141     PORTA.0=1;
142     PORTA.6=1;
143     PORTA.1=0;
144     PORTA.7=0;
145     PORTA.2=0;
146     error=tetad-grados;
147
148     sprintf(lcd_buffer,"PReal=%f",grados);//declarar variable char
149     lcd_gotoxy(0,0); //situar el cursor en la parte superior izquierda
150     lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir
151
152     sprintf(lcd_buffer,"Error=%f",error);//declarar variable char
153     lcd_gotoxy(0,2); //situar el cursor en la parte superior izquierda
154     lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir
155     };
156     };
157
158     if ((grados<tetad)&&(tetad>=0)&&(iniciop==0)&&(inicioa==1))
159     {
160         while ((grados!=tetad)&&(grados<75)) {
161             a=PINC.1;
162             b=(PINC.1^PINC.0);
163             c=(PINC.0^PINC.7);
164             d=(PINB.7^PINB.6);
165             e=(PINB.6^PINB.5);
166             f=(PINB.5^PINB.4);
167             g=(PINB.4^PINB.3);
168             h=(PINB.3^PINB.2);
169             i=(PINB.2^PINB.1);
170             j=(PINB.1^PINB.0);
171
172             total=(a*512)+(b*256)+(c*128)+(d*64)+(e*32)+(f*16)+(g*8)+(h*4)+(i*2)+(j*1);
173
174             grados=total*0.3515625;
175             PORTA.0=0;
176             PORTA.6=0;
177             PORTA.1=1;
178             PORTA.7=1;
179             PORTA.2=0;
180             error=tetad-grados;
181
182             sprintf(lcd_buffer,"PReal=%f",grados);//declarar variable char
183             lcd_gotoxy(0,0); //situar el cursor en la parte superior izquierda
184             lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir
185
186             sprintf(lcd_buffer,"Error=%f",error);//declarar variable char
187             lcd_gotoxy(0,2); //situar el cursor en la parte superior izquierda
188             lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir
189         };
190     };
191
192     iniciop=inicioa;
193
194
195     if ((grados>tetad)&&(tetad>=0)&&(grados!=gradosp)) {
196         PORTA.0=1;
197         PORTA.6=1;
198         PORTA.1=0;
199         PORTA.7=0;
200         PORTA.2=0;
201     };
202     if ((grados<tetad)&&(tetad>=0)&&(grados!=gradosp))
203     {
204         PORTA.0=0;
205         PORTA.6=0;
206         PORTA.1=1;
207         PORTA.7=1;
208         PORTA.2=0;
209
210     if ((grados==tetad)&&(grados<75)&&(tetad>=0))
211     {
212         PORTA.0=0;
213         PORTA.6=0;
214         PORTA.1=0;
215         PORTA.7=0;
216         PORTA.2=1;
217         iniciop=inicioa;
218     }
219 }
220
221 if ((tetad<0)~(tetad>75))
222 {
223     PORTA.0=0;
224     PORTA.2=0;
225     PORTA.1=0;
226     PORTA.3=0;
227     PORTA.2=1;
228     sprintf(lcd_buffer,"No posible ");//declarar variable char
229     lcd_gotoxy(0,3); //situar el cursor en la parte superior izquierda
230     lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir

```

Figura 5.16.- Código de programación parte 2.

Como se puede apreciar en las figuras 5.15 y 5.16, existen varias condiciones que al cumplirse una de ellas, el controlador entregará una acción sobre la salida del sistema, **generando un cambio de posición ya sea voluntario o involuntario por parte del usuario.**

5.3.5. Despliegue y visualización de datos.

Para que el usuario pueda darse cuenta de que valores son los que el sistema hidráulico arroja a su salida y su entrada se utiliza una pantalla de cristal líquido (LCD) para que el microcontrolador muestre el valor obtenido de la retroalimentación y la posición deseada del sistema.

Las pantallas de cristal líquido LCD alfanuméricas sin importar el fabricante se basan en un circuito integrado de Hitachi que es el HD44780, esto significa que cualquier pantalla que se utilice funciona de la misma manera, por lo que la programación de la pantalla es idéntica sin importar la marca de la pantalla. La única diferencia es la velocidad, ya que algunas responden más rápidamente a los comandos que se le mandan.

El asistente con el que cuenta el software CodeVision solicita que se le indique cuántos caracteres es cada línea de la pantalla de cristal líquido. Así mismo se indica en el mismo asistente cómo conectar la LCD y a que pines. Las pantallas se pueden conectar en un bus de datos de 8 bits o de 4, el asistente lo coloca en un bus de 4 bits para ahorrar pines. El asistente del CodeVision genera todo el código necesario para inicializar la LCD y el programador sólo debe preocuparse por manejar las siguientes funciones:

Los comandos que acepta la LCD son:

lcd_clear(); Se utiliza para borrar todos los caracteres en la LCD

lcd_gotoxy(unsigned char x,unsigned char y); Coloca el cursor en la columna x y fila y, puede ser o una variable “x” y “y” o una constante. Cuando se posiciona el cursor en algún punto determinado y se manda escribir una letra el cursor se mueve hacia la derecha un lugar.

lcd_putchar(char c); Coloca un carácter en la posición donde haya quedado el cursor, de acuerdo a la función anterior [24].

Las líneas de código correspondientes a las variables usadas en el sistema aparecen en las figuras 5.15 y 5.16, en el caso de este proyecto se utiliza una pantalla LCD de 16x4 donde se imprime la posición real del sistema, la posición deseada por el usuario, la señal de error y el indicador de una acción “No posible”.

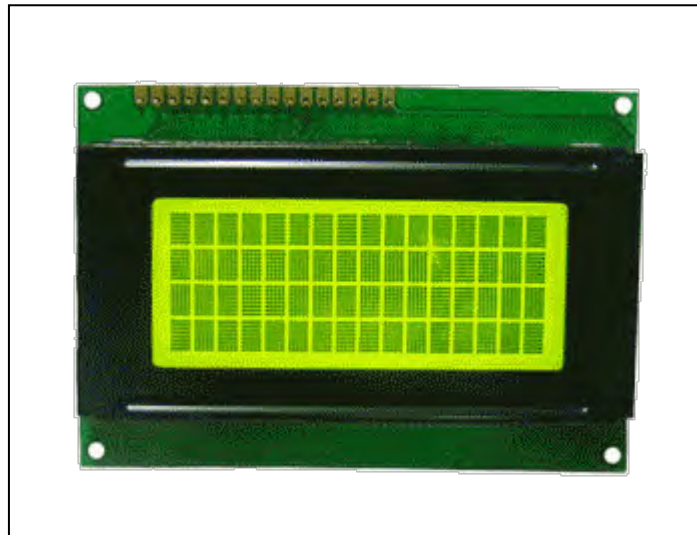


Figura 5.17.- Pantalla LCD 16x4.

En la figura 5.17 se puede observar el dispositivo de visualización de datos usado en el desarrollo del proyecto el cual cuenta con 4 renglones cada uno de ellos con la capacidad de imprimir 16 caracteres.

5.4. Ajuste de señal eléctrica del sistema de control.

Como se observó en el desarrollo del capítulo 5, los dispositivos del sistema hidráulico a controlar cuentan con diferentes especificaciones eléctricas para su uso, estas diferencias representan ajustes electrónicos tanto en la entrada al microcontrolador como a su salida, ya que los elementos hidráulicos requieren ya sea más voltaje y/o más corriente para su funcionamiento y el circuito microcontrolador maneja señales digitales de un voltaje máximo de 5 volts y una corriente no mayor a 100 mA.

5.4.1. Circuito optoacoplador.

Como se ha visto el codificador óptico absoluto a utilizar en el sistema a controlar de este trabajo entrega una señal digital de 10 bits, sin embargo, esta señal tiene una amplitud de 12 VCD lo que supera por más del doble la cantidad de voltaje que un microcontrolador puede soportar.

Para evitar que exista un sobre voltaje que dañe la parte principal del control se opta por separar la alimentación de cada uno de los elementos, es decir, el codificador óptico absoluto recibirá 12 VCD para su funcionamiento de manera independiente a la del microcontrolador que recibe 5 VCD. Como se requiere que la señal digital sea de una amplitud de 5 VCD a la entrada del control electrónico se opta por un opto-acoplamiento de las señales eléctricas

Un optoacoplador combina un dispositivo semiconductor formado por un foto-emisor y un foto-receptor y entre ambos hay un camino por donde se transmite la luz. Todos estos elementos se encuentran dentro de un encapsulado que por lo general es del tipo DIP [26].

Esta estructura produce un elemento que permite el acoplamiento de señales dos tipos de circuitos electrónicos independientes y totalmente aislados entre sí, según el encapsulado de estos dispositivos pueden tener un aislamiento hasta de 3500 volts [27].

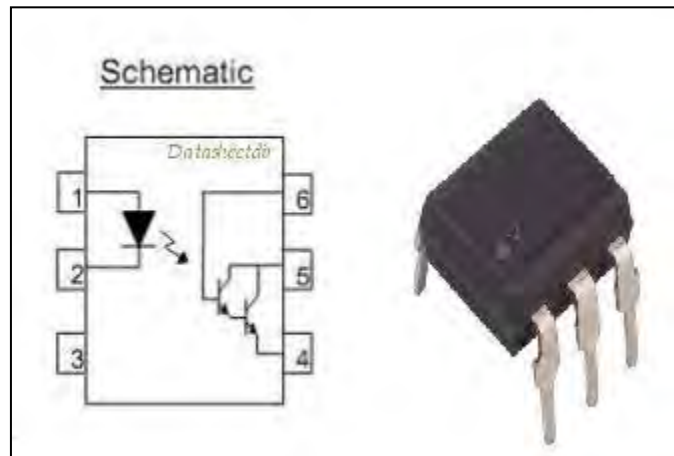


Figura 5.18.- Optoacoplador 4n30.

Para el desarrollo del proyecto se utiliza un optoacoplador tipo Darlington que consta de un diodo emisor de luz y un arreglo de dos transistores, este dispositivo se aprecia en la figura 5.18 donde se puede ver su esquemático así como su encapsulado tipo DIP.

Para su funcionamiento en el sistema de control la señal que es entregada por cada bit del codificador óptico absoluto de retroalimentación energizará el diodo led correspondiente de cada optoacoplador y propiciará el paso de la señal eléctrica por medio de los transistores con un voltaje menor (5 VCD) para su uso y procesamiento en el microcontrolador.

5.4.2. Interfaz de potencia (salida del sistema).

Las salida del sistema de control electrónico está dirigida al cambio de posición en la válvula direccional, como ésta maneja una señal de accionamiento

de acuerdo a sus especificaciones de 24 VCD y 1.39 amperes, es necesario el uso de elementos de potencia y una separación entre el microcontrolador y la válvula por medio de un optoacoplador para cada señal de salida.

Las interfaces de potencia son dispositivos intermedios entre el microcontrolador y aquellos aparatos que requieran cantidades de corriente mayores a los que pueden manejar el microcontrolador (por lo general se habla de 40 miliamperios como máximo por pin). Motores de paso, motores DC, servomotores, lámparas incandescentes, reflectores, grupos de leds son ejemplos de dispositivos que se puede llegar a controlar desde el microcontrolador a través de las interfaces de potencia, **es un grave error tratar de conectar este tipo de dispositivos directamente a los pines del microcontrolador** [28].

Para el desarrollo de este proyecto se utiliza un transistor de potencia TIP120 como el que se ve en la figura 5.19, éste permite el uso de corrientes mayores, la cual es necesaria para el funcionamiento de la válvula en el sistema hidráulico.

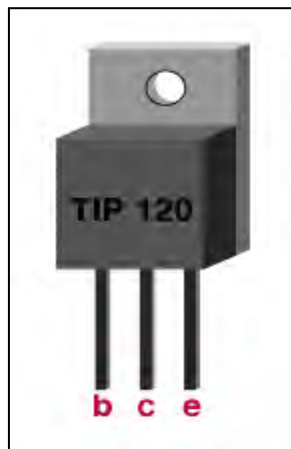


Figura 5.19.- Transistor TIP120.

Los transistores pertenecen a la familia de los componentes electrónicos llamados semiconductores, son componentes que pueden funcionar como amplificadores o interruptores, si se utiliza como interruptores pueden manejar corrientes altas, controlados por corrientes bajas (al igual que los relés). Los

transistores son dispositivos de tres terminales (patas) y en el caso de los transistores bipolares sus terminales se llaman emisor, base y colector, al poner una corriente pequeña en la base, una corriente alta puede pasar del colector al emisor [28].

El transistor que se utiliza en el proyecto internamente tiene un arreglo Darlington y cuenta con resistencias y diodo de protección que se puede observar en la figura 5.20.

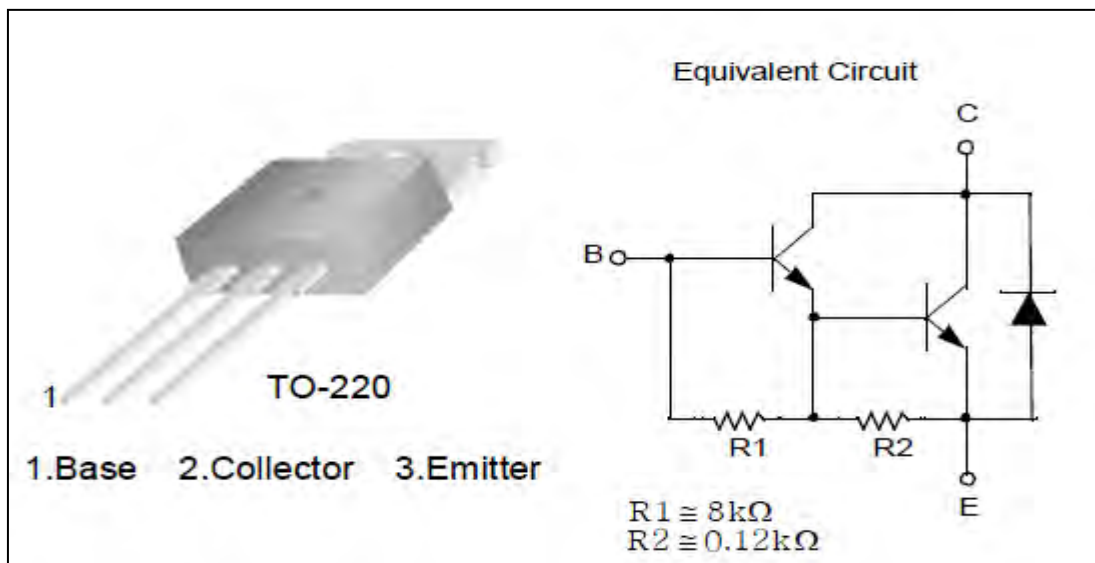


Figura 5.20.- Circuito equivalente transistor TIP120.

Este tipo de dispositivo permite conectar de manera directa la salida del microcontrolador, así como la carga del dispositivo, en este caso la válvula del sistema hidráulico, esto es posible ya que internamente cuenta con un diodo de protección y las resistencias equivalentes para su uso directo.

Los ajustes más significativos para el ajuste de la señal eléctrica de control son los presentados en las sección 5.4 con lo cual el diseño del control electrónico está completo.

5.5. Simulación del sistema de control

Parte esencial del desarrollo de control es la comprobación de su funcionamiento, para poder realizar pruebas se utiliza el software ISIS Proteus 7.0 con el cual se simulan circuitos y cargan un archivo programable en diferentes tipos de microcontroladores.

Para el proyecto realizado en este trabajo, se utilizó la simulación para la comprobación de todas las condiciones posibles a presentarse en un uso continuo del sistema de hidráulico que moverá el AHDR.

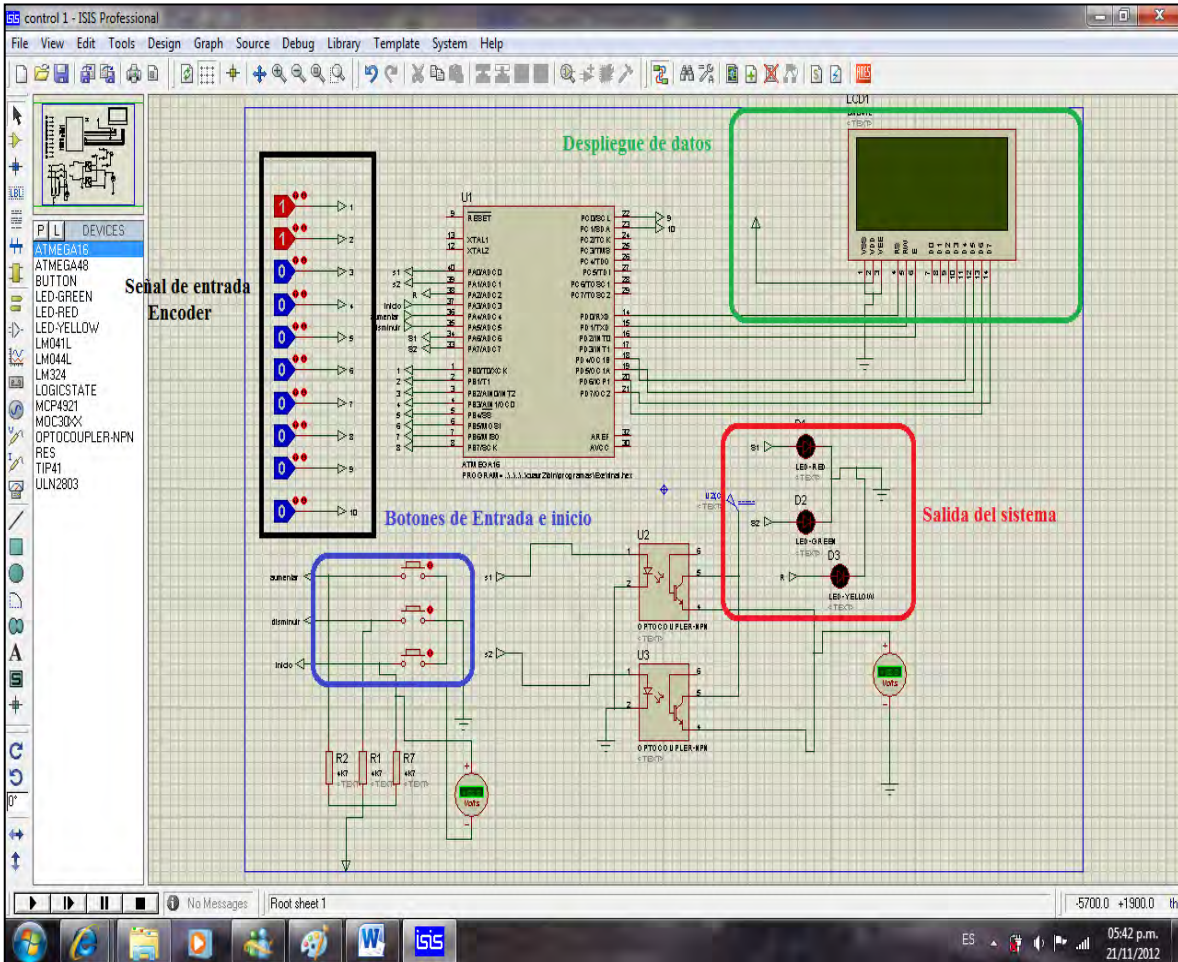


Figura 5.21.- Construcción circuito simulado.

En la figura 5.21 se observa la pantalla de trabajo del software ISIS Proteus 7.0, donde por medio de las librerías se colocan los dispositivos necesarios para la simulación del circuito de control. Como se puede apreciar en la figura 5.21 no están colocados todos los elementos electrónicos necesarios para la tarjeta electrónica esto se debe a que para simular el programa de control no son necesarios; en la construcción de la simulación sólo se incluye como entrada de retroalimentación estados lógicos de unos y ceros, y para la salida del sistema sólo se utiliza diodos leds de manera visual.

Al cargar el código presentado en la sección 5.3 en el microcontrolador de la simulación se ve el comportamiento del sistema de control para las diferentes situaciones como pueden ser: el cambio de posición voluntario, un cambio de posición involuntario y un error tanto en la posición deseada o en la lectura de retroalimentación.

En la figura 5.22 se puede ver que se propone un cambio de posición voluntario y el control del sistema activa una de las salidas destinadas a la activación de la posición en la válvula del sistema hidráulico.

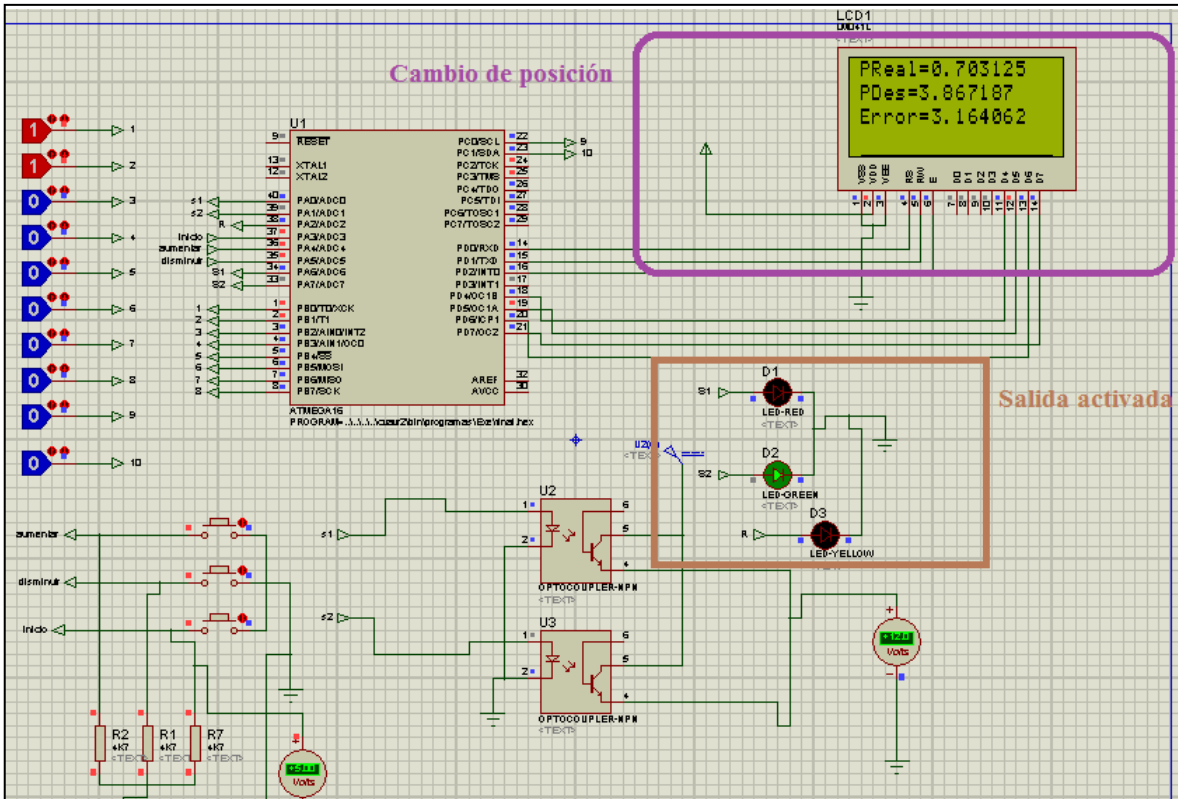


Figura 5.22.- Simulación cambio de posición voluntario.

Como se aprecia en la figura 5.22 la posición deseada y real no concuerda y existe un error que activa una de las salidas del sistema. Cabe destacar que **la salida sólo se desactiva cuando el error es nulo (cero)**.

Las diferentes condiciones fueron comprobadas para cada situación posible dando como resultado un comportamiento deseado en la simulación del sistema de control.

5.6. Prueba física del circuito de control.

Antes de conectar el sistema hidráulico completo es necesario observar la obtención de señales eléctricas que controlarán el sistema. Para su funcionamiento el elemento necesario es la conexión de la retroalimentación

(codificador óptico absoluto), que es gracias a las lecturas de este sensor que es posible obtener los cambios en la señal de control.

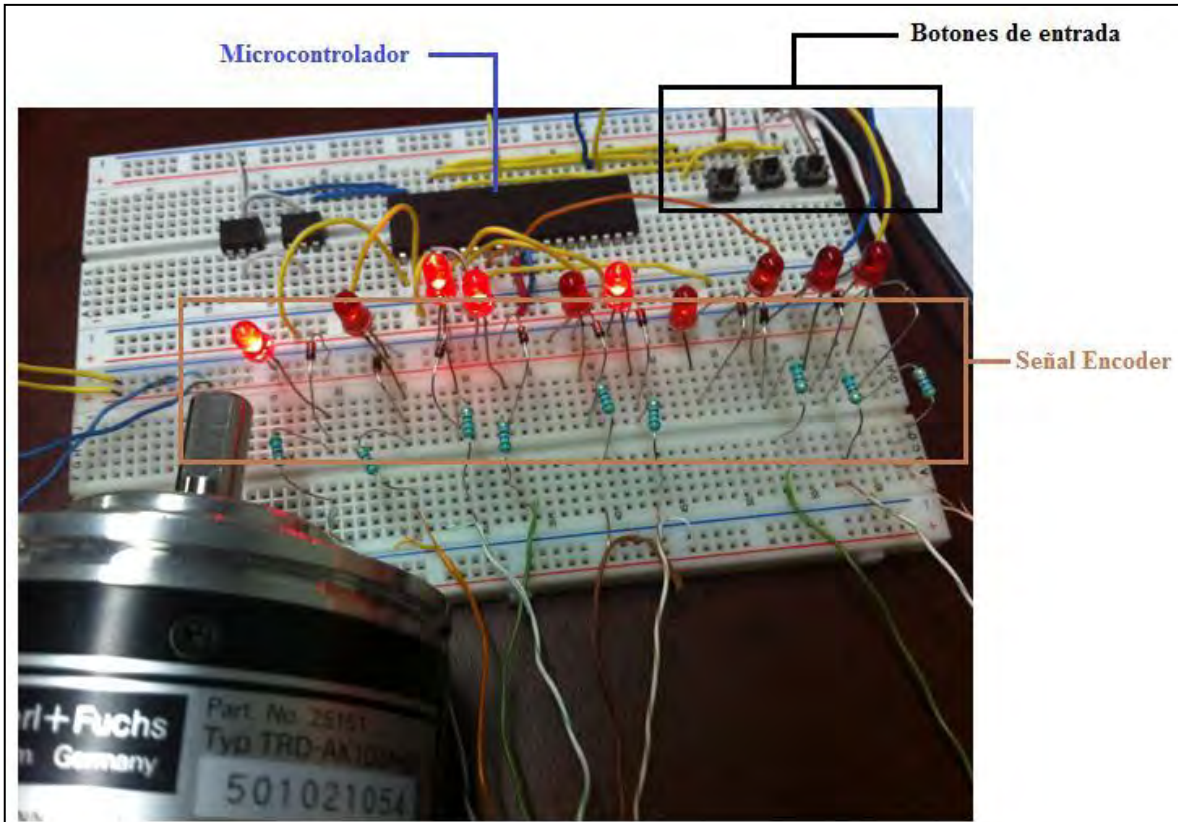


Figura 5.23.- Circuito controlador.

En la figura 5.23 se observa la construcción del circuito controlador donde se obtiene la señal de retroalimentación, y es ésta con la cual el microcontrolador ejecuta el código programado obteniendo las señales necesarias para el control del sistema hidráulico.

El funcionamiento del circuito de control es el idóneo con respecto a la simulación y su diseño; por lo cual su funcionamiento a partir de las condiciones del sistema hidráulico representa el desarrollo completo del proyecto presentado en este trabajo.

CAPÍTULO 6

DISEÑO DE CONTROL DE

VÁLVULA DIRECCIONAL

PROPORCIONAL

CAPÍTULO 6. DISEÑO DE CONTROL DE VÁLVULA DIRECCIONAL PROPORCIONAL

6.1. Componentes del sistema a controlar

Como se ha podido apreciar a lo largo del desarrollo de este proyecto, **el dispositivo controlador de un sistema depende de las características de los elementos de la planta y retroalimentación del mismo.**

Teniendo en cuenta la aplicación para la cual quiere ser sometido en este caso un actuador, los componentes de la planta son seleccionados, sin embargo, existen diferentes factores que limitan la selección de un dispositivo u otro, tales como la disponibilidad en el mercado, costo total o parcial, uso de sus cualidades, etc.

Para el completo desarrollo del proyecto presentado en este trabajo se presenta el diseño de un controlador para un sistema hidráulico similar al desarrollado en el capítulo 5, con la única diferencia del uso de una válvula direccional proporcional como la explicada en los capítulos 3 y 4 del proyecto.

La válvula proporcional seleccionada se muestra en la figura 6.1, esta válvula permite un paso regulado de caudal, regulado por la señal de entrada a la que es sometida, es decir, el paso del flujo al actuador varía, con lo que es posible lograr un cambio controlado en la velocidad de los movimientos.

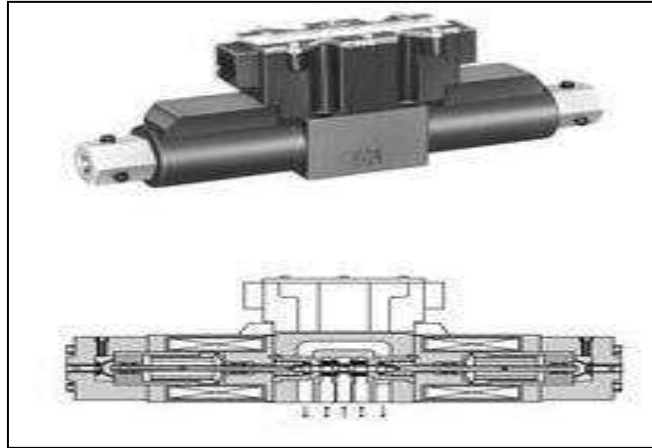


Figura 6.1.- Válvula Proporcional.

Las características de la válvula mostrada en la figura 6.1 se pueden ver de manera más extensa en el anexo IV; sin embargo, las especificaciones más importantes se refieren a su comportamiento eléctrico. La válvula proporcional permite un cambio en la dirección de flujo en el sistema hidráulico, equivalente a la señal de entrada que recibe, en este caso la válvula recibe para un cambio de posición, una señal de 0-5 VCD y de -5-0 VCD para otro cambio en diferente sentido, es decir, **si la válvula recibe 3 VCD dejará pasar en una posición el 60% del flujo suministrado por la bomba, lo mismo sucederá para voltajes negativos donde si recibiera una señal de -2 VCD cambiaría de posición y permitiría el paso de flujo a un 40% del caudal suministrado.**

La principal ventaja entre la válvula proporcional y la válvula analizada en el capítulo 5 es que para un control proporcional los cambios de posición tendrán un tiempo preestablecido sin importar su magnitud, esto gracias al manejo de la ecuación gobernante del AHDR.

6.2. Programación del sistema de control proporcional.

El sistema hidráulico para el caso de un control proporcional varía sólo en un elemento de la planta (válvula proporcional), por lo que las funciones y situaciones que presentará en los cambios de posición voluntarios e involuntarios son las mismas, es decir, **la retroalimentación, señal de error, despliegue de datos, etc., resultan de la misma programación desarrollada en el capítulo 5.**

El desarrollo de control implica el manejo y uso de la ecuación 3.12 que representa el movimiento del AHDR, a partir del cálculo del voltaje necesario para conseguir un cambio de posición en un tiempo determinado, la señal de accionamiento de la válvula es un valor analógico el cual se obtiene a partir de una señal digital entregada por el microcontrolador.

Por las complicaciones que las situaciones expuestas en el párrafo anterior representan, el diseño implica el uso de un microcontrolador más potente, para esto se utiliza un dispositivo Atmega2560 como el que se muestra en la figura 6.2.

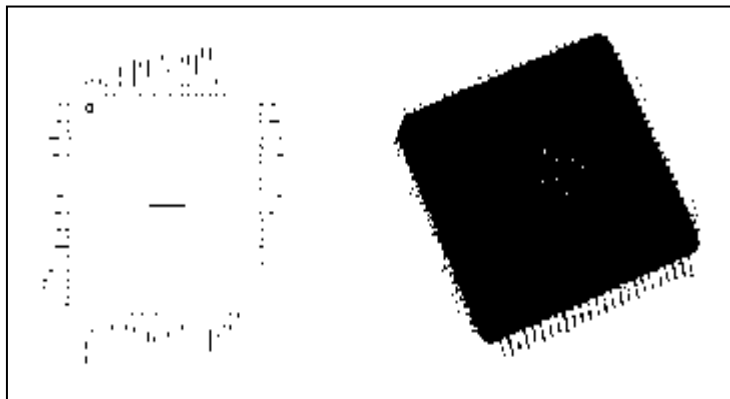


Figura 6.2.- Atmega 2560.

El microcontrolador Atmega 2560 (*figura 6.2*) cuenta con más del doble de capacidad que el microcontrolador Atmega 16 usado en el capítulo 5, contando con mayor capacidad de memoria y velocidad de procesamiento lo que permite

que el uso de ecuaciones complejas se resuelvan con mayor velocidad que en otros dispositivos.

6.2.1. Ajuste matemático de la señal de retroalimentación

El valor otorgado por la señal de retroalimentación está ajustado para que el usuario maneje posiciones desde los 90° a los 15.1171875° por la limitación del actuador presentado en los capítulos 3 y 4. Esto significa que en una posición donde el émbolo del cilindro se encuentre totalmente retraído la señal del codificador óptico absoluto enviará un valor de 90° , sin embargo, este valor no es adecuado para el manejo de la ecuación gobernante del AHDR, por lo que es necesario hacer un ajuste a manera que el valor sea convertido en un valor válido para el cálculo dentro de la ecuación 3.12.

Como se observó en el capítulo 3 el diseño del AHDR tiene un ángulo de construcción fijo de 56.25° (con la horizontal), este ángulo corresponde a una medición inicial del codificador óptico absoluto de 90° a partir de esta situación se puede decir que para una lectura menor a 33.75° el ángulo que se utilizará para calcular el valor del voltaje necesario se encuentra en el cuarto cuadrante del plano.

Por esta razón se utilizan las funciones "if" dentro del programa para realizar el ajuste de la posición que se toma en cuenta en la ecuación 3.12 del movimiento del AHDR.

```

125   if ((grados>=33.75)&&(grados<=90)) {
126       posicioni=(grados-33.75);//0.3515625;
127       angl=sin(posicioni*PI/180);
128       m1=sqrt(289-64-25+(80*angl));
129
130   };
131
132   if ((grados<33.75)&&(grados>=0)) {
133       posicioni=(grados+326.25);//0.3515625;
134       angl=sin(posicioni*PI/180);
135       m1=sqrt(289-64-25+(80*angl));
136
137   };

```

Figura 6.3.- Código de ajuste matemático de la señal de retroalimentación.

Como se observa en la figura 6.3 el código hace el ajuste de la posición a utilizar, además de que hace el cálculo de la distancia correspondiente al ángulo obtenido por el codificador óptico absoluto gracias a la variable “m1” calculando la ecuación 6.1.

$$\sqrt{\quad} \quad (6.1)$$

La ecuación 6.1 sirve para obtener el valor de las distancias reales y deseadas para el suministro de la señal de voltaje necesaria para mover el solenoide de la válvula proporcional.

Cabe destacar que un código igual al presentado en la figura 6.3 es manejado para la posición deseada, existe una conversión similar y la obtención de la distancia requerida con una variable llamada “m2”.

6.2.2. Cálculo de la señal a suministrar

Basándose en la ecuación 3.12 del AHDR se observa que para lograr un movimiento angular deseado considerando sólo una variable de entrada, en este caso el voltaje, es necesaria la inicialización de diferentes constantes.

$$\frac{(\text{---})}{(\text{---})} \quad (3.12)$$

Las constantes que se deben observar son todas las distancias del diseño: x_1 y x_2 . Además de las constantes del flujo suministrado Q , el tiempo determinado para cada movimiento “ t_1 ” y el área del émbolo del pistón “ A_p ”, en este caso las características del cilindro presentadas en el anexo II muestran que el área del vástago cambia cuando el flujo va en un sentido u en otro por lo tanto, el resultado de la ecuación 3.12 para una diferencia de posición puede variar ya sea en un sentido u otro. Para resolver esta situación se calculará la ecuación gobernante dependiendo el signo de la señal de error del sistema.

Como se vio en la sección 6.2.1 el cambio de posición se manejará por medio de un **diferencial de distancias correspondientes a las variables $m1$ y $m2$; que representan un cambio en la posición angular del sistema.**

Considerando sustituir la ecuación (3.8) en (3.7) se obtiene:

$$\text{---} \quad (6.2)$$

Si se toma en cuenta “ ” como un diferencial de posición obtenido mediante las variables “m1” y “m2” del programa, **se puede obtener el voltaje necesario para un cambio de posición angular en un tiempo determinado.**

Sin embargo, **el signo de este diferencial indicará en que sentido se moverá el cilindro** y por lo tanto, de este valor dependerá la posición de la válvula proporcional, así como la polaridad del voltaje de accionamiento.

Despejando de la ecuación (6.2) se obtiene:

(6.3)

La ecuación 6.3 se introduce en el programa para obtener el voltaje necesario para lograr un movimiento voluntario en AHDR en un tiempo determinado. El código de la programación para la obtención de valores son la simple introducción de ecuaciones, **no es necesario el uso de ninguna otra técnica ya que la velocidad de procesamiento del microcontrolador es suficientemente grande para obtener resultados inmediatos.**

```
206      dd=(m2-m1);
207      if (dd<0)
208          dp=dd*(-1);
209      else
210          dp=dd;
211      V= ((dp*A1*1)/(k*dt));
212      q=3*V;
213      V2= ((dp*A2*1)/(k*dt));
214      q2=3*V2;
```

Figura 6.4.- Ecuaciones dentro de la programación.

En la figura 6.4 se observa el código de obtención de voltajes, como se ve, existen dos cálculos con diferentes constantes de área, debido al diseño del cilindro de doble efecto empleado.

El principio básico del sistema de control presentado en esta sección basa su funcionamiento en la obtención de un voltaje para un desplazamiento lineal en el cilindro de doble efecto del sistema hidráulico; **la no linealidad y el comportamiento descrito es generado en su totalidad por el diseño mecánico del artefacto**, por lo que para un movimiento lineal iniciado en un punto cualquiera puede representar un cambio de diferente magnitud en la posición angular, sin embargo, el movimiento es realizado en la misma cantidad de tiempo.

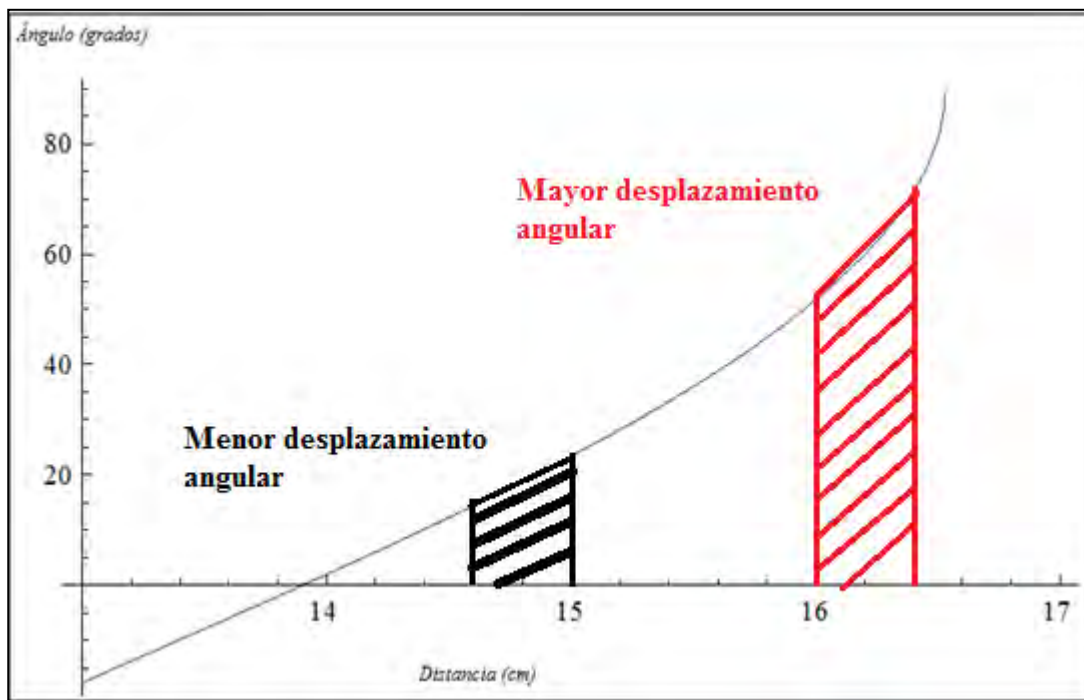


Figura 6.5.- Ejemplo de comportamiento no lineal.

En la gráfica de la figura 6.5 se observa que para un mismo desplazamiento lineal (eje horizontal) existen diferentes desplazamientos angulares (eje vertical), por lo que **la cantidad de voltaje dependerá de la magnitud lineal del movimiento.**

6.2.3. Inicialización de Microcontrolador Atmega 2560

La inicialización de los periféricos dentro del microcontrolador se realiza de manera idéntica a la del control electrónico del capítulo 5 por lo que sólo se diferencian en la cantidad de salidas que el control proporcional maneja.

Microcontrolador Atmega2560	
Frecuencia de Trabajo	8 MHz.
Entradas codificador óptico absoluto (10 bits)	Puerto A y Puerto E
Entradas Posición deseada e inicio	Puerto F (pines F0, F2 y F4)
Salidas visuales del sistema.	Puerto D (pines D0 y D5)
Salidas Accionamiento válvula	Puerto J y Puerto L
Despliegue de datos LCD	Puerto C

Tabla 6.1.- Inicialización de periféricos Atmega 2560.

El código básico del programa de control proporcional es el mismo, tanto para la obtención de posición real, posición deseada, despliegue de datos, eliminación de saltos, etc. Con la diferencia de que los puertos a llamar y en uso del microcontrolador son diferentes.

6.2.4. Consideraciones especiales del control proporcional.

Como se concluyó en secciones anteriores la base del control proporcional es la obtención de un valor en la señal de voltaje, sin embargo, para poder interpretar esta señal por medio de los puertos del microcontrolador es necesario convertir esta cantidad en un número binario.

Para esto se considera que los puertos de salida son de 8 bits, esto quiere decir que **el máximo número a contar es 255 en binario** por lo tanto, esta cantidad representará el mayor nivel en la señal de accionamiento a la válvula **es decir, 255 equivaldría a 5 VCD.**

Para esto se obtiene el voltaje real de salida multiplicándolo por una constante de valor 51.

Otro de los aspectos importantes a considerar es las condiciones de uso; para el caso de perturbaciones involuntarias el movimiento del actuador debe ser **lo más rápido posible** para recuperar la posición deseada, **por lo que en estos casos sólo se interpretará la señal de error para activar el sentido del flujo y dando como salida el máximo valor a la válvula proporcional.**

```

217         if ((grados>tetad)&&(tetad>=0)&&(iniciop==0)&&(inicia==1))
218         {
219             while (grados!=tetad)
220                 //for (y=0;y<=301;y++)
221                 {
222                     a=PINE.7;
223                     b=(PINE.7^PINE.6);
224                     c=(PINE.6^PINA.7);
225                     d=(PINA.7^PINA.6);
226                     e=(PINA.6^PINA.5);
227                     f=(PINA.5^PINA.4);
228                     g=(PINA.4^PINA.3);
229                     h=(PINA.3^PINA.2);
230                     i=(PINA.2^PINA.1);
231                     j=(PINA.1^PINA.0);
232
233                     total=(a*512)+(b*256)+(c*128)+(d*64)+(e*32)+(f*16)+(g*8)+(h*4)+(i*2)+(j*1);
234
235                     grados=total*0.3515625;
236                     error=tetad-grados;
237                     sprintf(lcd_buffer,"PReal=%f",grados);//declarar variable char
238                     lcd_gotoxy(0,0); //situar el cursor en la parte superior izquierda
239                     lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir
240                     sprintf(lcd_buffer,"Error=%f",error);//declarar variable char
241                     lcd_gotoxy(0,2); //situar el cursor en la parte superior izquierda
242                     lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir
243
244
245
246                     PORTD.0=1;
247                     PORTD.5=0;
248                     PORTJ=V;
249                     PORTL=0;
250
251                 };
252             };
253
254         if (grados<tetad&&tetad>=0&&iniciop==0&&inicia==1)
255         {
256             while (grados!=tetad)
257                 {
258                     a=PINE.7;
259                     b=(PINE.7^PINE.6);
260                     c=(PINE.6^PINA.7);
261                     d=(PINA.7^PINA.6);
262                     e=(PINA.6^PINA.5);
263                     f=(PINA.5^PINA.4);
264                     g=(PINA.4^PINA.3);
265                     h=(PINA.3^PINA.2);
266                     i=(PINA.2^PINA.1);
267                     j=(PINA.1^PINA.0);
268
269                     total=(a*512)+(b*256)+(c*128)+(d*64)+(e*32)+(f*16)+(g*8)+(h*4)+(i*2)+(j*1);
270
271                     grados=total*0.3515625;
272                     error=tetad-grados;
273                     sprintf(lcd_buffer,"PReal=%f",grados);//declarar variable char
274                     lcd_gotoxy(0,0); //situar el cursor en la parte superior izquierda
275                     lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir
276                     sprintf(lcd_buffer,"Error=%f",error);//declarar variable char
277                     lcd_gotoxy(0,2); //situar el cursor en la parte superior izquierda
278                     lcd_puts(lcd_buffer);//pone la variable a imprimir
279
280                     PORTD.0=0;
281                     PORTD.5=1;

```

Figura 6.6.-Código control proporcional parte 1.

```

285     PORTL=V2;
286     PORTJ=0;
287     };
288     };
289     iniciop=inicioa;
290     if (grados>tetad&&tetad>=0&&grados!=gradosp) {
291         PORTD.0=1;
292         PORTD.5=0;
293         PORTJ=255;
294         PORTL=0;
295     };
296     if (grados<tetad&&tetad>=0&&grados!=gradosp)
297     {
298         PORTD.0=0;
299         PORTD.5=1;
300         PORTL=255;
301         PORTJ=0;
302     };
303     if (grados==tetad)
304     {
305         PORTD.0=0;
306         PORTD.5=0;
307         PORTJ=0;
308         PORTL=0;
309         iniciop=inicioa;
310     };
311     if (grados>90^tetad<0^tetad>90)
312     {
313         PORTD.0=0;
314         PORTD.5=0;
315         PORTJ=0;
316         PORTL=0;
317         sprintf(lcd_buffer,"No posible "); //declarar variable char
318         lcd_gotoxy(0,3); //situar el cursor en la parte superior izquierda
319         lcd_puts(lcd_buffer); //pone la variable a imprimir

```

Figura 6.7.- Código control proporcional parte 2.

El código del control proporcional que varía con respecto al código desarrollado en el capítulo 5, éste se muestra en las figuras 6.6 y 6.7, donde se puede ver la impresión del resultado del voltaje en todo un puerto (8 bits) y las consideraciones especiales para movimientos involuntarios.

6.3. Ajuste de señal eléctrica.

Para el caso del control proporcional el ajuste de señal se centra en la salida del sistema, ya que la entrada del sistema se considera los mismos ajustes de la sección 5.4.1 (circuito optoacoplador).

Como se ha planteado la salida representa el uso de todo un puerto de salida, es decir, 8 bits en señal digital, sin embargo, la válvula proporcional recibe una señal analógica variable de 0 a 5 VCD y con cambio de polaridad; para resolver estas dos cualidades es necesario el cambio de una señal digital a analógica con máxima amplitud de 5 VCD, por lo que se utilizará un circuito DAC.

Un convertidor digital-analógico o DAC (*digital to analogue converter*) es un dispositivo para convertir datos digitales en señales de corriente o de tensión analógica. Se utilizan profundamente en los reproductores de discos compactos, en los reproductores de sonido y de cintas de vídeo digitales, y en los equipos de procesamiento de señales digitales de sonido y vídeo [29].

La mayoría de los convertidores digital-analógicos utilizan alguna forma de red reostática. Los datos digitales se aplican a los reóstatos en grupos de bits. Las resistencias varían en proporciones definidas y el flujo de corriente de cada uno está directamente relacionado con el valor binario del bit recibido [29].

Para el desarrollo del proyecto se utiliza un circuito DAC0808, el DAC0808 es un ejemplo de un convertidor digital-analógico en escalera. En la figura 6.8 se muestra su diagrama de bloques. Este dispositivo, opera con una tensión de alimentación continua V_{cc} en el rango comprendido entre +4.5 y +5.5 volts y una tensión de V_{EE} en el rango de -4.5 a -16.5 volts. La resolución es de 8 bits, con un tiempo de asentamiento de salida de 150ns. El DAC0808 puede conectarse directamente a dispositivos TTL o CMOS y su precisión es del -0.19% [30].

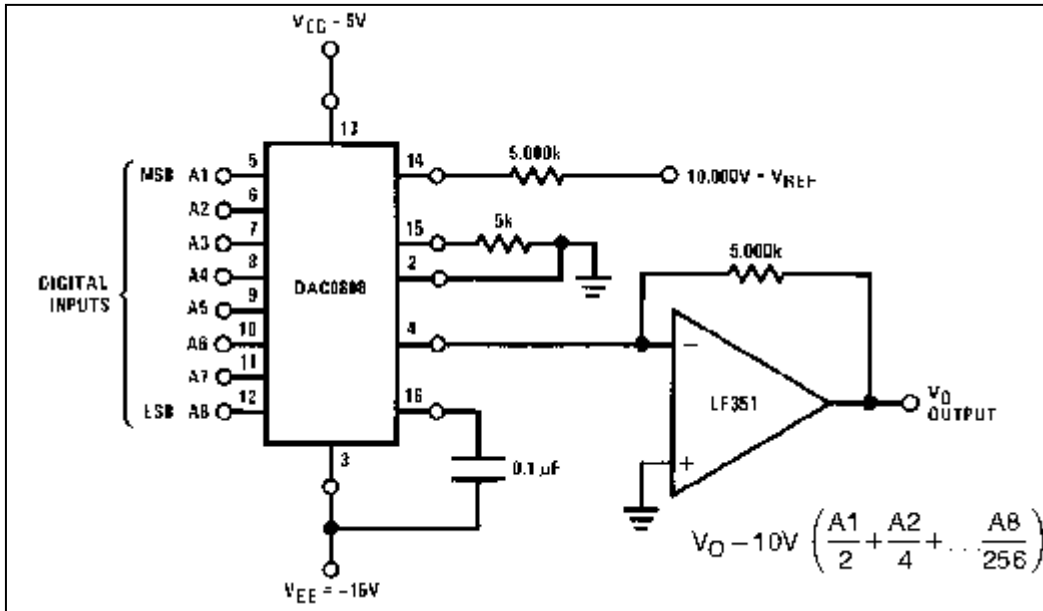


Figura 6.8.- Diagrama de conexión DAC0808.

El diagrama mostrado en la figura 6.8 representa la conexión necesaria para un circuito DAC, el voltaje de referencia puede variar hasta valores de 15 VCD en el caso del desarrollo del control proporcional corresponde a un voltaje de referencia de 5 VCD.

El uso de la conversión digital-analógica es una de las partes del sistema de control proporcional, el cambio de polaridad de una de las salidas del sistema para conseguir el cambio de polaridad se logra al conectar un amplificador inversor a la salida del convertidor digital-analógico.

Se llama así a este montaje porque la señal de salida es inversa a la de entrada, en polaridad, aunque puede ser mayor, igual o menor, dependiendo de la ganancia que se da al amplificador en lazo cerrado. La señal, mostrada en la figura 6.9, se aplica a la terminal inversora o negativo del amplificador y el positivo o no inversor se lleva a tierra eléctrica. La resistencia R2, que va desde la salida al terminal de entrada negativo, se llama de realimentación [31].

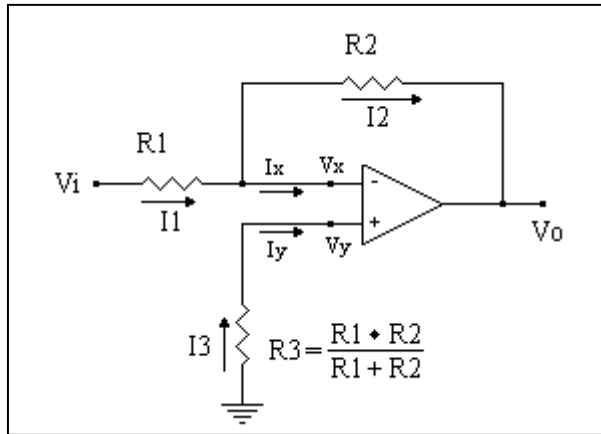


Figura 6.9.- Amplificador Inversor.

Como no se requiere una ganancia de ningún tipo se establece que las resistencias sean de un mismo valor para evitar cambios en la salida entregada por el microcontrolador. Con estos ajustes el diseño del sistema de control proporcional está completo lo que permite generar las señales específicas para movimientos de diferente magnitud; cabe destacar que el tiempo en el que se desea que se realice los movimientos es una constante en el programa “t” y sólo es posible su cambio al reprogramar el microcontrolador.

6.4. Simulación control proporcional.

Para comprobar el sistema de control proporcional se utiliza el software ISIS Proteus 7.0, el cual permite observar el comportamiento de la programación utilizada en su diseño.

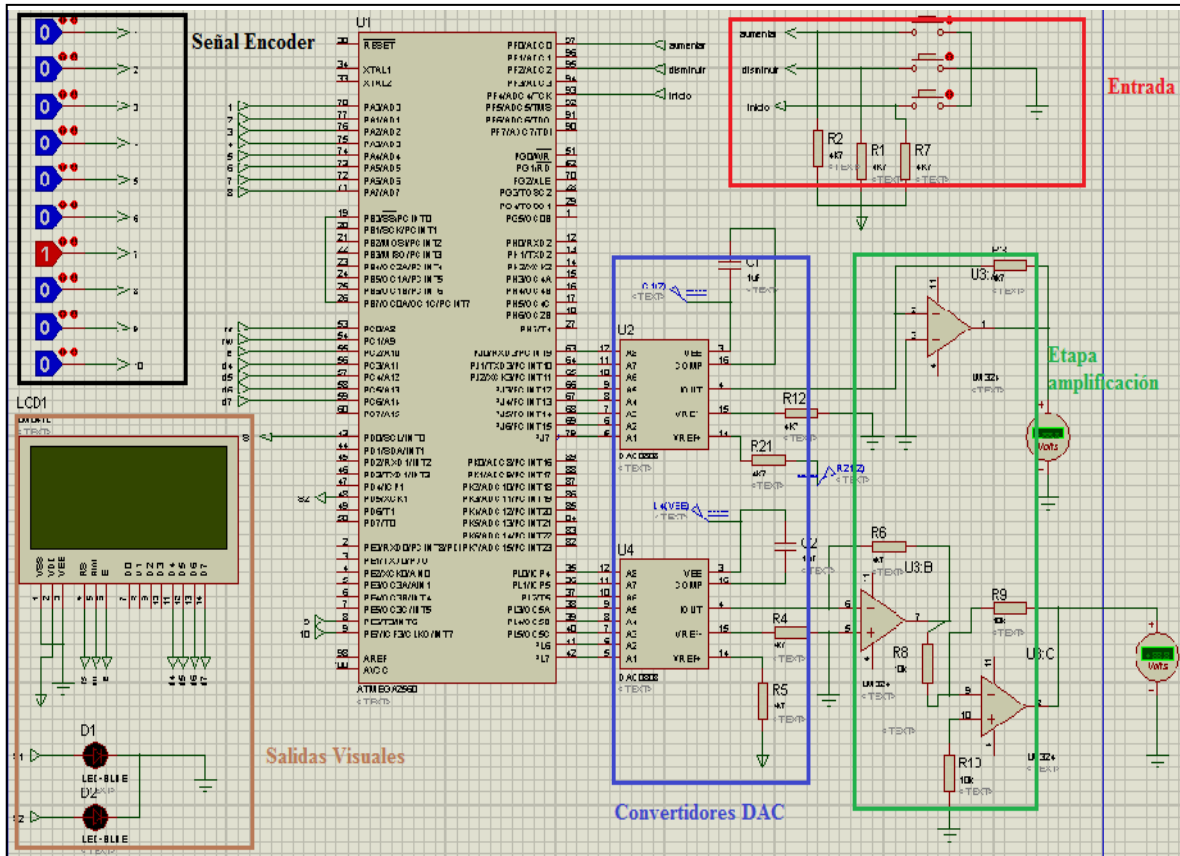


Figura 6.10.- Circuito simulado control proporcional.

La figura 6.10 muestra el circuito para simular el control proporcional como se puede observar presenta similitudes con el control ON/OFF, tales como la señal de entrada y señal del codificador óptico absoluto, sin embargo, se puede ver que ya cuenta con los ajustes en los convertidores digital-analógicos y su etapa de amplificación.

El diseño de la simulación también cuenta con un despliegue visual de datos para el usuario que permite comprobar el sentido de apertura de la válvula por medio de diodos leds.

En la figura 6.11 se aprecia por medio de un voltímetro virtual que las cantidades de voltaje que representan las salidas del sistema varían tanto en un

sentido como en otro permitiendo así comprobar el buen funcionamiento del sistema de control.

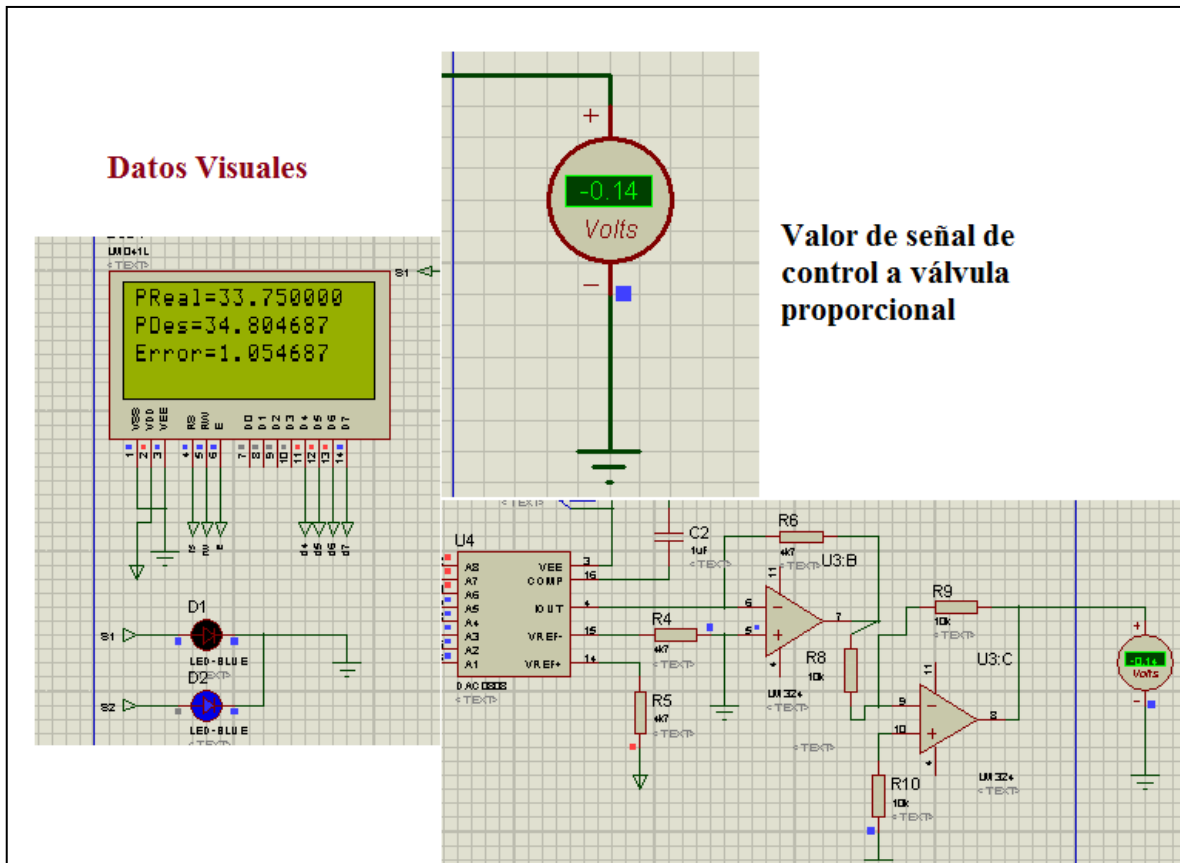


Figura 6.11.- Funcionamiento sistema de control proporcional.

El funcionamiento de la simulación de la figura 6.11 representa un solo sentido del movimiento de control, sin embargo, **la simulación funciona en todas las situaciones posibles correspondientes a la obtención de un voltaje variable para el funcionamiento del sistema a controlar.**

CAPÍTULO 7

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

7.1. Resultados

En el desarrollo del proyecto presentado a lo largo de este trabajo surgen resultados propios del comportamiento cinemático del AHDR y del diseño de control del mismo, obtenidos a base del análisis teórico y simulaciones realizadas a los diseños del proyecto.

Como se pudo apreciar en el capítulo 2 las características de los actuadores convencionales permiten el desarrollo y/o creación de nuevos artefactos para cumplir necesidades específicas o nuevos sistemas de movimiento, tal es el caso del nuevo diseño de actuador (AHDR) presentado en este proyecto.

Uno de los aspectos importantes es obtener un comportamiento del movimiento del AHDR, éste se define por el análisis cinemático revisado en el capítulo 3 obteniendo la ecuación gobernante (*véase ecuación 3.6*) del movimiento del actuador.

El diseño del actuador se encuentra basado en un cilindro de doble efecto (*capítulo 2*) que desempeña un movimiento lineal; el AHDR genera como objetivo principal un movimiento angular y es a partir del diseño presentado en la sección 4.1 y un movimiento lineal que se obtiene la salida de movimiento giratorio en el diseño del actuador de este trabajo, presentado en la simulación observada en el capítulo 4.

Los actuadores en general funcionan mediante la acción o suministro de una fuerza; en este proyecto esta fuerza está representada por la introducción de un fluido al AHDR, sin embargo, el suministro y control de este fluido depende del

uso de artefactos hidráulicos (véase *sección 3.2*), ya que sin el uso de estos es imposible el movimiento del actuador.

La conjunción de un sistema hidráulico capaz de suministrar fluido al AHDR representa un sistema de lazo abierto, para el cual la integración de una ecuación total del sistema es obtenida (véase *ecuación 3.12*). El diseño de control depende de la elección de un sensor que permita relacionar la entrada del sistema con la salida del mismo, esto permite la creación de un sistema de lazo cerrado (véase *sección 2.3*) en la cual se basa el diseño del sistema de control.

El comportamiento del sistema hidráulico se aprecia con claridad en la *sección 3.3* por medio de la simulación del mismo, resaltando el posicionamiento de la parte lineal que representa el cambio de posición.

La variedad de artefactos reguladores de flujo permite la creación de dos sistemas de control: control de válvula direccional ON/OFF y control de válvula proporcional. Ambos diseños presentan válvulas de 4 vías 3 posiciones; su diseño se logra a partir de la programación de microcontroladores con cualidades y capacidades distintas para cada uno de los casos. (Véase *secciones 5.2 y 6.2*)

La conjunción de características eléctricas diferentes entre los elementos del sistema hidráulico de lazo cerrado (véase *sección 5.1*) involucra ajustes en las señales de entrada y salida del control, presentando estos ajustes por medio de circuitos electrónicos (véase *sección 5.4*).

Los movimientos y perturbaciones a las que será sometido el sistema hidráulico son resueltos por la programación de los diseños de control y su comprobación se realiza mediante la simulación del circuito electrónico de control de los capítulos 5 y 6.

El diseño de control de válvula proporcional implica el diseño particular de circuitos que se acoplen con las características de la válvula proporcional, tales como el convertidor digital-analógico y la amplificación de la señal de salida presentadas en la *sección 6.3*.

En el desarrollo del proyecto se obtienen los circuitos electrónicos totales de los dos tipos de controles propuestos (véase *capítulos 5 y 6*), así como la simulación del funcionamiento de ambos.

7.2. Conclusiones

De acuerdo con lo presentado a lo largo de los capítulos anteriores y los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto mostrados de forma resumida en la sección 6.1 se establecen las siguientes conclusiones:

- ∅ El movimiento del AHDR está gobernado por una ecuación de segundo grado no lineal, la gráfica que describe la ecuación gobernante permite observar que la linealidad del movimiento depende de la distancia entre émbolo y rotor.
- ∅ Entre más cerca se encuentre el émbolo del elemento de rotación (rotor), el cambio en la posición angular es menor.
- ∅ El diseño del AHDR permite un movimiento máximo de 75° con respecto a la vertical del mismo para las dimensiones presentadas en el proyecto.
- ∅ El diseño del actuador puede variar en cuanto a las dimensiones, pero en todos los casos se presentará una limitante en el movimiento angular.
- ∅ El actuador requiere que el elemento de conexión tenga libertad de movimiento en todas direcciones para su buen funcionamiento; el uso de conexiones limitadas impide la transformación de un movimiento lineal en angular.
- ∅ La barra de conexión presenta un movimiento de rotación sobre su propio eje, por lo cual la reducción en el radio de giro de las barras de conexión es imprescindible para alcanzar un máximo desplazamiento angular.

- o La simulación del sistema hidráulico permite comprobar que la carga al final del sistema no influye en el posicionamiento del AHDR, sin embargo, para su aplicación es necesario considerar las capacidades de todo el sistema hidráulico.
- o El diseño del sistema de control depende de las características de los elementos de la planta y la retroalimentación; estos elementos se seleccionan de acuerdo a la aplicación específica del sistema.
- o La resolución del sensor de retroalimentación es ajustada por medio de la programación e interpretación de la señal entregada por el mismo.
- o Los movimientos generados por el control ON/OFF no tiene un perfil de velocidad, el control sólo envuelve el posicionamiento del actuador.
- o La respuesta del sistema de control ON/OFF es prácticamente inmediata, debido a la velocidad de conmutación de los dispositivos electrónicos, por lo que depende de la velocidad de accionamiento de los elementos a controlar.
- o El diseño de control proporcional permite realizar un movimiento en un tiempo determinado sin importar su magnitud, es decir, se introduce un tiempo preestablecido para todos los movimientos.
- o El diseño de control para ambos tipos de válvula (válvula direccional ON/OFF y válvula proporcional) requiere la separación de corriente eléctrica como protección al sistema de control.
- o El diseño de los controles presentados en este trabajo pueden ser aplicados para diferentes medidas de un AHDR, con un cambio en el valor de las constantes dentro de la programación.

7.3. Aportaciones

Las aportaciones que realiza este proyecto al conocimiento se recapitulan a continuación:

- 1) Con el análisis matemático del diseño de AHDR se pudo entender, conocer y controlar el movimiento generado por el mismo, para divulgarlo a nivel nacional mediante la publicación de artículos y asistencia a congresos; ya que el desarrollo de nuevos artefactos representa un área con un sin fin de novedades y con avance continuo a partir del surgimiento de necesidades cada vez más específicas.
- 2) Es posible observar el movimiento del AHDR por medio de la simulación cinemática, encontrando limitaciones en el máximo avance angular dependiendo de las medidas entre los elementos que en su conjunto representan el diseño de este artefacto.
- 3) Utilizando software libre como el FESTO FluidSim es posible obtener un resultado del comportamiento y control del sistema hidráulico presentado en el proyecto, realizando cambios a las condiciones iniciales del sistema y a la señales de activación y control del mismo.
- 4) Con el diseño de control de válvula direccional ON/OFF se establece que es posible obtener un posicionamiento con una exactitud que depende de la resolución del codificador óptico absoluto, que funge como retroalimentación del sistema de lazo cerrado.
- 5) El diseño del sistema de control de válvula proporcional establece un manejo con mayor sensibilidad en el accionamiento del sistema hidráulico, obteniendo movimientos de diferentes magnitudes en una cantidad de tiempo determinado.
- 6) La construcción y prueba física en los elementos del sistema hidráulico, permiten comprobar el funcionamiento del diseño de control de válvula direccional ON/OFF, para todas las circunstancias a presentarse en un accionamiento continuo.

7.4. Trabajo a futuro y recomendaciones

Este proyecto es parte de una línea de investigación que tiene como finalidad establecer equipo de laboratorio en la Facultad de Ingeniería Mecánica

de la U.M.S.N.H. y un sistema hidráulico capaz de ser utilizado en otros proyectos con diferentes aplicaciones; utilizando software libre y plataformas de bajo costo como FESTO FluidSIM, ISIS Proteus 7.0 y CodeVision AVR se configura el diseño del sistema hidráulico capaz de controlar un AHDR presentado en este trabajo.

Las recomendaciones para trabajo futuro se presentan a continuación:

- 1) El uso de nuevos artefactos capaces de cumplir tareas específicas es una de las áreas de investigación más grande en el campo de las ingenierías, por lo que con el sistema de control desarrollado en este proyecto se integrará a la realización de nuevos estudios como una base y/o parte esencial en los mismos dentro de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H.
- 2) Debido a que los sistemas de control constituyen un diseño aplicable a diferentes medidas para un AHDR, es posible que la aplicación de estos tenga un amplio campo, por lo que la construcción genérica de una tarjeta de control representa un importante paso a seguir dentro de esta línea de investigación.
- 3) La finalidad de realizar estudios e investigar el comportamiento cinemático del diseño del actuador presentado en este proyecto es la búsqueda de un mayor aprovechamiento de las cualidades del actuador, tales como la integración de dos movimientos en un solo artefacto, las capacidades de fuerza y presión en comparación con sus similares neumáticos y las posibles aplicaciones industriales que la manufactura del AHDR representará.
- 4) Continuar con el perfeccionamiento del diseño de control de válvula proporcional integrando la obtención de un perfil de trayectoria en la velocidad de movimiento en el AHDR, con la finalidad de conseguir movimientos suaves en el arranque y frenado, aumentando así la vida útil del sistema de posicionamiento para la cual sea utilizado.
- 5) Establecer diferentes señales de retroalimentación en el sistema de lazo cerrado creando un sistema de control con mayor rango de manejo para perturbaciones externas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Simarro Grande, G., "Fundamentos de Hidráulica". Ed. Grupo Editorial Universitario, 186 p. 2006
- [2] Yudong, X. Yanjun, L. y Yong, W. "Dynamic Design of Electro-hydraulic Control Valve based on Physical Simulation Model". International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IEEE, pp. 388-391, China, 2009.
- [3] Wells, D. Iversen, E. Davis, C. Jacobsen, S. "An investigation of hydraulic actuator performance trade-offs using a generic model", Center for Engineering Design University of Utah, IEEE, pp. 2168-2173, E.U., 2004
- [4] Zhu, H. y Book, W., "Construction and Control of Massive Hydraulic Miniature-actuator-sensor Array", Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design, IEEE, pp. 820-825, Munich, Germany, 2006.
- [5] Creus S. A., "Neumática e Hidráulica". Ed. Marcombo, segunda edición, 436 p.
- [6] Carulla M. y LLadonosa V., "Circuitos Básicos de Neumática", Ed. Marcombo, 148 p, 1993.
- [7] Mataix C., "Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas". Ed. Harla, 582 p, 1978.
- [8] Vilorio J., "Tecnología y Circuitos de aplicación Neumática, Hidráulica y Electricidad", Ed. Paraninfo, 174 p.
- [9] Patent Application Publication, Pub. No.: US 2002/0083828 A1
- [10] Patent Application Publication, Pub. No.: 3-924-519
- [11] Patent Application Publication, Pub. No.: US 7/299,741 B2
- [12] Katsuhiko Ogata , "Ingeniería de Control Moderna", Ed. Prentice Hall, 1015 p.
- [13] Aplicaciones Neumáticas e Hidráulicas, Ed. Ediciones UPC, 1997.
- [14] FESTO, FluidSim4 Hidráulica, "Manual del usuario".
- [15] "Elementos reguladores", Ed. Ediciones UPC, 1998.

- [16] Dadkhah, F., "Ansys Workbench Software Tutorial". Ed. Schroff Development Corp, 256 p, 2002.
- [17] Sensortech, "Pressure sensors transducers and transmitters", Ed: Sensor Technologies Limited, 435 p, 1996.
- [18] West Instruments México, "Manual de aplicación de encoders", 21p, 2000.
- [19] Vilches E., "Códigos binarios de representación de datos", 42p, 1998.
- [20] Morales R., "Diseño de circuitos de control para servoválvulas de sistemas hidráulicos", CONCAPAN XXI, 2003.
- [21] Zubicaray M., "Bombas: teoría, diseño y aplicaciones", Ed. Limusa, 239 p, 2003.
- [22] Bosch R. y Toledo A. J., "Fundamentos de Electrónica Digital", Ed. Univ. Politéc Valencia, 385 p, 2003.
- [23] Quetglás G. y Martínez G. F., "Introducción a la programación estructurada en C", Ed. Maite Simon, 236 p, 2003.
- [24] Infante D., "Curso básico-intermedio de programación en c de los microcontroladores Atmel", Ed. Comunidad Atmel, 78p, 2008.
- [25] Cirovic M. M., "Electronica fundamental", Ed. Reverte, 630 p, 1995.
- [26] García S. y Gualda J., "Electrónica de potencia: componentes, topologías y equipos", Ed. Paraninfo, 754 p, 2006.
- [27] "Optoacopladores", Instituto Tecnológico de La Laguna, 10 p., 2006.
- [28] Cowels, L., "Circuitos de transistores. Cálculos y aplicaciones.", Ed. Gustavo Gili, 2011.
- [29] Parada M., Escudero J., I., y Simón P., "Apuntes de Instrumentación, Técnicas de Medida y mantenimiento", Facultad de Informática y Estadística, Sevilla, 1998.
- [30] Sedra A.S. y Smith K.C., "Microelectronic Circuits", Saunders Collegue Publishing, Third Edition. 1991.
- [31] Forrest M. "Electronic formulas, symbols and circuits", Ed. Radio shack, 185p. 2000.
- [32] Karl J. Astrom, "Control PID Avanzado", Ed. Prentice Hall, 504 p., 2009.

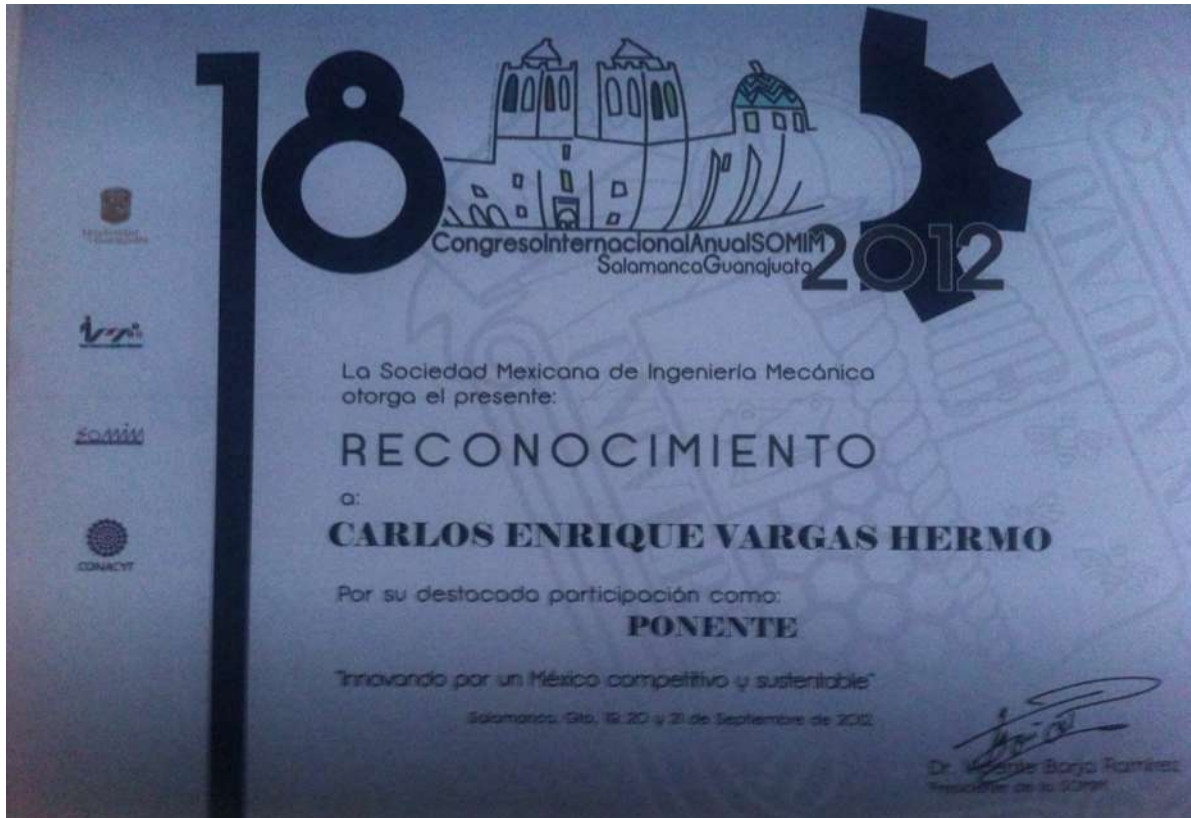
- [33] H. Sira-Ramírez, R. Márquez, F. Rivas-Echeverría y O. Llanes Santiago, “Control de sistemas no lineales”, Ed. Pearson Prentice Hall, 360 p., 2005.
- [34] Serón María M, “Sistemas no lineales-Notas de clase”, Universidad Nacional de Rosario, Basadas en Khalil, H. Nonlinear Systems. Segunda edición. Prentice Hall, NJ, 1996
- [35] Berengel M., “Aplicación de control a sistemas no lineales”, Universidad de Almería.
- [36] Garrido S., “Identificación, estimación y control de sistemas no-lineales mediante RGO”, Universidad Carlos III de Madrid.
- [37] González Q., “Diseño e implementación de un sistema de control digital de posición para un motor DC”, Universidad Santo Tomas, Bucaramanga, 1996
- [38] Pini A. y Sanguinetti G, “*Convertidores Digitales-Analógicos.*”, 1999.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo I. Publicaciones

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO BAJO LA MODALIDAD DE CONFERENCIA
EN EL XVIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM 19 al 21 DE
SEPTIEMBRE, 2012 SALAMANCA, GUANAJUATO, MÉXICO



Simulación dinámica de un actuador de doble efecto rotativo con la plataforma Workbench Ansys

¹Vargas Hermo Carlos Enrique, ¹Juárez Campos Ignacio

¹División de estudios de posgrado, Maestría en ciencias en ingeniería mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Teléfono (+52) (443) 322 3500, Avenida Francisco J. Mujica S/N Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

cevh23@hotmail.com, nacho_chan_66@hotmail.com

RESUMEN.

En disposición de realizar un actuador novedoso en comparación con los existentes; aprovechando el buen rendimiento de los actuadores lineales, se propone el diseño de un actuador de doble efecto rotativo para obtener dos tipos de movimiento. Este trabajo investiga el comportamiento dinámico de un nuevo modelo de actuador, el cual transforma el movimiento lineal en un movimiento de rotación. El diseño del actuador se basa en un cilindro de doble efecto que desplaza un émbolo, éste a su vez unido a un elemento de rotación por medio de un sistema de barras, genera un desplazamiento angular en el actuador. Específicamente este artículo se centra en las características del movimiento del émbolo (movimiento lineal), el rotor (movimiento de rotación) y las conexiones entre ellos; obteniendo con la simulación del sistema, el tipo de unión que debe existir para generar el comportamiento deseado, así como las limitantes del mismo.

ABSTRACT.

In order to realize a new actuator model in comparison with the existents, taking advantage of the good performance of linear actuators, to obtain two types of motion; the design of a double-acting rotary cylinder is proposed. This paper investigates the dynamic behavior of a new actuator model, which transforms the linear motion in a rotary motion. The actuator design is based in a double-acting cylinder which moves a

piston, this in turn joined to a rotating element through a system of bars, generates an angular displacement in the actuator. Specifically this article focuses on the characteristics of movement of the piston (linear motion), the rotary element (rotary motion) and the joints between them; obtained with the simulation of the system the type of joint needed to generate the desired movement in the actuator, and limitations of itself.

NOMENCLATURA

R = Radio del rotor
 r = Radio del émbolo
 l = Longitud del eslabón de unión
 d = Distancia de desplazamiento del émbolo
 θ = Ángulo de movimiento del rotor
 A = Punto de conexión barra – émbolo
 A' = Proyección punto A, cara frontal rotor
 AF = Posición final punto A
 B = Punto de conexión barra – rotor
 BF = Posición final punto B
 θF = Desplazamiento angular final
 C = Centro del actuador
 C' = Proyección punto C, cara frontal rotor
 m = Distancia $A' - B$

INTRODUCCIÓN

Un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico

[1]. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz-eléctrica (motor eléctrico o solenoide).

Dependiendo del origen de la fuerza el actuador se denomina "neumático", "hidráulico" o "eléctrico" [1].

Los actuadores se utilizan en una gran gama de campos, tanto en robótica, sistemas tele-operados, prótesis etc. [2,3,4]. Este tipo de proyectos requieren un sistema de actuación con características específicas, las cuales son obtenidas con la unión de varios tipos de actuadores en la mayoría de los casos. El diseño de nuevos actuadores que resuelvan de manera individual el comportamiento de un proyecto, abre un potencial de opciones a elegir en la industria moderna [5,6,7]. Dentro de los actuadores para nuestro interés existen dos: cilindro de doble efecto y actuador rotativo, ya que la unión de éstos representa el diseño del actuador estudiado en este trabajo.

Cilindro de doble efecto

La carga puede colocarse en cualquiera de los lados del cilindro. Se genera un impulso horizontal debido a la diferencia de presión entre los extremos del pistón. [1]

Actuador rotativo

El objetivo final del actuador rotatorio es generar un movimiento giratorio. El movimiento debe estar limitado a un ángulo máximo de rotación. Normalmente se habla de actuadores de cuarto de vuelta, o 90°, fracción de vuelta para ángulos diferentes a 90°, por ejemplo 180°. [1]

La unión de estos dos conceptos, da como resultado el actuador presentado en este artículo, la conjunción de dos tipos de actuadores en uno, con lleva un trabajo especial en el elemento que une a cada una de las partes, es decir, el sistema de barras entre el émbolo que se desplaza linealmente y el rotor donde se genera el

movimiento angular. El diseño del actuador se puede apreciar en la Figura 1.

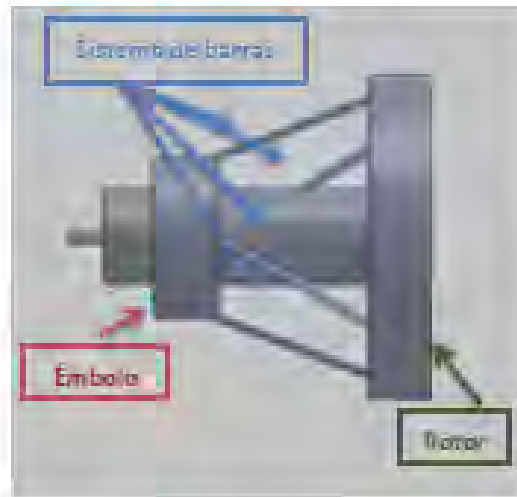


Figura 1.- Diseño del actuador de doble efecto rotativo.

El diseño del actuador no tiene antecedentes similares, es decir, es novedoso y a su vez su aplicación no es específica; puede utilizarse en diferentes sistemas ya que es posible el aprovechamiento de los dos tipos de movimiento, lo que lo convierte en un actuador con mayor versatilidad que cualquier actuador con movimiento singular. Ya que es basado en un cilindro de doble efecto, el mantenimiento y análisis es más simple que el de los actuadores rotativos de paletas o cremalleras en el mercado [1].

El comportamiento dinámico del actuador de doble efecto rotativo es gobernado por:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{R^2 + r^2 - l^2 + d^2}{2rR} \right) \quad (1)$$

La ecuación (1) se obtiene de un análisis al diseño del sistema que se aprecia en la Figura 2, donde se aprecia que la distancia entre los puntos A-A' y la longitud (l) del eslabón de conexión, se puede relacionar con la distancia m, por un triángulo rectángulo.

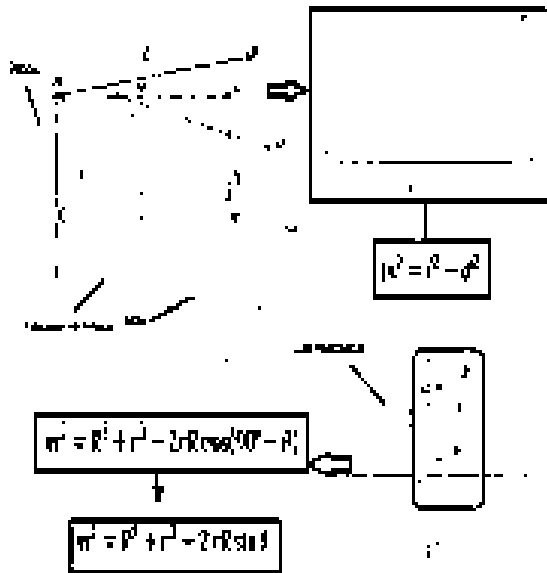


Figura 1.- Análisis matemático del actuador de doble efecto rotatorio

La proyección de los puntos C y A en la cara frontal del rotor nos permite relacionar la distancia m con el ángulo de desplazamiento θ , y a su vez sustituir la primera relación obtenida, para así encontrar la ecuación gobernante de nuestro sistema mostrada en la ecuación (1). Donde la relación entre la distancia de desplazamiento lineal y el ángulo de rotación se muestra en la Figura 3.

Sin embargo, el análisis matemático no es suficiente para validar el diseño del proyecto, por lo cual la simulación del mecanismo es necesaria a fin de comprobar su funcionamiento así como sus limitantes.

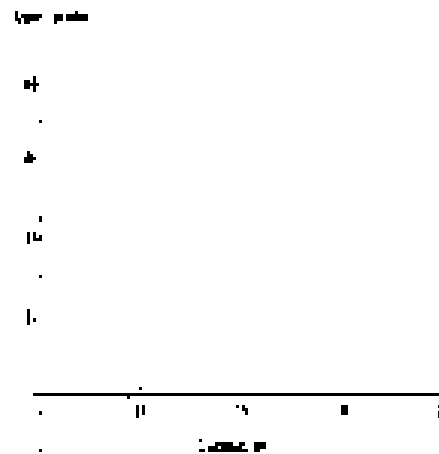


Figura 3.- Relación de espesor versus ángulo

DESARROLLO

Ya que el propósito del trabajo es analizar el actuador en su comportamiento dinámico, es posible reducir su construcción dentro de la simulación, ya que la interpretación de resultados no involucra análisis de fuerzas, torque etc. Por lo que la simulación sólo incluirá la representación del embolo, el rotor y una barra de conexión, aunque el diseño cuenta con cuatro barras, ya que con un solo eslabón de conexión es posible simular el comportamiento a analizar en este trabajo.

Para su simulación se utiliza la plataforma de Ansys Workbench. El primer paso para el desarrollo de un proyecto en Ansys es la selección del tipo de análisis, en la interfaz seleccionamos el ícono *Rigid Dynamics* [8], consecuentemente aparece una serie de pasos para resolver el análisis, en primer lugar se construye la geometría del proyecto, como se mencionó anteriormente sólo construiremos una parte del diseño para analizar la dinámica del actuador, la geometría se puede observar en la Figura 4 [8].

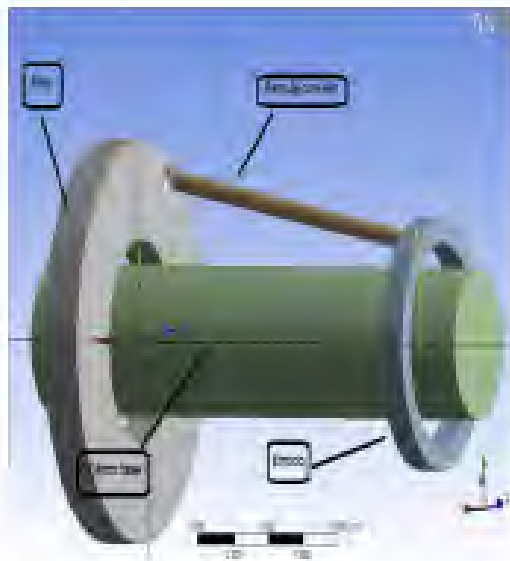


Figura 4.- Geometría del proyecto.

En la Figura 4 se aprecia que en el diseño de la simulación encontramos cuatro elementos (rotor, émbolo, barra de conexión y cilindro base), éstos son suficientes para observar el movimiento de nuestro sistema.

La construcción de la geometría envuelve evidentemente las dimensiones con las que se pretende construir físicamente el actuador, estas dimensiones están basadas en un cilindro de doble efecto de 126 mm de longitud con una carrera de su vástago de 75 mm [9] y en los rodamientos que fungirán como el émbolo y el rotor que tienen 100 mm y 160 mm de radio exterior respectivamente; con estos elementos diseñamos las dimensiones de la simulación, estas medidas se encuentran en la Tabla 1.

ELEMENTO	mm
Radio exterior rotor	80
Radio interior rotor	40
Ancho de rotor	20
Radio exterior émbolo	50
Radio interior émbolo	40
Ancho de émbolo	20
Radio cilindro base	30
Longitud cilindro base	360
Longitud de barra de conexión	248
Radio barra de conexión	4

Tabla 1.- Dimensiones de la geometría del actuador

El cilindro base tiene medidas basadas en el grosor del vástago del cilindro de doble efecto [9], con el fin de que el vástago pueda desplazarse fácilmente dentro del cilindro, y en el caso de esta simulación, sólo se utiliza para observar los movimientos del rotor y el émbolo.

Cabe mencionar que las medidas en el centro de la unión de la barra sobre el elemento rotativo, tiene coordenadas en el eje X de 40 mm y sobre el eje Y de 60 mm, dándonos así, un ángulo de desplazamiento de 33.70° con respecto a la vertical, la construcción de esta geometría se observa en la Figura 5.

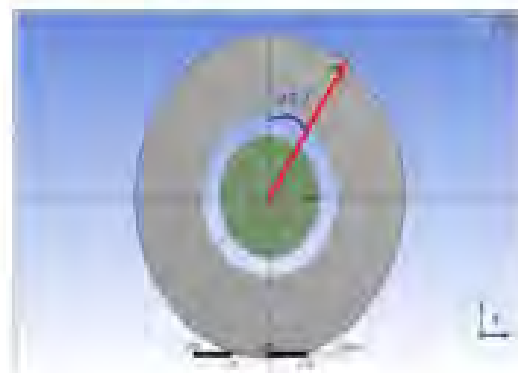


Figura 5.- Geometría de conexión en elemento rotativo

La determinación de la posición de la conexión de la barra es elegida por la simpleza de localizarla, es una medida con el fin de determinar únicamente el comportamiento del artefacto; la conexión de la barra al émbolo, se encuentra en el

eje Y tomando como referencia la cara del émbolo.

La unión de la barra al rotor, presenta una inclinación con respecto a la vertical tomando como referencia el cilindro base, esta inclinación facilita el movimiento de rotación deseado en el actuador (Figura 5).

Parte importante para la simulación del actuador son las conexiones dentro del software, para este trabajo se necesitan cinco conexiones las cuales permitirán comprobar el comportamiento dinámico del actuador; las conexiones se establecen en el menú "Connections-Joints"[8] que se pueden observar en la Figura 6.

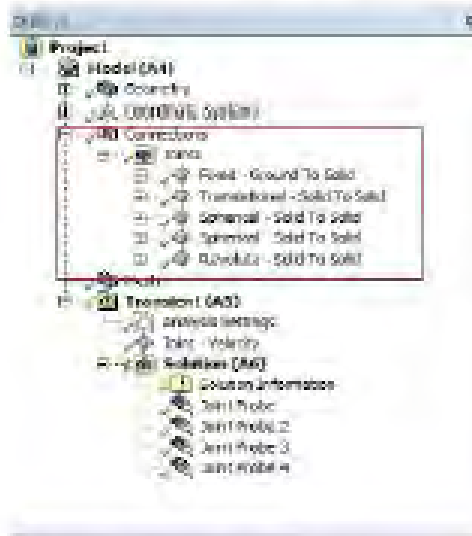


Figura 6.- Conexiones establecidos en el análisis.

Las conexiones necesarias para el análisis son la conexión fija del cilindro base, que sirve a los demás elementos, para moverse en referencia al cilindro; la conexión de traslación (cilindro base-émbolo), que simula el desplazamiento lineal del actuador y por último la conexión rotacional (cilindro base-rotor), que permite un movimiento giratorio alrededor del cilindro base; estas conexiones se pueden apreciar en la Figura 7.

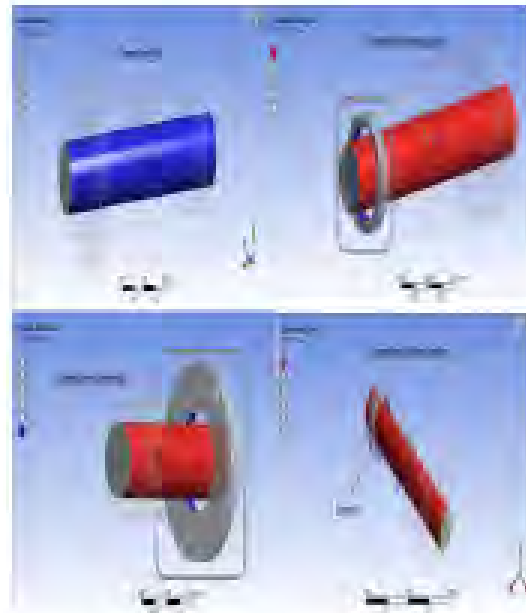


Figura 7.- Conexiones fijas, de traslación y rotacional.

Las conexiones de traslación y rotación presentadas en la Figura 7 permiten el movimiento lineal y giratorio del actuador, sin embargo para lograr que por medio de un movimiento lineal se genere un movimiento angular, el tipo de conexión que debe tener la barra que une a los dos elementos (émbolo y rotor) es una de las partes esenciales del trabajo.

Si la conexión de la barra en cada una de sus uniones, no es la adecuada, el actuador no desarrollará el movimiento deseado; para obtenerlo, se prueban las diferentes conexiones que el software permite, siendo la única solución satisfactoria la conexión esférica en ambas uniones de la barra, las cuales se apreciam en la Figura 8.

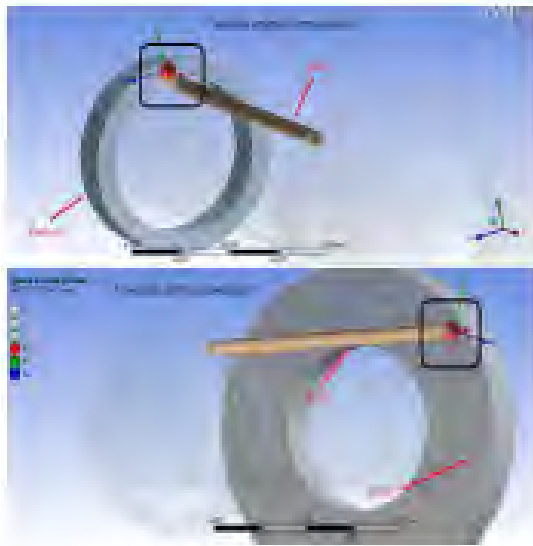


Figura 8 - Conexiones esféricas.

Las conexiones esféricas permiten un movimiento en los tres ejes coordinados y es esta particularidad la que permite el movimiento deseado en el actuador, sin esta propiedad el movimiento no es posible; cabe destacar que este tipo de conexión debe existir en los dos extremos de la barra como se aprecia en la Figura 8.

Para poder simular el actuador, se asigna movimiento al émbolo, para que éste se desplace de manera lineal con una velocidad constante; el movimiento del émbolo está limitado por las propiedades de la conexión antes asignadas, lo que permite observar el comportamiento del mecanismo.

RESULTADOS

En un inicio se dan las condiciones del análisis, en la primer prueba damos como condiciones una duración de 5 segundos y sin limitaciones de movimiento, comprobando que el sistema funciona dinámicamente como se esperaba.

Sin embargo existe un detalle a considerar, debido a la geometría del proyecto, físicamente sería imposible el movimiento que se aprecia en la Figura 9, donde se puede observar que la barra de unión chocaría con el cilindro base limitando así el ángulo de desplazamiento del rotor.



Fig. 9.- Análisis sin limitaciones.

Físicamente el actuador tiene un ángulo de desplazamiento máximo, el cual es determinado al observar la tabla de avance que el software proporciona, concluyendo que el elemento rotativo debe estar limitado a un giro de 75° aproximadamente, es decir, tomando como base la conexión de la barra, ésta se movería de su posición inicial de 33.7° a 108.7° con respecto a la vertical.

Con la finalidad de observar su comportamiento dinámico real, limitamos el movimiento en la conexión rotacional (cilindro base-rotor), obteniendo la simulación con limitaciones que representa nuestro movimiento real del actuador que se observa en la Figura 10.

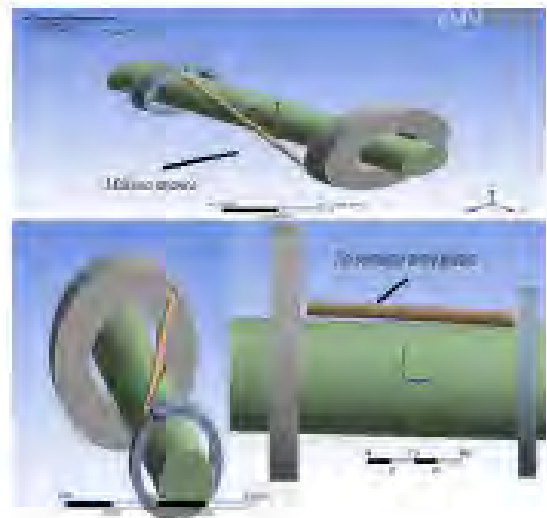


Figura 10 - Análisis dinámico con limitación.

Como se aprecia en la Figura 10 el máximo avance se muestra en diferentes perspectivas, apreciando que no existe contacto entre la barra y el cilindro base, comprobando que la limitación de nuestro actuador es la adecuada.

Las gráficas de movimiento de las uniones rotacional y de traslación se muestran en la Figura 11 y Figura 12, respectivamente, en éstas podemos observar los desplazamientos lineal y rotacional en el tiempo.

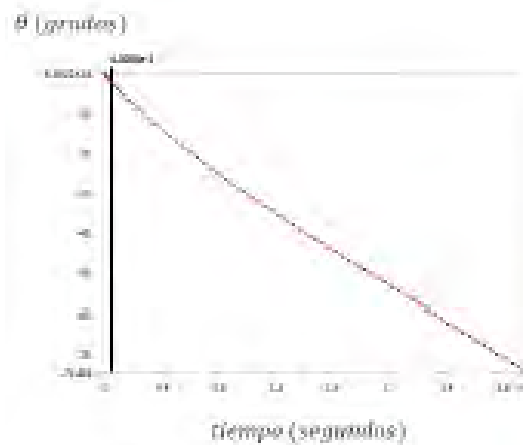


Figura 11.- Gráfica movimiento rotacional

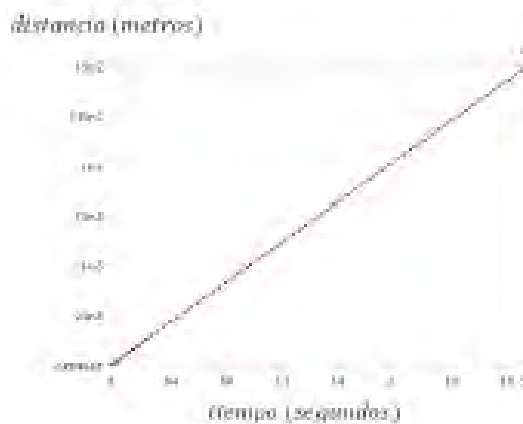


Figura 12.- Gráfica movimiento de traslación

La Figura 11 muestra que al principio del movimiento el cambio en la posición angular del rotor es muy pequeño; a medida que el émbolo se acerca al rotor el cambio de posición angular en el

rotor es mayor, es decir, entre más cerca esté el émbolo del rotor, el ángulo de desplazamiento del actuador es mayor.

El movimiento del émbolo que se muestra en la Figura 12 es constante durante todo el movimiento, es decir, es independiente del movimiento de rotación, lo que comprueba que a partir del movimiento lineal se obtiene un movimiento angular en el actuador.

La dinámica del actuador también incluye los movimientos que realiza el sistema de barras. Para observar su funcionamiento colocamos en la geometría del diseño una pestaña en la barra de conexión y realizamos el análisis dinámico del actuador completo. El análisis con la pestaña podemos observarlo en la secuencia de imágenes mostradas en la Figura 13.

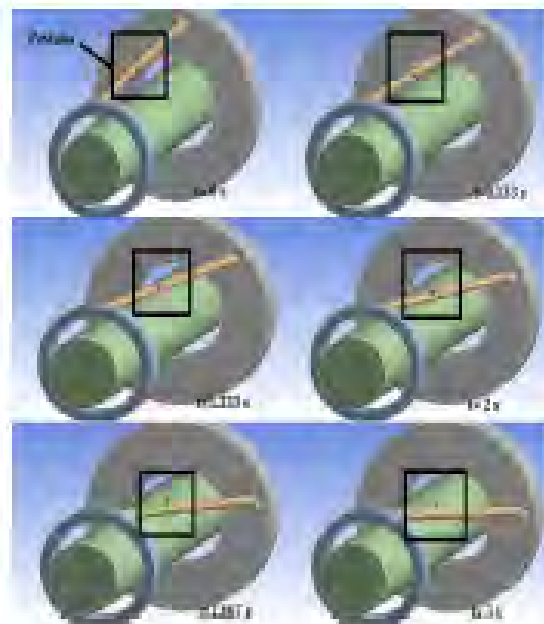


Figura 13.- Dinámica barra de conexión.

Como se observa en la Figura 13 las imágenes muestran en secuencia el movimiento del actuador, ésta permite observar que la pestaña agregada a la barra de conexión, gira en sentido anti horario sobre su propio eje horizontal, este movimiento descarta el cambio de diseño de una conexión tipo curva para evitar el contacto con el cilindro base.

Cabe destacar que es posible obtener un máximo desplazamiento angular más rápido o más lento, dependiendo del perfil de velocidad introducido, sin embargo tendrá las mismas características en cualquier caso tendrá menor velocidad al inicio y aumentará conforme el émbolo se acerque al rotor.

CONCLUSIONES

En este trabajo se determina que el cilindro de doble efecto rotativo es factible y que la dinámica del mismo es la deseada. El diseño del actuador permite transformar un movimiento de traslación en una rotación. Específicamente el cambio de movimiento se logra por medio del tipo de conexiones en el sistema de barras, las cuales deben tener libertad de movimiento en todas direcciones, ya que de no ser así el actuador no realizará el comportamiento esperado.

El diseño del actuador se encuentra limitado a un rango de movimiento angular, sin embargo variaciones en el ángulo de construcción en la unión hacia el elemento rotativo puede causar un aumento en su rango de movimiento, así como también la cercanía entre el émbolo y el rotor.

La dinámica con la que se comporta el sistema de barras, con rotación sobre su propio eje, implica que entre más pequeño sea su radio de giro aumenta la posibilidad de que el actuador tenga un desplazamiento angular mayor, al aumentar la distancia de contacto entre la barra y el cilindro base.

La velocidad con la que se llega al máximo desplazamiento angular varía a partir de la velocidad de traslación del émbolo, sin embargo la velocidad angular presenta un perfil de velocidad dependiendo la posición del émbolo mismo, teniendo mayor variación en su posición a medida que el émbolo se acerca. Ya que el movimiento angular depende directamente del movimiento lineal, el control automático del actuador involucra el control de la posición lineal del émbolo.

REFERENCIAS

- [1] Simarro Grande, G., Fundamentos de Hidráulica. Ed. Grupo Editorial Universitaria, 186 p. 2006
- [2] Yodang Xie, Yajun Lin y Yong Wang, Dynamic Design of Electro-hydraulic Control Valve based on Physical Simulation Model. International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2009.
- [3] D. L. Wells, E. K. Iversen, C. C. Davis, S. C. Jacobsen, AN INVESTIGATION OF HYDRAULIC ACTUATOR PERFORMANCE TRADE-OFFS USING A GENERIC MODEL, Center for Engineering Design, University of Utah, 2004.
- [4] Haihong Zhu, Wayne J Book, Construction and Control of Redundant Hydraulic Miniature-actuator-sensor Array, Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design, Munich, Germany, October 4-6, 2006.
- [5] Patent Application Publication, Pub. No.: US 2002/0083828 A1
- [6] Patent Application Publication, Pub. No.: 3-924-519
- [7] Patent Application Publication, Pub. No.: US 7/299,741 B2
- [8] ANSYS Workbench, Guía del usuario de ANSYS, Inc. versión 12.1 South pointe 11, 2009.
- [9] Parker, Compact Hydraulics Cylinders Series CHE/CHD, Parker Hannifin Corporation, 52 p. 2011.

Anexo II. Hoja de datos Cilindro Hidráulico de doble efecto

Catalog HY08-1157-5/NA

Cylinder Weights and Force

Compact Hydraulic Cylinders

Series CHE

Theoretical Push and Pull Forces

The cylinder output forces are derived from the formula:

$$F = \frac{P \times A}{10000}$$

Where F = Force in kN.

P = Pressure at the cylinder in bar.

A = Effective area of cylinder piston in square mm.

To determine the bore size for the application take the following steps.

Push and Pull Force in kN

Bore Ø	Rod Ø	Operating Direction	Piston Area (mm²)	Operating Pressure (Bar)							
				30	40	50	60	100	120	140	
20	12	Push	314	0.93	1.26	1.58	1.91	2.51	3.14	3.77	4.40
		Pull	201	0.66	0.90	1.21	1.51	2.01	2.41	2.81	
25	14	Push	491	1.39	1.88	2.37	2.85	3.78	4.71	5.64	6.57
		Pull	327	0.97	1.31	1.65	2.02	2.70	3.37	4.04	4.72
30	18	Push	804	2.31	3.12	3.93	4.74	6.24	7.74	9.24	11.3
		Pull	530	1.56	2.10	2.64	3.18	4.10	5.00	5.90	7.70
40	22	Push	1,257	3.51	4.73	5.95	7.17	9.39	11.61	13.83	17.8
		Pull	837	2.35	3.13	3.92	4.71	6.17	7.63	9.09	12.3
50	28	Push	1,963	5.23	7.00	8.77	10.54	13.8	17.0	20.3	-
		Pull	1,340	2.79	3.70	4.61	5.52	7.19	8.75	10.2	-
63	36	Push	3,117	8.23	10.9	13.7	16.4	21.6	27.2	-	-
		Pull	2,040	4.59	6.10	7.61	9.12	11.9	14.7	-	-
80	45	Push	5,027	13.1	17.4	21.7	26.0	34.2	42.4	-	-
		Pull	3,350	8.67	11.5	14.4	17.3	22.6	27.9	-	-
100	56	Push	7,854	21.7	28.8	36.0	43.1	56.3	70.5	-	-
		Pull	5,291	14.8	19.8	24.8	29.8	38.9	47.9	-	-

Series CHE

Pressure Rating

Bore Ø	Maximum Working Pressure in bar
20	140
25	140
30	140
40	140
50	120
63	100
80	100
100	100

Equivalents

1 kN = 224.81 pounds force

1 bar = 14.50 psi

1 mm = .03937 inch

1 mm² = .00155 inch²

Cylinder Weights

To determine the weight of a Series CHE cylinder, first select the proper basic zero stroke weight for the mounting required, and then calculate the weight of the

cylinder stroke and add the result to the basic weight. For extra rod extension, use piston rod weights per mm in Table C.

Table A Single Rod End CHE Cylinder Weights in kg.

Bore Ø	Rod Ø	Single Rod Cylinders									
		Basic Weight at Zero Stroke				Per mm Stroke	Basic Weight at Zero Stroke				Per mm Stroke
		T		TN, TR			J, H		CA		
		PC 3 ¹	PC B ¹	PC 3 ²	PC B ²	PC 3 ¹	PC B ¹	PC 3 ²	PC B ²		
20	12	0.24	0.25	0.25	0.26	0.004	0.51	0.52	0.48	0.49	0.005
25	14	0.34	0.36	0.35	0.37	0.005	0.71	0.73	0.69	0.71	0.006
30	18	0.52	0.56	0.54	0.58	0.009	1.14	1.18	1.28	1.29	0.009
40	22	0.92	0.99	0.95	1.02	0.011	1.80	1.93	2.00	2.09	0.013
50	28	1.38	1.50	1.44	1.55	0.015	2.87	3.00	3.12	3.24	0.017
63	36	2.33	2.54	2.42	2.62	0.021	4.83	4.54	5.14	5.34	0.025
80	45	4.20	4.60	4.34	4.80	0.031	7.98	8.14	8.67	9.13	0.039
100	56	8.02	8.86	8.23	9.09	0.045	14.7	15.6	15.6	16.4	0.051

Table B Double Rod End CHE Cylinder Weights in kg.

Bore Ø	Rod Ø	Double Rod Cylinders									
		Basic Weight at Zero Stroke				Per mm Stroke	Basic Weight at Zero Stroke				Per mm Stroke
		T		TN			J		CA		
		PC 3 ¹	PC B ¹	PC 3 ²	PC B ²	PC 3 ¹	PC B ¹	PC 3 ²	PC B ²		
20	12	0.26	0.28	0.28	0.29	0.005	0.53	0.55	0.50	0.51	0.006
25	14	0.37	0.40	0.38	0.41	0.007	0.75	0.77	0.72	0.75	0.008
30	18	0.58	0.72	0.71	0.75	0.011	1.21	1.25	1.25	1.28	0.011
40	22	1.02	1.09	1.09	1.13	0.014	1.97	2.04	2.10	2.17	0.016
50	28	1.50	1.70	1.64	1.75	0.020	3.18	3.20	3.33	3.44	0.022
63	36	2.75	2.95	2.84	3.04	0.029	4.75	4.85	5.50	5.79	0.033
80	45	5.00	5.45	5.14	5.59	0.043	8.48	8.93	9.47	9.92	0.048
100	56	9.04	10.5	9.89	10.7	0.065	16.3	17.2	17.2	18.1	0.071

Table C Piston rod weights in kg.

Rod Ø	Piston Rod Weight per mm
12	0.001
14	0.001
18	0.002
22	0.003
28	0.005
36	0.008
45	0.012
56	0.019

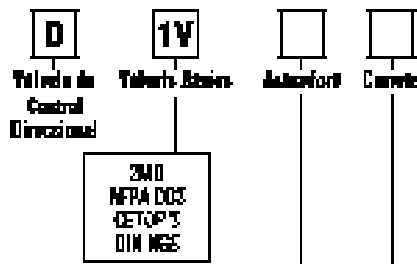
Equivalent

1 kg = 2.2046 pounds

Note 1: PC 3 = with Piston Code 3 or 5 (Magnetic Piston), PC B = with Piston Code B or B (Non-Magnetic Piston)

Anexo III. Hoja de datos Válvula direccional ON/OFF

Válvulas Estándar



3M0
MFA 003
DET 013
DIN 006

Código	Descripción
W	Solenóide, Perno Humedo, Removible
HW	Bobinado Inverso

† Los símbolos representados de la válvula son estándares de NFPA-RMS, suministrando el flujo de P hacia A cuando se energiza el solenóide A. Señale los leños inversos de los operadores para los carretes A008 y A009. Vea la información de instalación para detalles. Para configurar a estándares DIN Doosan Inha sobre puerto A, bobina B sobre puerto B, así como las válvulas como D11M***



Código	Descripción
N	Nitrilo
V	Fluorocarbono
E*	EPR

* Contacte a fábrica para disponibilidad.

Código	Descripción
A	20/30 YAC
D	120 YDC
S	198 YDC
+	24 YDC
K	12 YDC
L	6VDC
N	200/60 YAC
D	100/60 YAC
R	24/60 YAC
T	240/60 - 270/50 YAC
U	98 YDC
V	120/60 - 110/50 YAC
Z	250 YDC

Código	Símbolo	Código	Símbolo
001		014	
002		015	
003		016	
004		020*	
005		021	
006		022	
007		026*	
008†		030**	
009†		301	
010		302	
011			

* Los carretes 008, 020 y 026 tienen oruga cerrada.

** Los carretes 029 y 030 tienen oruga abierta.

Vea la tabla universal de carretes para otras opciones de carrete.

Código	Descripción	Símbolo
B†	2 posiciones, posicionada por resorte, P hacia A	
C	3 posiciones, centrada por resorte	
D†	2 posiciones, triángulo, P hacia A y B hacia T	
E	2 posiciones, centrada por resorte y B hacia P	
F	2 posiciones, posicionada por resorte, P hacia A y centrada	
H*	2 posiciones, posicionada por resorte, P hacia B	
K	2 posiciones, centrada por resorte y P hacia A	
M	2 posiciones, posicionada por resorte, P hacia B y centrada	

* Sólo carretes 020, 026 y 030.

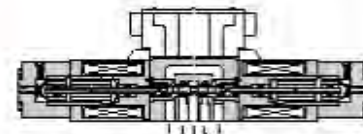
† Sólo carretes 020 y 026.

Anexo IV. Hoja de datos Válvula proporcional

EH SERIES Directional and Flow Control Valves EHDFG-01/03 (1/8, 3/8) Sub-plate Mounting

**PROPORTIONAL
CONTROLS**

These valves incorporate two control functions - flow and direction - which simplify the hydraulic circuit composition and therefore the cost of the system is reduced.



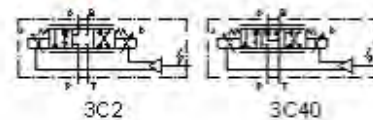
Specifications

Model Numbers		EHDFG-01	EHDFG-03
Description			
Max. Operating Pressure	MPa (PSI)	24.5 (3550)	24.5 (3550)
Max. Tank Line Back Pres.	MPa (PSI)	7 (1020)	7 (1020)
Rated Flow	L/min (U.S.GPM) [Valve JP 6.9 MPa (1000 PSI)]	30 (7.92)	60 (15.9)
Hysteresis		Less than 5%	
Repeatability		Less than 1%*	
Frequency Response		20 (-90 deg.) Hz	17 (-90 deg.) Hz
Coil Resistance		10.5 Ω	8.0 Ω
Supply Electric Power		24 V DC (21 to 28 V DC included Ripple)	
Input Voltage	By Controlling Variable Resistance (Using of Power from Amp.)	1 - 2 kΩ Voltage Range	
	By Controlling Voltage (Using of Power outside Amp.)	0 ~ -5 V for SOL a 0 ~ +5 V for SOL b	
Input Impedance		10 kΩ	10 kΩ
Power Input (Max.)		40 W	45 W
Ambient Temperature		0 - 50°C (32 - 122°F) (With Circulated Air)	

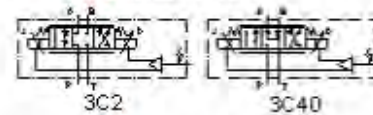
* The repeatability of the valves is obtained by having it tested independently on the conditions similar to its original testing.

Graphic Symbols

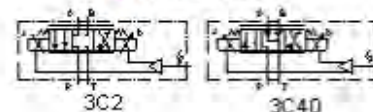
● Metre-in • Metre-out Control



● Metre-out Control



● Metre-in Control



Model Number Designation

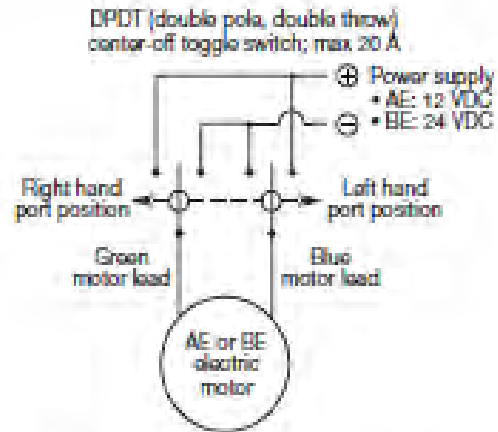
EHDFG	-01	-30	-3C2	-E	-30
Series Number	Valve Size	Rated Flow L/min (U.S.GPM)	Spool Type*	Direction of Flow	Design Number
EHDFG : Proportional Electro-Hydraulic Directional and Flow Control Valve (Sub-Plate Mounting)	01	30: 30 (7.92)	3C2	XY : Metre-in Metre-out	30
	03	60: 60 (15.9)	3C40	X : Metre-in Y : Metre-out	30

* Spool type shown in the column is for the centre position.

Anexo V. Hoja de datos Bomba hidráulica

Pumps with AE (12 VDC) or BE (24 VDC) permanent magnet electric motors

For intermittent duty cycles; refer to page 4.



Pump assembly with AE or BE electric motor.

AE or BE wiring diagram.

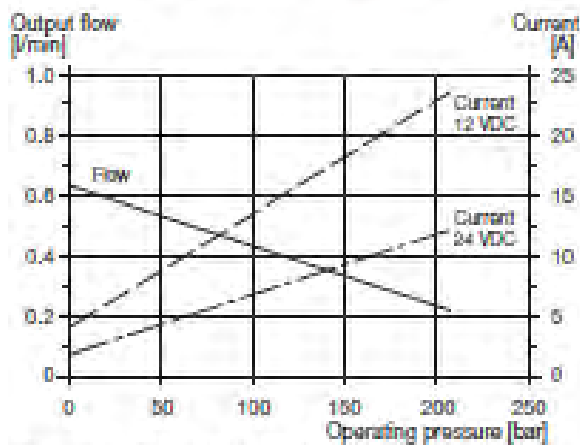


Diagram 1. Flow and current vs. pressure for 0.16 cm³/rev pump.

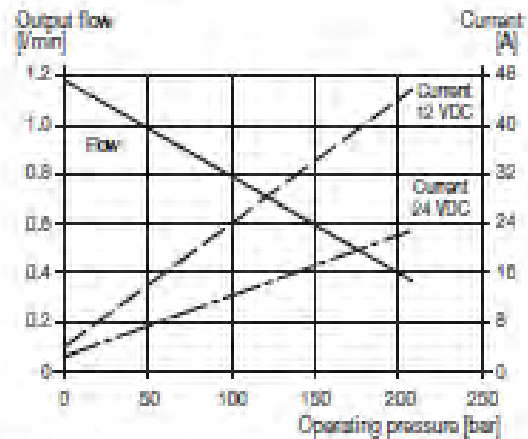


Diagram 2. Flow and current vs. pressure for 0.31 cm³/rev pump.

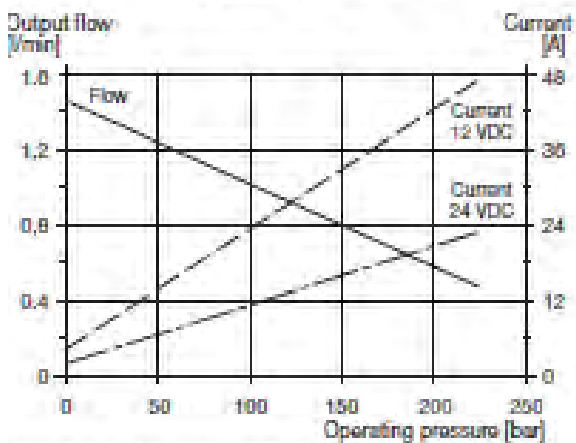


Diagram 3. Flow and current vs. pressure for 0.40 cm³/rev pump.

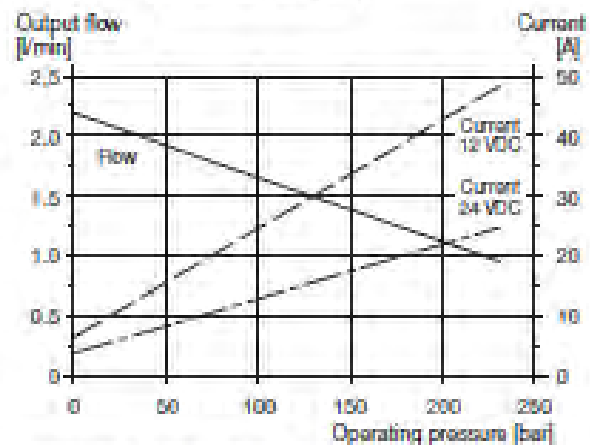


Diagram 4. Flow and current vs. pressure for 0.53 cm³/rev pump.