

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO PARA EL
SISTEMA DE CARGA Y DESCARGA DE UN CARGADOR
FRONTAL CON TRANSMISIÓN HIDROSTÁTICA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

AUTOR

ING. EDGAR GAMBOA QUISPE

ASESOR:

DR. JAVIER SOTOMAYOR MORIANO

JURADO:

Dr. Ing. Carlos Gustavo Pérez Zúñiga

Mg. Ing. Eddie Sobrado Malpartida

ABRIL, 2018

RESÚMEN

Estando el Perú ubicado en una zona con alta probabilidad de ocurrencia de movimientos telúricos, resulta necesario el uso de maquinaria que permita remover escombros y equipos para casos donde debido a un movimiento sísmico se tenga como resultado el derrumbe de viviendas o instalaciones industriales. Debido a que el ingreso a estas zonas constituye un peligro e implicaría el riesgo del personal a quedar sepultado bajo un derrumbe, resultaría conveniente tener maquinaria operada con mando a distancia que minimice los posibles daños personales. Asimismo un control autónomo del sistema de carga y descarga de material permitiría una rápida limpieza del área, facilitando al operador la ejecución de su trabajo reduciendo los efectos de la baja visibilidad.

Para realizar este proyecto se requerirá del uso de cilindros hidráulicos con sensores de posición que determinen la altura y ángulo de ataque del cucharón del equipo para permitir reproducir el proceso de carga y descarga de forma autónoma usando para ello un controlador difuso.

La realización del presente estudio permitirá implementar el mando a distancia para la operación de equipos que utilizan sistemas hidráulicos para realizar funciones tales como desplazamiento, giro, frenado así como la carga y descarga de material. Esta implementación contribuirá elevar la seguridad en la operación de equipos en zonas de alto riesgo.

INDICE

1. DESCRIPCIÓN DE UN CARGADOR FRONTAL	3
1.1. Introducción	3
1.2. Ámbito de trabajo del cargador frontal	3
1.3. Características del equipo	4
1.4. Alcance del proyecto	12
2. DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL CONTROL DE MOVIMIENTO DE UN CARGADOR FRONTAL	17
2.1. Introducción	17
2.2. Tecnologías existentes para el control de movimientos de un Cargador Frontal	17
2.2.1. Control a distancia de equipos de carguío	17
2.2.2. Control de movimientos usando computadoras para monitoreo y transferencia de datos	19
2.3. Identificación del módulo hidráulico de prueba	21
2.3.1. Obtención del modelo matemático para la implementación del controlador difuso	21
2.3.2. Análisis de estabilidad del modelo matemático obtenido	36
2.4. Objetivo general de la tesis	37
2.4.1. Objetivos específicos.....	37
3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL	38
3.1. Introducción	38
3.2. Determinación del número de entradas y salidas del controlador.....	38
3.3. Características de la señal de entrada	41
3.4. Diseño del controlador difuso	42
4. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN	50
4.1. Introducción	50
4.2. Simulación de resultados para el controlador difuso	50
4.2.1. Prueba simulación 1	50
4.2.2. Prueba simulación 2.....	54
4.2.3. Prueba simulación ante una perturbación externa.....	57
4.3. Validación de resultados para el controlador difuso	65
4.3.1. Validación con entrada externa “Joystick”	69

4.3.2. Validación con señal pre definida	70
4.4. Comparación del controlador difuso versus controlador PID	73
4.4.1. Implementación del controlador PID	73
4.4.2. Comparación de respuestas entre controlador difuso y controlador PID ante señal de entrada pre definida	76
4.5. Análisis de resultados	78
4.6. Recomendaciones para la implementación.....	78
5. CONCLUSIONES	80
6. RECOMENDACIONES	81
7. BIBLIOGRAFIA.....	82



1. DESCRIPCIÓN DE UN CARGADOR FRONTAL

1.1. Introducción

En el presente capítulo se muestran las características del equipo que constituye la base del presente estudio, así como su importancia en las operaciones de construcción civil. También se definen los alcances del proyecto y una visión general de su implementación.

1.2. Ámbito de trabajo del cargador frontal

El equipo objeto del presente estudio es un Mini Cargador Skid Loader 216 de la marca Caterpillar, usado en la construcción de obras civiles. El equipo, forma parte del grupo de equipos de carguío de materiales (Caterpillar Inc. Company, 2008).

En la figura 1.1 podemos identificar la ubicación del equipo objeto de estudio dentro de la gama de equipos usados en construcción civil.

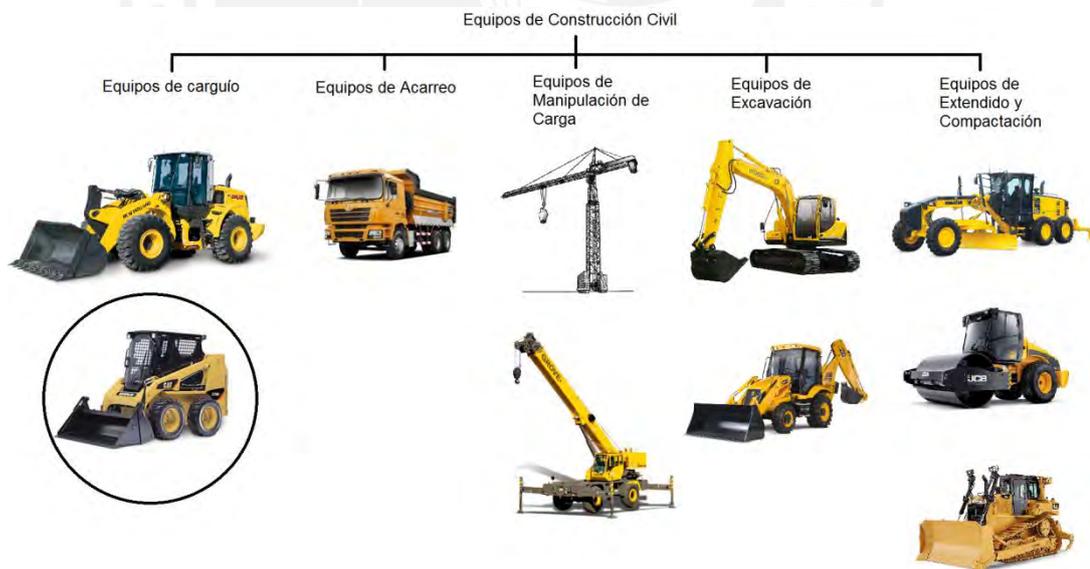


Figura 1.1 – Ubicación del equipo objeto de estudio

La función principal del Mini cargador es la de carga, transporte y descarga de materiales. Sin embargo el equipo tiene múltiples aplicaciones en función a los accesorios que se le pueden incorporar, tal como se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2 – Aplicaciones del Mini Cargador

1.3. Características del equipo

El Mini Cargador es un equipo compacto el cual posee una transmisión hidrostática para su desplazamiento y un sistema hidráulico para la operación de sus implementos (cucharón, martillo etc.).

El control de la transmisión y de los implementos se realiza por medio de mandos hidráulicos (Joystick), que controlan el caudal que generan las bombas hidrostáticas de transmisión, así como la distribución de aceite hacia los cilindros hidráulicos de los implementos tal como se muestra en la figura 1.3.

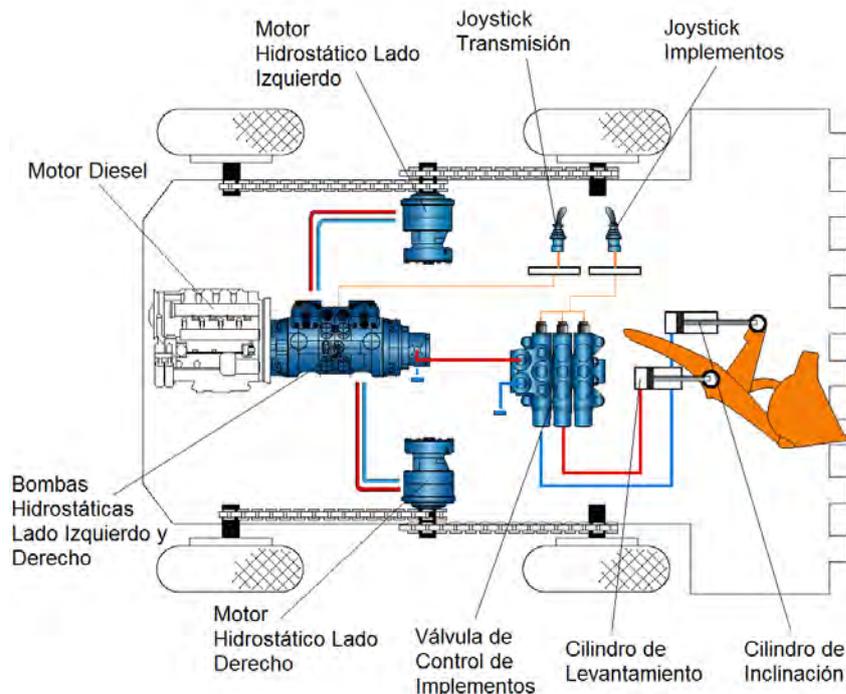


Figura 1.3 – Esquema de funcionamiento del Mini Cargador

El funcionamiento de la transmisión hidrostática se basa en la utilización de altas presiones de trabajo hasta 50 MPa (Bosch Rexroth, 2016) en circuitos cerrados como se muestra en la figura 1.4.

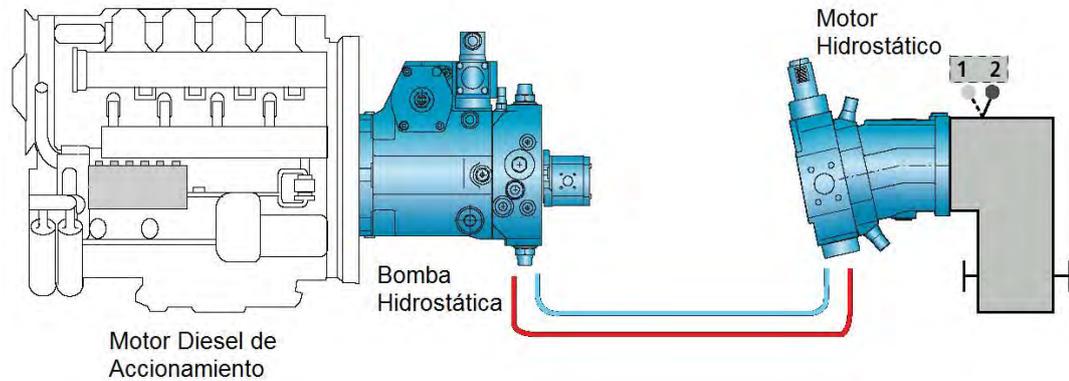


Figura 1.4 – Esquema básico de una transmisión hidrostática

Se entiende como circuito hidráulico cerrado, cuando el fluido hidráulico que retorna del actuador es conducido directamente hacia la bomba hidráulica; es decir, no regresa al tanque. La representación del circuito hidrostático cerrado, según la norma ISO 1219 (International Organization for Standardization, 2012) es como se muestra en la figura 1.5.

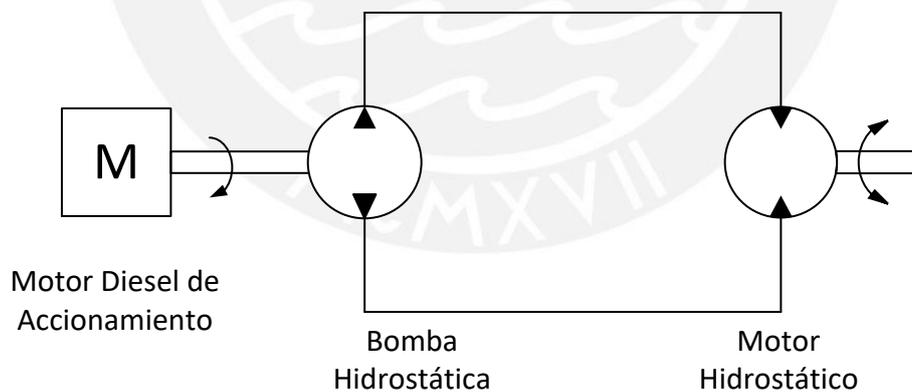


Figura 1.5 – Representación del esquema básico según normas ISO 1219

El caudal, generado por la bomba hidrostática, está en función al desplazamiento volumétrico de la misma multiplicado por las rpm del motor diesel de accionamiento.

$$\text{Caudal } Q = DV \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{rev}} \right) * n \left(\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \text{ (Bosch Rexroth, 2016)}$$

Donde DV es el desplazamiento volumétrico de la bomba en cm³. El desplazamiento volumétrico se define como el volumen de aceite que desplaza la bomba por cada vuelta de su eje motriz (Bosch Rexroth, 2016).

La bomba hidrostática está constituida de pistones axiales de plato inclinado variable. El ángulo de variación del plato determina el desplazamiento volumétrico de la bomba, en consecuencia, el caudal que genera. El principio de funcionamiento de la bomba hidrostática de plato inclinado se muestra en la figura 1.6.

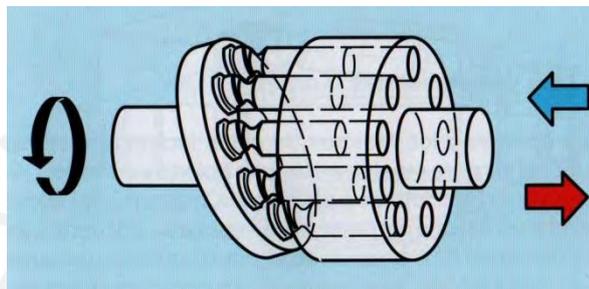


Figura 1.6 – Principio de funcionamiento de una bomba hidrostática (Fuente Manassman – Rexroth)

El volumen desplazado se calcula en base al diámetro de cada pistón (d_k), la distancia mayor entre pistones (D_k) y el ángulo de inclinación del plato (α), tal como se muestra en la figura 1.7, de acuerdo a la siguiente fórmula:

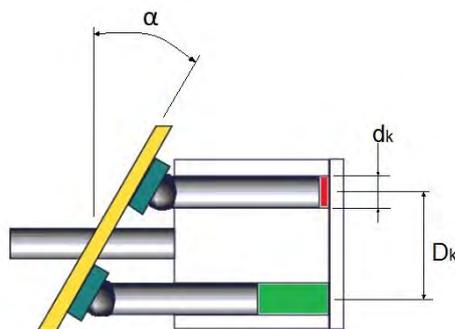


Figura 1.7 – Parámetros para el cálculo del desplazamiento volumétrico de una bomba de pistones axiales

$$\text{Desplazamiento Volumétrico} = \frac{d_k^2 \cdot \pi}{4} \cdot D_k \cdot \tan(\alpha)$$

Los componentes internos de la bomba que permiten el desplazamiento volumétrico variable se muestran en la figura 1.8.

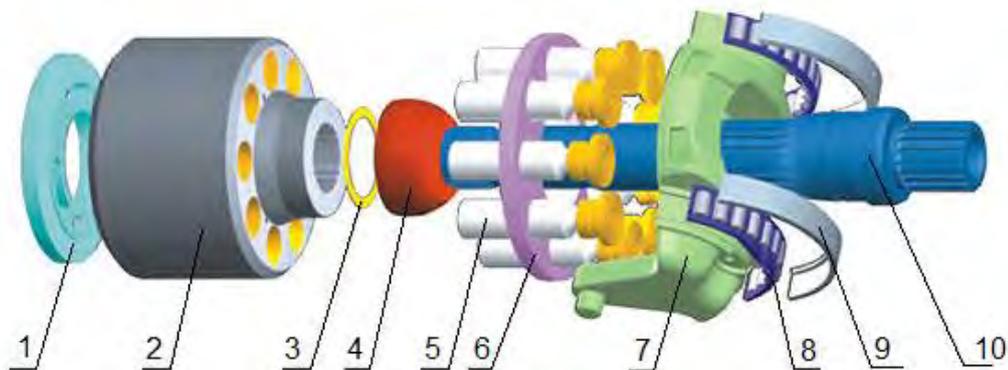


Figura 1.8 – Componentes de una bomba de pistones axiales (Fuente Halies Hydraulic)

Donde:

1. Placa de desgaste
2. Cilindro
3. Espaciador
4. Guía
5. Pistones
6. Porta pistones
7. Plato basculante
8. Cojinete
9. Soporte de cojinete

A fin de controlar tanto el desplazamiento hacia adelante, en retroceso del equipo, así como su posición neutral, es necesario implementar componentes adicionales al circuito hidrostático cerrado.

En la figura 1.9, se muestran los componentes adicionales para el control del plato inclinado, la limitación de las presiones máximas en el sistema, el control del freno de estacionamiento y el control de la temperatura.

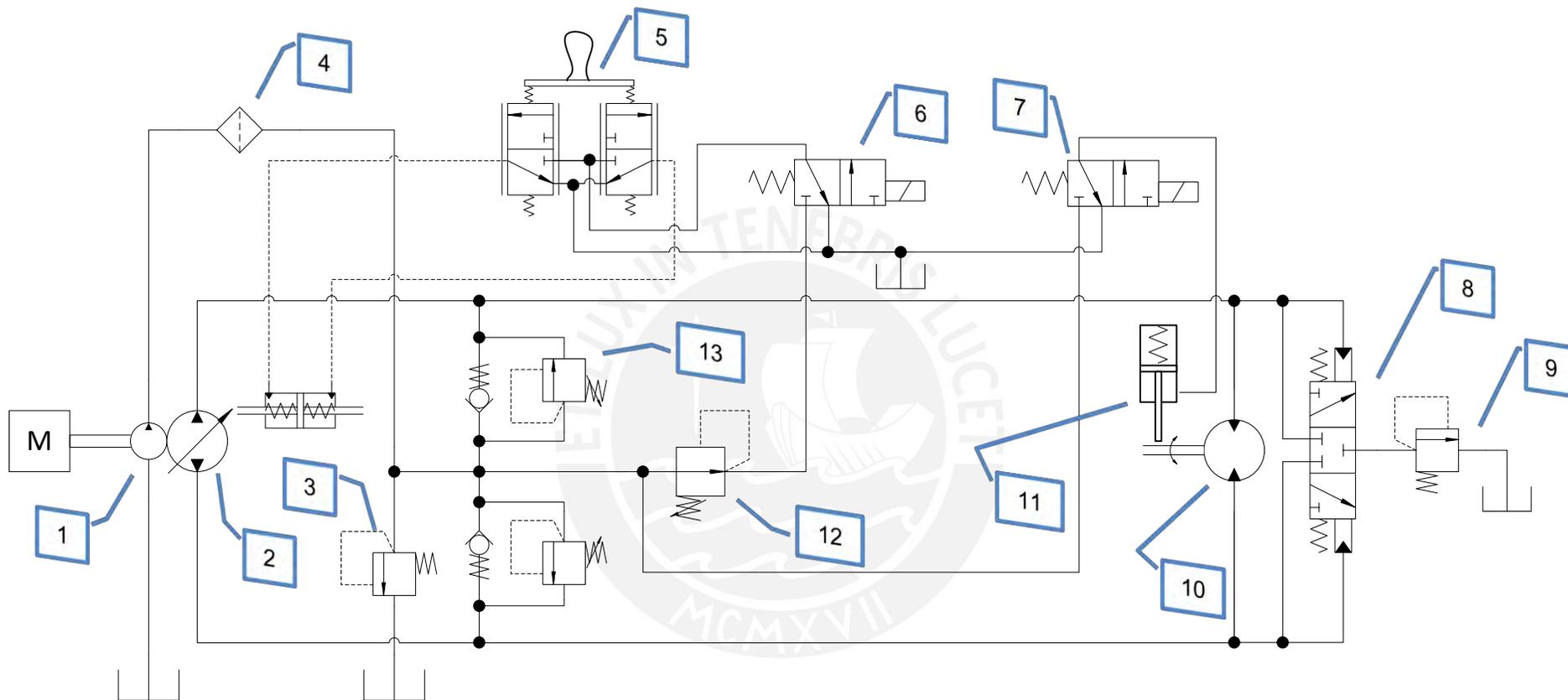


Figura 1.9 – Componentes de la transmisión hidrostática para el Mini Cargador

De la figura 1.9 se observan los siguientes componentes:

1. Bomba de carga: Genera caudal, para compensar, las pérdidas de aceite del circuito cerrado.
2. Bomba hidrostática: Genera caudal variable para el circuito cerrado.
3. Válvula de alivio de carga: Limita la presión máxima del circuito de carga.
4. Filtro de transmisión: Previene la contaminación del sistema.
5. Joystick de transmisión: Proporciona, el control del plato inclinado de la bomba hidrostática.
6. Válvula de corte piloto: Permite el bloqueo de la alimentación al joystick.
7. Válvula de parqueo: Libera el freno de estacionamiento del equipo.
8. Válvula de barrido: Permite extraer el aceite caliente del sistema para refrigerarlo.
9. Válvula de alivio de barrido: Limita la presión máxima del sistema de barrido.
10. Motor hidrostático: Transforma, la energía hidráulica, en energía mecánica.
11. Freno de estacionamiento: Frena, el eje del motor hidrostático, para evitar su movimiento.
12. Válvula sensora de velocidad: Genera presión de mando, para el plato inclinado de la bomba, en función de la rpm del motor diésel.
13. Válvulas de alivio de línea: Limitan los incrementos de presión, que se generan en el sistema.

Se observa que el control del desplazamiento del equipo está en función del joystick, el cuál podría ser reemplazado por una válvula de accionamiento electrónico además de proporcional para así permitir su mando a distancia.

El sistema de implementos del equipo consta de una bomba de engranajes exteriores, con desplazamiento volumétrico constante, una válvula de distribución con mando hidráulico, una válvula de mando (joystick), cilindros hidráulicos, mangueras y conexiones, tal como se muestra en la figura 1.10 de acuerdo a la simbología normalizada ISO 1219.

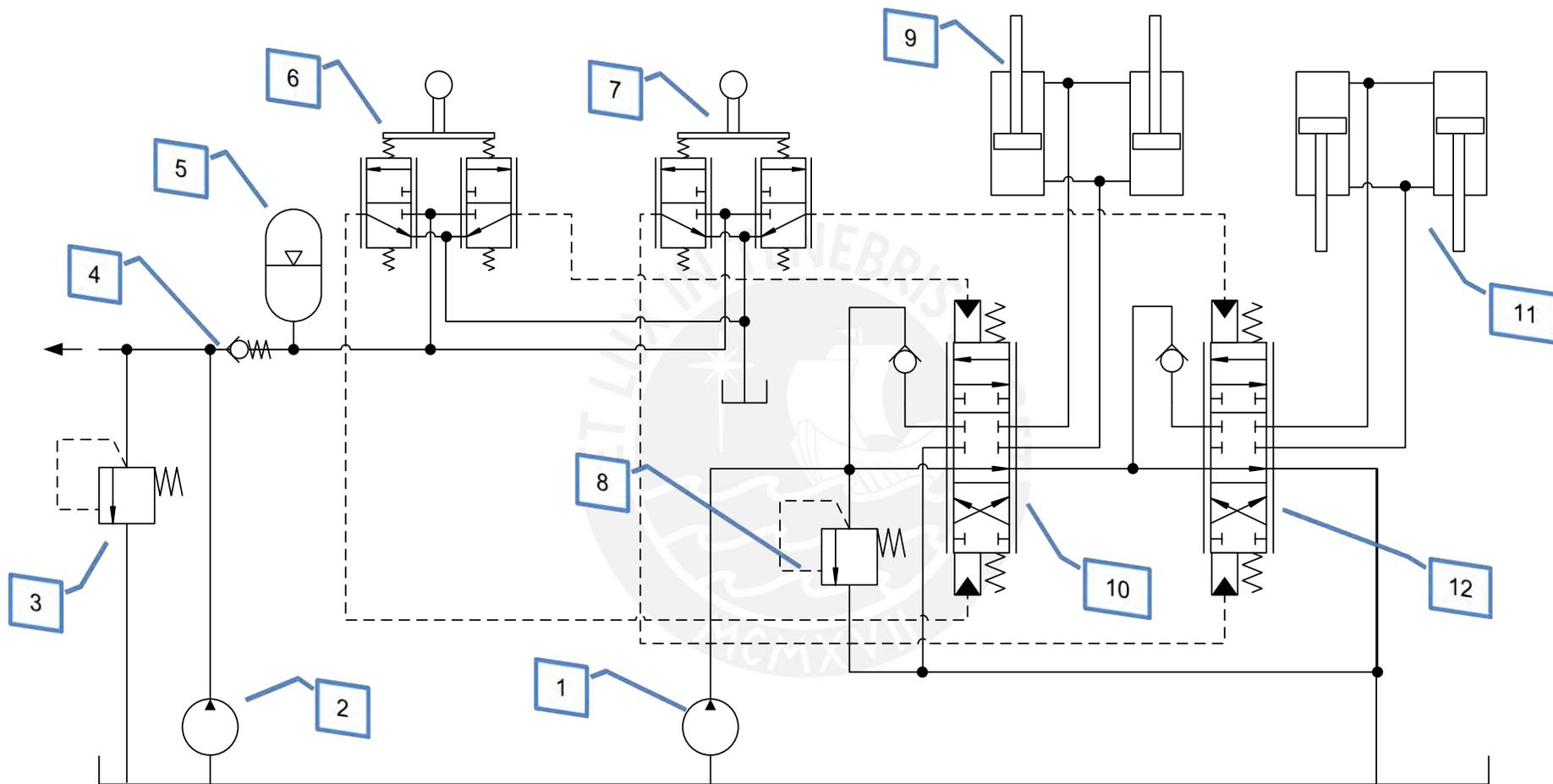


Figura 1.10 – Sistema de implementos Skid Loader 216

De la figura 1.10 se observan los siguientes componentes:

1. Bomba de implementos: Genera el caudal para el sistema de implementos.
2. Bomba de carga y pilotaje: Genera el caudal para el sistema de carga de la transmisión hidrostática, así como para el sistema de pilotaje de implementos.
3. Válvula de alivio de carga: Limita la presión máxima del sistema de carga.
4. Válvula check: Evita que la presión de pilotaje de implementos se descargue una vez apagada la máquina.
5. Acumulador de pilotaje: Almacena energía en forma de presión para suministrar la misma al sistema de pilotaje cuando el motor diésel se encuentre apagado.
6. Válvula de pilotaje: Mando hidráulico para controlar la válvula de distribución de los cilindros de levante.
7. Válvula de pilotaje: Mando hidráulico para controlar la válvula de distribución de los cilindros de inclinación.
8. Válvula de alivio de implementos: Controla la presión máxima del sistema de implementos.
9. Cilindros de levante: Generan movimiento para levantar el cucharón de la máquina.
10. Válvula de distribución de cilindros de levante: Distribuye y controla el caudal que alimenta a los cilindros de levante.
11. Cilindros de inclinación: Generan movimiento para inclinar el cucharón y permitir la descarga de material.
12. Válvula de distribución de cilindros de inclinación: Distribuye y controla el caudal que alimenta a los cilindros de inclinación.

1.4. Alcance del proyecto

Se espera obtener un control autónomo del sistema de implementos del Mini Cargador tal como se muestra en la figura 1.11. Este control autónomo de los movimientos de carga y descarga de material debe realizarse mediante la implementación de un controlador difuso que reproduzca los movimientos de carga de material, los cuales tienen que ser realizados por un operador experimentado, ajustando sus parámetros de control a las perturbaciones generadas por los diferentes valores de densidad y forma del material a cargar que se pudieran presentar.

Para ello, es necesario cambiar las válvulas de mando hidráulico por otras válvulas con control electrónico proporcional y generar una interfase con los controladores. Se debe considerar, el cuidado para no perder precisión en la operación del equipo, por lo que resulta necesario que el controlador adquiera una retroalimentación de posición, que mida el desplazamiento de los cilindros de levante e inclinación que realiza el mini cargador para ejecutar su labor. Es por ello, que usaremos sensores de posición para monitorear el movimiento total de los implementos.

Para validar el funcionamiento del proyecto, se implementará un módulo experimental de prueba, el cual simulará el funcionamiento del proyecto bajo las condiciones siguientes:

- Se usará una unidad de generación hidráulica marca Rexroth, con un caudal de 7.5 lt/min y presión máxima de 6 MPa. Esta unidad, simulará el caudal proporcionado por la bomba hidrostática del Mini Cargador. En la figura 1.12, se muestra la unidad hidráulica (Bosch Rexroth, 2016). La unidad hidráulica posee un motor eléctrico de 220vac monofásico con una potencia de accionamiento de 1.5kw. El tanque hidráulico de almacenamiento de aceite, permite almacenar 40 litros. Debido a que la unidad hidráulica no posee sistema de enfriamiento, se debe limitar el uso continuo del mismo para evitar el calentamiento excesivo del aceite hidráulico.

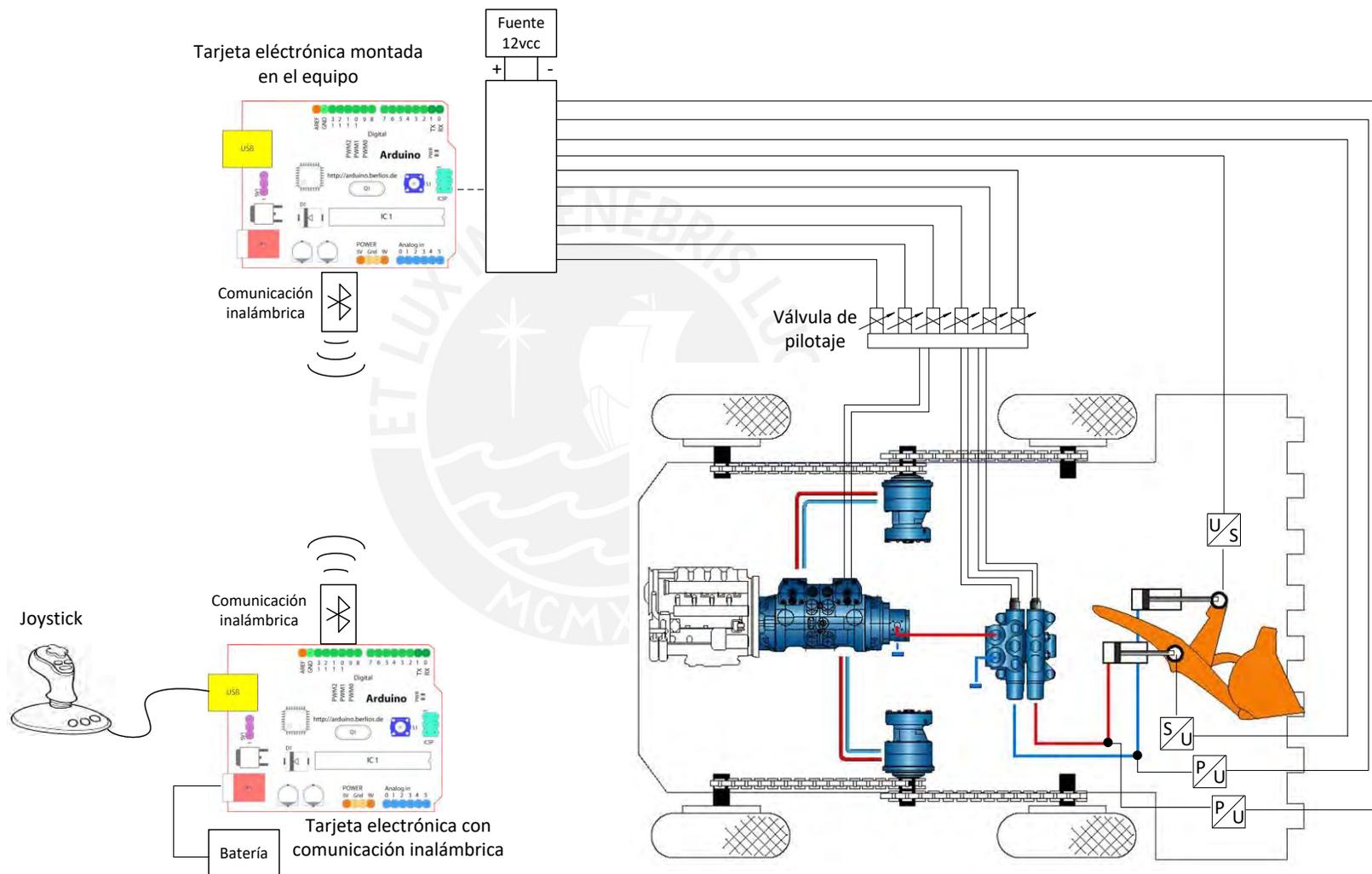


Figura 1.11 – Objetivo del proyecto



Figura 1.12 – Unidad de generación hidráulica Rexroth

- Se utilizará una válvula hidráulica de distribución proporcional 4/3, voltaje de suministro de 24vcc, y voltaje de comando de +/-10vcc para la distribución de aceite y control de caudal hacia un cilindro hidráulico (Bosch Rexroth, 2017). Esta válvula controlará la dirección del movimiento del cilindro hidráulico, así como la distancia que se desplace. La figura 1.13 muestra la válvula proporcional a usar.

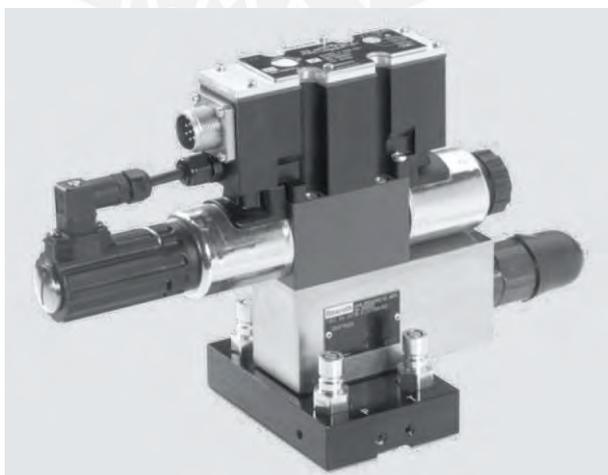
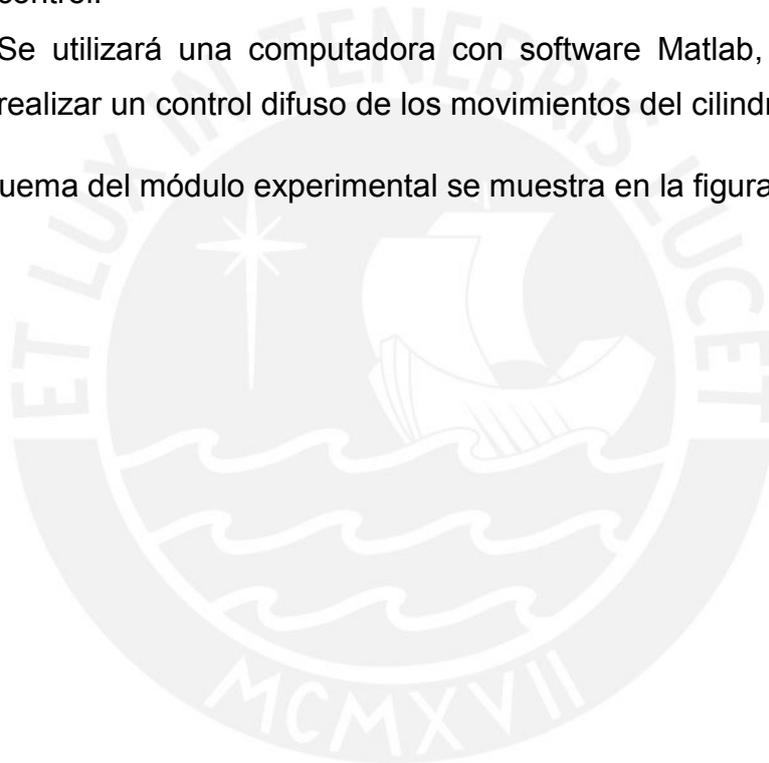


Figura 1.13 – Válvula de distribución proporcional

- Las presiones de trabajo se limitarán a valores de 0-4 MPa (40bar).
- Se usará un potenciómetro que reemplazará al joystick de modo que genere valores de señal de 0-5vcc con el fin de generar señales de control hacia la válvula de distribución proporcional.
- Se usará un cilindro hidráulico, con dimensiones 25/16/400 con un sensor de posición. Este cilindro simulará los movimientos del sistema de implementos del equipo.
- Se utilizarán tarjetas electrónicas que permitan la adquisición de datos, comunicación entre la computadora y los elementos hidráulicos de control.
- Se utilizará una computadora con software Matlab, la cual permite realizar un control difuso de los movimientos del cilindro hidráulico.

El esquema del módulo experimental se muestra en la figura 1.14.



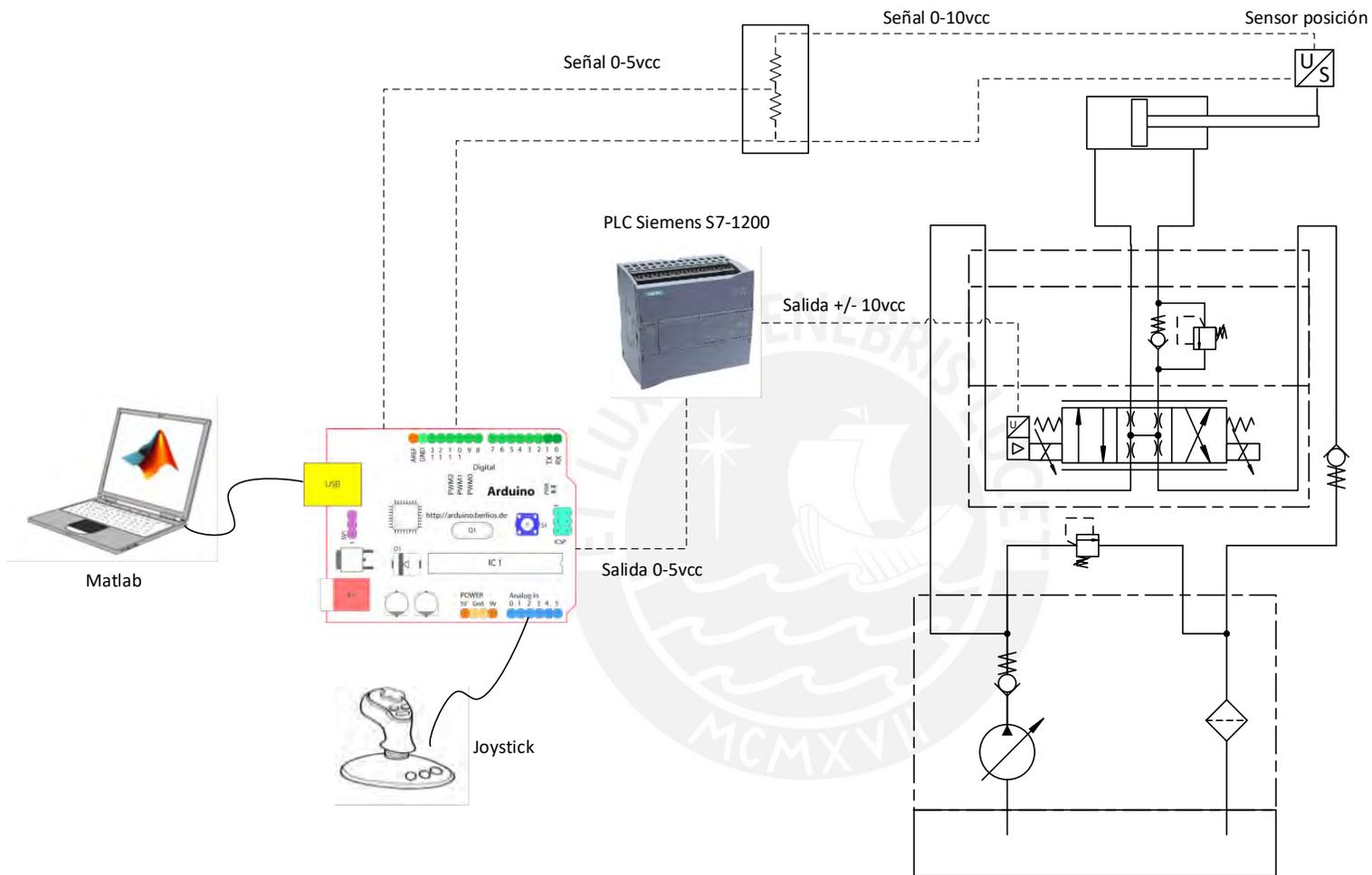


Figura 1.14 – Esquema de simulación del proyecto

2. DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL CONTROL DE MOVIMIENTO DE UN CARGADOR FRONTAL

2.1. Introducción

En este capítulo, mostraremos las tecnologías usadas para el control de equipos de carguío de material existentes en el mercado. De igual forma proporcionaremos el fundamento matemático para el control difuso del proyecto.

2.2. Tecnologías existentes para el control de movimientos de un Cargador Frontal

2.2.1. Control a distancia de equipos de carguío

En el mercado existen sistemas de mando a distancia, como los aplicados a cargadores frontales de bajo perfil (LHD) para minería subterránea, tal como se observa en la figura 2.1.



Figura 2.1 – Mando a distancia para equipos LHD (Fuente: CATTRON Group International)

Estos sistemas consisten en emisores de señal tipo joystick montados sobre un mando portátil, para ser controlados por el operador tal como se muestra en la figura 2.2.

Las señales emitidas por los emisores son recibidas por un equipo receptor, instalado en el cargador LHD. El receptor indicado se muestra en la figura 2.3.

Las características de los modelos existentes varían en función de:

- Voltaje de alimentación
- Número de salidas ON/OFF
- Número de salidas proporcionales
- Tipo de montaje (Riel DIN o empernado en plancha)
- Opción de retroalimentación



Figura 2.2 – Emisores tipo joystick (Fuente: CATTRON Group International)



Figura 2.3 – Equipo receptor de señal (Fuente: CATTRON Group International)

El sistema permite la comunicación de las señales generadas por el operador, para controlar el desplazamiento y velocidad de los implementos del equipo. Además cuenta con pulsadores para el sistema de arranque y parada (Cattron Group International, 2017).

Este sistema de control a distancia se puede aplicar al Mini Cargador ya que posee múltiples modelos, sin embargo es necesario acondicionar las válvulas del equipo para que puedan ser operadas por señales proporcionales ya que originalmente el equipo posee un control manual.

Este sistema requiere que el operador mantenga siempre contacto visual con el material a cargar ya que las variaciones en la carga son corregidas por el operador. El sistema solo sirve para transmitir y recibir señales más no para ajustarse automáticamente a las variaciones del medio.

2.2.2. Control de movimientos usando computadoras para monitoreo y transferencia de datos

Los equipos que emplean computadoras utilizan elementos de entrada (input) manipulados por el operador del equipo. Estos elementos de entrada generan señales analógicas en voltaje o PWM. Por ello se entiende que estas señales deben ser digitalizadas con el uso de decodificadores que transformen las señales analógicas en señales digitales las cuales son enviadas hacia las computadoras del equipo como se observa en la figura 2.4.

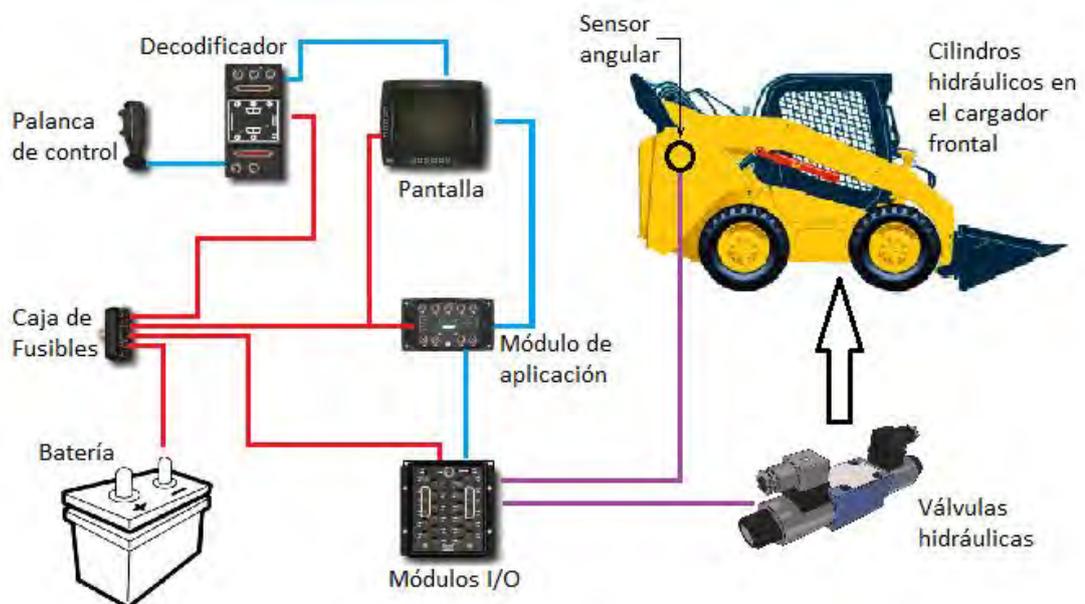


Figura 2.4 – Sistema de control computarizado para cargador frontal (Fuente propia)

Posteriormente estas computadoras se conectan con pantallas, que muestran valores al operador, ya sea en unidades de temperatura, presión, nivel o

posición. Estos valores en consecuencia, permiten monitorear de manera permanente las condiciones de trabajo del equipo para facilitar los trabajos de mantenimiento de la máquina.

Las computadoras también permiten almacenar la información de los parámetros de trabajo del equipo. En ese sentido se pueden mostrar tendencias o variaciones de dichos parámetros necesarios, para predecir fallas futuras de ciertos componentes usados en los cargadores frontales. En la figura 2.5 se muestra algunos parámetros de trabajo en un cargador frontal.



Figura 2.5 – Panel de control de cargador frontal de bajo perfil (Fuente sistema RCS de Atlas Copco)

Una vez recibidas las señales generadas por el operador, la computadora principal procesa las mismas e interpreta el deseo del operador generando nuevas señales hacia los componentes, los cuales controlan los movimientos del equipo. Para ello, se requiere del uso de componentes electrónicos adicionales como módulos de aplicación (Atlas Copco Company, 2017). Estos módulos de aplicación, reciben las señales digitales enviadas por el computador principal y las transforman en señales analógicas de voltaje. Este acondicionamiento de señales es necesario para activar las válvulas hidráulicas del equipo que, a su vez, controlan el accionamiento de los cilindros hidráulicos de la máquina.

2.3. Identificación del módulo hidráulico de prueba

2.3.1. Obtención del modelo matemático para la implementación del controlador difuso

De acuerdo a lo mostrado en la figura 1.14, se requiere controlar los movimientos de cilindros hidráulicos a través de un voltaje de control aplicado a válvulas hidráulicas con accionamiento proporcional y, a su vez, recibir una señal de retroalimentación en función a la posición generada por los cilindros hidráulicos del Mini Cargador.

Para identificar y validar nuestro modelo matemático, simularemos el control del equipo a través de un módulo de prueba donde la señal de control será el voltaje de $\pm 10\text{vcc}$ y la respuesta será la señal generada por el sensor de posición, cuyos valores oscilan entre $0-10\text{vcc}$. Usar un módulo hidráulico de prueba para validar la eficacia de un controlador, es práctica usada y difundida tal como se muestra en el paper “Applying Optimal Control Using SLP on a Hydraulic System” (Verlohren, 2010).

El esquema de control que validará la aplicación en el Mini Cargador se muestra en la figura 2.6.

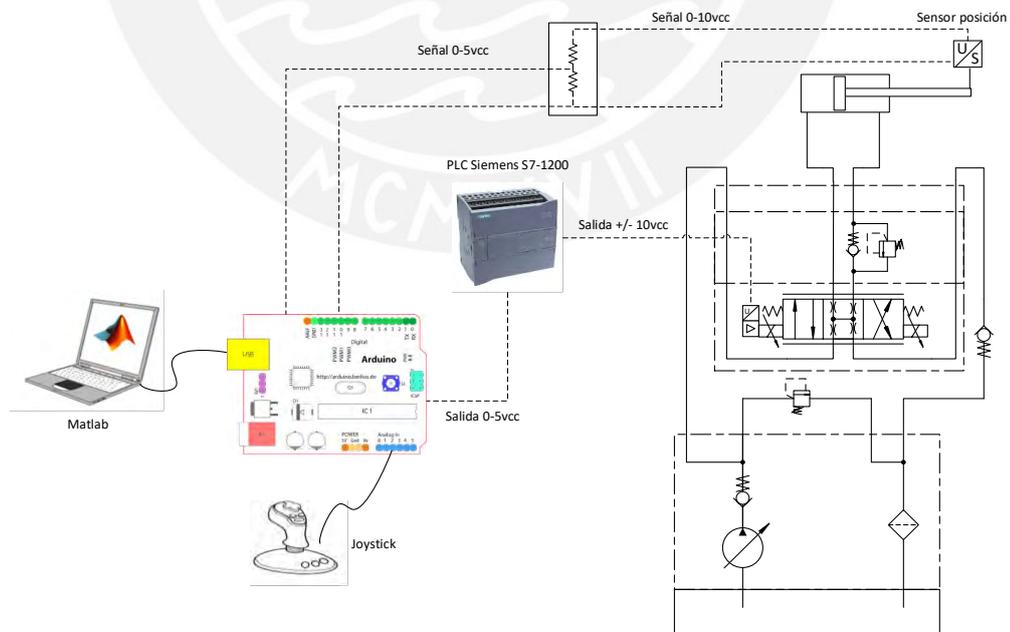


Figura 2.6 – Esquema de control para la implementación en el Mini Cargador

Si bien es posible implementar un controlador Fuzzy en un sistema, sin la necesidad de conocer el modelo matemático de la planta, incluiremos en esta tesis la identificación, a fin de probar y validar nuestro algoritmo de control. Para ello, usaremos el software Matlab tanto para la identificación como para la prueba y validación del algoritmo de control.

Para hacer uso del software Matlab, se debe acondicionar las señales usadas por la planta. Para ello, usaremos una tarjeta Arduino Mega 2560, (ver figura 2.7) como tarjeta de adquisición de datos la que estará conectada a una computadora con el software Matlab (Arduino, 2017).

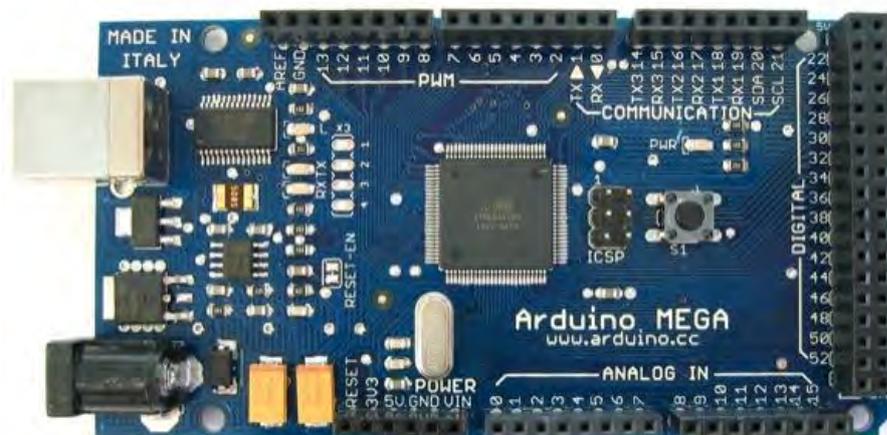


Figura 2.7 – Tarjeta Arduino Mega 2560 (Fuente: www.arduino.cc)

Para generar las señales que controlarán el movimiento del equipo, se usará un potenciómetro que simula el joystick, el cual es manipulado por el operador de la máquina. Dicho potenciómetro se conectará a la tarjeta Arduino y permitirá generar señal de 0 a 5 vcc. Esta señal, sin embargo, debe ser acondicionada entre -10vcc y +10vcc que es el rango de señal de control para la válvula de distribución proporcional. La tarjeta de conexión, cable y válvula proporcional a usar se muestran en la figura 2.8.

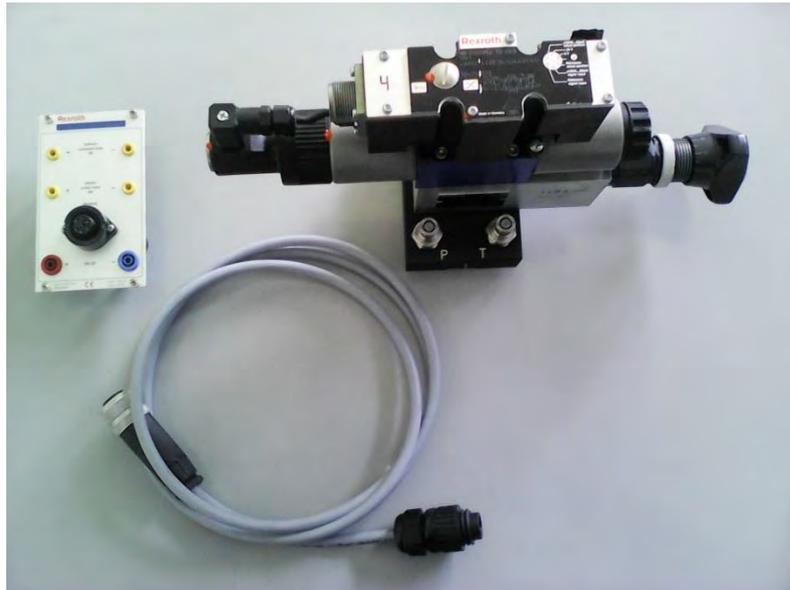


Figura 2.8 – Componentes para conexión de válvula proporcional

Para acondicionar la señal de 0-5vcc a +/- 10vcc se usará la entrada y salida analógica de un PLC Siemens Simatic S7-1200 (Siemens AG, 2017) el que se muestra en la figura 2.9.

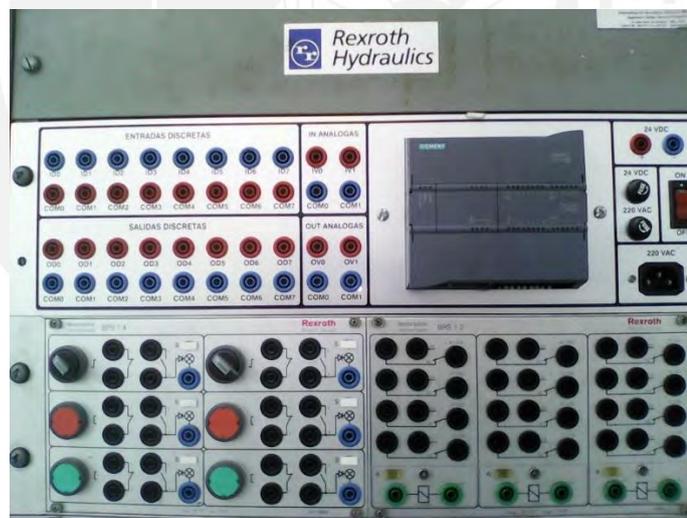


Figura 2.9 – Panel de conexiones de PLC Siemens S7-1200

El PLC recibirá, por un puerto de entrada analógica, la señal de 0-5vcc y, mediante un programa de escalamiento de datos, generará a la salida un voltaje de +/- 10vcc. En la figura 2.10 se muestra el programa a usar en el PLC.

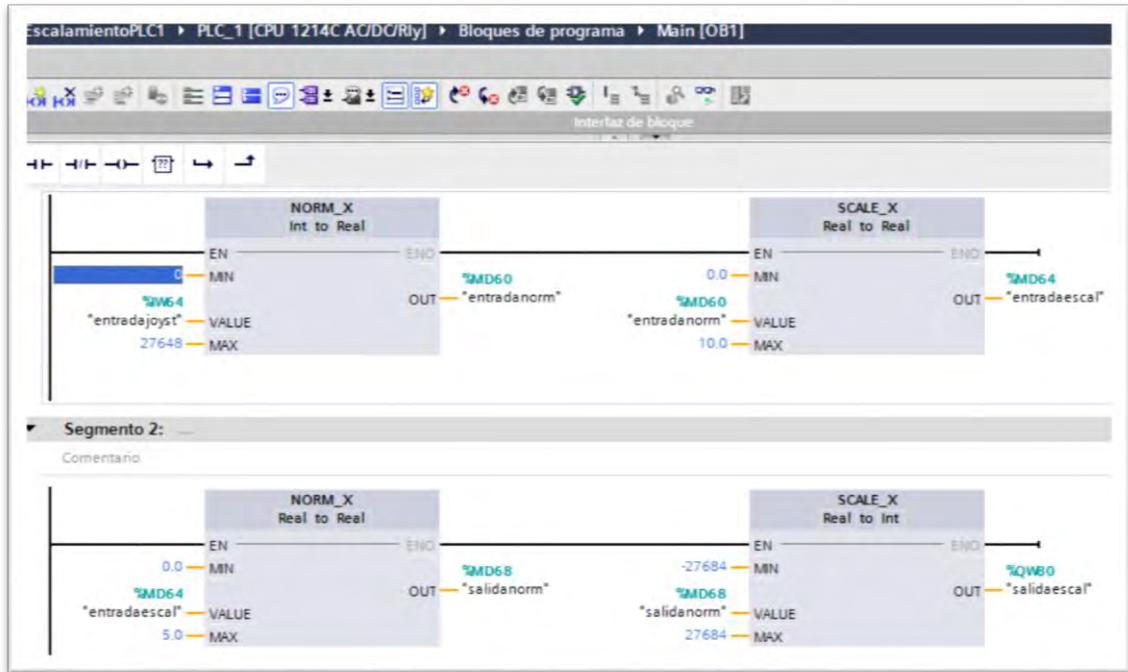


Figura 2.10 – Programa para escalamiento de señal en PLC Siemens S7-1200

Para acondicionar la señal generada por el sensor de posición, se usará un divisor de tensión que permita reducir el valor de señal de 0 – 10vcc a valores de 0 – 5vcc, los cuáles son los valores de tensión, con los que trabaja la tarjeta Arduino la que será usada como tarjeta de adquisición de datos.

El módulo de prueba, con todos los componentes instalados que usaremos para la validación de datos, se muestra en la figura 2.11.

Una vez instalado el módulo, generamos un programa en Matlab (The MathWorks Inc, 2017) para adquisición y almacenamiento de datos. Se buscará obtener un gráfico de las características estáticas del proceso a fin de determinar la región lineal sobre la que luego podemos aplicar una entrada escalón a fin de obtener la respuesta dinámica del proceso. Con los resultados de la respuesta dinámica del proceso, podremos obtener luego la función de transferencia de la planta.

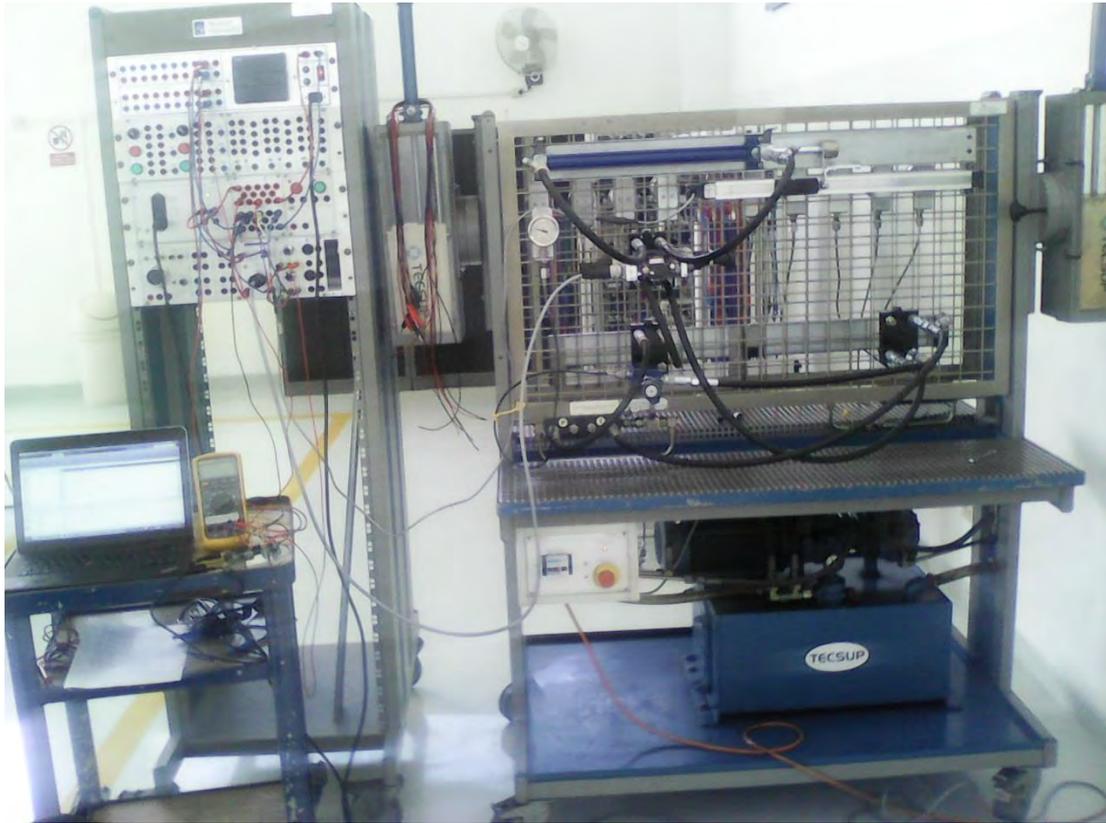


Figura 2.11 – Módulo para prueba y validación de resultados

El programa en Matlab, que permite usar la tarjeta Arduino como tarjeta de adquisición de datos y almacenar las señales de respuesta para diferentes valores de entrada, se muestra a continuación (Gilat, 2011):

```

% Programa que lee parámetros, calcula y almacena velocidad
% de cilindro hidráulico

clear all
close all
clc

a = arduino()

k = 1;

xx(1,4) = 0;

dt = 0.001;

while true

tic;                                     % Mide tiempo ejecución de bucle

xx(k,1)= readVoltage(a,'A3')           % Entrada escalón (joystick)
xx(k,2)= readVoltage(a,'A5')           % Entrada posición (cilindro)

```

```

xx(k,3)= dt;

joystick = xx(k,1);
cilindro = xx(k,2);           % Posición cilindro

if k>1
    desplazamiento=xx(k,2)-xx(k-1,2);
    tiempo=dt;
    xx(k,4)=desplazamiento/tiempo;    % Velocidad
end

writePWMVoltage(a, 'D3', joystick)    % Genera salida hacia PLC

dt = toc;

k = k+1;

if cilindro >=4.98           % Culmina lectura de datos
    break;
end

end

disp(' ');
disp('Presione una tecla');
pause

plot(xx(:,1), '-r');
grid;
hold on
plot(xx(:,4), '-b');
legend('Joystick', 'Velocidad')

```

Para trabajar los datos se debe considerar que el voltaje de entrada hacia la tarjeta Arduino, que trabaja como tarjeta de adquisición de datos, es directamente proporcional a la posición del cilindro hidráulico cuya hoja técnica se muestra en la figura 2.12.

Cabe señalar que se trabaja con un cilindro hidráulico de doble efecto con una carrera de 400mm o 0.4mt.

CD70F25/16-400 single-rod cylinder with protective housing	
Material no.	R961003495
Tie rod design with foot mounting and cam on the piston rod, complete with protective cover and provision for mounting proximity switches, without end position cushioning; connections via quick disconnects	
Didactic designation	ZY1.7N-W
Industrial type	CD70F25/16-400Z11/01HCUM11T
Industrial type information	RE 17016
Dimensions	mm L960 x W90 x H100
Weight	kg 5.55
Mounting type.	Snap-in, grid 50 x 50
Operating pressure, max.	bar 105
Zero leak quick disconnect	Type W
Piston diameter	mm 25
Piston rod diameter	mm 16
Piston ratio	1.6:1
Stroke	mm 400

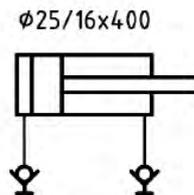


Figura 2.12 – Hoja técnica del cilindro hidráulico a usar para validación

Se instala el cilindro hidráulico de modo que con el vástago totalmente retraído, se considera que su posición es de 0mt y con su vástago totalmente extendido, su posición es de 0.4mt, tal como se observa en la figura 2.13.

Puesto que la tarjeta de adquisición trabaja con un voltaje de 0 a 5vcc, se define que para la posición 0 mt le corresponde 0 vcc y para la posición de 0.4mt le corresponde 5vcc.

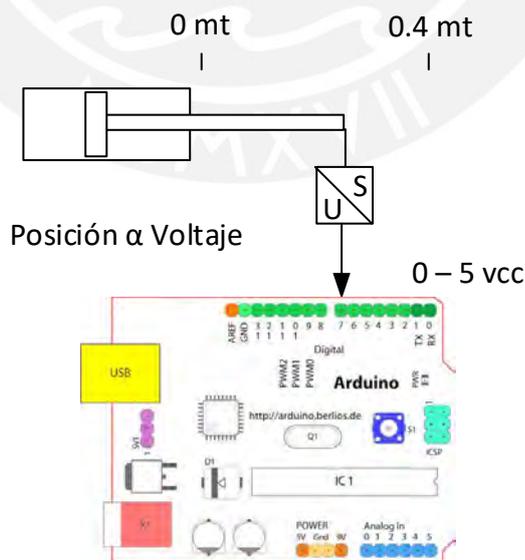


Figura 2.13 – Equivalencia entre la posición y el voltaje de entrada medido

Para todo valor de voltaje registrado, se puede obtener la posición del cilindro por interpolación. Por ejemplo, si la tarjeta de adquisición detecta un valor de 3vcc, entonces por interpolación:

$$\begin{array}{rcl} 0.4 \text{ mt} & \text{-----} & 5 \text{ vcc} \\ x \text{ mt} & \text{-----} & 3 \text{ vcc} \\ 0 \text{ mt} & \text{-----} & 0 \text{ vcc} \end{array}$$

$$\frac{0.4 - x}{0.4 - 0} = \frac{5 - 3}{5 - 0}$$

$$x = 0.4 - \frac{(2)(0.4)}{5} = 0.24 \text{ mt}$$

La razón de cambio de la posición en función del tiempo, la podemos calcular dividiendo el voltaje registrado entre el tiempo acumulado para cada posición.

Algunas de las curvas de respuesta para diferentes valores de entrada, se muestran en la figura 2.14.

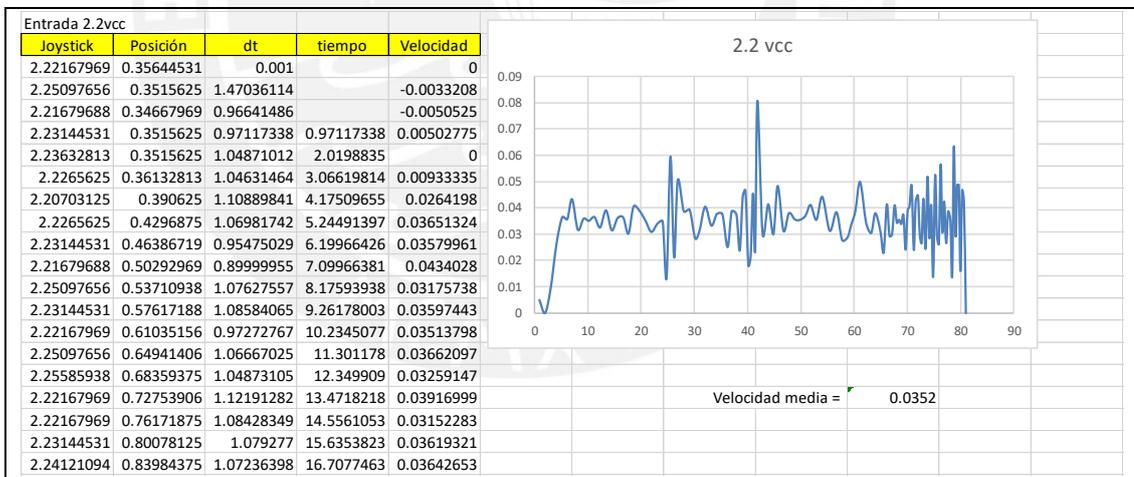




Figura 2.14 – Ejemplos de curvas de respuesta para diferentes valores de entrada

Al tabular los valores obtenidos para diferentes entradas, se genera la tabla 1 la cual relaciona la velocidad de respuesta del cilindro hidráulico en función al voltaje de alimentación de la válvula proporcional. Los movimientos de extensión (velocidad positiva) y retracción (velocidad negativa) del vástago del cilindro hidráulico, tienen una relación con el valor del voltaje suministrado como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1. Velocidad de respuesta de cilindro hidráulico versus voltaje de excitación.

Voltaje entrada (vcc)	Razón de cambio de la posición (vcc/seg)
1.00	2.3172
1.10	2.0524
1.20	1.8956
1.30	1.9007
1.40	1.8042
1.50	1.6342
1.60	1.4685
1.70	1.2833
1.80	0.9644
1.90	0.7294
2.00	0.4882
2.10	0.2441
2.20	0.0352
2.25	0.0293
3.05	-0.0349
3.10	-0.0427
3.20	-0.1671
3.30	-0.2774
3.40	-0.4492
3.50	-0.6115
3.60	-0.7167
3.70	-0.8866
3.80	-1.0017
3.90	-1.1049
4.00	-1.1856



Al graficar los valores de la tabla 1, se puede visualizar en la figura 2.15 la curva de respuesta estática del módulo de prueba.

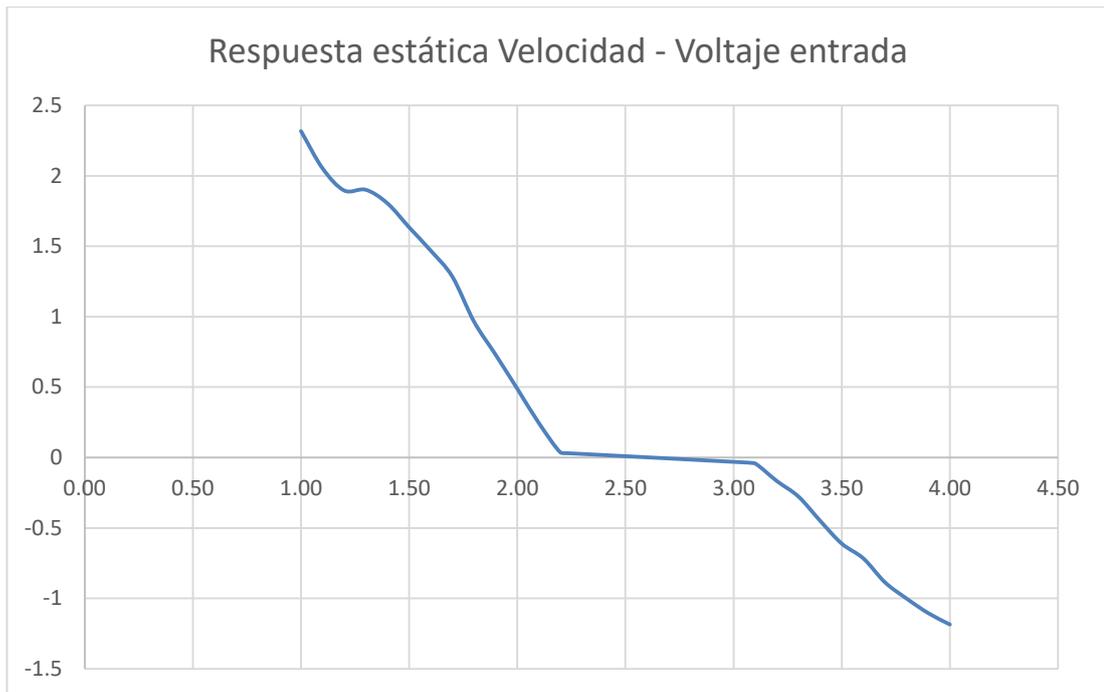


Figura 2.15 – Curva de respuesta estática voltaje de entrada vs velocidad (razón de cambio)

Se observa de la tabla de datos y de la curva de respuesta, que en el rango de valores entre 2.25 y 3.05vcc, el cilindro no realiza movimiento alguno. El rango de valores mencionado indicaría la posición de reposo del cilindro hidráulico.

De la curva de respuesta estática se observa que el comportamiento del sistema es casi lineal, con una pendiente de respuesta similar en la extensión y retracción del vástago del cilindro hidráulico.

Para obtener una respuesta dinámica del sistema, se usará una entrada escalón en el rango de 2.2 y 1.6vcc es decir, se iniciará con una velocidad lenta y luego con una velocidad rápida de extensión de vástago (Ogata, 2010).

Para realizar la toma de datos se crea un programa en Matlab, que permita introducir la entrada escalón y guardar los datos obtenidos en una matriz, para posteriormente usarla en la identificación. El programa en Matlab se muestra a continuación.

```

% Programa que genera entrada escalón y mide
% respuesta de cilindro hidráulico extendiendo vástago

clear all
close all
clc

a = arduino()

k = 1;

xx(1,4) = 0;
writePWMMVoltage(a, 'D3',4.8)    % Retrae cilindro hidráulico
dt = 0.001;

disp(' ');
disp('Presione una tecla');
pause

while true

tic;

if k<2
    joystick = 2.2;    % Inicia movimiento lento
else
    joystick = 1.6;    % Aplica entrada escalón
end

xx(k,1)= joystick;    % Lee entrada escalón
xx(k,2)= readVoltage(a, 'A5')    % Entrada posición (cilindro)

xx(k,3)= dt;

joystick = xx(k,1);
cilindro = xx(k,2);    % Almacena datos posición cilindro

if k>1
    desplazamiento=xx(k,2)-xx(k-1,2);
    tiempo=dt;
    xx(k,4)=desplazamiento/tiempo;    % Calcula velocidad
end

writePWMMVoltage(a, 'D3', joystick)    % Genera salida hacia PLC

dt = toc;

k = k+1;

if cilindro >=4.98
    break;
end

end

```

```

disp(' ');
disp('Presione una tecla');
pause

plot(xx(:,1), '-r');
grid;
hold on
plot(xx(:,4), '-b');
legend('Joystick', 'Velocidad')

```

Una vez realizadas las pruebas, tabulamos los datos los cuales se muestran en la tabla 2

Tabla 2. Variación de velocidad de respuesta ante entrada escalón.

Entrada escalón 2.2 - 1.6 vcc				
Entrada escalón	Posición registrada del cilindro (voltios cc)	Muestreo dt (seg)	Tiempo acumulado (seg)	Velocidad (Razón de cambio vcc/seg)
2.2	0.3515625	0.001	0.001	0
2.2	0.35644531	0.85417405	0.85517405	0.00571641
1.6	0.39550781	0.59023568	1.44540973	0.06618119
1.6	0.72265625	0.47614856	1.92155829	0.68707219
1.6	1.45019531	0.47465134	2.39620964	1.53278627
1.6	2.11425781	0.42230984	2.81851948	1.5724533
1.6	2.78320313	0.4098222	3.22834168	1.63228178
1.6	3.3984375	0.40256765	3.63090933	1.52827576
1.6	3.96484375	0.35165029	3.98255961	1.61070891
1.6	4.48730469	0.33169133	4.31425094	1.57514197
1.6	4.98535156	0.31145116	4.62570211	1.59911709
Tiempo de muestreo =		0.46247021		

Algunas observaciones con respecto a la tabla obtenida son:

- El tiempo de muestreo “dt” no es constante. Esto se debe a que la velocidad de procesamiento de la información en el programa Matlab, se ve influenciada por:
 - El uso de varios componentes electrónicos para el acondicionamiento de señales. Tales componentes como el divisor de tensión, el PLC y la tarjeta Arduino, generan un retardo

en cada bucle que se procesa en el programa de Matlab. Para el caso del Arduino y el PLC, éstos procesan internamente un programa en su propio lenguaje de programación, cuya duración no es posible controlar por el programa en Matlab.

- El computador donde va instalado el programa Matlab no es de uso exclusivo del mismo. El sistema operativo del computador, no tiene dedicación exclusiva para procesar las señales que deben trabajarse en el programa Matlab. El programa en Matlab es una tarea más que se une a otras tareas propias del sistema operativo, como el calendario y el cronómetro, lo que perturba el tiempo de procesamiento en cada bucle del programa en Matlab.
- Se asume una velocidad constante en cada etapa de muestreo. Debido a que son valores pequeños, se obtiene una buena aproximación. Para ello es necesario medir la distancia recorrida en el tiempo de muestreo “dt” y calcular el cociente entre el espacio recorrido sobre el tiempo.

Tomando en cuenta los valores de la tabla 2 con sus respectivas consideraciones, generamos el gráfico de respuesta en la figura 2.16.

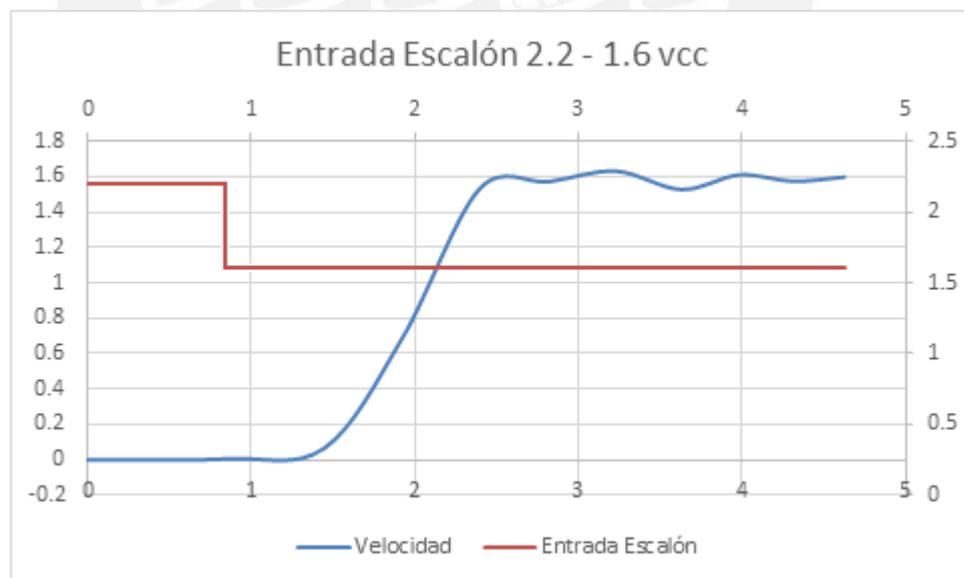


Figura 2.16 – Curva de respuesta dinámica a entrada escalón

Se puede observar de la curva de respuesta, lo siguiente:

- El sistema es estable.

- Se observa un retardo en la respuesta. Este retardo se puede atribuir al acondicionamiento de señales y a la velocidad de procesamiento de las mismas.

Con los datos de respuesta obtenidos, se usará la herramienta de identificación de Matlab, para aproximar la función de transferencia de la planta. Para ello trabajaremos con los datos en el dominio del tiempo de la tabla 2. Se observa de la tabla, que solo se dispone de 11 muestras a introducir en la herramienta de identificación. El número de muestras se ve limitado por la carrera del cilindro hidráulico, la cual es de 0.4m.

La figura 2.17 muestra las iteraciones generadas por la herramienta de identificación.

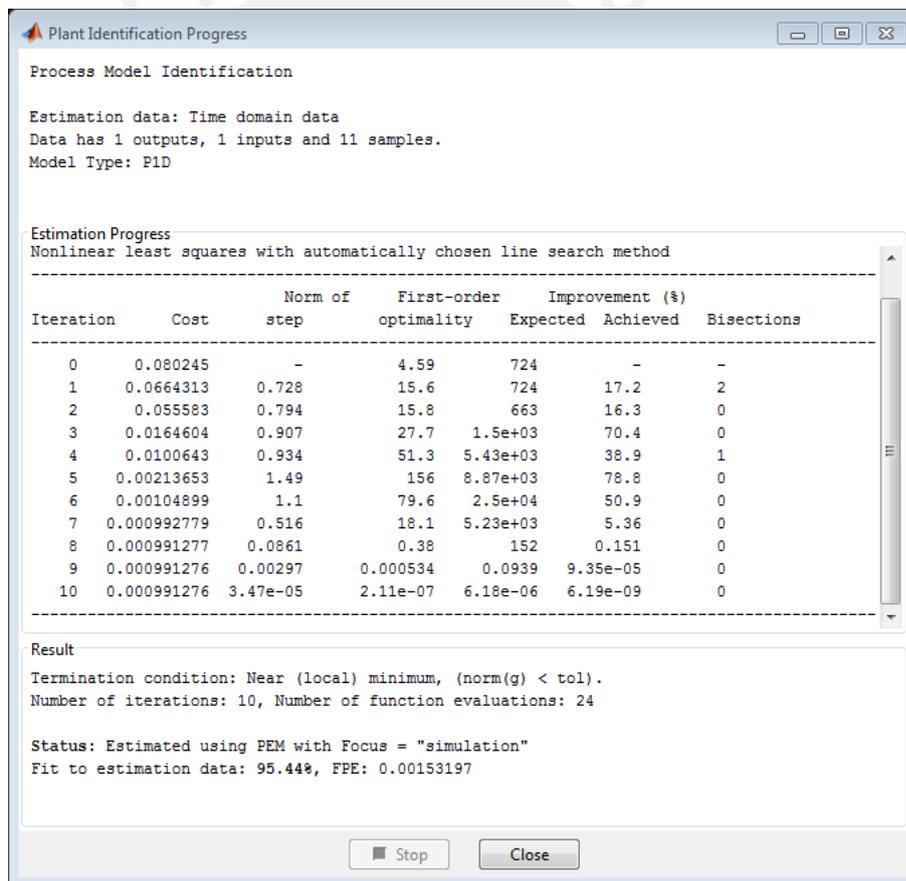


Figura 2.17 – Iteraciones realizadas por la herramienta de identificación de Matlab

Se observa que se tiene una aproximación de 95.44% en el ajuste de la curva como se muestra en la figura 2.18.

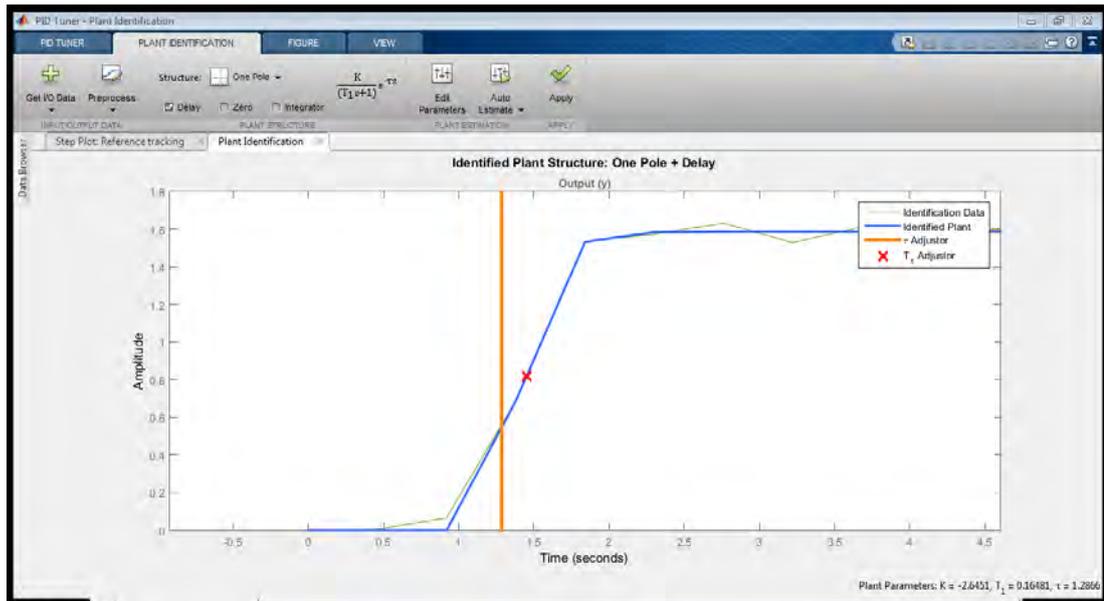


Figura 2.18 – Ajuste de curva realizada por la herramienta de identificación de Matlab

La herramienta de identificación, proporciona los valores de las constantes de la función de transferencia, la que finalmente queda de la forma siguiente:

$$G(s) = \frac{-2.6451}{(0.16481s + 1)} * e^{-1.2866s}$$

La cual es la función de transferencia de la planta en el dominio de la frecuencia.

2.3.2. Análisis de estabilidad del modelo matemático obtenido

Para el análisis de la estabilidad del modelo matemático obtenido, se aplicará el criterio de estabilidad de Routh – Hurwitz (Ogata, 2010). Para ello, transformaremos la ecuación obtenida con el criterio de aproximación de Padé de primer orden (Kuo, 1996)

$$e^{-T_d s} \cong \frac{1 - \frac{T_d s}{2}}{1 + \frac{T_d s}{2}}$$

$$G(s) = \frac{-2.6451}{(0.16481s + 1)} * \frac{(1 - 0.6433s)}{(1 + 0.6433s)}$$

$$G(s) = \frac{1.7s - 2.6451}{0.1s^2 + 0.808s + 1}$$

Aplicando el criterio de Routh – Hurwitz al denominador

$$\begin{array}{c|cc} s^2 & 0.1 & 1 \\ s^1 & 0.808 & 0 \\ s^0 & b_1 & \end{array}$$

$$b_1 = \frac{(1)(0.808) - (0.1)(0)}{0.808} = 1$$

Por lo tanto, al no existir cambio de signo se puede afirmar que el sistema es estable.

2.4. Objetivo general de la tesis

Diseño de un controlador difuso para reproducción autónoma de los movimientos de carga y descarga de material aplicado al control del sistema de implementos de un mini cargador.

2.4.1. Objetivos específicos

- Identificar el modelo matemático del módulo de prueba del sistema de implementos.
- Diseñar un controlador difuso para reproducir los movimientos de carga y descarga del sistema de implementos de un mini cargador.
- Implementar un módulo de prueba que simule el funcionamiento del sistema de implementos de un mini cargador.
- Proporcionar un alcance para la implementación del control difuso en el mini cargador.

3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.1. Introducción

En este capítulo, se desarrolla el diseño del algoritmo de lógica difusa para controlar el sistema de implementos de un mini cargador. Las pruebas y validación del algoritmo serán inicialmente simuladas en Matlab y luego aplicadas en el módulo hidráulico de prueba.

3.2. Determinación del número de entradas y salidas del controlador

Para definir el número de entradas y salidas a usar para controlar los movimientos del sistema de levante y volteo de un mini cargador frontal, es necesario analizar el mecanismo usado por el equipo para lograr tal fin.

La figura 3.1 muestra el mecanismo de levante y volteo del mini cargador.

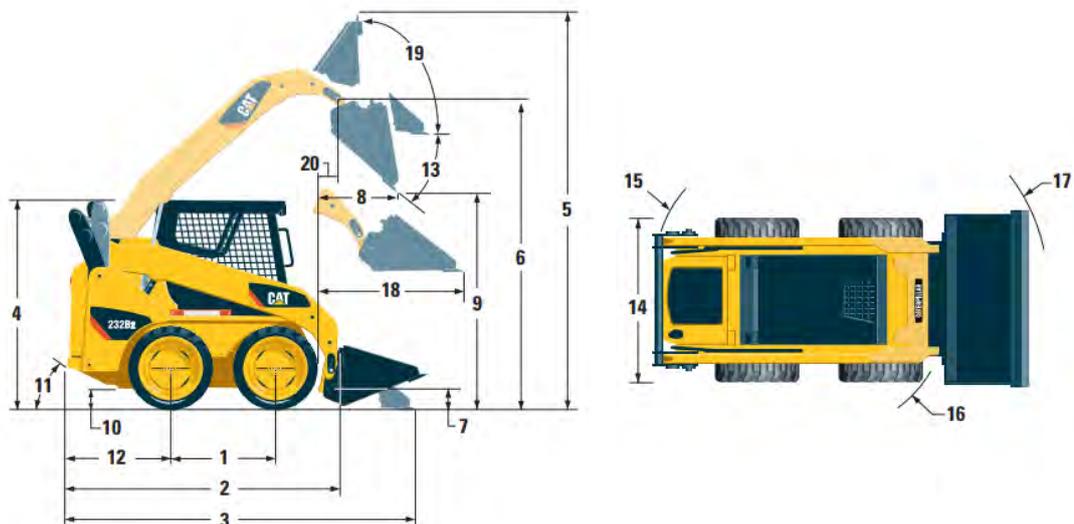


Figura 3.1 – Mecanismo de levante y volteo de un mini cargador (Caterpillar Inc., 2007)

La activación de cada movimiento es independiente uno del otro. No existe restricción, ni oposición entre ambos movimientos debido a que cada mecanismo es de 1 grado de libertad. Los grados de libertad del mecanismo,

se pueden determinar haciendo uso de la ecuación de Gruebler (Norton, 2009), la cual indica:

$$M = 3(L - 1) - 2J$$

Donde:

M = Grados de libertad del mecanismo

L = Número de eslabones del mecanismo

J = Número de juntas del mecanismo

El mecanismo de levante de la figura 3.1, se puede simplificar como el mecanismo mostrado en la figura 3.2

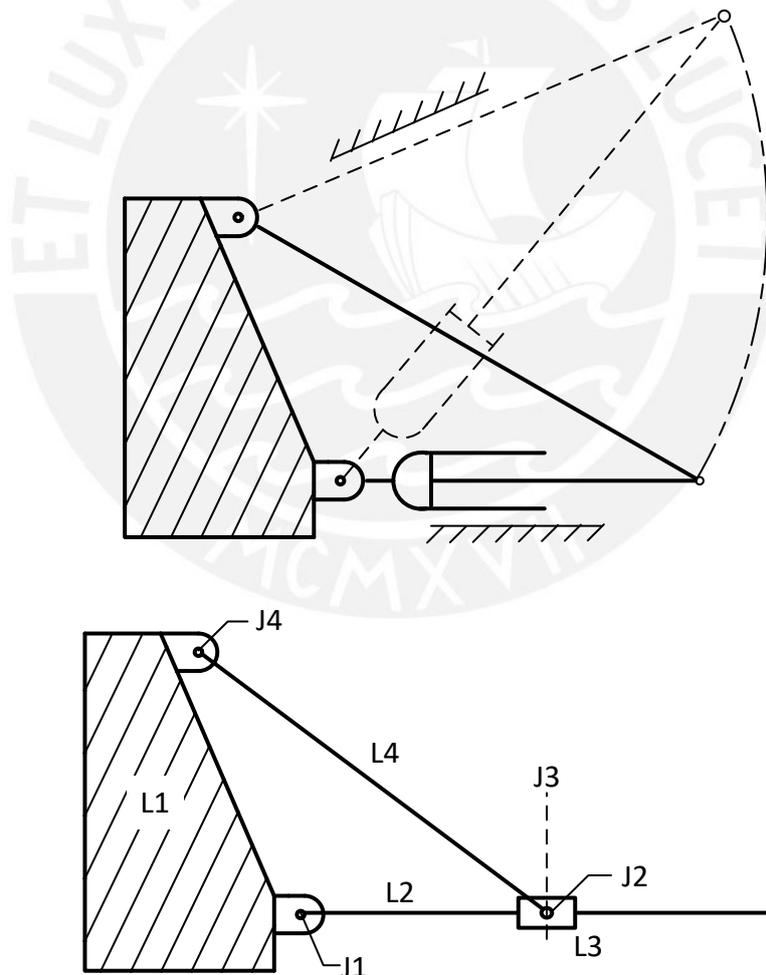


Figura 3.2 – Mecanismo simplificado del sistema de levante del mini cargador

Donde se observa que se tiene 4 eslabones ($L=4$) y 4 juntas ($J=4$), por lo tanto:

$$M = 3 \cdot (4 - 1) - 2 \cdot 4 = 1$$

Se obtiene como resultado un mecanismo de 1 grado de libertad, lo que implica que solo se requiere de la variación de un parámetro del mecanismo (en este caso la velocidad de desplazamiento del eslabón L3), para determinar la posición de todos los demás puntos del mecanismo en cualquier instante de tiempo.

Del mismo modo se puede simplificar el mecanismo de volteo del mini cargador como se observa en la figura 3.3

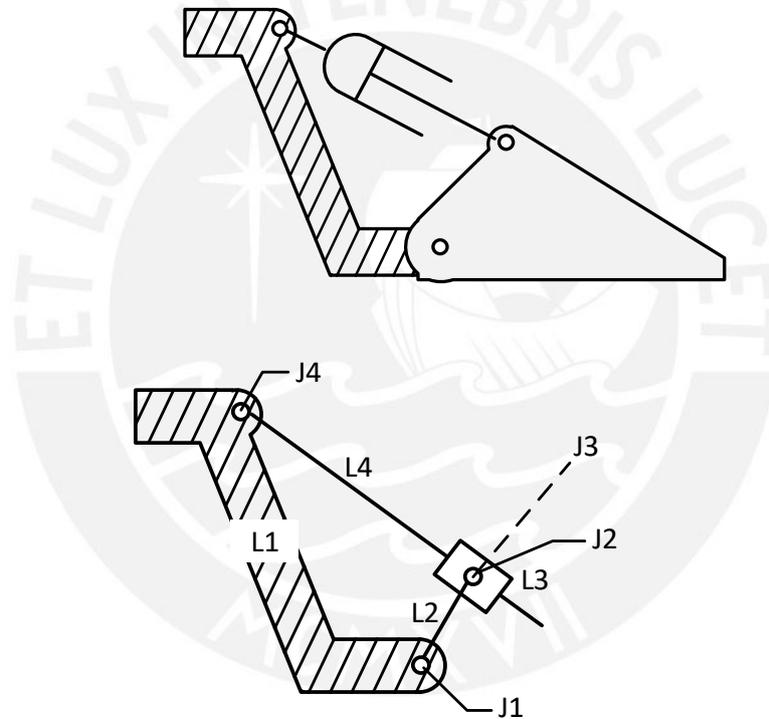


Figura 3.3 – Mecanismo simplificado del sistema de volteo del mini cargador

Donde también se obtiene como resultado que el mecanismo de volteo es de 1 grado de libertad, por lo tanto, solo se necesita conocer la velocidad de desplazamiento del eslabón L3 para determinar la posición de cualquier punto del mecanismo en un instante de tiempo. El cucharón está determinado por el eslabón L2 y el cilindro de volteo, por los eslabones L3 y L4.

3.3. Características de la señal de entrada

La señal de entrada, o set point, es la variación de la posición del cilindro hidráulico en función del tiempo, proporcionada por un operador experimentado. Sin embargo, el sistema hidráulico tiene limitaciones en cuanto a la velocidad máxima de trabajo.

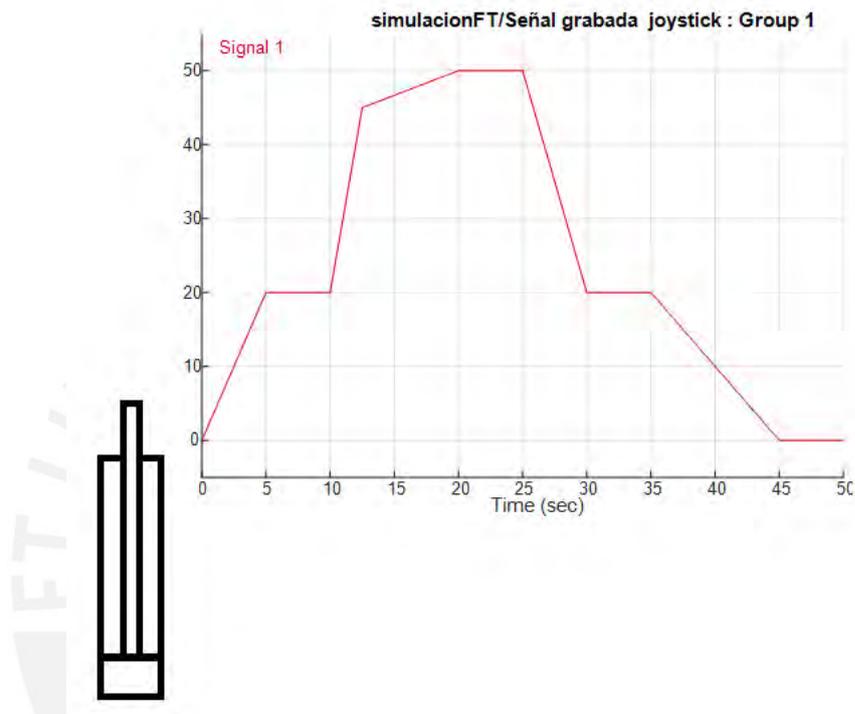


Figura 3.4 – Señal de prueba para validación de controlador

Para la validación usaremos una velocidad máxima de trabajo de 0.01 m/seg, que es una velocidad muy adecuada para simular el movimiento del sistema de implementos de un mini cargador frontal (Bosch Rexroth, 2016). La señal de prueba se muestra en la figura 3.4, donde el eje de las abscisas corresponde a la longitud del sensor de posición que medirá el desplazamiento del cilindro hidráulico. El valor cercano a 0cm corresponde al vástago del cilindro totalmente retraído y cercano a 50cm corresponde al valor del vástago totalmente extendido.

En el capítulo anterior, se determinó la función de transferencia de la planta, cuya ecuación usaremos para la simulación del controlador difuso. Se usará la plataforma Simulink para realizar la simulación. En la figura 3.5 se muestra el diagrama de bloques en Simulink a usar (Chaturvedi, 2010).

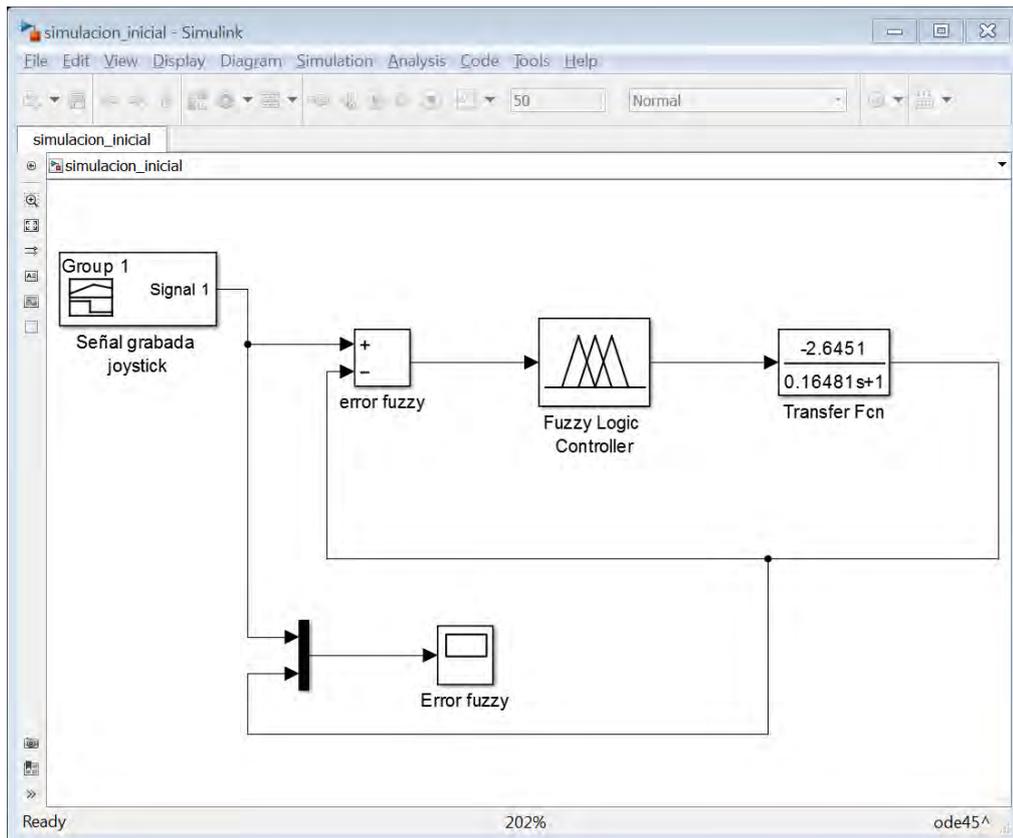


Figura 3.5 – Diagrama de bloques en Simulink para simulación

3.4. Diseño del controlador difuso

Para el diseño del controlador difuso consideraremos como entrada el error entre la posición deseada del cilindro hidráulico, más la posición real medida por el sensor de posición del cilindro. La salida del controlador será el voltaje que requiere la válvula proporcional, voltaje necesario para controlar el movimiento del cilindro hidráulico.

Debemos definir entonces los niveles de error, para luego introducirlos en las funciones de membresía (Membership Functions), del controlador difuso (Morán Cardenas, 2004). Como se muestra en la figura 3.6, es posible obtener errores positivos, negativos y error cero.

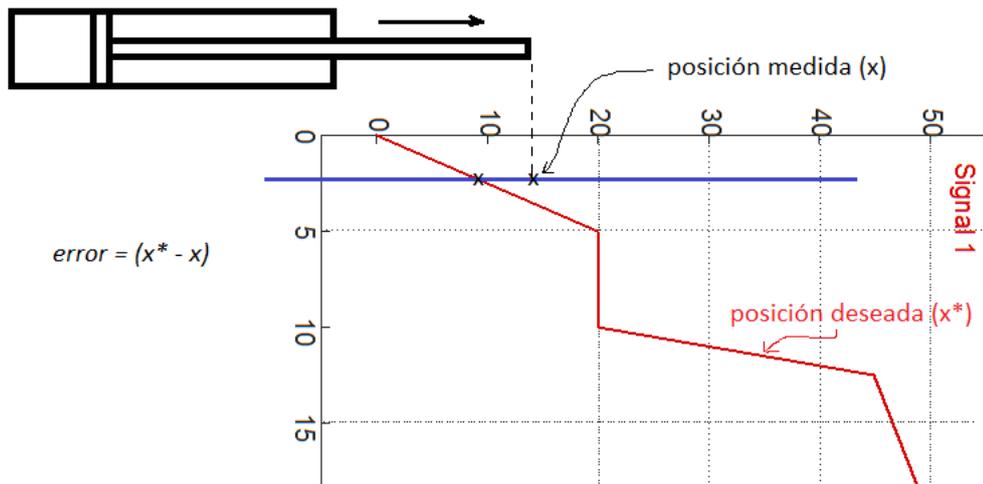


Figura 3.6 – Definición del error para el controlador

Se observa en la figura, que el cilindro ha extendido en exceso el vástago por lo que la posición medida es mayor que el valor de la posición deseada. Por lo tanto se considera se tiene un error negativo.

Se trabajará con un controlador difuso de 5 particiones, por lo tanto, se deben definir 5 niveles de error. La figura 3.7 muestra los 5 niveles de error a usar.

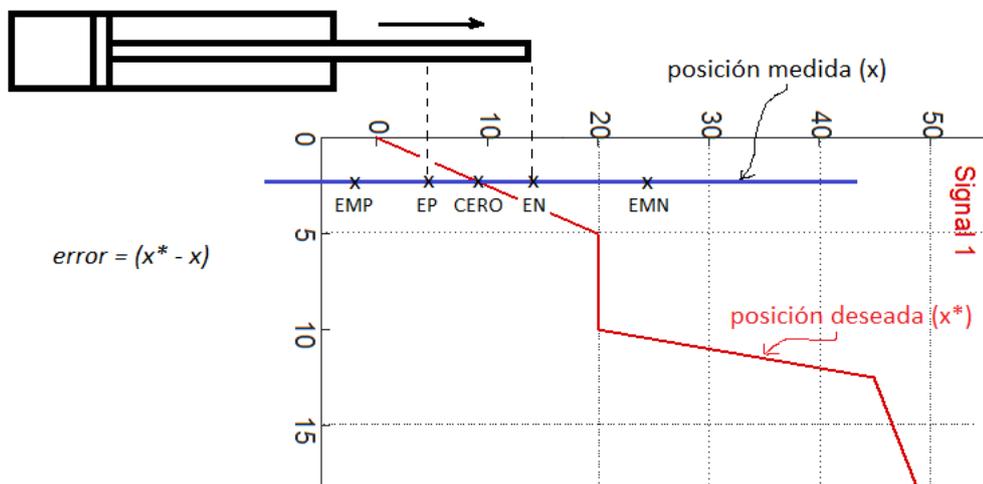


Figura 3.7 – Niveles de error a usar en el controlador

Los niveles de error indicados corresponden a:

- EMP : Error muy positivo
- EP : Error positivo
- CERO : Error cero

- EN : Error negativo
- EMN : Error muy negativo

Al hacer uso de la herramienta “Fuzzy Logic Toolbox” de Matlab, estos 5 niveles de error se pueden cargar al controlador difuso del modo que se muestra en la figura 3.8.

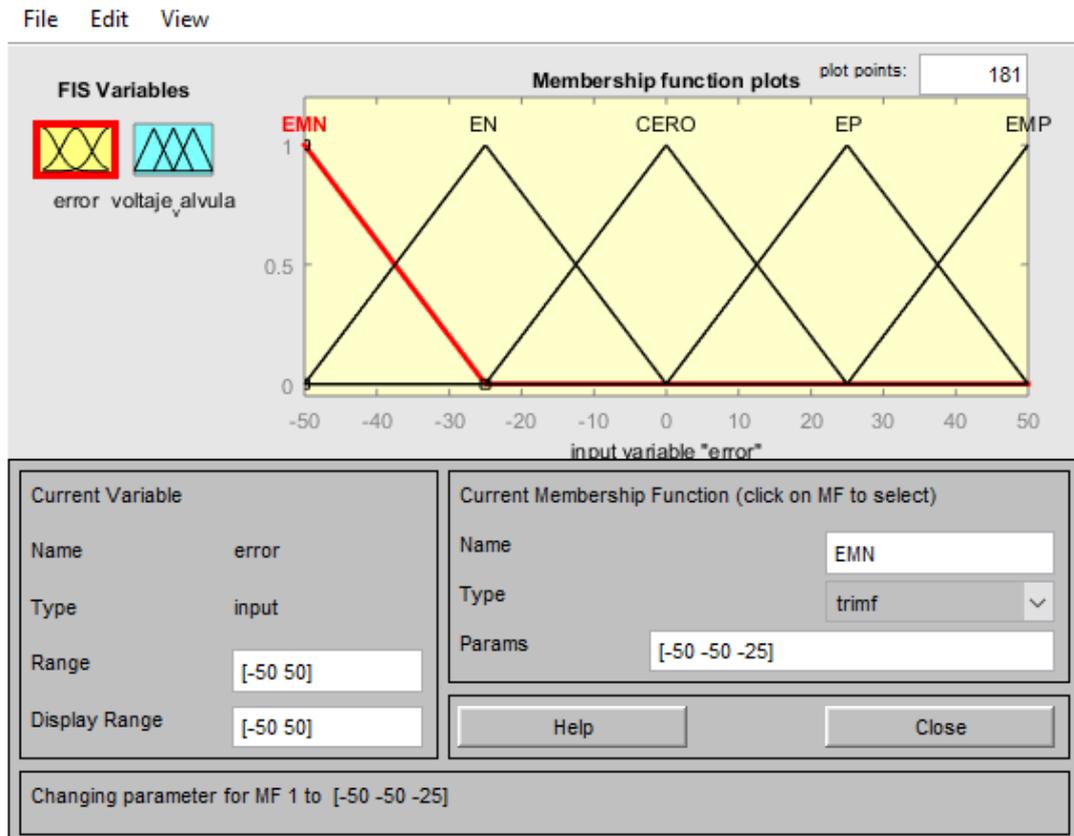


Figura 3.8 – Definición de funciones de membresía para el error

Se observa en la figura 3.8, que se considera como errores máximos ± 50 cm que es la longitud del sensor de posición del cilindro hidráulico.

Una vez definido el error de posición en uno de sus 5 niveles, el controlador difuso, debe generar una señal que reduzca el error. La señal a emitir es un voltaje que sale hacia la válvula proporcional, que controla el desplazamiento del cilindro hidráulico. La figura 3.9, muestra la conexión existente entre la válvula proporcional y el cilindro hidráulico.



Figura 3.9 – Conexión oleohidráulica entre la válvula proporcional y el cilindro hidráulico

El voltaje de control que requiere la válvula proporcional es de +/- 10vcc. Debido a que usamos una tarjeta Arduino como tarjeta de adquisición de datos para la validación del presente trabajo, el voltaje de salida del controlador difuso debe estar entre 0 y 5vcc. Por lo que resulta necesario usar un amplificador que transforme la salida de 0 @ 5vcc a -10 @ +10vcc.

Para la validación del presente trabajo, hemos usado como amplificador las conexiones analógicas de un PLC Siemens S7-1200. Como se demostró en el capítulo 2, se requiere de un voltaje de 2.25vcc hasta 0vcc, para incrementar la velocidad de salida del vástago del cilindro hidráulico y un voltaje de 3.05 a 5vcc, para aumentar la velocidad de retorno del vástago del cilindro hidráulico.

La figura 3.10 muestra la curva de respuesta voltaje de salida del controlador, hacia la válvula proporcional vs velocidad del cilindro hidráulico. Tomar en cuenta que, a menor voltaje, mayor es la velocidad con que el cilindro hidráulico extiende el vástago. Asimismo, a mayor voltaje, de salida del controlador difuso, mayor es la velocidad de retracción del vástago. Para un voltaje entre 2.25 y 3.05 vcc, el vástago del cilindro hidráulico no se mueve.

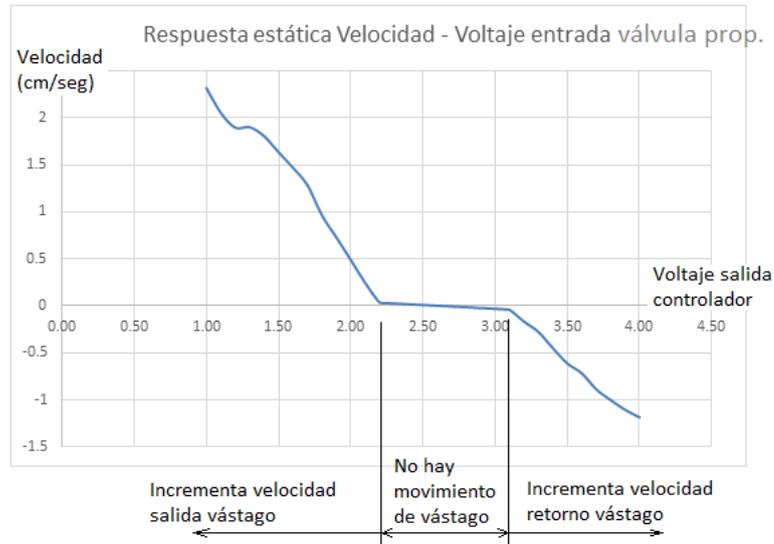


Figura 3.10 – Curva de respuesta velocidad del cilindro vs voltaje salida controlador

Se trabajará con 5 particiones para definir, las funciones de membresía del voltaje de salida del controlador difuso, hacia la válvula proporcional. Los niveles de velocidad de respuesta, del cilindro hidráulico en función del voltaje de salida del controlador difuso, se muestran en la figura 3.11.

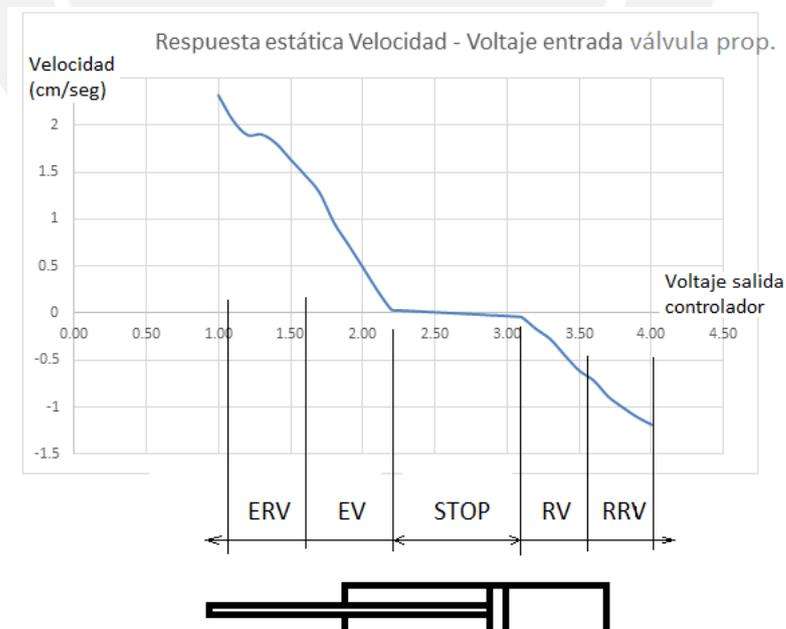


Figura 3.11 – Niveles de velocidad de respuesta del cilindro hidráulico

Los niveles de voltaje indicados corresponden a:

- ERV : Extiende rápido vástago
- EV : Extiende vástago
- STOP : El vástago no se mueve
- RV : Retrae vástago
- RRV : Retrae rápido el vástago

Podemos, ahora usar la herramienta “Fuzzy Logic Toolbox” de Matlab, para definir las particiones del voltaje de salida del controlador hacia la válvula proporcional como se muestra en la figura 3.12.

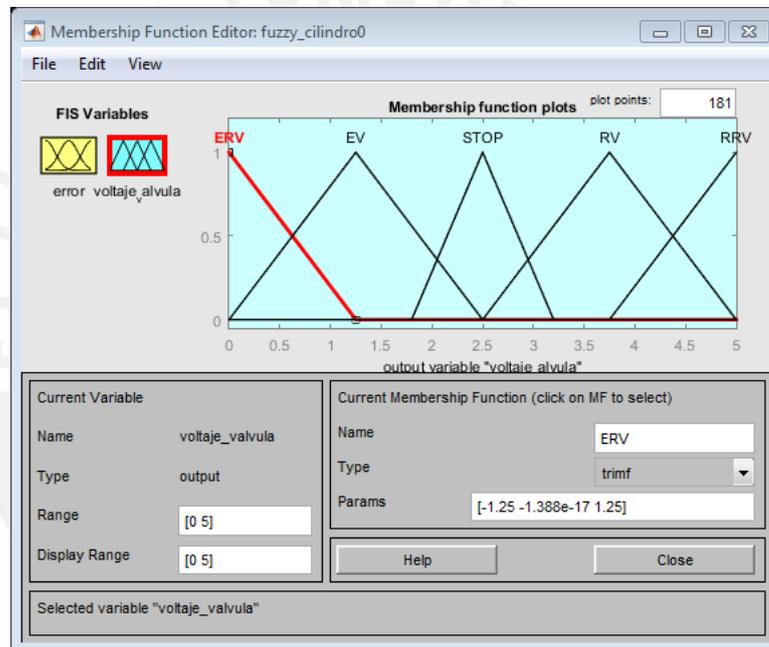


Figura 3.12 – Definición de funciones de membresía para el voltaje de salida del controlador

Una vez definidas las entradas y salidas del controlador difuso, corresponde ahora definir las reglas. Un error positivo se genera debido a que la posición deseada es mayor que la posición medida, por lo que se requiere que el cilindro extienda el vástago para alcanzar a la posición deseada. Asimismo, un error negativo se genera debido a que la posición deseada es menor que la posición medida por lo que se requiere que el cilindro retraiga el vástago para así alcanzar a la posición deseada.

La figura 3.13 muestra la acción a tomar por el controlador difuso en función a la posición del cilindro hidráulico.

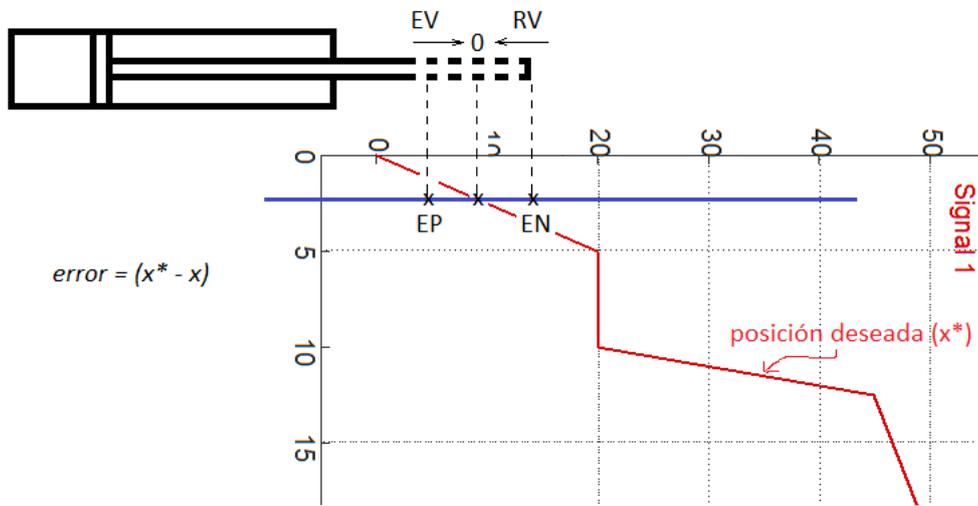


Figura 3.13 – Definición de reglas en función a la posición del cilindro hidráulico

Dependiendo de la magnitud del error, será necesario que el controlador aplique un voltaje de salida hacia la válvula proporcional en menor o mayor proporción, para que el cilindro alcance a la posición deseada. La definición final de las reglas se muestra en la figura 3.14.

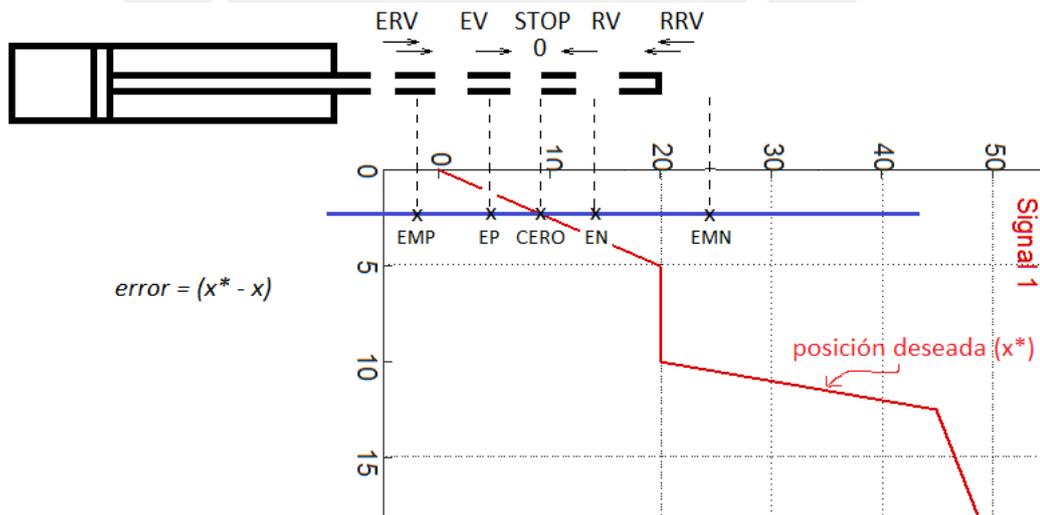


Figura 3.14 – Definición final de reglas en función a la posición del cilindro hidráulico

Definida las reglas, se cargan las mismas al “Fuzzy Logic Toolbox” de Matlab como se muestra en la figura 3.15.

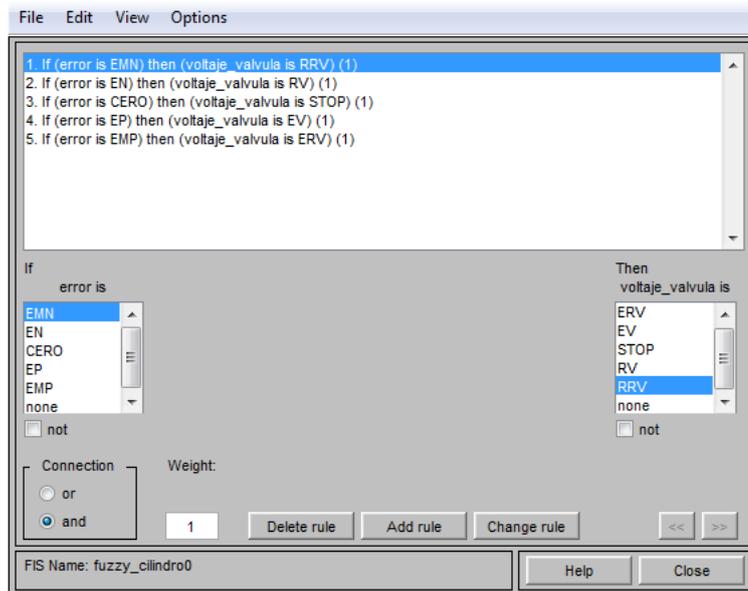


Figura 3.15 – Uso de la herramienta de Matlab para definición de reglas

Una vez definido el controlador, se procede a la simulación y validación del algoritmo de control.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

4.1. Introducción

En este capítulo, se evalúan los resultados del algoritmo de lógica difusa, para controlar el sistema de implementos de un mini cargador. Se realizan diferentes pruebas de simulación en Matlab, y por último se valida el resultado en un módulo hidráulico real.

4.2. Simulación de resultados para el controlador difuso

En el capítulo anterior, se determinó la estructura del controlador difuso, pero no se definió con precisión los valores de cada partición a fin de obtener un resultado óptimo. Evaluaremos los resultados para diferentes valores, en las particiones del error y voltaje hacia válvula proporcional.

4.2.1. Prueba simulación 1

Para esta prueba inicial, trabajaremos con particiones simétricas e iguales para el error. Para trabajar con valores enteros, se usaran las unidades de medición de distancia en centímetros en lugar de metros. Debido a que la carrera del cilindro hidráulico es de 0.4m o 40cm, el error no podrá en ningún caso superar a dicho valor, por lo que se tomará como límites del mismo, los valores de 50cm para el error positivo, y -50cm para el error negativo. Las funciones de membresía a cargar en el programa son:

- EMN = Error muy negativo, de -50, -50, -25
- EN = Error negativo, de -50, -25 y 0
- CERO= Error cero, -25, 0 y 25
- EP = Error positivo, 0, 25, 50
- EMP = Error muy positivo, 25, 50, 50.

Los parámetros de cada función de membresía, se muestran en la figura 4.1.

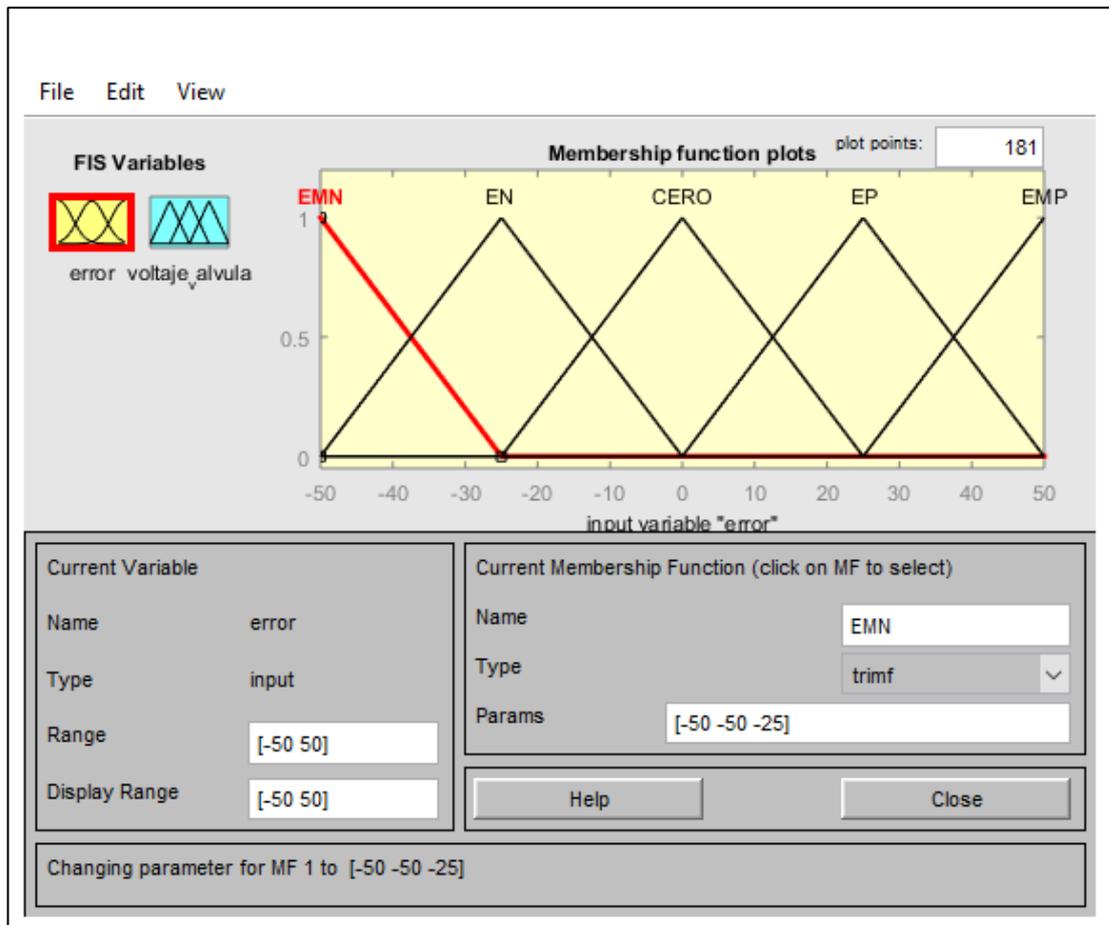


Figura 4.1 – Definición de particiones para el error – simulación 1

La figura 4.2 muestra las particiones elegidas para el voltaje de salida hacia la válvula proporcional. Para el voltaje de salida se considera los siguientes parámetros:

- Rango de 0 a 5vcc. Este rango se elige de acuerdo a los valores obtenidos en la tabla 1, que define el voltaje de salida hacia la válvula hidráulica proporcional.
- ERV = Extiende rápido el vástago, de 0, 0, 1.25vcc
- EV = Extiende el vástago, de 0, 1.25, 2.5vcc
- STOP = Vástago detenido, de 1.8, 2.5, 3.2vcc
- RV = Retrae el vástago, de 2.5, 3.75, 5vcc
- RRV = Retrae rápido el vástago, de 3.75, 5, 5vcc

Teniendo en cuenta estos valores, se construye el bloque fuzzy.

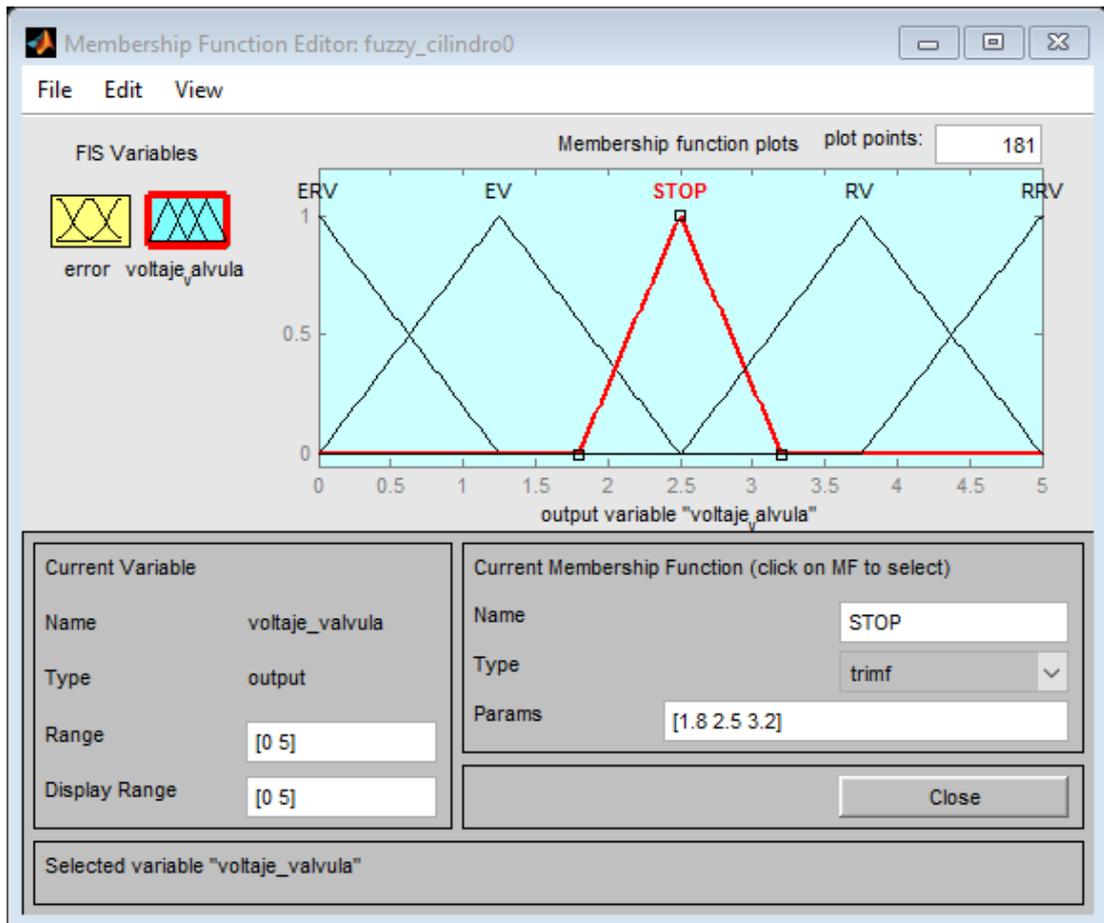


Figura 4.2 – Definición de particiones para el voltaje de salida – simulación 1

Una vez definido el bloque fuzzy, este se graba y se carga en el algoritmo de control del diagrama de bloques de Simulink. El diagrama de bloques en Simulink estará compuesto de los siguientes bloques:

- El bloque de función de transferencia, cuya identificación se realizó en el capítulo 2.
- El bloque de señal de entrada a usar para la simulación, que será la señal de prueba para validación del controlador definida en el capítulo 3.
- Un bloque de saturación a la salida del bloque fuzzy, de modo que se limite el valor de salida de la señal fuzzy entre 0 y 5vcc.

Una vez completado el diagrama de bloques, es necesario agregar algunas constantes de modo que se ajuste el resultado obtenido. La figura 4.3 muestra el diagrama de bloques en Simulink a usar.

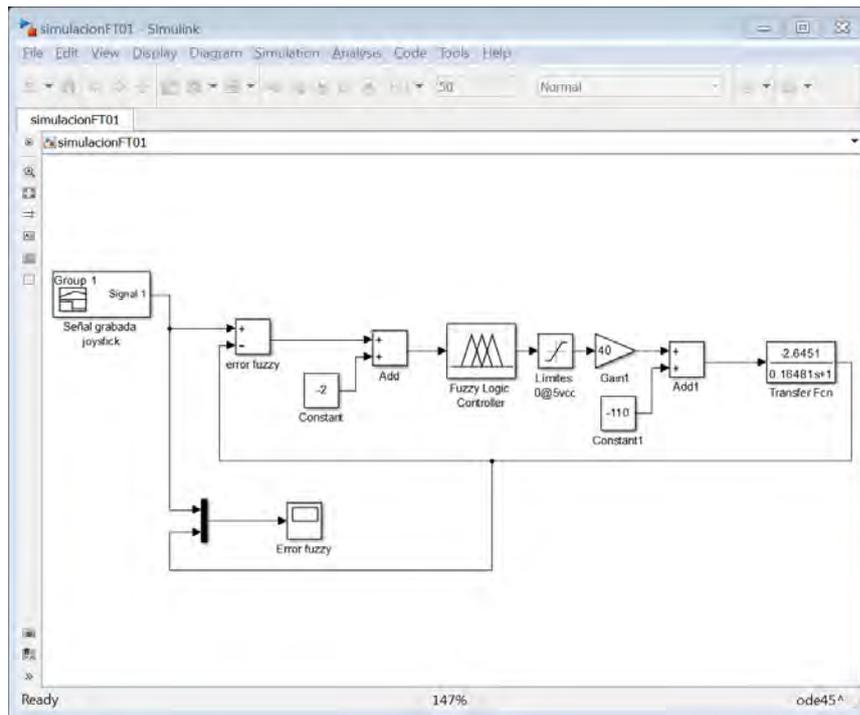


Figura 4.3 – Diagrama de bloques en Simulink – simulación 1

Corriendo la simulación, se obtiene la posición del cilindro hidráulico en color azul versus la posición deseada en color rojo. La figura 4.4 muestra el resultado obtenido.

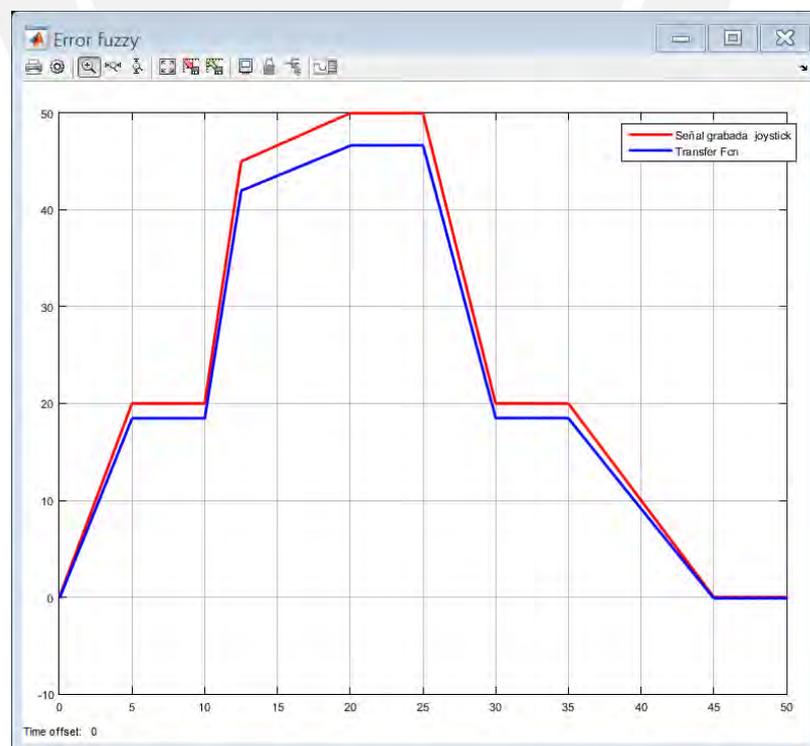


Figura 4.4 – Resultados prueba simulación 1

Se observa de esta primera simulación, que no se alcanza al valor de la posición deseada. De acuerdo a la figura 4.4, se obtendría un error de aproximadamente 4 cm en la posición final de la extensión del vástago del cilindro hidráulico, por lo que se requiere ajustar los valores de cada partición para reducir el error.

4.2.2. Prueba simulación 2

A fin de obtener un mayor voltaje a la salida del controlador, de modo que la válvula proporcional desplace al cilindro hidráulico a una mayor distancia, se ampliarán los límites de la partición del error y del voltaje de salida hacia la válvula hidráulica proporcional.

Los nuevos valores de partición para el error serán:

- Rango del error. Ampliaremos el rango desde -60cm hasta 60cm.
- EMN = con nuevos valores -90, -60, -25
- EN = valores -50, -25, 0
- CERO= valores -25, 0, 25
- EP = valores 0, 25, 50
- EMP = valores 25, 60, 90

Los nuevos valores de partición, para el voltaje de salida hacia la válvula hidráulica proporcional, serán:

- Rango del voltaje de salida, desde -4 hasta 9vcc.
- ERV = con función trapezoidal -4, -4, -3 y -0.3.
- EV = valores -4, -2.5, 2.5.
- STOP= valores 2, 2.5, 3.5.
- RV = valores 2.5, 7.5, 9.
- RRV = con función trapezoidal 5.3, 8, 9, 9.

La figuras 4.5 y 4.6, muestran los valores ampliados del error y del voltaje de salida hacia la válvula hidráulica proporcional.

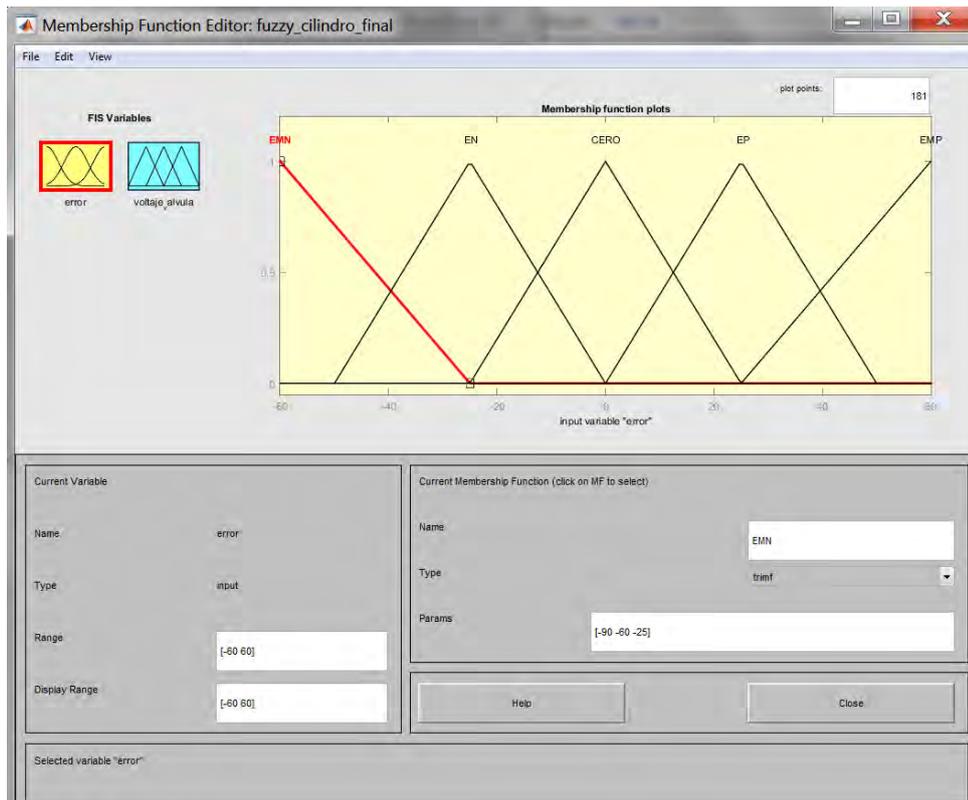


Figura 4.5 – Valores ampliados del error

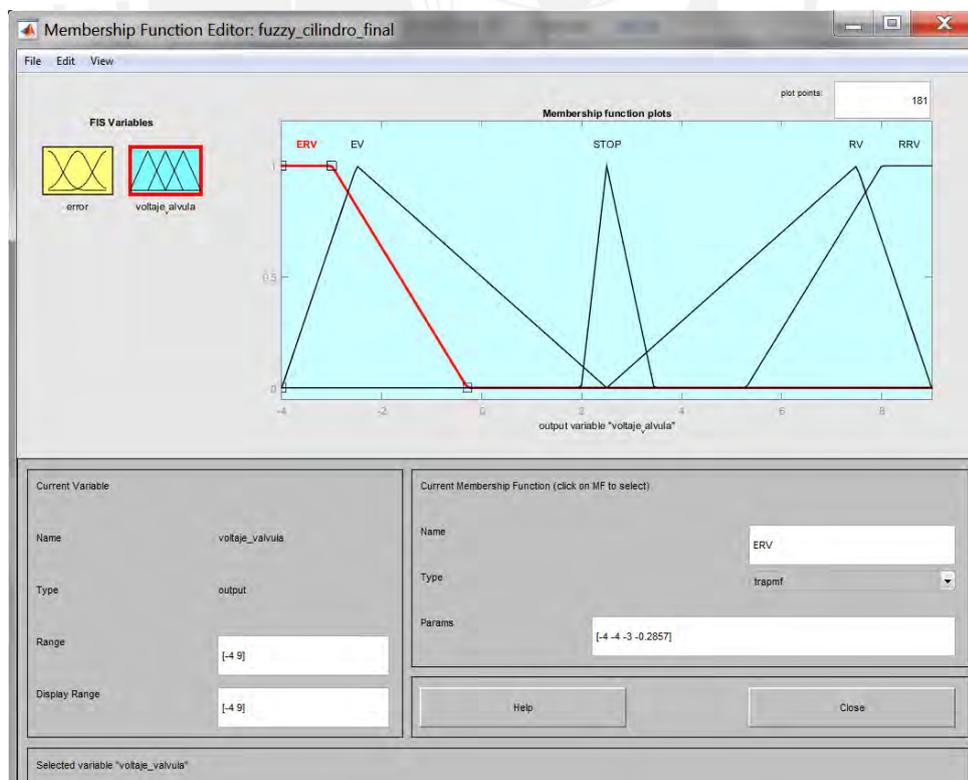


Figura 4.6 – Valores ampliados del voltaje de salida hacia válvula

La razón de extender los límites del voltaje de salida desde -4 hasta 9vcc radica en que el método de procesamiento utiliza la inferencia min-max, para determinar el voltaje de salida. Al incrementar los límites, forzamos al controlador a que se alcance los valores extremos que permiten incrementar la velocidad de movimiento del cilindro hidráulico para reducir el error con mayor rapidez. A fin de no exceder los valores máximo y mínimo que puede soportar la tarjeta Arduino usada como tarjeta de adquisición de datos, se inserta un bloque de saturación (0 @ 5vcc) para evitar sobrepasar los límites del componente.

Cargamos el algoritmo del controlador difuso en el diagrama de bloques de Simulink ajustando algunas constantes para obtener un mejor resultado. La figura 4.7 muestra el diagrama de bloques indicado.

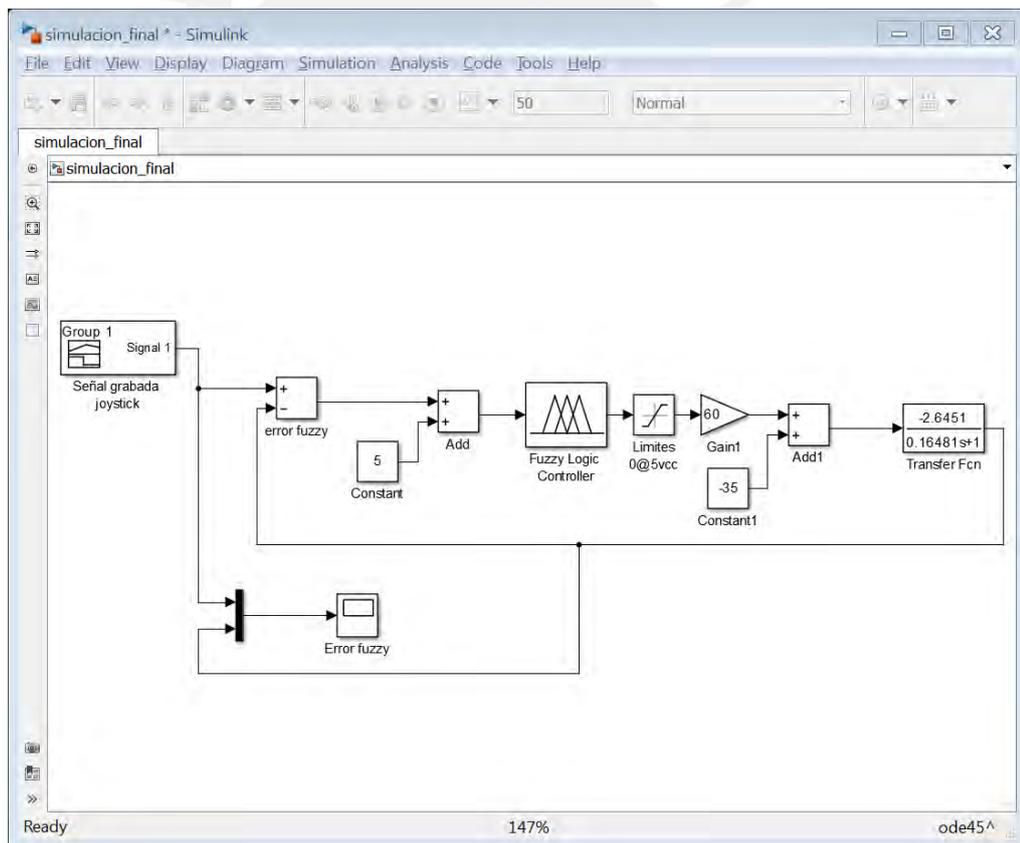


Figura 4.7 – Diagrama de bloques con ampliación de límites de particiones

La figura 4.8 muestra el resultado de los cambios realizados.

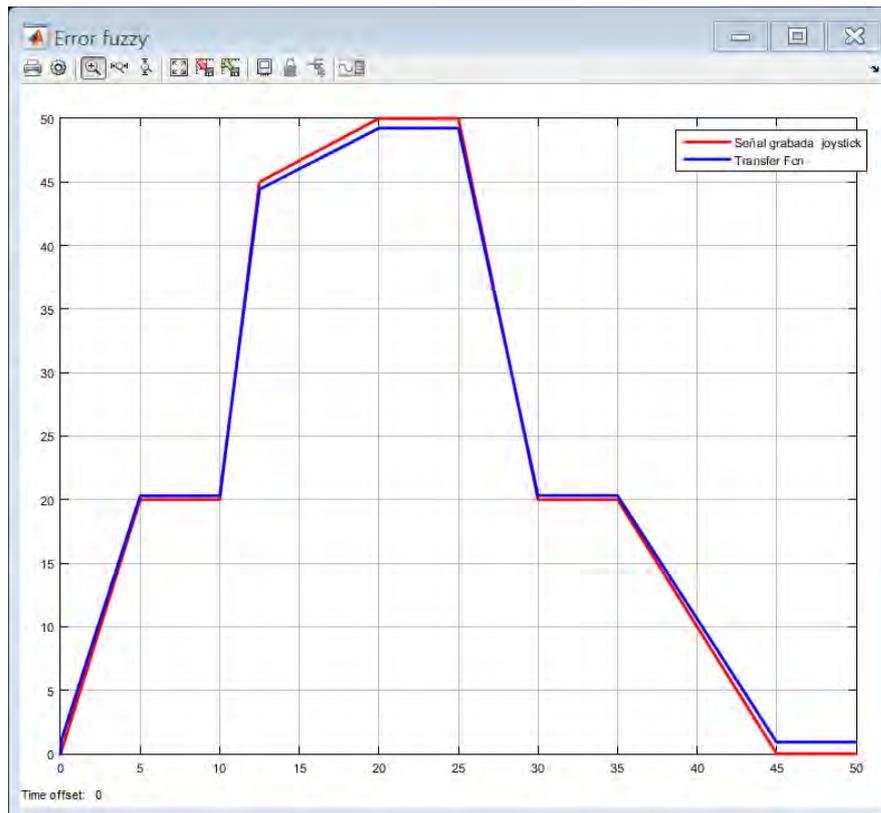


Figura 4.8 – Resultados prueba simulación con límites ampliados

Se observa un resultado mucho mejor que el obtenido en la primera simulación.

4.2.3. Prueba simulación ante una perturbación externa

El objetivo del presente trabajo es instalar un sistema de carga y descarga automático que permita que un mini cargador ejecute dicho proceso del mismo modo que lo haría un operador experimentado. Sin embargo, se debe entender que el material a cargar por la máquina, puede tener cambios en su densidad o pueden aparecer rocas que inicialmente no fueron considerados por el operador experimentado.

Por tal razón, el controlador debe ser capaz de responder ante perturbaciones que pudieran aparecer durante su aplicación. Para ello, agregaremos una perturbación en el diagrama de bloques de Simulink como se muestra en la figura 4.9.

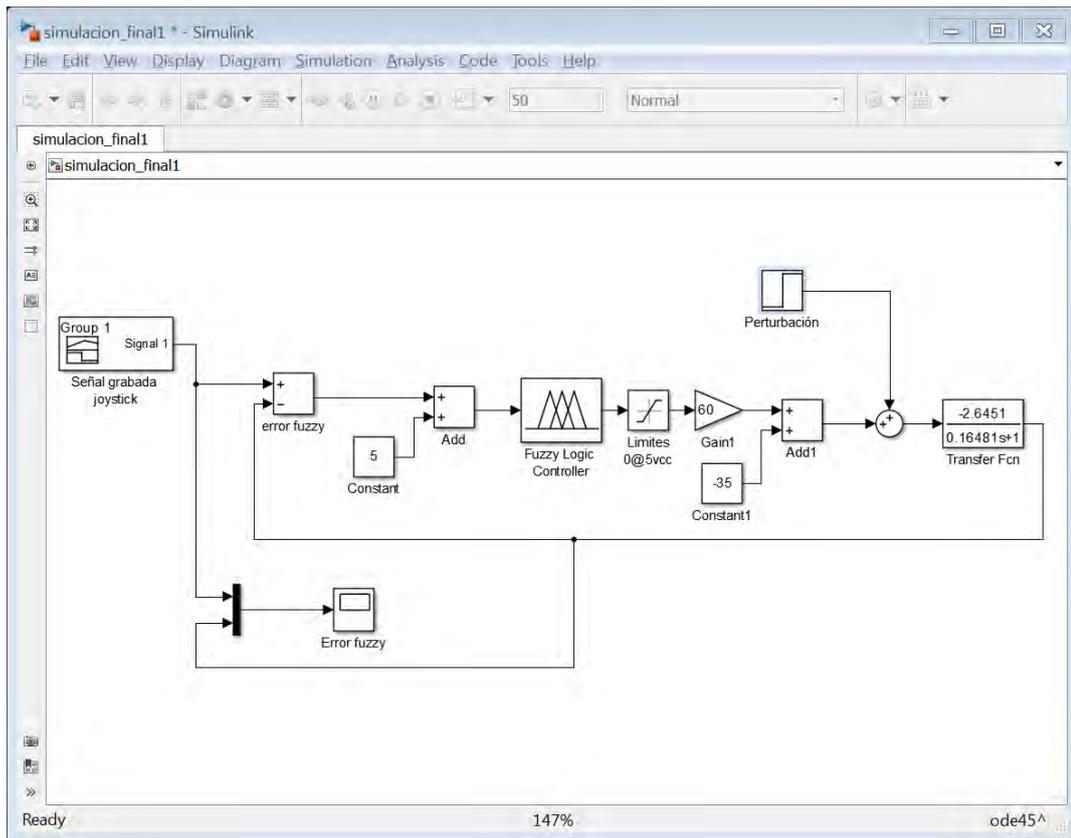


Figura 4.9 – Implementación de una perturbación en el sistema

Se simulará la perturbación como una entrada escalón aplicada en línea con la función de transferencia. Para evaluar la respuesta del controlador fuzzy ante una perturbación, se genera entonces diferentes valores de entrada escalón y se mide el porcentaje de error entre el valor deseado y el valor obtenido. Se medirá la variación del error en 3 puntos los cuáles están indicados en la figura 4.10.

Las características de la perturbación se muestran en la figura 4.11, donde se aprecia que dicha perturbación se aplicará en el tiempo de 7.5 segundos luego de iniciada la prueba.

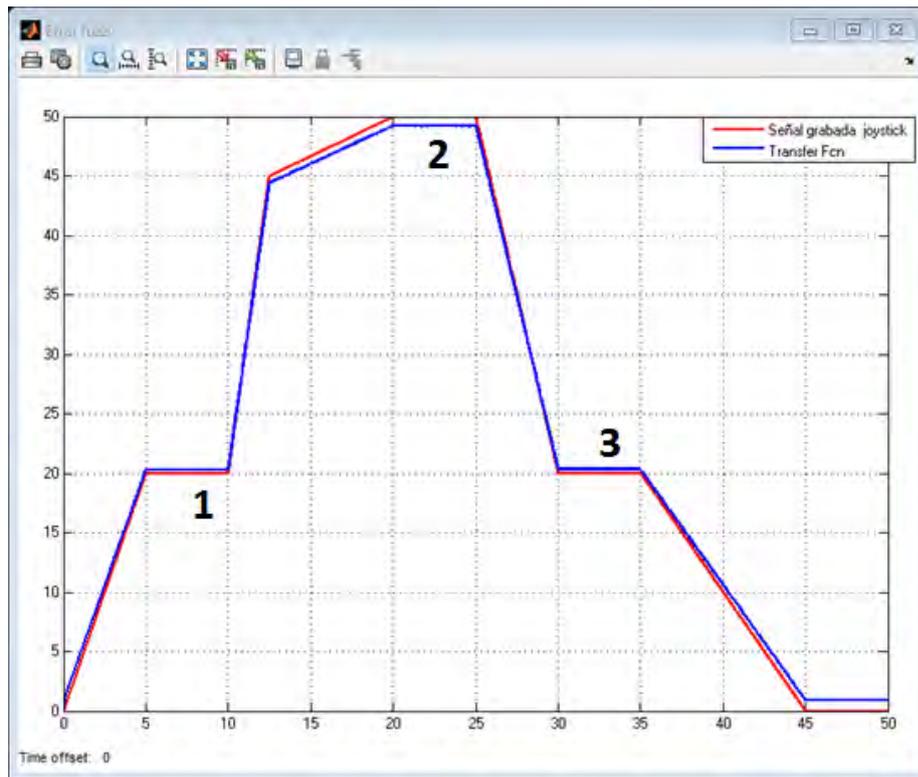


Figura 4.10 – Puntos de evaluación del error ante perturbaciones externas

Source Block Parameters: Perturbación

Step

Output a step.

Parameters

Step time:
7.5

Initial value:
0

Final value:
0

Sample time:
0

Interpret vector parameters as 1-D

Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

Figura 4.11 – Perturbación del tipo entrada escalón aplicado en el tiempo 7.5 segundos

Se inicia la evaluación con una entrada escalón de magnitud 0 para obtener los datos iniciales de la prueba. Los resultados obtenidos en los puntos 1, 2 y 3 se muestran en los gráficos de las figuras 4.12, 4.13 y 4.14.

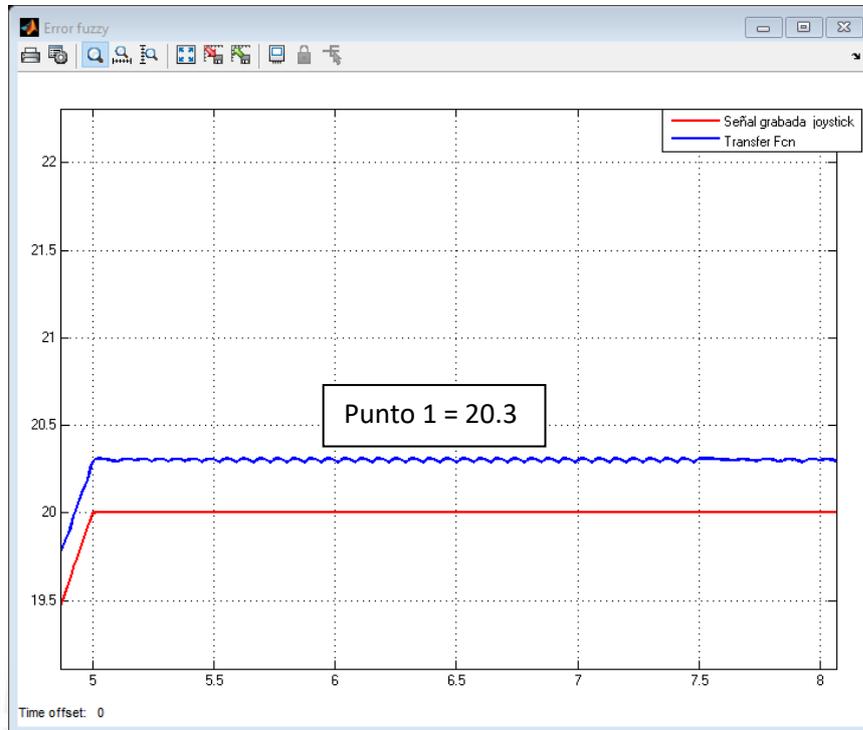


Figura 4.12 – Valores iniciales del error para el punto de medición 1

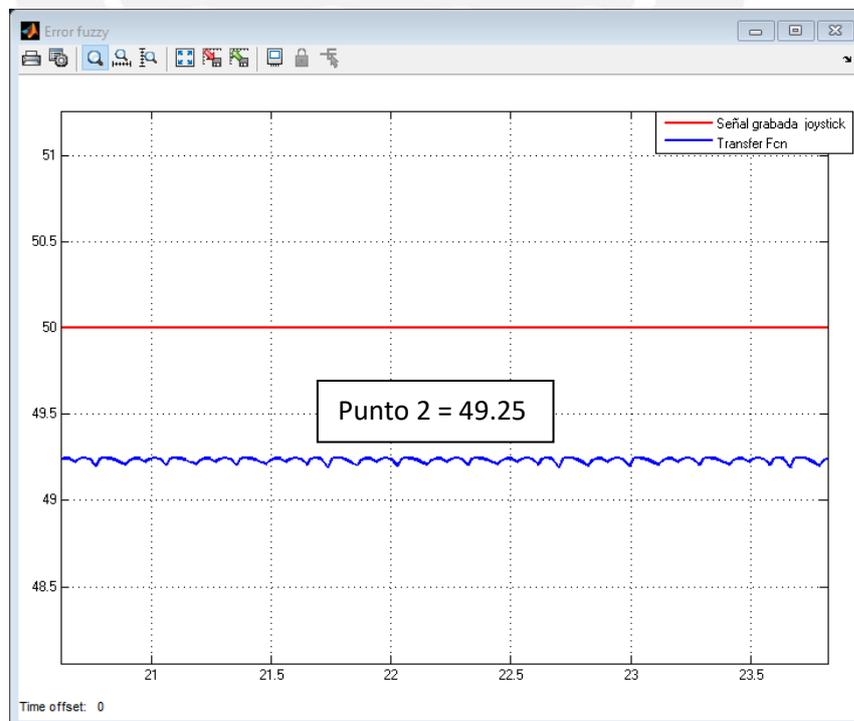


Figura 4.13 – Valores iniciales del error para el punto de medición 2

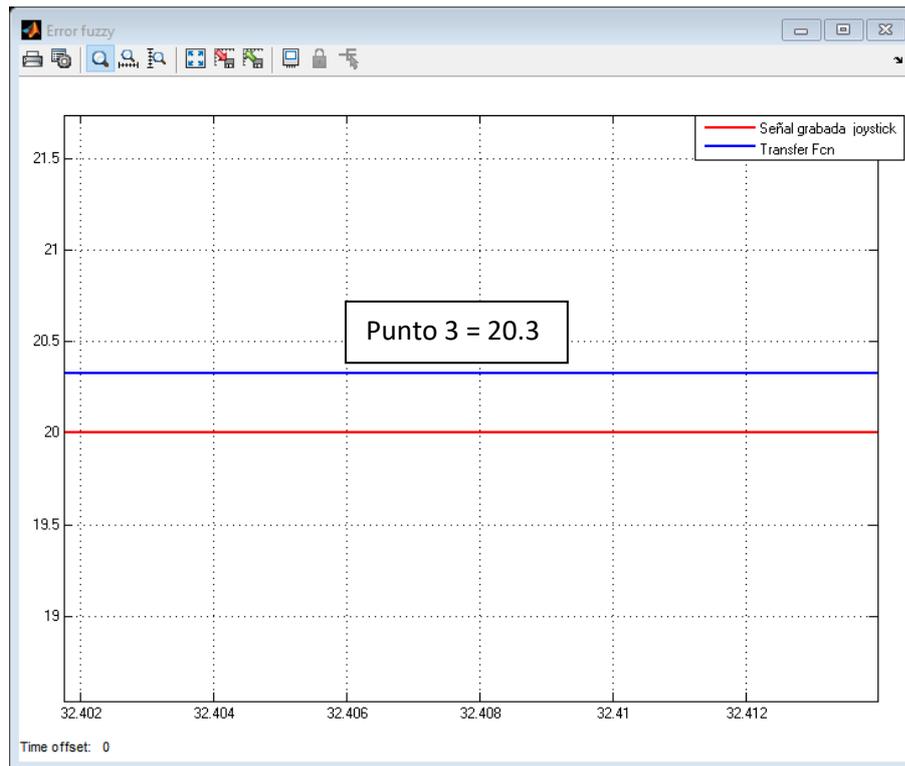


Figura 4.14 – Valores iniciales del error para el punto de medición 3

De las figuras mostradas, se pueden determinar los valores de error iniciales sin perturbación externa los cuáles se colocan en la tabla 3.

Tabla 3. Errores iniciales sin perturbación externa

Punto medición	Perturbación (Entrada escalón)	Valor deseado (x^*)	Valor obtenido (x)	% error
1	0	20	20.3	-1.50%
2	0	50	49.25	1.50%
3	0	20	20.3	-1.50%

Se observa que el sistema tiene un error inicial de 1.5% con respecto al valor deseado, para los 3 puntos de medición definidos inicialmente.

Estos valores de error iniciales, nos servirán de base para evaluar el comportamiento del sistema y determinar la eficacia del controlador fuzzy ante una perturbación externa. La evaluación del sistema, se cuantificará

comparando las variaciones del error ante diferentes magnitudes de cada perturbación que ingresemos al sistema.

Iniciamos la prueba con una entrada escalón de magnitud 1 aplicada en el tiempo de 7.5 segundos luego de iniciada la prueba.

Las características de la perturbación ingresada, se muestran en la figura 4.15

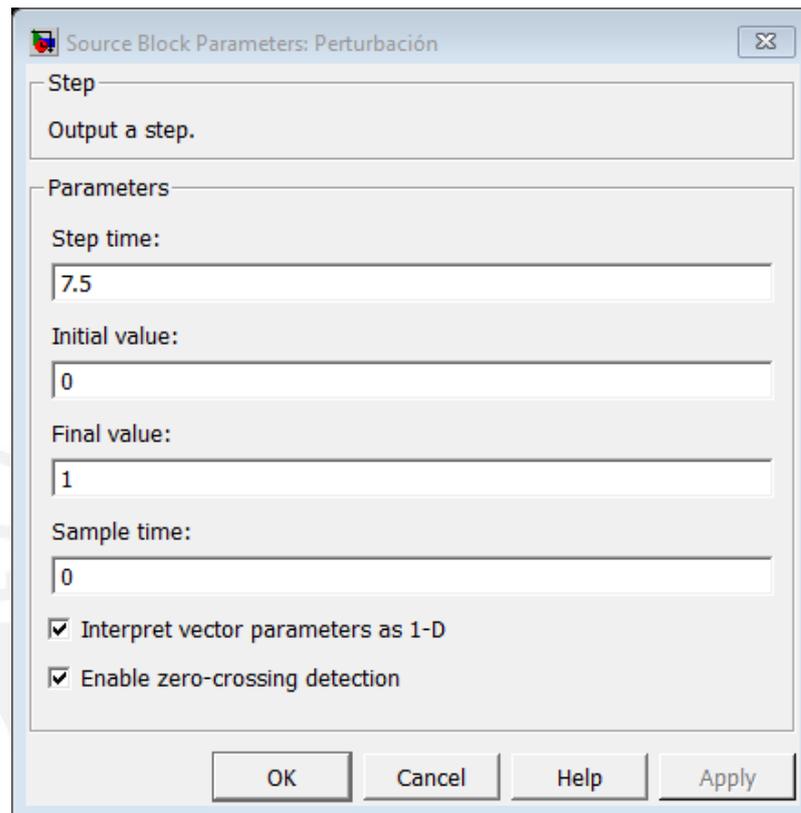


Figura 4.15 – Características de la perturbación inicial

Una vez ingresada la perturbación, se ejecuta el programa y evaluamos los resultados en cada punto de medición definido.

Los resultados de esta perturbación en cada punto, se muestran en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18.

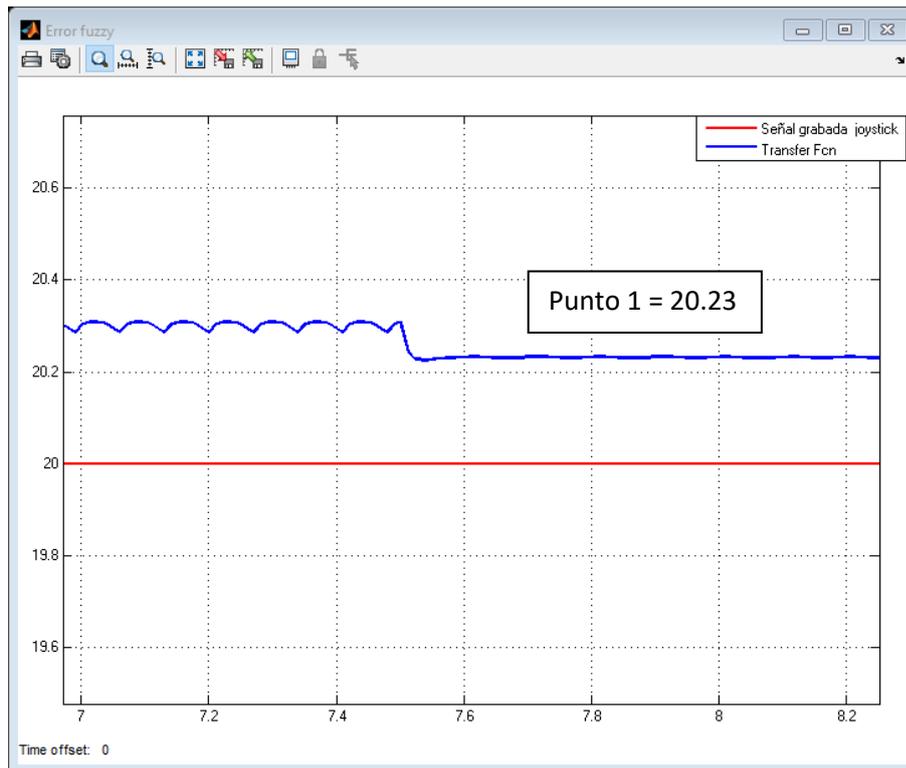


Figura 4.16 – Valores obtenidos para el punto de medición 1 luego de la perturbación final value = 1

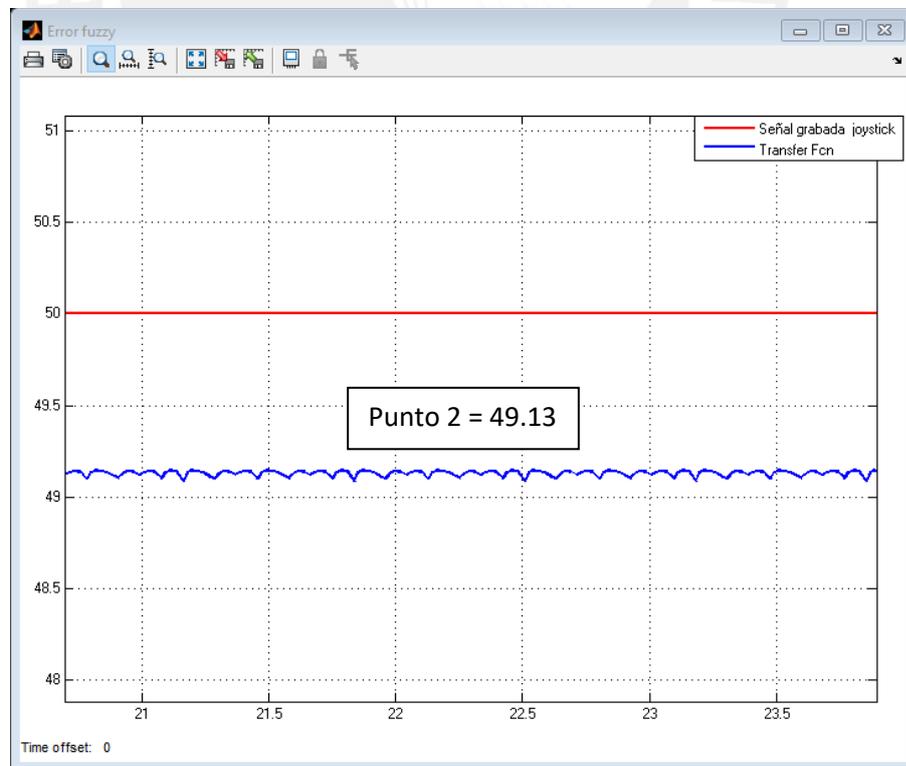


Figura 4.17 – Valores obtenidos para el punto de medición 2 luego de la perturbación final value = 1

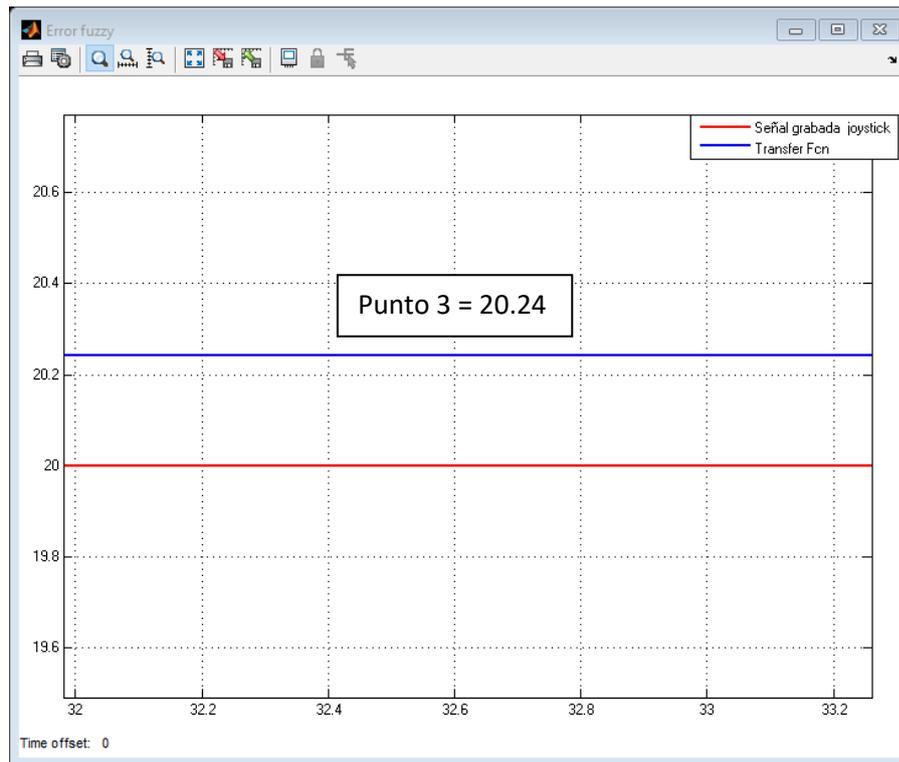


Figura 4.18 – Valores obtenidos para el punto de medición 3 luego de la perturbación *final value = 1*

La comparación de los resultados obtenidos contra los valores de error inicial se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Errores obtenidos ante perturbación externa *final value = 1*

Punto medición	Perturbación (Entrada escalón)	Valor inicial sin perturbación	Valor final obtenido con perturbación	% error
1	1	20.3	20.23	0.34%
2	1	49.25	49.13	0.24%
3	1	20.3	20.24	0.30%

Se observa que ante perturbaciones externas se generan errores por debajo del 1% lo que indica que el controlador difuso atenúa las variaciones en los resultados.

Tabulamos las variaciones en el error para diferentes valores de perturbación. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Errores obtenidos ante diferentes valores de perturbación externa

Perturbación (Entrada escalón)	Punto medición	Valor inicial sin perturbación	Valor final obtenido con perturbación	% error
1	1	20.3	20.23	0.34%
	2	49.25	49.13	0.24%
	3	20.3	20.24	0.30%
2	1	20.3	20.14	0.79%
	2	49.25	49.037	0.43%
	3	20.3	20.155	0.71%
3	1	20.3	20.055	1.21%
	2	49.25	48.93	0.65%
	3	20.3	20.0668	1.15%
4	1	20.3	19.965	1.65%
	2	49.25	48.825	0.86%
	3	20.3	19.97	1.63%

Se observa que para perturbaciones externas por encima de valores de magnitud 3 hacia arriba, se obtienen errores mayores al 1% lo que indica que el controlador cumple su función de estabilizar el sistema pero hasta cierto valor de la perturbación.

4.3. Validación de resultados para el controlador difuso

De acuerdo a la simulación, se determina que si es posible realizar el control de posición de un cilindro hidráulico al usar un controlador difuso. Por lo tanto, corresponde validar los resultados en una instalación hidráulica real.

En el capítulo 2 se comenta sobre el módulo de prueba a usar para la validación de los resultados. La figura 4.19 y 4.20 muestran el esquema y módulo hidráulico físico a usar para la validación.

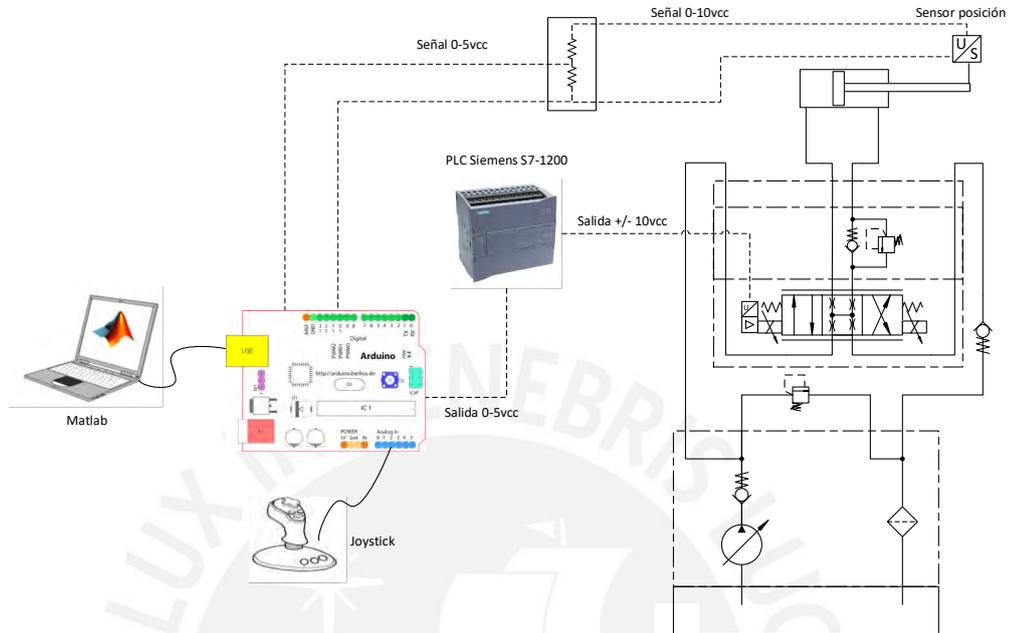


Figura 4.19 – Esquema de módulo hidráulico de prueba

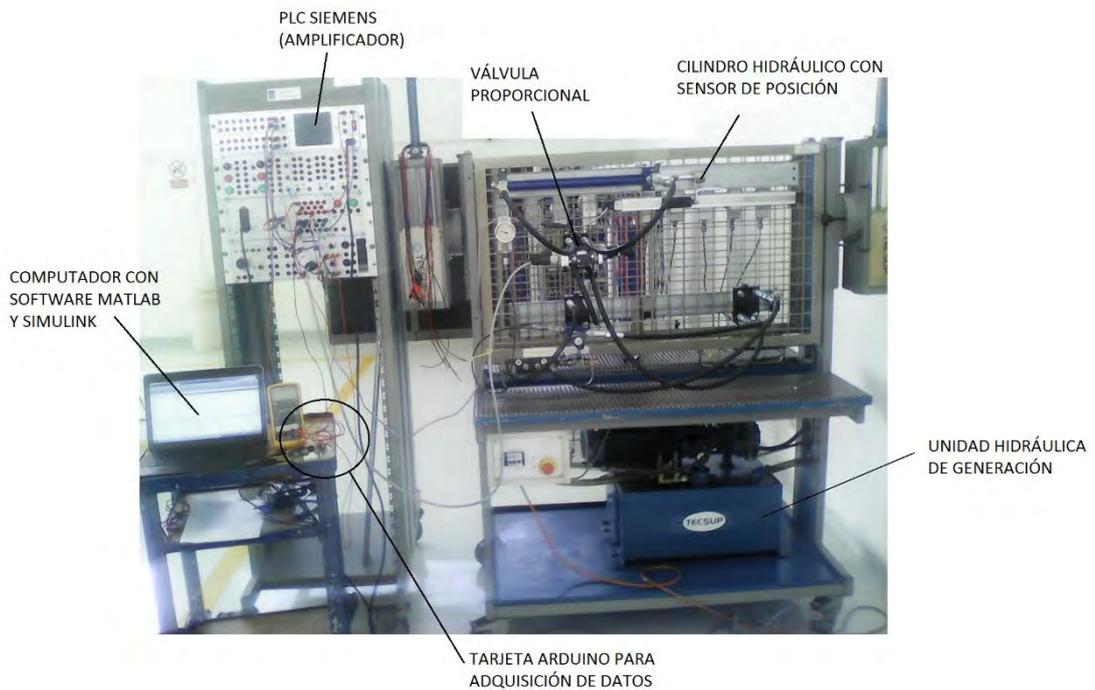


Figura 4.20 – Módulo hidráulico para validación de resultados

Para trabajar con la instalación física es necesario ajustar algunos parámetros en el diagrama de bloques de Simulink. El diagrama de bloques final se muestra en la figura 4.21.

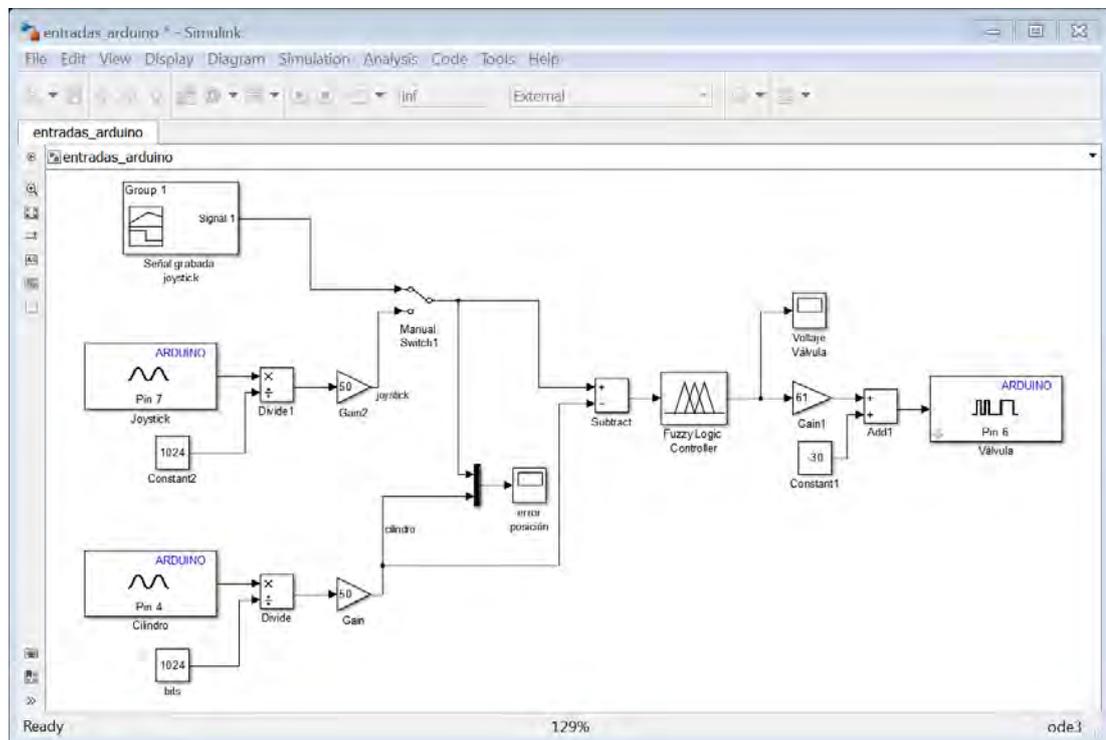


Figura 4.21 – Diagrama de bloques en Simulink para validación

Se observa del diagrama que el pin 7, corresponde al pin analógico de entrada de la tarjeta Arduino Mega. Esta entrada, permitirá que un operador experimentado controle los movimientos del cilindro hidráulico y en consecuencia, poder así grabar las posiciones que se requerirán, para replicar los movimientos de manera automática.

El pin 6 corresponde a un pin de salida PWM en la tarjeta Arduino Mega. Se usará el valor de voltaje generado en este pin para luego amplificar la señal de 0@5vcc hasta +/- 10vcc, voltaje requerido para controlar la válvula hidráulica proporcional, que controla los movimientos del cilindro hidráulico.

El pin 4 corresponde a una entrada analógica en la tarjeta Arduino, el cual llega desde el sensor de posición del cilindro hidráulico. El voltaje de salida del sensor de posición es de 0@24vcc, por lo que se requiere de resistencias para reducir la magnitud del voltaje entre 0@5vcc, que es el rango de voltaje con que trabaja la tarjeta Arduino.

Una vez completada la instalación física de los componentes, se procede a realizar la validación. Las figuras 4.22 y 4.23, muestran las particiones usadas en el controlador difuso.

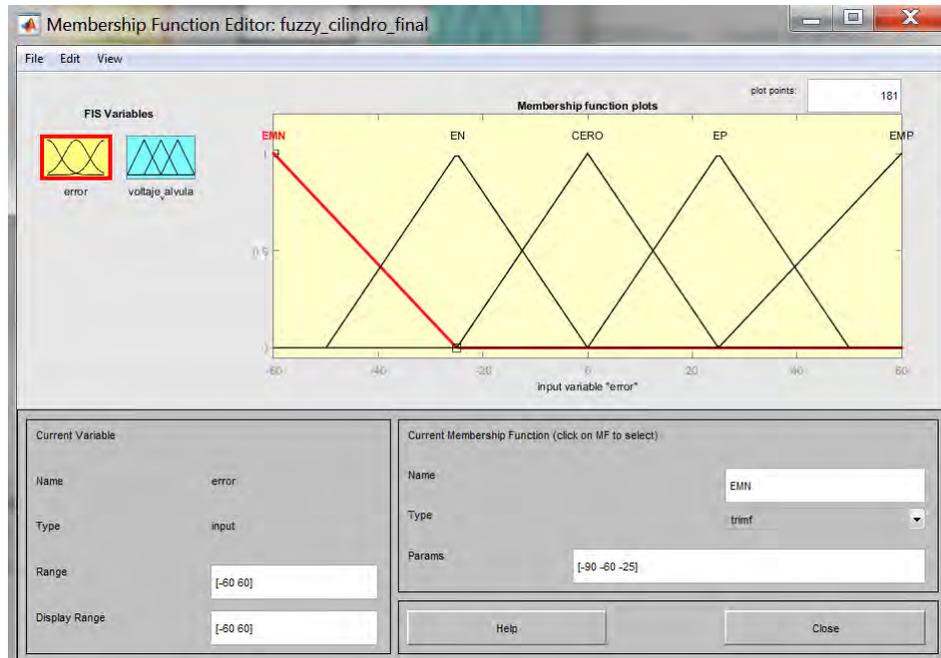


Figura 4.22 – Particiones usadas para el error - validación

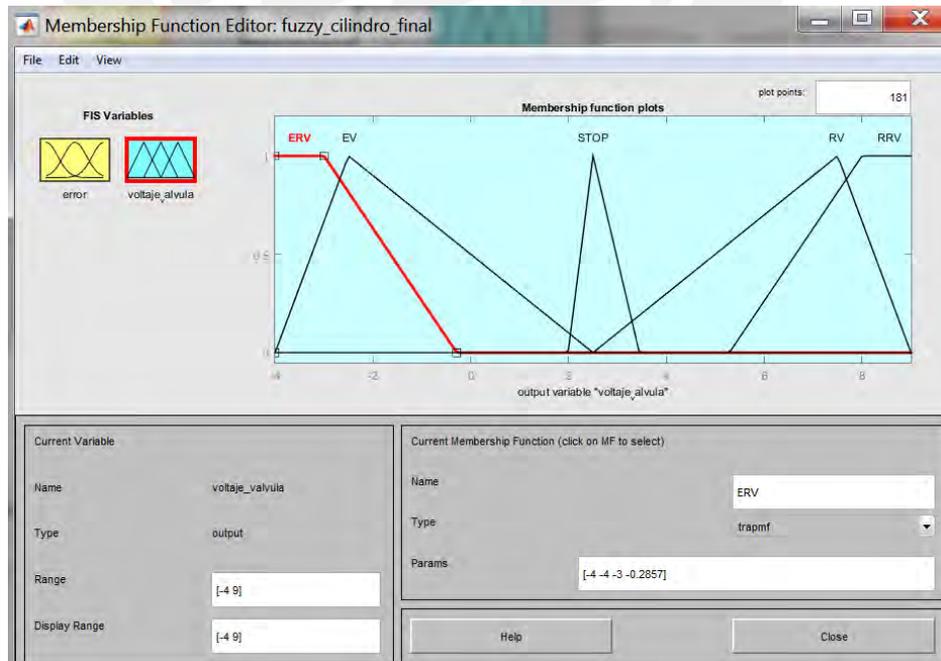


Figura 4.23 – Particiones usadas para el voltaje – validación

4.3.1. Validación con entrada externa “Joystick”

Para evaluar la respuesta del sistema ante una posición deseada cualquiera, primero usaremos un potenciómetro, que trabajará como el mando del operador en el mini cargador (joystick). Se activará el “Manual Switch 1”, a la posición de entrada externa “Joystick”, que se encuentra conectado al pin analógico 7 de la tarjeta Arduino Mega. El diagrama de bloques usado para trabajar con entrada externa es mostrado en la figura 4.24.

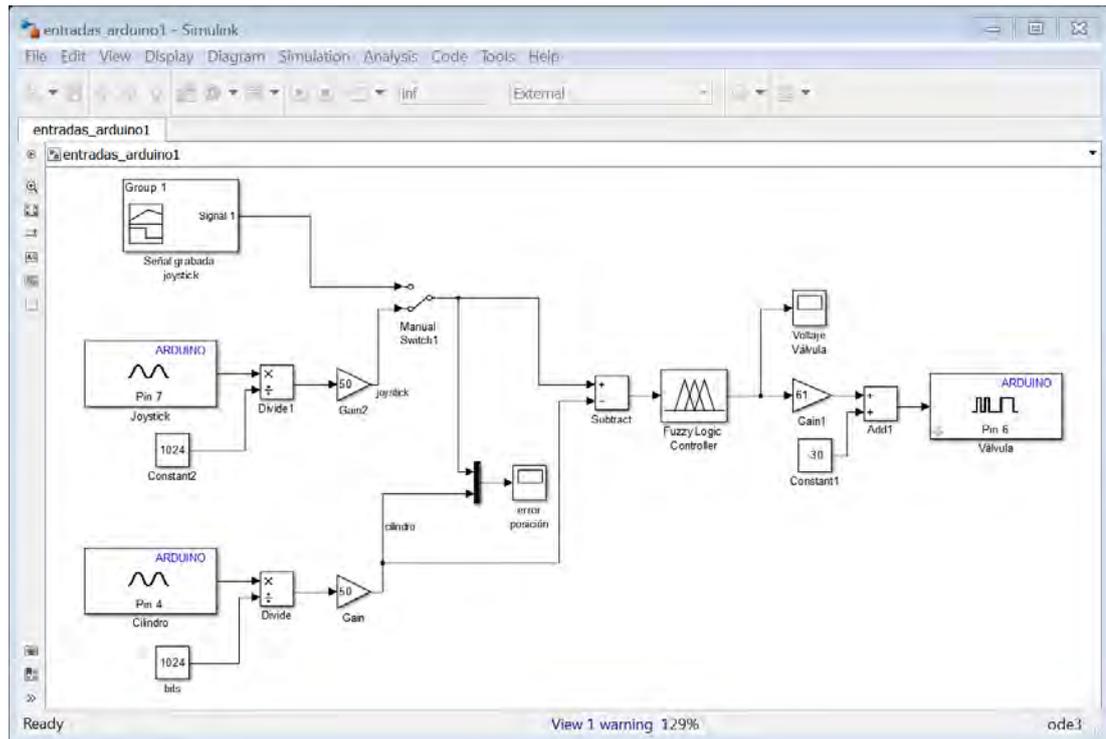


Figura 4.24 – Diagrama de bloques en Simulink para entrada externa – validación

Una vez ejecutado el programa y manipulando el potenciómetro Joystick para diferentes posiciones, podemos visualizar en la figura 4.25, la respuesta del sistema ante diferentes solicitudes de posición generada por el potenciómetro. La línea roja corresponde a la posición solicitada por la entrada externa (Joystick) y la línea azul corresponde a la posición del cilindro hidráulico medida por el sensor de posición.

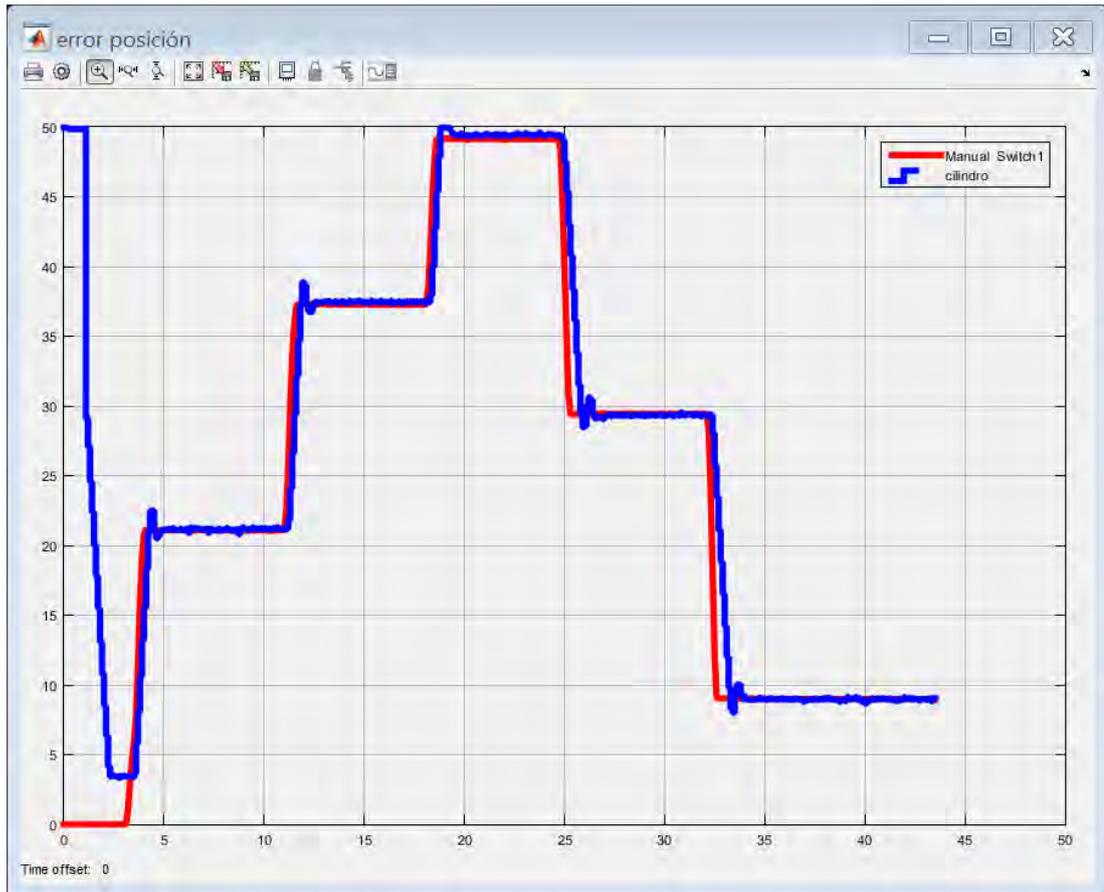


Figura 4.25 – Curva de respuesta ante entrada externa Joystick – validación

Se observa que se tiene sobre impulso ante una rápida solicitud de posición, pero dicha posición se estabiliza rápidamente. Nótese también que la prueba se inicia con el vástago del cilindro hidráulico totalmente extendido (línea azul en posición inicial igual a 50cm) y la posición inicial deseada proporcionada por el Joystick, requiere que el cilindro inicie con el vástago totalmente retraído (línea roja en posición inicial igual a 0 cm).

Se observa en esta prueba, que el controlador proporciona una rápida respuesta ante una determinada solicitud de posición.

4.3.2. Validación con señal pre definida

Se procede ahora a probar el sistema, para que siga una señal de posición pre definida, para tal fin activamos nuevamente el “Manual Switch 1” a la posición de conexión con una entrada de señal grabada o pre definida. El diagrama de bloques usado, se muestra en la figura 4.26.

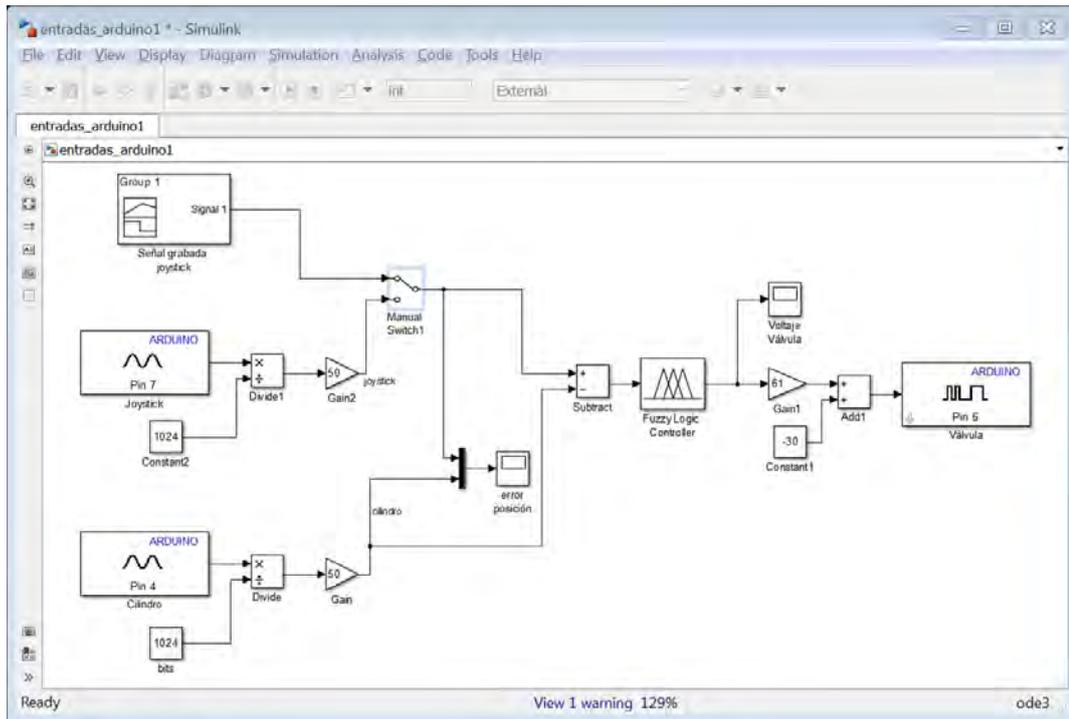


Figura 4.26 – Curva de respuesta ante señal pre definida – validación

Ejecutando el programa observamos luego el resultado en la figura 4.27.

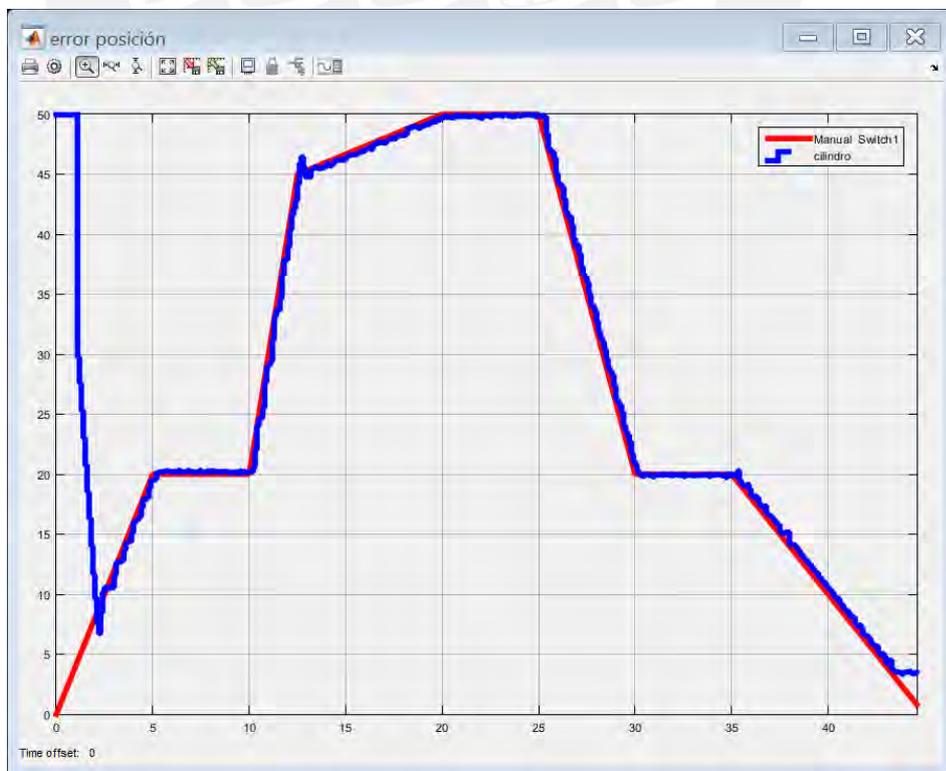


Figura 4.27 – Curva de respuesta ante señal pre definida – validación

Nuevamente el cilindro, se encuentra inicialmente en la posición de vástago totalmente extendido, mientras que la posición deseada inicial, requiere que el vástago se encuentre en la posición totalmente retraído.

En consecuencia, se observa que el controlador posiciona rápidamente al cilindro en la posición deseada y por ende, sigue muy de cerca cada posición solicitada. Puede observarse al inicio de la prueba, la existencia de un retardo que luego se corrige, lo que no generará impacto importante durante la operación en un mini cargador real.

Se puede visualizar un video con el resultado de esta prueba en el siguiente link: <https://www.youtube.com/watch?v=WbrhBA212G8>.

Es posible aún mejorar el desempeño del sistema y ajustar los valores de las particiones usadas, en el voltaje de salida hacia la válvula, a fin de reducir el sobre impulso. Muestra de ello se observa en la figura 4.28, donde se aprecia un sobre impulso bastante disminuido, pero sin perder precisión para seguir a la posición pre definida del cilindro hidráulico.

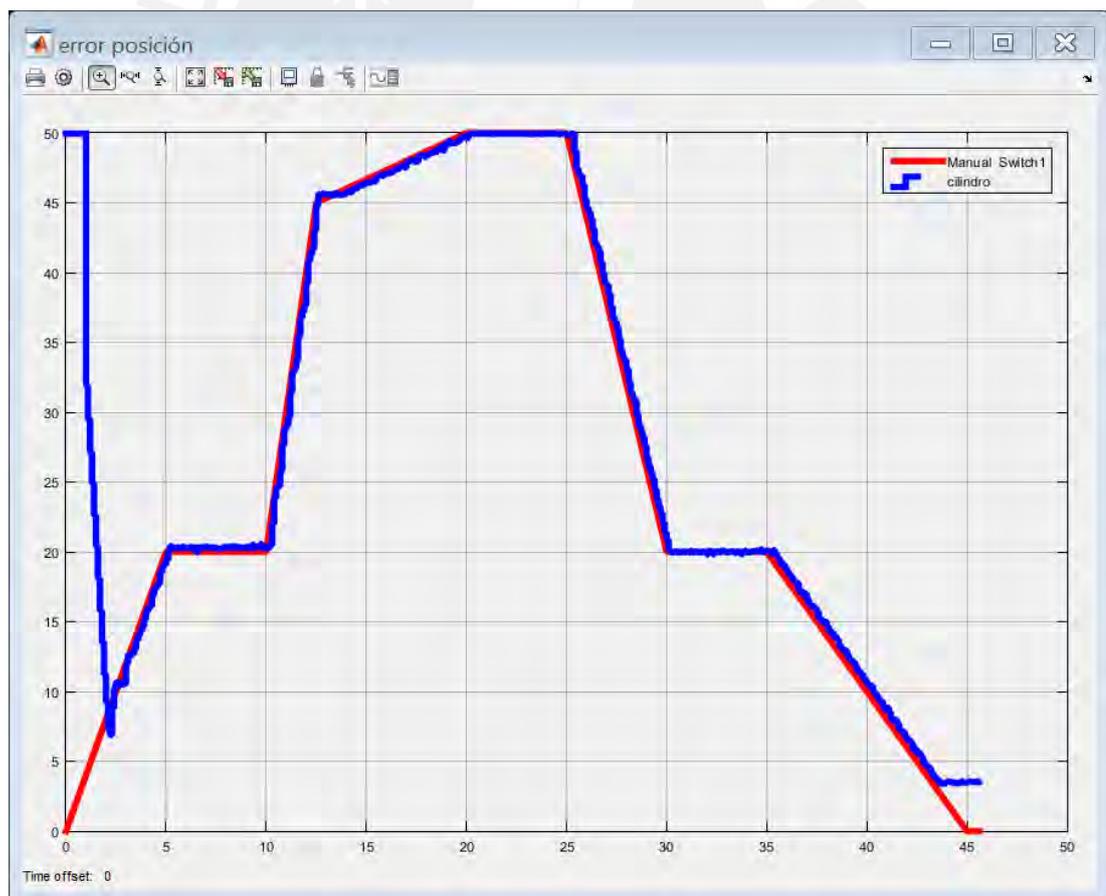


Figura 4.28 – Curva de respuesta ajustada ante señal pre definida – validación

4.4. Comparación del controlador difuso versus controlador PID

4.4.1. Implementación del controlador PID

Para comparar los resultados entre un controlador difuso y otro con control PID, se agrega en el diagrama de bloques de Simulink, un controlador PID en paralelo con un switch antes del ingreso a la función de transferencia como se muestra en la figura 4.29

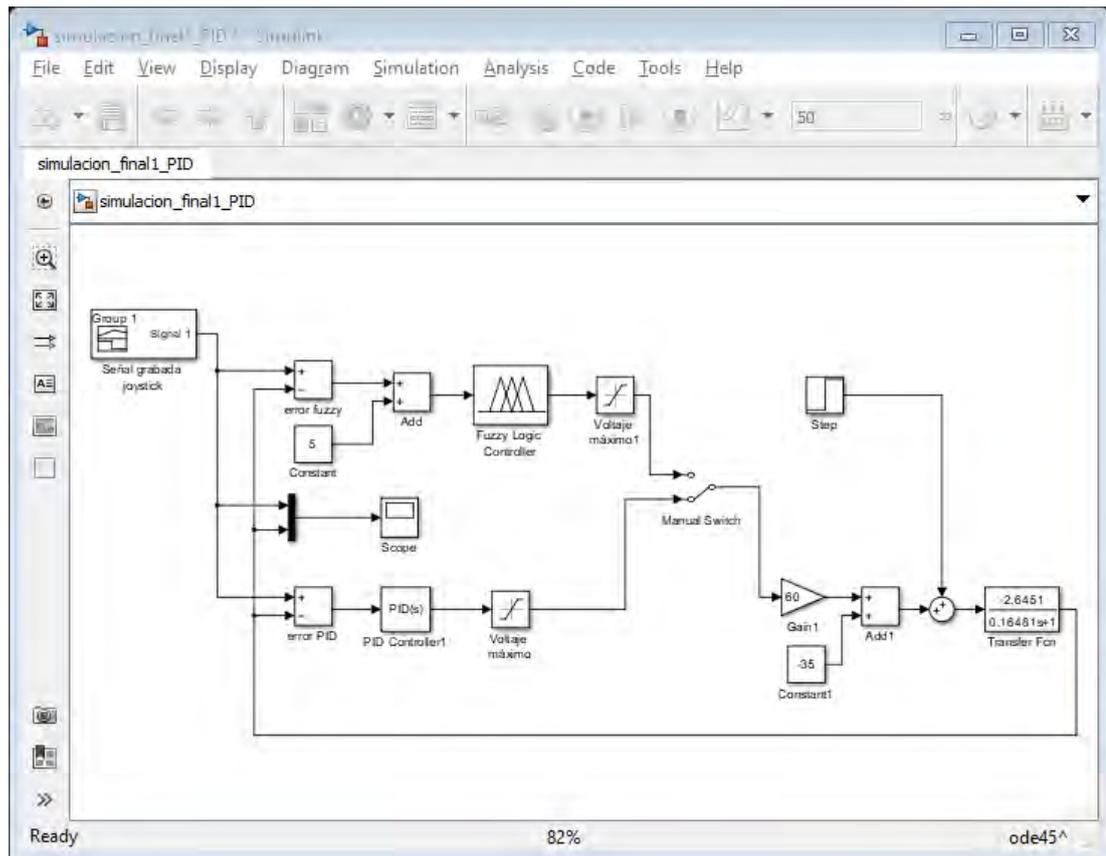


Figura 4.29 – Diagrama de comparación entre un controlador difuso y uno PID

Es posible usar la función Tune del programa Simulink para encontrar los parámetros del controlador, pero se usará un método convencional. La fórmula del controlador PID tipo paralelo a usar es:

$$P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \frac{1}{s}}$$

Para la sintonización del controlador PID, se hace uso del primer método de sintonización de Ziegler – Nichols (Ogata, 2010). Este método se aplica si la curva de respuesta a una entrada escalón, tiene como resultado una respuesta con forma

de S. De la figura 2.16 se observa que la curva de respuesta cumple con el requisito de la regla.

Para obtener los parámetros T y L del primer método de sintonía de Ziegler y Nichols, debemos trazar una recta tangente al punto de inflexión como se muestra en la figura 4.30. Luego completamos las líneas restantes y determinamos los parámetros T y L.

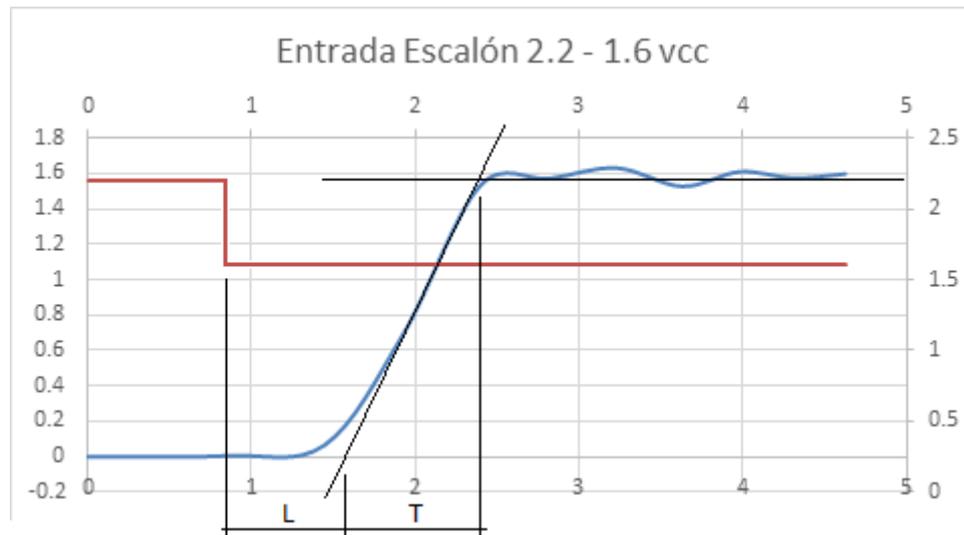


Figura 4.30 – Parámetros L y T de la curva de respuesta

Se observa de la figura 4.30 que el valor de T es ligeramente mayor que L. De acuerdo al primer método de Ziegler – Nichols para un controlador proporcional el valor del parámetro P se determina como:

$$P = \frac{T}{L}$$

De la figura 4.30 se observa también que una entrada escalón descendente genera una curva de respuesta ascendente, por tal razón, el parámetro se modificará al valor siguiente:

$$P = -\frac{T}{L}$$

Cargamos el parámetro P en el bloque de parámetros de Simulink como se muestra en la figura 4.31, y luego hacemos pruebas de seguimiento a una señal pre definida como se muestra en la figura 4.32. Luego de aplicar la simulación con la señal de entrada pre definida, se observa que los resultados son muy satisfactorios con un error casi cero.

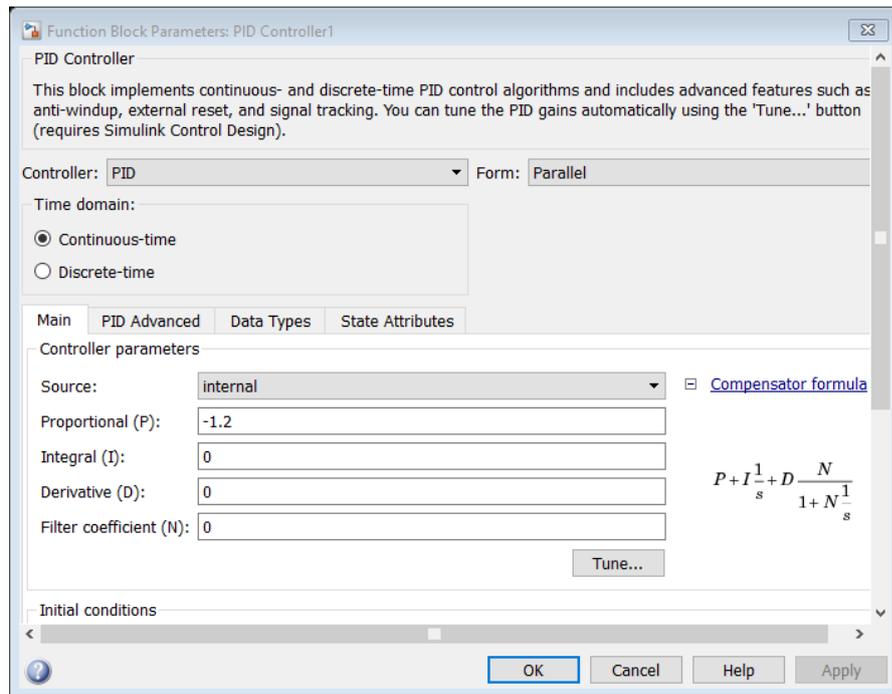


Figura 4.31 – Carga del parámetro P para el controlador proporcional

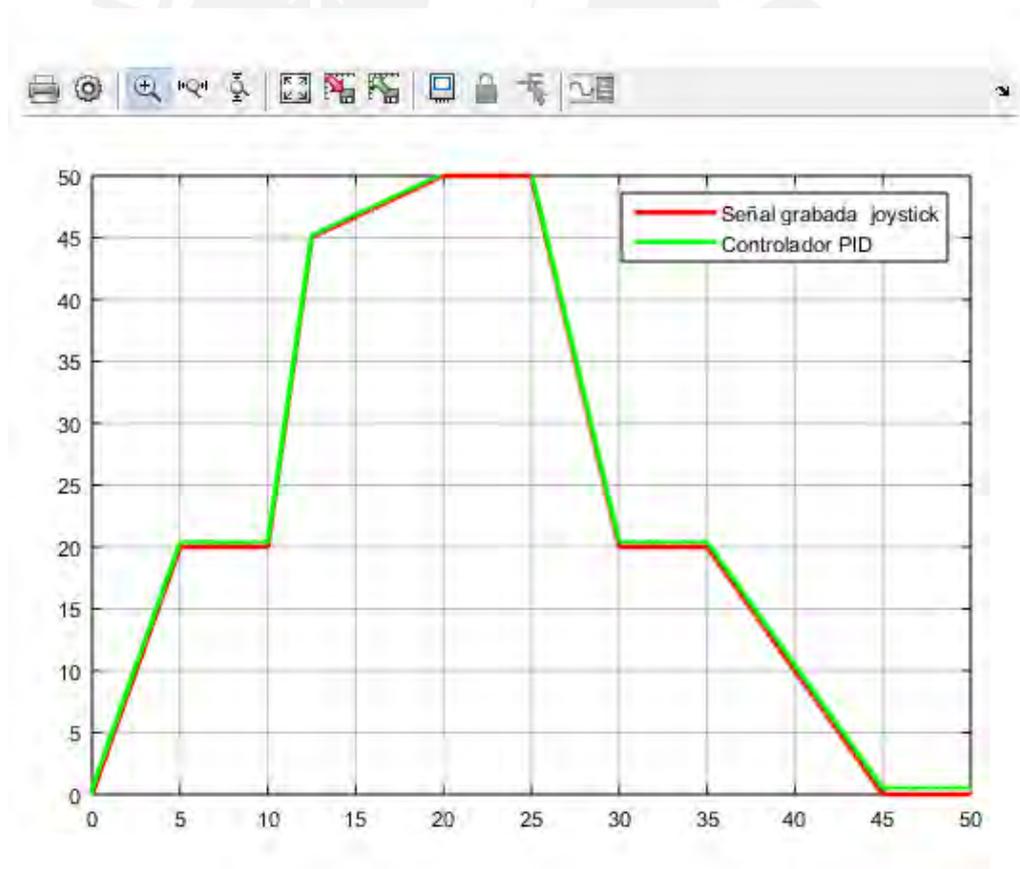


Figura 4.32 – Respuesta del controlador PID ante señal de entrada pre definida

4.4.2. Comparación de respuestas entre controlador difuso y controlador PID ante señal de entrada pre definida

Se procede a generar una perturbación tipo escalón como se muestra en la figura 4.29. Esta perturbación inicial se introducirá en el tiempo de 7.5 segundos luego de iniciada la simulación y tendrá una magnitud de 5 como se muestra en la figura 4.33.

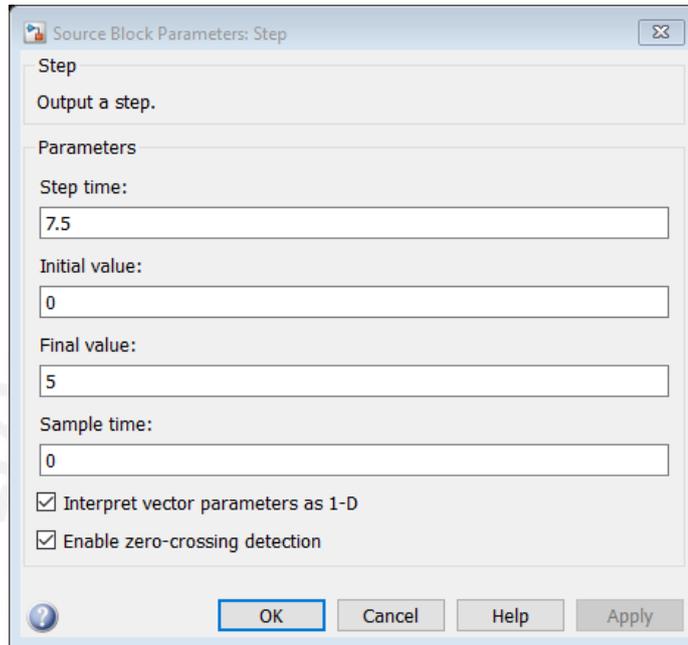
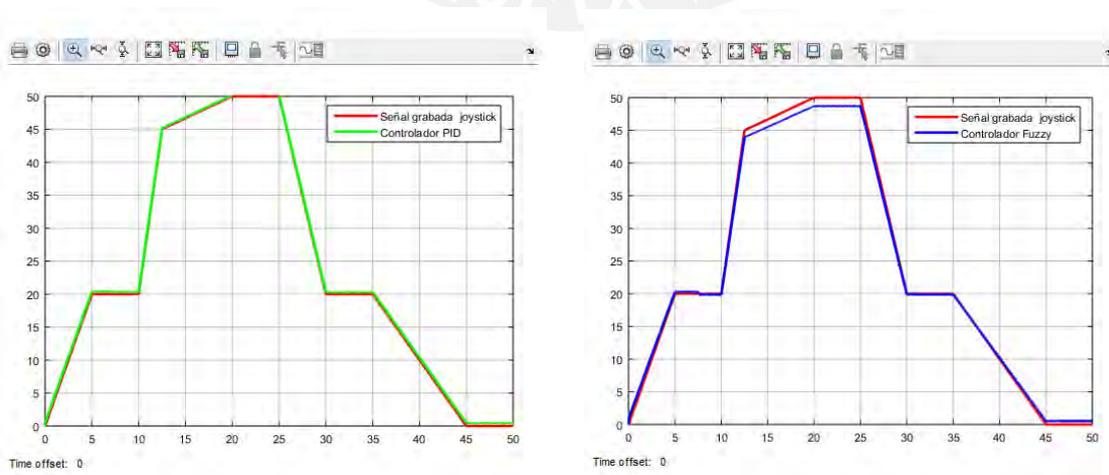


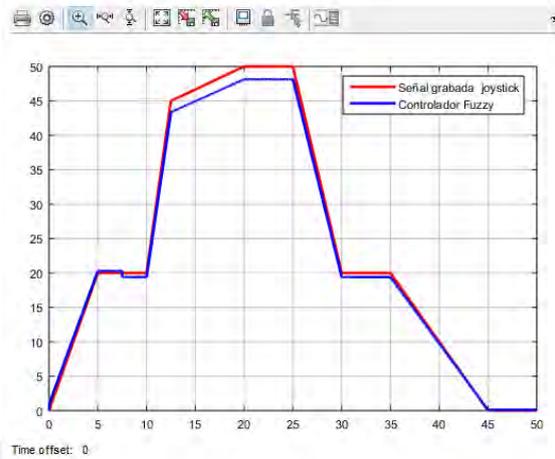
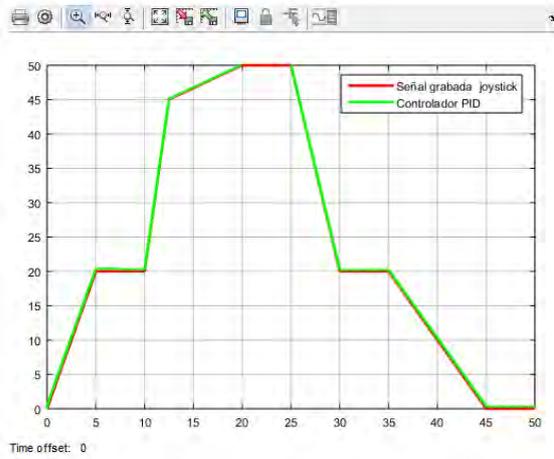
Figura 4.33 – Ingreso de perturbación en el bloque de simulación

Se muestra a continuación, los resultados obtenidos para diferentes valores de perturbación utilizando el controlador difuso y el PID.

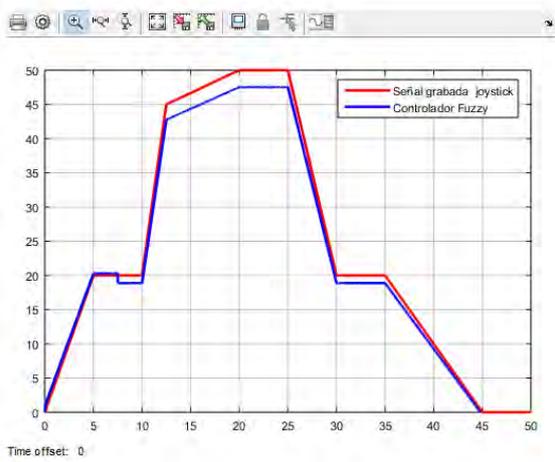
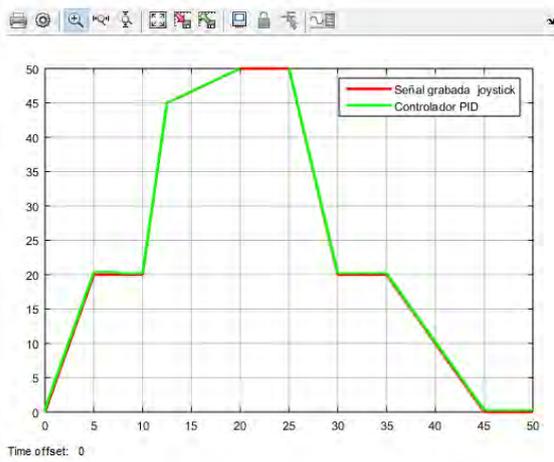
Resultados con perturbación =5



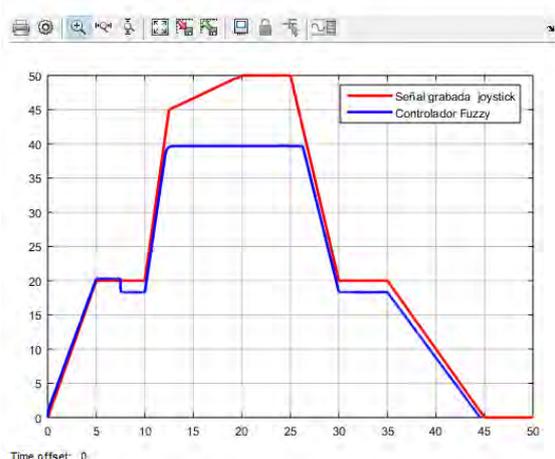
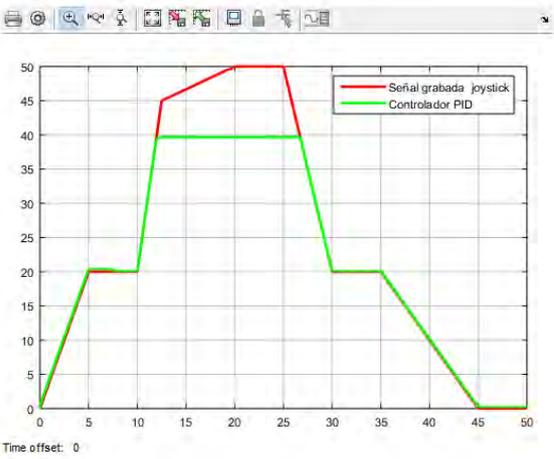
Resultados con perturbación = 10



Con perturbación de 15



Con perturbación igual a 20



Se observa que hasta un valor de perturbación igual a 15, el controlador PID tiene una mejor respuesta que el controlador difuso.

4.5. Análisis de resultados

- Existen pequeñas diferencias, entre los resultados obtenidos mediante la simulación y la validación del algoritmo de control, lo que demuestra que el modelo matemático obtenido es muy adecuado.
- El controlador difuso amortigua las perturbaciones externas como se demuestra en la sección 4.2.3 donde para una magnitud de 4 en la entrada escalón se obtiene una variación en el error de 1.65%, valor que no influirá mayormente en la aplicación en el cargador frontal.
- El modelo matemático, indica un retardo de 1.5 segundos en la respuesta al inicio de la validación. Esto se debe, a que en la validación es necesario acondicionar las señales para poder trabajar con una tarjeta Arduino Mega 2560 cuyos valores de voltaje oscilan de 0 a 5vcc, como es el caso de la señal de salida de la tarjeta Arduino hacia la válvula proporcional, la cual requiere el uso de un amplificador. El tiempo de procesamiento para la comunicación entre la computadora y la tarjeta Arduino, influye también en el retardo de la respuesta. Sin embargo, dicho retardo inicial, es rápidamente atenuado por el controlador difuso y no genera impacto en el resto de la prueba.
- A pesar de las diferencias mencionadas entre la simulación y validación, se demuestra la eficacia del controlador difuso para controlar la posición de un cilindro hidráulico con velocidades de hasta 0.01m/seg.
- A pesar que la salida de voltaje de la tarjeta Arduino varía desde 0@5vcc, fue necesario incrementar el rango de voltaje de salida del controlador difuso desde -4@9vcc, con el fin de forzar un mayor voltaje de salida hacia la válvula proporcional.

4.6. Recomendaciones para la implementación

A fin de implementar el estudio mostrado en el mini cargador, se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- Se requiere implementar, sensores de posición en los cilindros de levantamiento y volteo de cucharón. Tener en cuenta que, el voltaje de trabajo del equipo es de 12vcc, por lo que dichos sensores deben ser seleccionados para trabajar con ese valor de voltaje.

- Se deben cambiar las válvulas hidráulicas de control de implementos de accionamiento por mando de aceite hidráulico, a válvulas con mando electrónico proporcional. El tamaño y configuración de la válvula deben mantenerse ya que solo se requiere cambiar el tipo de accionamiento.
- Se debe cambiar el mando de aceite hidráulico “joystick”, por otro electrónico de modo que, permita interactuar el mando con el sistema de control difuso que trabaja con señales eléctricas y por consiguiente, ya no con señales de aceite hidráulico de mando.
- Se requiere la implementación de un controlador electrónico, que permita cargar el software con el controlador difuso. Este controlador, debe permitir también recibir las señales de los sensores de posición y enviar el voltaje proporcional hacia las válvulas hidráulicas, que controlarán los movimientos de los cilindros. Este controlador debe estar conectado con el sistema de arranque del equipo, a fin de que se active durante el encendido de la máquina, e incluir protección desde la caja de fusibles del mini cargador frontal.



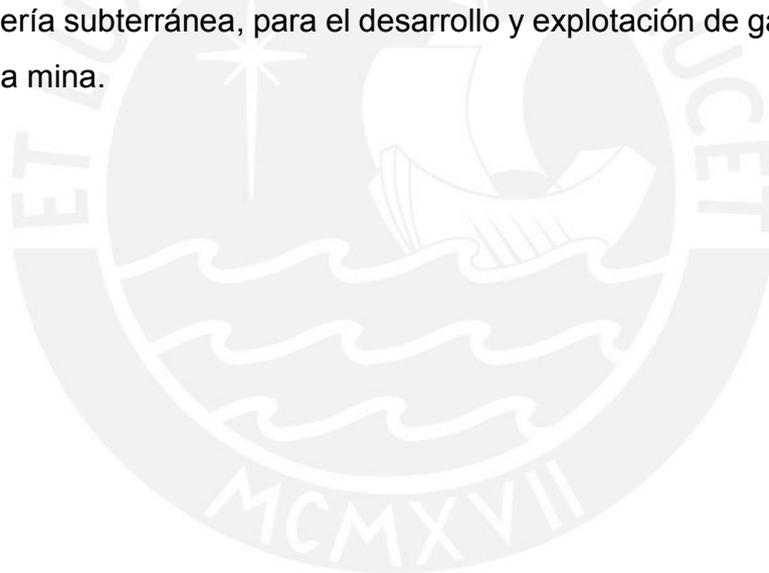
5. CONCLUSIONES

- Se logró identificar, el modelo matemático del módulo de prueba al utilizar el método no paramétrico de análisis de la respuesta en el tiempo empleando la respuesta al escalón. Para ello, se proporcionó señales de entrada (en voltios) de forma progresiva y se midió la velocidad de respuesta de la planta. Se tabuló y graficó las señales de entrada versus la velocidad de respuesta, para determinar una región lineal donde se aplicó una entrada escalón, para obtener una respuesta dinámica de la planta. Con los datos de la respuesta dinámica obtenidos, se usó luego el software Matlab para determinar el modelo de la planta.
- Se consiguió diseñar y probar un controlador difuso, para reproducir los movimientos de carga y descarga realizados por un cilindro hidráulico, el cual formaría parte del sistema de implementos del mini cargador frontal. Se probó la eficacia del diseño en el modelo matemático y en el módulo de pruebas, donde se obtuvo resultados satisfactorios en ambas pruebas.
- Se seleccionó e instaló un módulo hidráulico de pruebas para demostrar, de manera física, el funcionamiento del control difuso. Para ello se usó una tarjeta Arduino como tarjeta de adquisición de datos, un PLC Siemens para acondicionar la señal de la tarjeta Arduino hacia la válvula proporcional, componentes hidráulicos como válvulas y cilindro, un sensor de posición y una computadora con software Simulink de Matlab, donde se cargó el bloque de control difuso, que ejerce el control sobre el funcionamiento del sistema.
- Se proporcionó alcances para la implementación del control difuso en el mini cargador frontal, considerando la adición de sensores y cambio de componentes; con el fin de que puedan trabajar con el nuevo sistema de control difuso, el cual necesita señales eléctricas para controlar el sistema de implementos del equipo.

6. RECOMENDACIONES

Se demuestra con el presente trabajo que el uso del control difuso permite resolver necesidades de control, usando un nivel matemático mucho más simple que otras formas de control, tales como el control usando redes neuronales o el análisis, en el dominio de la frecuencia, de modelos matemáticos, ya que genera la posibilidad de difundir su uso como herramienta para iniciarse en el estudio de la ingeniería de control.

Se ha demostrado que es posible seguir una señal pre determinada con bastante precisión. La aplicación de esta metodología podría además usarse para el movimiento de varios cilindros hidráulicos al mismo tiempo lo que permitiría el control de equipos más complejos, como los sistemas de posicionamiento en vigas de perforación de equipos Boomer usados en minería subterránea, para el desarrollo y explotación de galerías al interior de la mina.



7. BIBLIOGRAFIA

- Arduino. (14 de Junio de 2017). *2017 Arduino*. Obtenido de www.arduino.cc
- Atlas Copco Company. (14 de Junio de 2017). *Atlas Copco Group*. Obtenido de <http://www.atlascopcogroup.com/en/media/innovation-stories/2015/insight-on-automation>
- Bosch Rexroth. (2016). DS4 Hydraulic Training System. *Drive and Control Academy*, 9-45.
- Bosch Rexroth. (2016). *Hydraulics. Basics Principles and Components*. Wurzburg, Alemania: Drive and Control Academy.
- Bosch Rexroth. (2016). *Hydrostatic Drives with Secondary Control*. Wurzburg, Alemania: Drive and Control Academy.
- Bosch Rexroth. (14 de Junio de 2017). *Válvulas Proporcionales Direccionales 4/2 y 4/3 OBE*. Obtenido de https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/rs29061_2012-11.pdf?db=brmv2&lvid=1168171&mvid=12783&clid=20&sid=F2E8DFA689209296AE44B3C90B3D864C.borex-tc&sch=M&id=12783,20,1168171
- Caterpillar Inc. (2007). ASHQ5896-1 (11-07). *Specalog 232B Serie 2*, 2.
- Caterpillar Inc. Company. (2008). *Caterpillar Performance Handbook*. Peoria, Illinois, USA: Caterpillar Inc.
- Cattron Group International. (14 de Junio de 2017). *www.cattron.com*. Obtenido de <http://www.cattron.com/dnn/Portals/0/pdf/brochures/LHD.pdf>
- Chaturvedi, D. K. (2010). *Modeling and Simulation of Systems Using Matlab and Simulink*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Gilat, A. (2011). *Matlab, An Introduction with Application. Cuarta Edición*. Columbus, Ohio, USA.: John Wiley and Sons, Inc.
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 1219-1:2012*. Geneva, Suiza: International Organization for Standardization.
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de Control Automático*. Illinois: Prentice Hall-Inc.
- Morán Cardenas, A. (4 de Junio de 2004). Intelligent Car Parking Using Fuzzy Neural Networks. Miami, Florida, USA: LACCEI 2004.
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinaria*. Mexico DF: McGraw-Hill Companies .
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, España: Prentice Hall.
- Siemens AG. (14 de Junio de 2017). *Siemens web site*. Obtenido de www.siemens.com

The MathWorks Inc. (14 de Junio de 2017). *MathWorks web site*. Obtenido de www.mathworks.com

Verlohren, C. (2010). Applying Optimal Control Using SLP on a Hydraulic System. *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 6.

