



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Implementación de un controlador basado en lógica borrosa aplicado a la válvula de impulso de un prototipo de ariete hidráulico para garantizar un bombeo permanente de agua

JORGE ENRIQUE FLORES CAYANCELA

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Riobamba-Ecuador

Mayo 2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, denominado: "Implementación de un controlador basado en lógica borrosa aplicado a la válvula de impulso de un prototipo de ariete hidráulico para garantizar un bombeo permanente de agua", de responsabilidad del señor Jorge Enrique Flores Cayancela, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Ing. Jorge Luis Paucar Samaniego, Msc
PRESIDENTE

Ing. Jorge Luis Hernández Ambato, PhD.
DIRECTOR

Ing. Jesús Alberto Rodríguez Flores, PhD.
MIEMBRO

Ing. Gabriel Esteban Asqui Santillán, Msc.
MIEMBRO

Riobamba, mayo 2023

© 2023, Jorge Enrique Flores Cayancela

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Jorge Enrique Flores Cayancela, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

Jorge Enrique Flores Cayancela
C.I.: 060360526-2

DEDICATORIA

Dedico este logro alcanzado principalmente a Dios cuyo nombre es Jehová, por colmarme de sus bendiciones y por permitirme dar un paso más en mi vida profesional. A mi esposa Paulina, mi hijita Paulita, a mi madre Anita y mi hermano Julito por estar a mi lado en los momentos más difíciles de mi vida y permitirme cumplir con este anhelado objetivo, demostrándome siempre su amor y apoyo incondicional.

A todas y cada una de las personas que ayudaron directa e indirectamente en la culminación de este proyecto.

Jorge

AGRADECIMIENTO

Después de agradecer a Dios Todopoderoso por permitirme tener sabiduría en la ciencia y los avances tecnológicos para realizar proyectos de investigación y culminarlos con satisfacción, agradezco a mi amada esposa Paulina Guevara y a mi pequeña hijita Paulita que han demostrado la paciencia necesaria para poder cumplir mis objetivos, siendo mi pilar fundamental en la conclusión del presente proyecto.

También, extiendo mis agradecimientos a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial al Instituto de Posgrados y Educación Continua por su programa de Maestría en Sistemas de Control y Automatización Industrial.

De manera especial agradezco a los miembros del tribunal al Ing. Jorge Hernández Ph.D. en calidad de director, al Ing. Jesús Rodríguez Ph.D y al Ing. Gabriel Asqui Mgs por guiarme en el trascurso de la elaboración del proyecto de titulación, sus enseñanzas y tiempo que ha permitido culminar el proyecto de titulación.

Por último, agradezco a todas las personas que de una u otro forma aportaron para que el presente proyecto haya llegado a feliz término.

Jorge

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xviii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.1. <i>Formulación del problema</i>	3
1.1.2. <i>Preguntas directrices o específicas de la investigación</i>	3
1.2. Justificación de la investigación.....	3
1.3. Objetivos de la investigación	5
1.3.1. <i>General</i>	5
1.3.2. <i>Específicos</i>	5
1.4. Hipótesis de la investigación	5
1.4.1. <i>General</i>	5
1.4.2. <i>Específica</i>	5
CAPÍTULO II	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes de la investigación.....	7
2.2. Arietes hidráulicos	8
2.2.1. <i>Configuración general del ariete hidráulico</i>	8
2.2.2. <i>Configuración general del ariete hidráulico</i>	9
2.2.3. <i>Etapas y explicación del fenómeno de golpe de ariete</i>	9
2.3. Sistemas de control.....	13
2.3.1. <i>Tipos de sistemas de control</i>	13
2.3.1.1. <i>Sistema de control de lazo abierto</i>	14
2.3.1.2. <i>Sistema de control de lazo cerrado</i>	14
2.4. Controladores básicos en lazo cerrado.....	15
2.5. Controlador inteligente.....	17
2.5.1. <i>Técnicas de Control Inteligente</i>	17

2.5.1.1.	<i>Sistemas expertos</i>	17
2.5.1.2.	<i>Lógica difusa</i>	18
2.5.1.3.	<i>Redes neuronales</i>	19
2.5.1.4.	<i>Algoritmos genéticos</i>	19
2.5.2.	Concepto de lógica borrosa	20
2.5.2.1.	<i>Características de la lógica difusa</i>	23
2.5.3.	Base matemática de la lógica difusa	24
2.5.3.1.	<i>Conjuntos difusos</i>	24
2.5.3.2.	<i>Funciones de membresía</i>	25
2.5.3.3.	<i>Operaciones difusas</i>	28
2.5.3.4.	<i>Variable lingüística</i>	29
2.5.3.5.	<i>Sistema de inferencia difusa</i>	30
2.5.3.6.	<i>Módulo de fusificación</i>	31
2.5.3.7.	<i>Base de Reglas y motor de Inferencia</i>	32
2.5.3.8.	<i>Base de conocimiento</i>	33
2.5.3.9.	<i>Lógica de decisiones</i>	34
2.5.3.10.	<i>Módulo de Defusificación</i>	34
2.5.4.	Reglas tipo Mamdani	35
CAPÍTULO III		37
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	37
3.1.	Identificación de variables	37
3.1.1.	<i>Variables independientes</i>	37
3.1.2.	<i>Variables dependientes</i>	37
3.2.	Operacionalización de variables	37
3.3.	Matriz de Consistencia	39
3.4.	Tipo y diseño de la investigación	40
3.5.	Alcance de la investigación	41
3.6.	Población de estudio	41
3.6.1.	<i>Unidad de análisis</i>	41

3.7.	Diseño experimental.....	42
3.8.	Cronograma de actividades.....	42
3.9.	Presupuesto.....	42
CAPÍTULO IV		43
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1.	Diseño mecánico	43
4.1.1.	<i>Introducción</i>	43
4.1.2.	<i>Parámetros de diseño para el prototipo de ariete hidráulico</i>	43
4.1.3.	<i>Altura entre el pozo de captación y el ariete hidráulico</i>	44
4.1.4.	<i>Pozo de captación</i>	44
4.1.5.	<i>Cálculo de la distancia entre el pozo de captación y el ariete</i>	44
4.1.6.	<i>Selección del diámetro óptimo de la tubería de impulsión</i>	45
4.1.7.	<i>Cálculo del área de la tubería de impulsión</i>	47
4.1.8.	<i>Velocidad del agua calculada dentro de la tubería de impulsión</i>	47
4.2.	Volumen del pozo de captación.....	47
4.3.	Altura máxima del agua descargada	49
4.4.	Cálculo de (Hr) total de pérdidas	49
4.4.1.	<i>Cálculo del coeficiente de resistencia (λ)</i>	49
4.4.2.	<i>Cálculo del parámetro principal (Número de Reynolds)</i>	50
4.4.2.1.	<i>Obtención de la Rugosidad relativa.....</i>	51
4.4.3.	<i>Cálculo de la sumatoria (ΣK)</i>	51
4.4.4.	<i>Resistencia de la válvula de impulsión</i>	52
4.4.5.	<i>Cálculo de la velocidad de apertura y cierre de la válvula de impulsión</i>	53
4.5.	Cálculo de la presión (Ht) total de la carga ejercida en la válvula de impulsión	54
4.6.	Diseño y construcción de la válvula de impulsión	55
4.6.1.	<i>Cálculo del espesor de asiento y el diámetro de la válvula de impulsión</i>	55
4.6.2.	<i>Cálculo del diámetro (dv) del vástago</i>	56
4.6.3.	<i>Cálculo de la distancia de cierre de la válvula de impulsión</i>	57

4.6.4.	<i>Longitud del vástago</i>	58
4.6.5.	<i>Cálculo el peso (W) de la válvula de impulsión</i>	58
4.6.6.	<i>Cálculo del peso del vástago</i>	59
4.6.7.	<i>Cálculo del área de cierre de la válvula de impulsión</i>	60
4.7.	Cálculo del coeficiente de resistencia de cierre	60
4.8.	Cálculo del peso máximo requerido de la válvula de impulsión	61
4.9.	Diseño y construcción de la válvula de descarga	62
4.9.1.	<i>Cálculo del área de paso de la válvula de descarga</i>	62
4.9.2.	<i>Cuerpo del ariete</i>	64
4.9.3.	<i>Ensamblaje del ariete hidráulico</i>	65
4.9.4.	<i>Tubería de alimentación</i>	65
4.9.5.	<i>Sistema de control en la válvula de impulso</i>	65
4.10.	Diseño del Circuito Electrónico	75
4.11.	Condiciones de operación de la bomba de ariete en lazo abierto	78
4.12.	Obtención de modelo de tiempo muerto más sistema de primer orden	80
4.12.1.	<i>Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional</i>	81
4.12.2.	<i>Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional integral</i>	82
4.12.3.	<i>Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional integral ante perturbación de caudal</i>	83
4.12.4.	<i>Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional integral derivativo</i>	84
4.12.5.	<i>Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional integral derivativo ante perturbación de caudal</i>	86
4.12.6.	<i>Obtención de un modelo de primer orden más tiempo muerto</i>	87
4.13.	Parametrización de un controlador PI difuso, de tipo Mamdani, para caudal y nivel	90
4.14.	Control de la Válvula de Impulso	93
4.15.	Programación en la tarjeta de desarrollo STM32 – F030R8	93
CAPÍTULO V		94

5.	PROPUESTA	94
5.1.	Consideraciones Generales.....	94
5.2.	Descripción del plan de trabajo	94
5.3.	Objetivo del proyecto.....	94
5.4.	Metodología propuesta	95
5.4.1.	<i>Investigación y análisis</i>	<i>95</i>
5.4.2.	<i>Diseño y desarrollo del prototipo</i>	<i>95</i>
5.4.3.	<i>Integración de componentes</i>	<i>95</i>
5.4.4.	<i>Prueba y evaluación</i>	<i>95</i>
5.4.5.	<i>Mejora continua</i>	<i>95</i>
5.4.6.	<i>Informe final y presentación.....</i>	<i>95</i>
5.5.	Impacto esperado	96
	CONCLUSIONES	97
	RECOMENDACIONES	98
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3: Operacionalización de variables.....	38
Tabla 2-3: Operacionalización de variables, relación de dependencia, orden para la obtención de parámetros.....	39
Tabla 3-3: Matriz de Consistencia	40
Tabla 4-3: Tipo de caso que define la unidad de análisis en la investigación.....	41
Tabla 5-3: Cronograma de actividades para realizar la investigación y tesis	42
Tabla 6-3: Costo asociado a la investigación y redacción del documento de tesis	42
Tabla 1-4: Características de tuberías de varios materiales	46
Tabla 2-4: Valores K para algunos accesorios.....	52
Tabla 3-4: Especificaciones del Potenciómetro Lineal.....	66
Tabla 4-4: Tensión en función de la distancia del potenciómetro lineal.....	66
Tabla 5-4: Reglas que vinculan el antecedente y el consecuente.....	70
Tabla 6-4: Características del Motor DC	71
Tabla 7-4: Revoluciones del Motor DC.....	71
Tabla 8-4: Características Puente H L298N.....	72
Tabla 9-4: Características del Caudalímetro YF-DN50.....	73
Tabla 10-4: Caudal vs Distancia	73
Tabla 11-4: Características del Microcontrolador STM32-F030R8	75
Tabla 12-4: Etiqueta de Entradas y Salidas de la STM32-F030R8.....	76
Tabla 13-4: Reglas que vinculan el antecedente y el consecuente del controlador difuso Mamdani para la bomba de ariete.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Funcionamiento del ariete hidráulico.....	1
Figura 2-1: Ejemplo de comunidad rural cercana a una fuente de agua natural.....	4
Figura 1-2: Configuración típica de una bomba de ariete.....	8
Figura 2-2: Onda en retroceso ocasionado por el cierre instantáneo de una válvula.....	9
Figura 3-2: Movimiento del líquido en la tubería sin perturbaciones.....	10
Figura 4-2: Cierre súbito de la válvula de paso.....	10
Figura 5-2: Propagación de onda de presión.....	11
Figura 6-2: Dilatación de la tubería.....	11
Figura 7-2: Tubería en la parte izquierda contraída.....	11
Figura 8-2: Tubería sin esfuerzos internos que afecte su diámetro.....	11
Figura 9-2: Depresión en la mitad de la tubería.....	12
Figura 10-2: Depresión en toda la tubería de alimentación.....	12
Figura 11-2: Tubería en la parte izquierda en movimiento.....	12
Figura 12-2: Tubería en la parte izquierda en movimiento.....	13
Figura 13-2: Esquema sistema de control de lazo abierto.....	14
Figura 14-2: Esquema sistema de control de lazo cerrado.....	15
Figura 15-2: Modelo simplificado que se emplea para la caracterización difusa de la salida considerando entradas reales.....	21
Figura 16-2: Universo de un conjunto difuso.....	22
Figura 17-2: Función de pertenencia triangular o delta.....	25
Figura 18-2: Función de pertenencia sigmoideal.....	26
Figura 19-2: Función de pertenencia trapezoidal.....	26
Figura 20-2: Función de pertenencia gaussiana.....	27
Figura 21-2: Función de pertenencia singleton.....	27
Figura 22-2: Representación de operaciones lógicas de unión, intersección y complemento.....	29
Figura 23-2: Arquitectura de un sistema de inferencia borrosa o difusa.....	31
Figura 24-2: Ejemplo de un universo del discurso (dominio de la variable) fraccionado en funciones de pertenencia (o atributos).....	33
Figura 25-2: Grafica de la agregación de consecuentes, a) empleando la defusificación por truncamiento, b) empleando la defusificación por escalamiento.....	34
Figura 1-4: Configuración típica de una bomba de ariete.....	43
Figura 2-4: Tanque de suministro de agua para el ariete hidráulico.....	48
Figura 3-4: Válvula de impulso.....	55
Figura 4-4: Asiento y vástago de válvula.....	57

Figura 5-4: Válvula de descarga.	62
Figura 6-4: Cuerpo principal del ariete hidráulico.	64
Figura 7-4: Ensamblaje total del ariete hidráulico.	65
Figura 8-4: Tubería de alimentación e instalación total del ariete hidráulico.	65
Figura 9-4: Potenciómetro Lineal.	66
Figura 10-4: Sistema difuso Mamdani para caracterizar el peso digital en función de la posición.	69
Figura 11-4: Motor DC.	70
Figura 12-4: Puente H L298N	71
Figura 13-4: Caudalímetro YF-DN50	72
Figura 14-4: Final de Carrera	74
Figura 15-4: STM32 Núcleo F030R8	75
Figura 16-4: Esquema Gráfico del Circuito Electrónico.	76
Figura 17-4: Esquema de conexión en el software Proteus.	77
Figura 18-4: Diseño PCB en el software Proteus.	77
Figura 19-4: Resultado del Circuito Electrónico.	78
Figura 20-4: Regulación PI difuso de a) caudal y b) Cota o nivel.	93

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4: Gráfica Peso digital vs distancia del potenciómetro lineal.....	67
Gráfico 2-4: Gráfica Peso digital vs distancia del potenciómetro lineal, trazo rojo, y su predicción o curva de ajuste, trazo azul.....	68
Gráfico 3-4: a) funciones de pertenencia del Universo del Discurso de la posición, b) funciones de pertenencia del Universo del Discurso de valores digitales.....	69
Gráfico 4-4: Gráfica Peso digital vs distancia del potenciómetro lineal, trazo rojo, y su predicción difusa o caracterización, trazo azul.....	70
Gráfico 5-4: Modelo Caudal vs Distancia.....	74
Gráfico 6-4: Condiciones de cota y caudal de entrada a la bomba de ariete, a) cota reservorio, b y c) caudal de entrada a la bomba de ariete.	79
Gráfico 7-4: Espectro del caudal de entrada a la bomba de ariete.	79
Gráfico 8-4: Condiciones de cota y caudal de salida de la bomba de ariete.	80
Gráfico 9-4: Comportamiento de la bomba de ariete con un control proporcional, para cuando se cierra el lazo de control considerando la altura y una consigna de altura.....	81
Gráfico 10-4: a) Caudal de entrada a la bomba de ariete, b) Acercamiento que aprecia la pulsación del caudal debido al golpe de ariete.....	82
Gráfico 11-4: a) Cota de agua a la salida de la bomba de ariete, b) Acercamiento que aprecia la variación de la cota debido al golpe de ariete.	82
Gráfico 12-4: a) Comportamiento del caudal de salida de la bomba de ariete, b) Pulsación del caudal debido a la variación de cota de salida.	83
Gráfico 13-4: a) Comportamiento de la cota del reservorio de la bomba de ariete, b) Comportamiento del caudal de entrada a la bomba de ariete.	84
Gráfico 14-4: a) Comportamiento del caudal de salida de la bomba de ariete, b) Pulsación del caudal debido a la variación de cota de salida.	84
Gráfico 15-4: a) Caudal de entrada a la bomba de ariete, b) Acercamiento que aprecia la pulsación del caudal debido al golpe de ariete.....	85
Gráfico 16-4: a) Cota de agua a la salida de la bomba de ariete, b) Acercamiento que aprecia la variación de la cota debido al golpe de ariete.	85
Gráfico 17-4: a) Comportamiento del caudal de salida de la bomba de ariete, b) Pulsación del caudal debido a la variación de cota de salida.	85
Gráfico 18-4: a) Comportamiento de la cota del reservorio de la bomba de ariete, b) Comportamiento del caudal de entrada a la bomba de ariete.	86
Gráfico 19-4: a) Comportamiento del caudal de salida de la bomba de ariete, b) Pulsación del caudal debido a la variación de cota de salida.	87

Gráfico 20-4: Comportamiento instantáneo de la cota de bombeo tanto del sistema de la bomba de ariete como de su modelo.	88
Gráfico 21-4: Comportamiento instantáneo de la orden de control o ciclo útil, tanto del sistema de la bomba de ariete como de su modelo.	88
Gráfico 22-4: Comportamiento instantáneo del caudal de bombeo tanto del sistema de la bomba de ariete como de su modelo.	89
Gráfico 23-4: Comportamiento instantáneo de la orden de control o ciclo útil, tanto del sistema de la bomba de ariete como de su modelo.	89
Gráfico 24-4: a) Superficie inicial determinada por los centroides del universo de salida, b) Superficie final determinada por los centroides del universo de salida.	90
Gráfico 25-4: a) Evolución del factor de correlación cuadrático multivariable, b) Evolución de la función de costo.	90
Gráfico 26-4: Evolución de los centroides de las funciones de pertenencia del universo de salida del controlador.	91
Gráfico 27-4: Estructura del sistema difuso Mamdani para el control.	91
Gráfico 28-4: funciones de pertenencia asociada a) al efecto proporcional b) al efecto integral, y c) a la salida del controlador.	92

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Viscosidad cinemática del agua

ANEXO B: Coeficiente de rugosidad absoluta del hierro galvanizado

ANEXO C: Diagrama de Moody

ANEXO D: Valores K para accesorios en tuberías

ANEXO E: Módulo de elasticidad del agua

RESUMEN

La necesidad de ciertas poblaciones del Ecuador por abastecerse del líquido vital, en zonas donde carecen total o parcialmente de agua de riego, ha impulsado a sus moradores a buscar fuentes de agua natural en las entrañas de las montañas, alejadas de cualquier tipo de energía que pudiera ser utilizada para el funcionamiento de alguna máquina que ayude a bombear agua a sus tierras. Sin embargo, las bombas basadas en arietes hidráulicos son una alternativa viable al no utilizan energía eléctrica ni combustibles, pero resultando ineficientes a las variaciones de caudal. Si existe una caída de caudal de agua y se viera afectado el depósito de donde se alimenta el ariete hidráulico, simplemente deja de funcionar o no es aprovechado su máximo potencial. Este estudio se centra en la necesidad de aplicar métodos y estrategias de control para implementar una plataforma embebida que actúe sobre las partes más sensibles de esta máquina y así mejorar su desempeño. En específico, se propone un control basado lógica difusa que actúe sobre la válvula de impulsión que permita retrasar o adelantar el cierre de dicha válvula con el fin de compensar las variaciones de caudal. Los resultados obtenidos de los experimentos realizados con un control basado en el método de Mamdani y un prototipo de ariete, demuestran que el sistema de control funciona de manera efectiva, ya que tiene un amplio rango de actuación sobre los datos medidos. Esto permitió que el sistema de control realice variaciones oportunas en el cierre y apertura de la válvula de impulsión cuando existan variaciones de caudal en desde el depósito de almacenamiento.

Palabras claves: < ARIETE HIDRÁULICO >, <SISTEMA DE CONTROL >, <LOGICA BORROSA>, <MAMDANI>, <VALVULA DE IMPULSO>.



06-06-2023

0041-DBRA-UPT-IPEC-2023

SUMMARY

The need of certain Ecuadorian population groups for accessing water in areas where there is a total or partial access to it for irrigation, has driven its people to look for natural water sources coming up from the surface of mountains, located far away from any type of energy that could be used to make a water booster pump work and get water for their land. However, water pumpers based on hydraulic rams are a viable alternative as they neither use electricity nor fuel, but are ineffective to flow rate changes. If there was a drop in the water flow, the reservoir from which the hydraulic ram is fed would be affected and either it would just stop working or it would not work to its full potential. This research is focused on the need for applying methods and strategies of control in order to implement an embedded platform to act on the most sensitive parts of the machine with the view to improve its performance. Specifically, it is part of the proposal for the implementation of a controller based on widespread logic that acts on the impulse valve, with the aim of delaying or advancing the closing of the valve to compensate for flow variations. The results obtained through the experiments with a controller based on the Mamdani method and a prototype battering ram, demonstrates that the system works effectively, as it has a wide range of action on the data obtained. This allowed the system controller to make timely variations in closing and opening the impulse valve whenever there was a flow variation at the reservoir.

Keywords: < HYDRAULIC RAMS >, <SYSTEM CONTROLLER >, <WIDESPREAD LOGIC>, <MAMDANI>, <IMPULSE VALVE >.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Existen máquinas mecánicas muy importantes para los sistemas de riego, en localidades donde no existe energía eléctrica, y que no han sido abordados contundentemente por el control automático. Este es el caso de un sistema de bombeo accionado mediante un ariete hidráulico mecánico.

A nivel mundial la necesidad de abastecerse de agua para riego, alimentación, industria, etc., ha sido un tema fundamental para crear nuevas tecnologías en sistemas de bombeo y riego, utilizando bombas accionadas por energía eléctrica o combustibles fósiles. Pese a estos avances, dichos sistemas no han podido ser instalados en lugares alejados, donde no existe energía eléctrica y el costo de combustible es alto. Esto ha generado un grave problema en las poblaciones rurales, viéndose limitado el desarrollo personal, económico y agropecuario de estas comunidades. Una alternativa de solución para el bombeo de agua en lugares alejados de fuentes energéticas es usar una bomba de ariete hidráulico (Colmenar et al., 2015).

Desde su invención, el ariete hidráulico tuvo gran aceptación al rededor del mundo. Tanto fue que, hasta llegó a estar presente en la India y Afganistán. En Nicaragua existen instalados y operando una gran cantidad de arietes hidráulicos. Ejemplo de ello, es uno que tiene más de 40 años de estar operando en la zona de Boaco y se encuentra en perfecto estado (Sandoval, 2016, p.6)

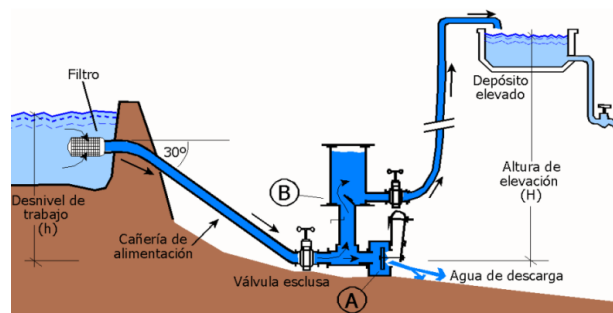


Figura 1-1: Funcionamiento del ariete hidráulico

Fuente: (Czajkowski Jorge, 2007)

El ariete hidráulico es un sistema de bombeo, accionado por la energía potencial, que se acumula debido a la diferencia de nivel entre una fuente de agua (río, acequia, depósito etc.) y la bomba que se encuentra a varios metros de desnivel hacia abajo. Gracias a este desnivel, es posible

multiplicar por varias veces la altura de bombeo de agua. En la Figura 1-1 se puede apreciar el esquema general de funcionamiento de un ariete hidráulico (Crespo, 2006, p.8).

Las bombas ariete son una alternativa tecnológicamente accesible, eficiente y ecológica para el bombeo de agua. Sin embargo, su principal desafío radica en la necesidad de un caudal de entrada de agua de alimentación constante para su correcto funcionamiento. La falta de este caudal puede disminuir la eficiencia del ariete e incluso impedir su operación, requiriendo la intervención de un operador para su reactivación. A pesar de esta limitación, se han llevado a cabo estudios en nuestro país para diseñar arietes hidráulicos capaces de funcionar con un caudal constante y una entrega de agua final uniforme. Una alternativa es utilizar agua recolectada de vertientes naturales o riachuelos cercanos, pero esta opción puede verse afectada por la disminución del caudal de agua en algunas épocas del año debido al impacto del cambio climático (Crespo, 2006, p.8).

Un ejemplo adicional de ariete hidráulico se encuentra instalado en la Comunidad Puñapi, Cantón Patate, a lo largo del río del mismo nombre. Este dispositivo opera a una distancia de aproximadamente 1 km de la red eléctrica más cercana y provee de agua a una superficie de 3 hectáreas de terreno destinado a la siembra de árboles frutales pertenecientes a 15 familias de la zona. En este sitio, se ha construido un tanque de hormigón que recoge el agua de múltiples vertientes naturales presentes en la región, que es conducida mediante un tubo con un diámetro previamente dimensionado hasta el ariete hidráulico. Este ariete cuenta con válvulas tipo check que producen un cierre instantáneo, generando un efecto denominado "golpe de ariete". Este fenómeno provoca un aumento instantáneo de la sobrepresión, que es aprovechado para generar alta presión y almacenarla temporalmente en un tanque. Este tanque es el encargado de elevar el agua mediante el bombeo generado hacia los depósitos de almacenamiento, ubicados a una altura de 80 metros sobre la bomba y a lo largo de un recorrido de 150 metros, permitiendo un caudal máximo de 14 000 litros de agua en 24 horas, siempre y cuando el caudal de entrada a la bomba sea constante y no supere los 15 litros por segundo (Crespo, 2006, p.10).

Es importante destacar que, debido a la fluctuación del caudal natural de agua, que oscila entre los 8 y los 25 litros por segundo, la bomba no puede aprovechar todo el caudal excedente cuando este está cercano a su límite superior y deja de operar cuando el caudal de entrada se encuentra en su límite inferior. Cuando esto sucede, es necesaria la intervención de un técnico especializado para poner nuevamente en marcha el sistema hidráulico.

Para mejorar el control y lograr un funcionamiento continuo de una bomba de ariete, se propone implementar un controlador específico para regular la válvula de impulso del ariete hidráulico, ajustando el tiempo de cierre y apertura de dicha válvula de acuerdo al caudal natural de entrada.

Sin embargo, no existe evidencia en la literatura que describa el diseño de controladores aplicados al ariete hidráulico debido a la complejidad del modelado del sistema planta de la bomba, el cual no se relaciona directamente con modelos conocidos desde el punto de vista del control automático. Por lo tanto, la implementación de controladores clásicos es poco factible ya que se necesita un conocimiento previo del modelo de la planta. En este contexto, los controladores de lógica borrosa se presentan como una alternativa viable ya que no requieren conocer el modelo de la planta, sino solamente un conocimiento experto específico sobre el funcionamiento y las condiciones ideales de trabajo de la bomba de ariete que puede ser aportado por un experto (Crespo, 2006, p.10).

1.1.1. *Formulación del problema*

Implementación de un controlador basado en lógica borrosa en la válvula de impulso, para mejorar el control de bombeo de agua en un prototipo de ariete hidráulico, con el objetivo de asegurar un bombeo continuo de agua.

1.1.2. *Preguntas directrices o específicas de la investigación*

¿Al parametrizar las funciones de pertenencia de defusificación del controlador borroso, haciendo uso del método de optimización del gradiente decreciente, se podrá lograr una condición de operación estable, bajo el criterio de salida acotada ante una entrada de control acotada?

¿Cuál de los controladores ofrecerán un mejor criterio de desempeño ante una misma condición de control, durante un mismo o igual lapso de establecimiento, el controlador P, PI, PID?

¿Cómo sería la estructura de un controlador PI borroso y su desempeño simulado?

1.2. *Justificación de la investigación*

El Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021 - Toda una vida del gobierno ecuatoriano busca mejorar las condiciones económicas y alimentarias de las personas, en parte a través del fomento de la producción de alimentos de calidad y una distribución equitativa de agua para su producción. Sin embargo, en varias comunidades de la zona central del Ecuador, la distribución de agua de riego es deficiente debido a su ubicación en terrenos a desnivel con respecto a las fuentes de agua naturales y a la falta de acceso a líneas eléctricas para el bombeo de agua. La utilización de bombas a combustible fósil resulta económicamente impráctica para las comunidades, lo que

afecta negativamente la producción de alimentos y el cultivo de tierras, reduciendo la cantidad y calidad de los productos agrícolas y frutales (SEMPADES, 2017).

Teniendo en cuenta los obstáculos mencionados anteriormente, una solución viable son las bombas de ariete hidráulico, que aprovechan la energía potencial de las fuentes naturales de agua. Sin embargo, el principal problema de estas bombas es que su rendimiento disminuye cuando el caudal de entrada de agua natural disminuye, lo que puede incluso detener su funcionamiento con pequeñas variaciones en el caudal. En este caso, el operador debe intervenir para calibrar las válvulas de impulsión y reiniciar la bomba, utilizando su conocimiento experto del sistema. Un ejemplo de esta problemática se encuentra en la comunidad de Puñapi en Tungurahua, ubicada aproximadamente a 1.06 km de una fuente natural de agua que podría utilizarse para el riego, tal como se ilustra en la Figura 2-1.



Figura 2-1: Ejemplo de comunidad rural cercana a una fuente de agua natural

Fuente: Google Earth Pro.

Por lo tanto, es esencial implementar un controlador en la válvula de impulso de un prototipo de ariete hidráulico para garantizar una entrega de agua constante. Además, este proyecto busca proponer soluciones para controlar válvulas de impulsión de arietes de mayor tamaño en diferentes partes de la provincia de Chimborazo. La investigación se enfocará en comprender el funcionamiento de la bomba de ariete desde una perspectiva de control automático y determinar el tipo de controlador de lógica borrosa que se pueda utilizar en una plataforma embebida para regular la apertura y cierre de la válvula de impulso. A continuación, se implementará un controlador diseñado para garantizar el funcionamiento continuo del ariete hidráulico ante variaciones en el caudal, lo que permitirá una entrega permanente de agua. Finalmente, se llevarán a cabo varias pruebas en un prototipo para verificar el funcionamiento del sistema de control propuesto.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. General

Implementar un controlador basado en lógica borrosa de tipo Mamdani aplicado a la válvula de impulso de un prototipo de ariete hidráulico para garantizar un bombeo permanente de agua.

1.3.2. Específicos

Determinar las variables y parámetros característicos de operación del prototipo de ariete hidráulico para el diseño de un sistema de control basado en lógica borrosa de tipo Mamdani, usando configuraciones de lazo abierto y lazo cerrado.

Diseñar un controlador basado en lógica borrosa de tipo Mamdani a partir de reglas de conocimiento sobre el funcionamiento del ariete hidráulico y configuraciones de lazo abierto y cerrado, para garantizar la entrega permanente de agua.

Implementar los controladores diseñados sobre una plataforma embebida a ser evaluados sobre la válvula de impulso de un prototipo de ariete hidráulico.

Evaluar el sistema de control basado en lógica borrosa para determinar la mejor configuración que garantice un bombeo permanente de agua.

1.4. Hipótesis de la investigación

1.4.1. General

La implementación de un controlador basado en lógica borrosa de tipo Mamdani aplicado a la válvula de impulso de un prototipo de bomba de ariete hidráulico garantiza la entrega permanente de agua ante variaciones del caudal de entrada.

1.4.2. Específica

Existen variables y parámetros clave que influyen en el funcionamiento del prototipo de ariete hidráulico, y es posible determinarlos mediante el análisis de su comportamiento operativo. La identificación de estas variables y parámetros es fundamental para diseñar un sistema de control basado en lógica borrosa eficaz.

El diseño de un controlador basado en lógica borrosa de tipo Mamdani a partir de reglas de conocimiento sobre el funcionamiento del ariete hidráulico y configuraciones de lazo abierto y cerrado permitirá garantizar la entrega permanente de agua. Las reglas de conocimiento y las configuraciones de lazo abierto y cerrado deben ser cuidadosamente seleccionadas y ajustadas para optimizar el rendimiento del sistema de control.

La implementación de los controladores diseñados sobre una plataforma embebida y su evaluación sobre la válvula de impulso de un prototipo de ariete hidráulico permitirá determinar su capacidad para controlar el flujo de agua. La plataforma embebida debe ser adecuada para el control de la válvula de impulso y debe contar con suficiente potencia de procesamiento para ejecutar los algoritmos de control en tiempo real.

La evaluación del sistema de control basado en lógica borrosa permitirá determinar la mejor configuración para garantizar un bombeo permanente de agua. La evaluación debe incluir pruebas en diferentes condiciones operativas y configuraciones de lazo abierto y cerrado, así como una comparación con otros sistemas de control disponibles en el mercado para determinar su eficacia y ventajas.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Se han llevado a cabo diversos estudios previos sobre el diseño mecánico del ariete hidráulico, entre los que destacan:

La tesis de (Paredes & Tuquinga, 2013, p.1), titulada "Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico instalado en la comunidad de Airón Cebadas". Este trabajo concluye que la bomba de ariete es una alternativa ecológica, ya que, al no requerir una fuente de energía externa, no produce contaminación. Por lo tanto, este tipo de bomba puede ser una opción adecuada en lugares donde la preservación del medio ambiente es importante y el acceso a la energía eléctrica o fósil para activar otros tipos de máquinas de bombeo resulta costoso o poco práctico.

Además, se ha confirmado su utilidad en lugares donde las fuentes de agua se encuentran por debajo del punto de interés. Sin embargo, existen tres desventajas notables, a saber: la variación del caudal de entrada de la bomba, la sensibilidad de las válvulas de impulsión y la necesidad de intervención humana para poner en marcha la bomba cada vez que el caudal de entrada varía, lo que puede resultar en una calibración deficiente de la válvula de impulsión y provocar la parada de la bomba (Paredes & Tuquinga, 2013).

La necesidad de investigar y experimentar con aplicaciones de sistemas de control surge debido a la variación natural del caudal de entrada, lo que afecta la entrega permanente de agua y la operación continua del ariete hidráulico. Para resolver este tipo de problemas, se han propuesto soluciones de control en tiempo real de la válvula de impulsión, lo que requiere un conocimiento preciso del sistema planta para la implementación de controladores convencionales. Sin embargo, los controladores difusos se presentan como una alternativa viable para el control de la válvula de impulso de un ariete hidráulico, ya que no requieren de modelos precisos sino de un conocimiento experto del funcionamiento y parámetros de operación de los sistemas planta. En este sentido, los controladores difusos permiten afrontar problemas de control en los que no es posible contar con modelos precisos del sistema.

2.2. Arietes hidráulicos

Para comprender que es un ariete hidráulico, es necesario abarcar algunos conceptos y fundamentos teóricos, por lo tanto, en esta sección se presentan varios temas que sirven como sustento teórico para el desarrollo del diseño de la bomba de ariete y las ecuaciones físicas y matemáticas que rigen su funcionamiento (Mataix, 1970, p.403).

Entre las características principales de un ariete hidráulico desde el punto de vista mecánico se destacan las siguientes:

- No necesita combustible fósil ni electricidad para su operación.
- Estas bombas son más económicas que las bombas de motor.
- La contaminación al medio ambiente es mínima.
- La vida útil del equipo es extensa y permite funcionar las 24 horas del día.
- No necesita mantenimiento continuo.

2.2.1. Configuración general del ariete hidráulico

El diseño y fabricación de los arietes hidráulicos determina la configuración general, pero los principios básicos de funcionamiento son los mismos en todos los arietes. La figura 1-2 muestra dicha configuración (Mataix, 1970, p.404).

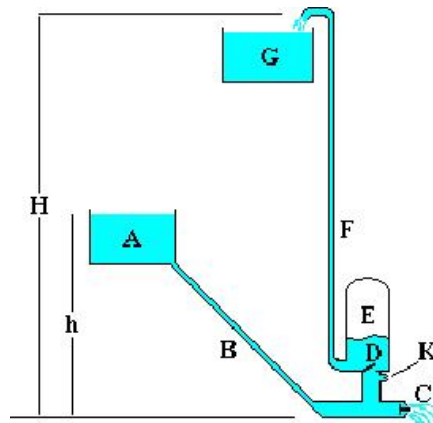


Figura 1-2: Configuración típica de una bomba de ariete
Fuente: (Mataix, 1970).

En donde:

H: altura total de elevación del agua tomando desde el ariete hidráulico hasta el reservorio.

h: Altura entre el pozo de captación y el ariete hidráulico.

A: Pozo de captación.

B: Tubería de alimentación de agua hacia el ariete.

C: Válvula principal (impulsión).

D: Válvula tipo check de descarga.

- E: Cámara de amortiguamiento.
- F: Tubería de salida de agua presurizada.
- K: Válvula de ingreso de aire.

2.2.2. Configuración general del ariete hidráulico

El golpe de ariete hidráulico es un fenómeno que se presenta en tuberías cuando se produce una alteración brusca en el movimiento de un fluido, como puede ser el cierre o apertura abrupta de una válvula de paso. Cuando un fluido se encuentra en movimiento, posee energía cinética, que, al ser interrumpida bruscamente, se convierte en energía potencial, aumentando la carga piezométrica original y generando una deformación en las paredes del conducto. De esta manera, el agua realiza un trabajo elástico que provoca sobrepresiones que pueden alcanzar niveles críticos, generando daños estructurales en tuberías y válvulas (Pérez, 2016, p.17).

Las sobrepresiones generadas por el golpe de ariete pueden generar ondas negativas y cavitación, lo que puede provocar el colapso de las tuberías por efecto de la presión del ambiente externo. Por ejemplo, este fenómeno se presenta al cerrar o abrir una válvula o al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, como se muestra en la Figura 2-2 (Mataix, 1970, p.397). Por lo tanto, es fundamental tomar medidas preventivas para controlar y mitigar el impacto del golpe de ariete en las tuberías y sistemas hidráulicos.

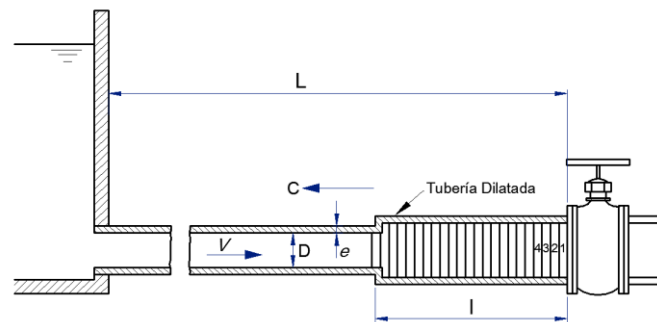


Figura 2-2: Onda en retroceso ocasionado por el cierre instantáneo de una válvula
Fuente: (Mataix, 1970).

2.2.3. Etapas y explicación del fenómeno de golpe de ariete

Aunque en la realidad una válvula no puede cerrarse instantáneamente, es necesario considerar esta posibilidad para estudios en casos reales. Si la válvula de la Figura 2-2 se cerrara de forma instantánea, se seguiría el siguiente procedimiento:

Imaginando la división del fluido dentro de la tubería en discos, numerados en orden ascendente como 1t, 2t, 3t y 4t, el disco 1t quedaría en reposo primero, seguido por los discos 2t, 3t, 4t, etc. Esto requiere un instante de tiempo para alcanzar el reposo y da lugar a una onda de presión en retroceso, la cual se propaga con una velocidad C contraria a la velocidad V del fluido. Se crea una onda elástica en retroceso que se mueve hacia atrás, en dirección al pozo de almacenamiento. Este efecto puede ser observado en una perturbación repentina en la superficie del embalse (Mataix, 1997, p.405).

Al considerar este acontecimiento en la tubería se genera las siguientes etapas:

Etapa 0: Régimen permanente sin perturbación. El líquido se mueve con velocidad V del pozo de almacenamiento hacia a la válvula de impulsión, observar la Figura 3-2.

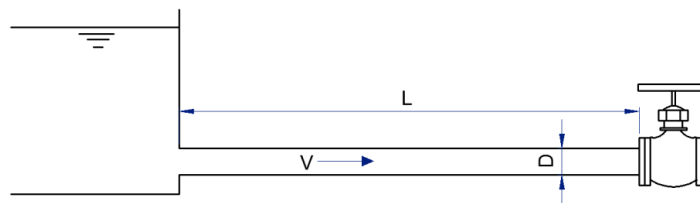


Figura 3-2: Movimiento del líquido en la tubería sin perturbaciones
Fuente: (Mataix, 1997).

Etapa 1: Cierre súbito de una válvula. El líquido con velocidad V se detiene súbitamente a partir de la válvula, observar la Figura 4-2 (Mataix, 1997, p.405).

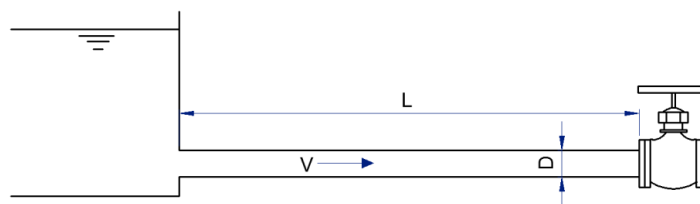


Figura 4-2: Cierre súbito de la válvula de paso
Fuente: (Mataix, 1997).

Etapa 2: Una onda de presión se propaga con rapidez hacia el pozo de alimentación, lo que provoca la dilatación de la tubería debido a la sobrepresión. Se puede observar este fenómeno en la Figura 5-2 (Mataix, 1997, p.405).

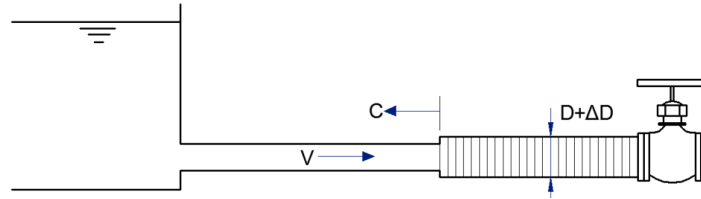


Figura 5-2: Propagación de onda de presión
Fuente: (Mataix, 1997).

Etapa 3: Toda la tubería esta dilatada, observar la Figura 6-2.

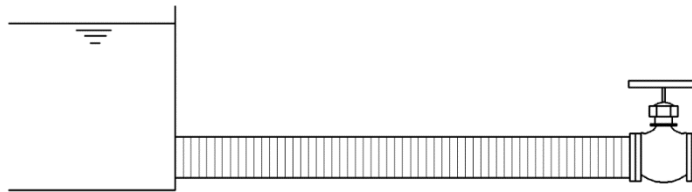


Figura 6-2: Dilatación de la tubería
Fuente: (Mataix, 1997).

Etapa 4: La tubería se contrae a su diámetro normal desde la mitad hasta el pozo. La otra mitad de la tubería permanece bajo presión con una onda que se mueve a una velocidad de V . Desde la mitad de la tubería hasta el pozo, el fluido circula a la misma velocidad V , tal y como se muestra en la Figura 7-2 (Mataix, 1997, p.405).

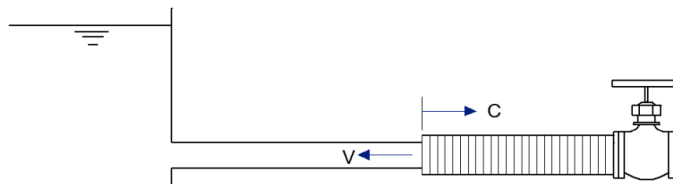


Figura 7-2: Tubería en la parte izquierda contraída
Fuente: (Mataix, 1997).

Etapa 5: La inercia de los líquidos causa una disminución de la presión, lo que genera una onda elástica de depresión que se propaga desde la válvula hacia el pozo de almacenamiento a una velocidad V . Este proceso se puede observar en la figura 8-2 (Mataix, 1997, p.405).

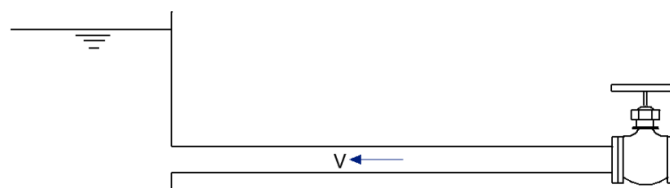


Figura 8-2: Tubería sin esfuerzos internos que afecte su diámetro
Fuente: (Mataix, 1997)

Etapa 6: La mitad de la tubería que se encuentra hacia la válvula experimenta una depresión negativa, mientras que la otra mitad contiene agua en reposo a una presión inferior a la normal. El diámetro de la tubería es menor que su diámetro nominal, como se puede observar en la Figura 9-2 (Mataix, 1997, p.405).

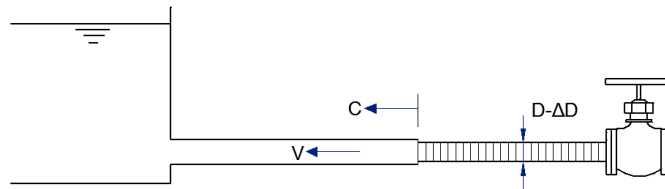


Figura 9-2: Depresión en la mitad de la tubería
Fuente: (Mataix, 1997).

Etapa 7: El líquido comienza a moverse nuevamente desde el pozo de almacenamiento hacia la válvula con una velocidad V . La tubería permanece en depresión y su diámetro es menor que su diámetro nominal, como se puede observar en la Figura 10-2 (Mataix, 1997, p.405).



Figura 10-2: Depresión en toda la tubería de alimentación
Fuente: (Mataix, 1997).

Etapa 8: El fluido se mueve con una velocidad V desde la mitad de la tubería hacia la válvula, mientras que, en la otra mitad derecha del tubo, el líquido permanece en reposo y en depresión. Este fenómeno se puede observar en la figura 11-2 (Mataix, 1997, p.405).

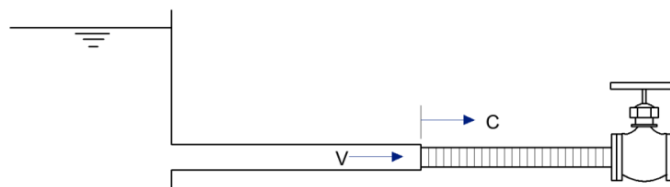


Figura 11-2: Tubería en la parte izquierda en movimiento
Fuente: (Mataix, 1997).

Etapa 9: El diámetro de la tubería regresa a su normalidad y todo el fluido se mueve con una velocidad V hacia la válvula, tal como se muestra en la figura 12-2. (Mataix, 1997, p.405).

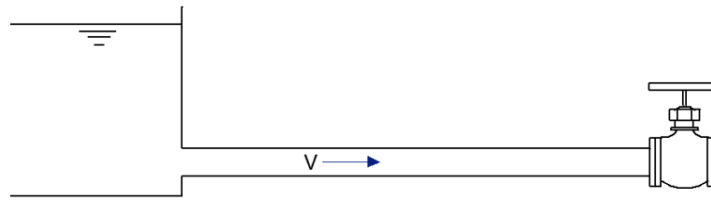


Figura 12-2: Tubería en la parte izquierda en movimiento
Fuente: (Mataix, 1997).

2.3. Sistemas de control

El sistema de control automático es una herramienta fundamental para la ingeniería moderna, ya que permite controlar de manera eficiente y estable el funcionamiento de diversos procesos, sistemas y maquinarias sin la intervención constante de una persona. Este sistema se compone de varios elementos, como sensores, actuadores, controladores y software de programación, que trabajan juntos para supervisar y ajustar el proceso en tiempo real (Sasir, 2021).

El control automático ha tenido un gran impacto en la optimización de procesos y en la simplificación del trabajo de operaciones manuales. Gracias a la capacidad del sistema de adaptarse y ajustar su funcionamiento en tiempo real, se han obtenido resultados más precisos y eficientes en diferentes campos de la ingeniería, como la producción industrial, la automatización de edificios y la robótica. Además, el control automático ha permitido reducir costos, minimizar errores humanos y aumentar la seguridad en diversos procesos industriales. En resumen, el control automático es una herramienta clave para mejorar la eficiencia y la calidad de los procesos en diferentes campos de la ingeniería (Sasir, 2021).

2.3.1. Tipos de sistemas de control

Los sistemas de control se dividen en dos categorías principales: los sistemas de control de lazo abierto y los sistemas de control de lazo cerrado. En un sistema de control de lazo abierto, la salida no se compara con la entrada, lo que significa que no hay retroalimentación. En otras palabras, no hay forma de ajustar el sistema durante el funcionamiento. En cambio, el sistema está diseñado para realizar una tarea específica sin tener en cuenta las posibles variaciones en las condiciones de entrada o las perturbaciones externas. Por otro lado, los sistemas de control de lazo cerrado utilizan una retroalimentación de la salida para ajustar la entrada y así mantener el proceso dentro de los límites deseados. De esta manera, los sistemas de control de lazo cerrado son más precisos y ofrecen una mayor estabilidad en el control del proceso en comparación con los sistemas de control de lazo abierto (Pardo, 2018, p.9).

2.3.1.1. Sistema de control de lazo abierto

Un sistema de control en lazo abierto es aquel en el que la salida del proceso no tiene efecto sobre la acción de control. En otras palabras, la salida del proceso no se mide ni se compara con la entrada del sistema, y no se utiliza para ajustar la acción de control. El sistema de control en lazo abierto no tiene capacidad para adaptarse a los cambios en el proceso y depende de la calibración precisa para su funcionamiento (Pardo, 2018, p.9).

Aunque el sistema de control en lazo abierto puede ser adecuado para procesos simples y estables, no es adecuado para procesos más complejos o que pueden variar en función de las condiciones del proceso. Por lo tanto, los sistemas de control en lazo cerrado son más comunes y se utilizan en una variedad de aplicaciones (Pardo, 2018, p.9).

En los sistemas de control en lazo cerrado, la salida del proceso se mide y se compara con la entrada del sistema, y se utiliza para ajustar la acción de control. Esto permite que el sistema se adapte a los cambios en el proceso y sea más preciso en su funcionamiento. Los sistemas de control en lazo cerrado son más complejos que los sistemas de control en lazo abierto y requieren una mayor cantidad de componentes y una programación más detallada. Sin embargo, también son más versátiles y pueden manejar una variedad de procesos y aplicaciones (Pardo, 2018, p.9).

La Figura 13-2, muestra un diagrama de bloques esquemáticos que ilustran el caso de un control en lazo abierto.

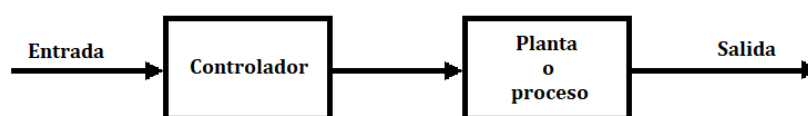


Figura 13-2: Esquema sistema de control de lazo abierto
Fuente: (Ogata, 1998).

2.3.1.2. Sistema de control de lazo cerrado

Un sistema de control en lazo cerrado es aquel que mide la salida y la compara con la entrada para generar una señal de error que alimenta al controlador y corregir el proceso. Este tipo de sistema se utiliza comúnmente en procesos donde se requiere un alto grado de precisión y estabilidad en la salida. La realimentación de la señal de salida a la entrada del controlador permite ajustar la salida de acuerdo a las necesidades del proceso (Ogata, 1998, p.10).

El proceso de control en lazo cerrado es altamente eficaz para el control de procesos, ya que permite una mayor precisión y estabilidad en la salida, debido a la constante retroalimentación y corrección. Es capaz de corregir y compensar los errores en la salida, lo que aumenta la precisión del proceso y minimiza los errores en la medición. Los sistemas de control en lazo cerrado son ampliamente utilizados en sistemas de control de temperatura, presión, nivel y velocidad en la industria (Ogata, 1998, p.10).

El control en lazo cerrado también puede ser utilizado para ajustar los parámetros de control en tiempo real, lo que permite una mayor flexibilidad y adaptabilidad en el proceso. El controlador en lazo cerrado ajusta los parámetros del proceso según la señal de error, lo que aumenta la eficiencia del proceso y minimiza el tiempo de respuesta. Este tipo de sistema de control es altamente beneficioso en procesos industriales donde se requiere una alta precisión y estabilidad en la salida para asegurar la calidad del producto y minimizar los costos de producción (Ogata, 1998, p.10).

La Figura 14-2, muestra un diagrama de bloques esquemáticos que ilustran el caso de un control en lazo cerrado.

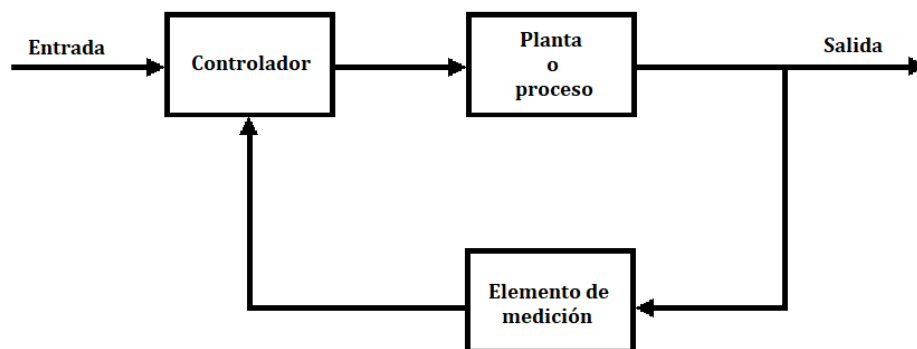


Figura 14-2: Esquema sistema de control de lazo cerrado
Fuente: (Ogata, 1998).

2.4. Controladores básicos en lazo cerrado

En el ámbito de los sistemas de control de lazo cerrado, existen distintos tipos de controladores, siendo los más comunes los controladores proporcional, integral y derivativo (PID). La selección del tipo de controlador a utilizar dependerá de la complejidad del proceso que se desea controlar, aunque en la mayoría de los casos el controlador PID es el más utilizado debido a que combina el control proporcional, integral y derivativo en un solo sistema (Ogata, 1998, p.11).

La ecuación que representa el controlador PID se observa en la ecuación (1). Este tipo de controlador utiliza la información de la señal de error generada por la comparación entre la salida del proceso y el valor deseado de la misma, para calcular la acción de control a realizar. La acción proporcional es directamente proporcional al error, la acción integral es proporcional a la suma de los errores en el tiempo y la acción derivativa es proporcional a la tasa de cambio del error en el tiempo (Navarro, 2004).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\gamma) d\gamma + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

El controlador PID es ampliamente utilizado en diferentes procesos de control, como el control de temperatura, velocidad, nivel de líquidos, entre otros. Aunque es importante tener en cuenta que su ajuste óptimo puede ser una tarea compleja y requiere de conocimientos especializados para lograr un correcto funcionamiento del sistema de control (Navarro, 2004).

Es importante destacar que se puede implementar una estructura de controlador utilizando un regulador PID completo o solo utilizar la parte proporcional o combinar un regulador proporcional e integral o ambas. Sin embargo, el controlador de tipo proporcional y derivativo no es viable desde el punto de vista físico debido a su estructura. Para determinar qué parte del controlador utilizar, se debe considerar que cada una de ellas mejora ciertas condiciones del sistema, pero desafortunadamente, esto puede tener un costo en otras áreas del sistema (Navarro, 2004).

El regulador Proporcional (P) proporciona una respuesta más rápida del sistema, reduce la diferencia con la señal de entrada (error), pero disminuye la estabilidad y aumenta los transitorios del sistema (Navarro, 2004).

El regulador Proporcional Integral (PI) elimina el error en estado permanente del sistema, incorporando la parte integral al sistema, pero la estabilidad del sistema puede verse afectada negativamente (Navarro, 2004).

El regulador Proporcional Derivativo (PD) ofrece un sistema anticipativo y, por lo tanto, más rápido y estable, manteniendo el error en su valor actual. La acción derivativa equilibra la acción integradora (Navarro, 2004).

El regulador PID mejora las tres características del sistema, pero es necesario ajustar los valores de ganancia para obtener la respuesta óptima, para (Navarro, 2004).

2.5. Controlador inteligente

El control inteligente es una disciplina que se basa en técnicas de inteligencia artificial para resolver problemas complejos que no pueden ser abordados mediante los métodos convencionales de control (Takagi & Sugeno, 1985). Cuando se analizan las actividades que conforman un sistema de control, se pueden distinguir dos tipos principales: las actividades conductivas, que implican la modificación del mundo real, y las actividades cognoscitivas, que se relacionan con el procesamiento de la información.

En el control clásico, el tratamiento de la información se realiza a un nivel numérico y se actúa directamente sobre los fenómenos del mundo real, sin considerar actividades cognoscitivas de alto nivel de abstracción. Esto hace que, en muchos casos, sea necesario contar con la supervisión humana para asegurar el correcto funcionamiento del sistema (Takagi & Sugeno, 1985).

En cambio, el control inteligente se centra en la importancia de las actividades cognoscitivas para abordar situaciones complejas, especialmente aquellas causadas por mal funcionamiento de los sistemas a controlar. En este enfoque, se busca utilizar técnicas avanzadas de inteligencia artificial para realizar tareas cognitivas de alto nivel, como la toma de decisiones y el aprendizaje automático, de manera que se pueda lograr una mayor autonomía en el sistema de control (Takagi & Sugeno, 1985).

2.5.1. Técnicas de Control Inteligente

Entre las técnicas de la inteligencia artificial usadas para el control inteligente destacan:

2.5.1.1. Sistemas expertos

Los sistemas expertos son una categoría de sistemas de control que se basan en el conocimiento adquirido de un experto humano en el proceso que se desea controlar. La base de conocimientos de control de estos sistemas se construye a partir de la información proporcionada por el operador del proceso, quien tiene un conocimiento profundo y especializado sobre el mismo (Pino et al., 2001, p.11).

En la base de conocimientos de un sistema experto se recogen dos tipos de información fundamentalmente: reglas para interpretar el estado del proceso y reglas para determinar las acciones que deben llevarse a cabo. Estas reglas se agrupan en diferentes categorías con el fin de mejorar la eficiencia del sistema y facilitar su manejo (Pino et al., 2001, p.11).

Además de estas reglas, los sistemas expertos también utilizan técnicas de inferencia lógica para procesar la información y tomar decisiones de manera autónoma. De esta manera, el sistema es capaz de simular el razonamiento de un experto humano y tomar decisiones de forma inteligente, incluso en situaciones complejas y cambiantes (Pino et al., 2001, p.11).

En resumen, los sistemas expertos se caracterizan por su capacidad para aprovechar el conocimiento de un experto humano en el proceso que se desea controlar, lo que les permite tomar decisiones autónomas y eficientes. Esto hace que sean especialmente útiles en procesos que presentan un alto grado de complejidad y que requieren un control preciso y adaptable (Pino et al., 2001, p.11).

2.5.1.2. Lógica difusa

La lógica borrosa es una técnica de control que se utiliza para manejar la imprecisión y la incertidumbre que se presentan en sistemas complejos del mundo real. En contraposición a los sistemas de control convencionales, que utilizan reglas matemáticas precisas, los controladores borrosos emplean reglas basadas en el lenguaje natural y en la evaluación de conceptos vagos y subjetivos (Takagi & Sugeno, 1985).

Una de las ventajas principales de los reguladores borrosos es que son una alternativa efectiva al control adaptativo, predictivo u otros sistemas de control experto que utilizan incertidumbre. Esto se debe a que los reguladores borrosos son capaces de lidiar con la complejidad de los sistemas reales de manera más eficiente y efectiva que otras técnicas (Takagi & Sugeno, 1985).

La lógica borrosa se basa en la teoría de conjuntos borrosos, que permite trabajar con conceptos que no pueden ser definidos de manera precisa o matemática. Los controladores borrosos utilizan la información proporcionada por sensores y otros dispositivos de medición para evaluar el estado del sistema y determinar las acciones que deben llevarse a cabo (Takagi & Sugeno, 1985).

Para implementar estrategias de control con reguladores borrosos, se utilizan conjuntos de reglas expresados en términos lingüísticos. Estas reglas se basan en la experiencia y el conocimiento de los expertos en el sistema y se ajustan de manera dinámica para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno (Zadeh, 1965).

En conclusión, los reguladores borrosos son una técnica de control efectiva para sistemas complejos del mundo real. La lógica borrosa permite manejar la incertidumbre y la imprecisión en la evaluación de los sistemas y proporciona una alternativa eficaz a los sistemas de control

convencionales. La implementación de estrategias de control con reguladores borrosos se realiza a través de conjuntos de reglas expresados en términos lingüísticos y se ajustan de manera dinámica para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno (Zadeh, 1965).

2.5.1.3. *Redes neuronales*

Las redes neuronales son una técnica de procesamiento de información muy útil en el ámbito del control debido a su capacidad para modelar el comportamiento no lineal de un proceso. En una red neuronal, cada elemento de procesamiento, también conocido como neurona, está interconectado con otros mediante canales unidireccionales de información. La señal de salida de una neurona puede ser de cualquier tipo matemático y se propaga por las diferentes ramas de la red (Zadeh, 1965).

La gran ventaja de las redes neuronales en el control es su capacidad para aprender el comportamiento del proceso, lo que las convierte en una herramienta muy valiosa para el diseño de sistemas de control. En concreto, se pueden utilizar para la simulación, identificación o control del proceso (Zadeh, 1965).

En la simulación, una red neuronal puede generar modelos precisos y fiables del comportamiento del proceso, lo que permite estudiar su comportamiento en diferentes condiciones de operación.

En la identificación, se utilizan para estimar los parámetros del modelo de un proceso desconocido, a partir de los datos experimentales recopilados.

Por último, en el control, las redes neuronales pueden utilizarse como controladores para mejorar el rendimiento del proceso y reducir el tiempo de respuesta. La capacidad de aprendizaje de las redes neuronales les permite adaptarse a las condiciones cambiantes del proceso en tiempo real, lo que les convierte en una herramienta muy valiosa en aplicaciones de control complejas (Mamdani, 1974).

2.5.1.4. *Algoritmos genéticos.*

Los algoritmos genéticos son una técnica de optimización que se inspira en el proceso de evolución de las especies en la naturaleza. Esta técnica se utiliza ampliamente en el ámbito del control y otros campos de la inteligencia artificial para encontrar soluciones óptimas a problemas complejos. En el caso del control, los algoritmos genéticos se utilizan para ajustar

automáticamente los parámetros de un controlador o para generar reglas de control que sean más efectivas en un entorno determinado (Ponce, 2010, p.12).

El proceso de evolución en los algoritmos genéticos comienza con una población inicial de soluciones posibles. A continuación, se aplican una serie de operadores genéticos, como la selección, el cruce y la mutación, para generar nuevas soluciones a partir de la población existente. La selección se utiliza para elegir las soluciones más aptas para la siguiente generación, mientras que el cruce y la mutación se utilizan para crear nuevas soluciones a partir de las soluciones seleccionadas (Ponce, 2010, p.12).

Una vez que se ha generado una nueva población, se evalúan todas las soluciones en términos de su aptitud para el problema en cuestión. Esta evaluación se basa en una función de aptitud que se define específicamente para el problema en cuestión. En el caso del control, la función de aptitud puede medir la capacidad de la solución para satisfacer un conjunto de requisitos de desempeño del sistema (Ponce, 2010, p.12).

Los algoritmos genéticos tienen la ventaja de ser capaces de encontrar soluciones óptimas en un espacio de búsqueda muy grande y complejo, lo que puede resultar difícil o imposible para otros métodos de optimización. Además, los algoritmos genéticos pueden ser paralelizados fácilmente, lo que significa que se pueden ejecutar en sistemas con múltiples procesadores para acelerar el proceso de optimización (Ponce, 2010, p.13).

En resumen, los algoritmos genéticos son una técnica poderosa y ampliamente utilizada en el campo del control y otros campos de la inteligencia artificial para encontrar soluciones óptimas a problemas complejos. Su capacidad para adaptarse a un entorno cambiante y su capacidad para trabajar en espacios de búsqueda complejos los convierten en una herramienta valiosa para el control inteligente (Ponce, 2010, p.13).

2.5.2. *Concepto de lógica borrosa*

La lógica difusa fue desarrollada por el ingeniero eléctrico iraní Lofti Zadeh, quien publicó en 1965 el primer artículo sobre el tema, titulado "Fuzzy Sets". Posteriormente, en 1974, Ebrahim Mamdani aplicó los conceptos de lógica difusa al control de un motor a vapor. En 1985, Takagi y Sugeno introdujeron un nuevo método llamado Takagi-Sugeno-Kang (TSK) como una alternativa al método anterior. La combinación de los conceptos de Zadeh con el área de control de procesos ha dado lugar a numerosas aplicaciones en industria, medicina, electrónica, aeronáutica, electrodomésticos, entre otras áreas (Takagi & Sugeno, 1985).

Además, la lógica difusa es una herramienta útil para modelar sistemas continuos en diversas áreas como la inteligencia artificial, física, economía y biología. Esta lógica permite el estudio de la estructura y los principios del razonamiento correcto, así como el establecimiento de principios que aseguren la validez de los argumentos deductivos. La lógica difusa es multivaluada y puede representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento (Takagi & Sugeno, 1985).

La lógica difusa se puede aplicar a cualquier problema del mundo que se pueda expresar en términos de variables de entrada y de salida. La figura 15-2 muestra cómo la lógica difusa permite establecer valores de pertenencia con sus respectivos conjuntos difusos para cada variable. Esta técnica fue introducida en la década de 1970 y ha sido utilizada con éxito en la actualidad (Takagi & Sugeno, 1985).

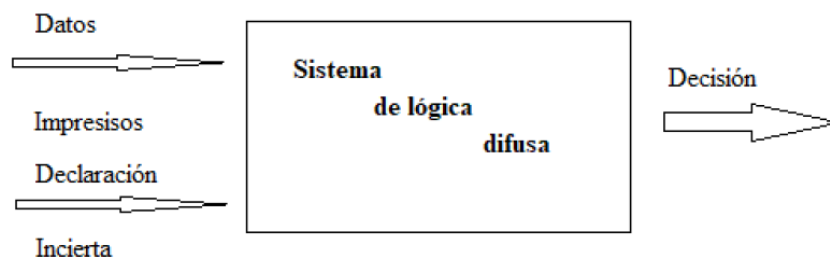


Figura 15-2: Modelo simplificado que se emplea para la caracterización difusa de la salida considerando entradas reales

Fuente: (Sivanandam et al., 2007).

En resumen, la lógica difusa es una herramienta poderosa para el modelado y control de sistemas continuos en una variedad de campos, y ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones prácticas en la industria, la medicina, la electrónica y otras áreas. La capacidad de representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, y la facilidad para establecer valores de pertenencia con sus respectivos conjuntos difusos, hacen de la lógica difusa una técnica valiosa para el tratamiento de problemas complejos en el mundo real (Sivanandam et al., 2007, p.19).

La incertidumbre surge de inexperiencia, de la casualidad y de la aleatoriedad; debido a la falta de conocimiento, y de la vaguedad (poco clara). Existentes en nuestro lenguaje natural. Lotfi Zadeh propuso el conjunto de miembros borrosos, una idea para tomar decisiones adecuadas cuando se produce la incertidumbre (Zadeh, 1965).

Tenemos una función de transferencia que procede de la generalización de la llamada función característica. La función de transferencia “membership function”, se entiende desde el universo del discurso U , hasta el intervalo unidad cerrada de los reales, que es el $I = [0,1]$, R . No así en los

llamados “crisp sets” conjuntos clásicos o conjuntos nítidos, donde el rango de función se reduce a un conjunto que consta de tan solo dos elementos, a saber, el $\{0,1\}$. Por lo tanto, la teoría de conjunto difusos sería una generalización de la teoría de conjuntos clásica que se ve en la ecuación (Zadeh, 1965).

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (2)$$

Podemos decir que el grado de adhesión de cualquier elemento particular de un conjunto difuso expresan el grado de compatibilidad del elemento con un concepto representado por el conjunto difuso. Significa que un conjunto difuso:

A contiene un objeto x al grado $a(x)$, es decir $a(x) = (x \in A)$, y el mapa $a: X \rightarrow \{\text{Grados de membresía}\}$ se denomina función de conjunto o membresía función.

El conjunto difuso A puede expresarse como $A = \{(x, a(x))\}$, $x \in X$, e impone una restricción elástica de los posibles valores de los elementos $x \in X$ llamados la posibilidad de distribución (Sivanandam et al., 2007, p.19).

Los conjuntos difusos tienden a captar la indeterminación exclusivamente a través de funciones de pertenencia que son asignaciones de un universo dado del discurso, como se ve en la Figura 16-2 (Sivanandam et al., 2007, p.19).

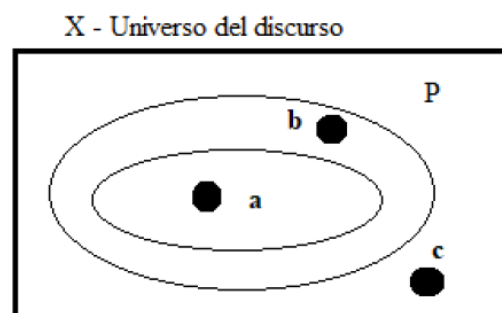


Figura 16-2. Universo de un conjunto difuso
Fuente: (Sivanandam et al., 2007).

Se puede observar que a es claramente un miembro del conjunto difuso P , c no es claramente un miembro del conjunto difuso P , pero la pertenencia de b se encuentra impreciso. Por lo tanto, a puede tomar el valor de la calidad de miembro “1”, c puede tomar la calidad de miembro “0” y b pueden tomar valor de pertenencia entre “0” y “1”. Esto se establece para ser una pertenencia parcial del conjunto difuso P (Sivanandam et al., 2007, p.19).

2.5.2.1. *Características de la lógica difusa*

El concepto de incompatibilidad sostiene que es imposible describir de manera completamente precisa el comportamiento de un sistema complejo. Para abordar esta dificultad, (Zadeh, 1965) sugiere la necesidad de crear herramientas que puedan manejar información imprecisa de manera confiable y rigurosa. Esto implica la necesidad de desarrollar los siguientes aspectos:

- En cuanto a la representación de información imprecisa, (Zadeh, 1965) sugiere utilizar la teoría de conjuntos difusos para describir la relación de los sistemas complejos de entrada y salida mediante proposiciones condicionales del tipo "Si-Entonces". De esta forma, se pueden vincular las variables de entrada y salida de manera más efectiva. Por ejemplo, si la presión en un recipiente es alta, entonces se vacía el recipiente.
- Para obtener nuevos conocimientos a partir de información imprecisa, es necesario combinarla de alguna manera. Para lograr esto, (Zadeh, 1965) propone un método de inferencia generalizado conocido como "regla composicional de inferencia". A partir de esta herramienta, se pueden describir las características fundamentales de la lógica difusa y los sistemas.
- El razonamiento exacto es solo una variante del razonamiento aproximado, el cual puede ser aplicado a cualquier sistema lógico. La lógica difusa es una herramienta útil para estructurar el conocimiento humano de manera ordenada y precisa, y su integración en sistemas de ingeniería es una tarea sencilla (Zadeh, 1965).
- El enfoque de las restricciones difusas asume que el conocimiento puede expresarse en términos de restricciones imprecisas en un conjunto de variables. Esta idea es muy útil cuando el modelo preciso del sistema es difícil de obtener y se requiere una aproximación. Los sistemas difusos permiten manejar y procesar información incierta de manera efectiva, lo que los convierte en herramientas valiosas para la modelización y control de sistemas complejos (Zadeh, 1965).
- La inferencia es el procedimiento por el cual se transmiten las restricciones difusas. Es un recurso que se utiliza con frecuencia en sistemas de soporte a la toma de decisiones. Con la lógica difusa, es posible tomar decisiones incluso cuando los valores de entrada son incompletos o la información es incierta. En resumen, la lógica difusa es una herramienta poderosa para la toma de decisiones en situaciones donde la información es limitada o poco precisa (Zadeh, 1965).

Cuando se trata de problemas complejos sin un modelo matemático claro, los sistemas difusos son una solución efectiva. Además, cuando se enfrenta un comportamiento no lineal, el enfoque difuso presenta muchas ventajas. La clave para este enfoque es la expresión del conocimiento experto en términos lingüísticos, algo que suele ser relativamente sencillo de obtener (Sivanandam et al., 2007, p.19).

2.5.3. Base matemática de la lógica difusa

2.5.3.1. Conjuntos difusos

Zadeh en 1965 propone por primera vez la noción de conjunto difuso, los conceptos se asocian a conjuntos difusos (asociando los valores de pertenencia) en un proceso llamado fusificación, una vez que tenemos los valores fusificados podemos trabajar con reglas lingüísticas u obtener una salida, que podrá seguir siendo difusa o defusificada para obtener un valor discreto (Zadeh, 1965).

La teoría de conjuntos difusos es un intento de desarrollar una serie de conceptos para tratar de un modo sistemático el tipo de imprecisión que aparece cuando los límites de las clases de objetos no están claramente definidos, un conjunto difuso puede ser visto de manera que un objeto puede tener un grado de pertenencia total “1” o no pertenencia “0” (Zadeh, 1965).

Sea X el universo del discurso, y sus elementos se denotan como x , en la teoría clásica de conjuntos claros se define un conjunto C sobre X mediante la función característica de C como f_C . Este conjunto mapea el universo X en un conjunto de dos elementos, donde la función $f_C(x)$ es “1” si el elemento x pertenece al conjunto C , y “0” si el elemento x no pertenece al conjunto C (Zadeh, 1965).

Si generalizamos esta función para que los valores asignados a los elementos del conjunto caigan en un rango particular y así indicar el grado de pertenencia de los elementos a ese conjunto, tendremos una función de pertenencia de un determinado conjunto difuso. La función de pertenencia μ_A por la que se define un conjunto difuso A , sería:

$$\mu_A = X \rightarrow [0,1] \quad (3)$$

Dónde:

$\mu_A(x)=1$, si x está totalmente en A ;

$\mu_A(x)=0$, si x no está en A ;

$0 < \mu_A(x) < 1$, si x está parcialmente en A .

El valor entre “0” y “1” representa en grado de pertenencia.

Sea X una colección de objetos, expresados en forma genérica por x . entonces, un conjunto difuso A en X , se define como un conjunto de pares ordenados $A=\{(x, \mu A(x))/x \in X\}$

Dónde $\mu A(x)$ es una función de pertenencia cuya etiqueta es A y su dominio es x .

2.5.3.2. Funciones de membresía

Las MF figuran el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto determinado por una etiqueta. Existe una gran diversidad de membresías las más frecuentes son del tipo: trapezoidal, triangular, singleton, sigmoide, campana de Gauss, campana generalizada (Mamdani, 1974).

- Forma triangular

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(m-b)} & \text{si } x \in (a, m) \\ \frac{(b-x)}{(b-m)} & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

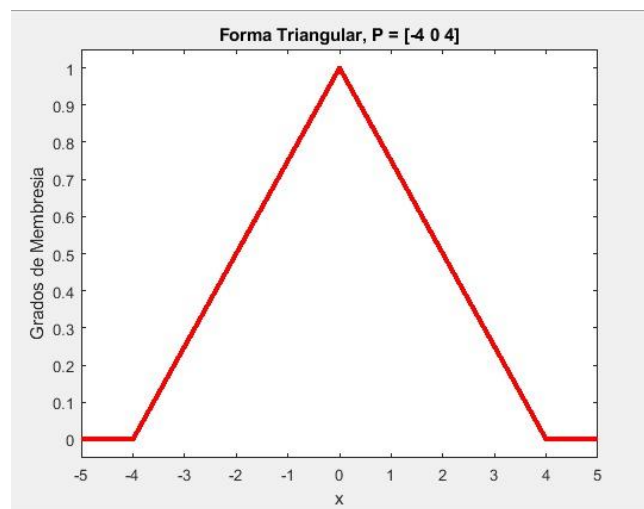


Figura 17-2: Función de pertenencia triangular o delta
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

- Forma sigmoideal

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 2 \cdot \left(\frac{(x-a)}{(b-a)}\right)^2 & \text{si } x \in (a, m) \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{(x-a)}{(b-a)}\right)^2 & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (5)$$

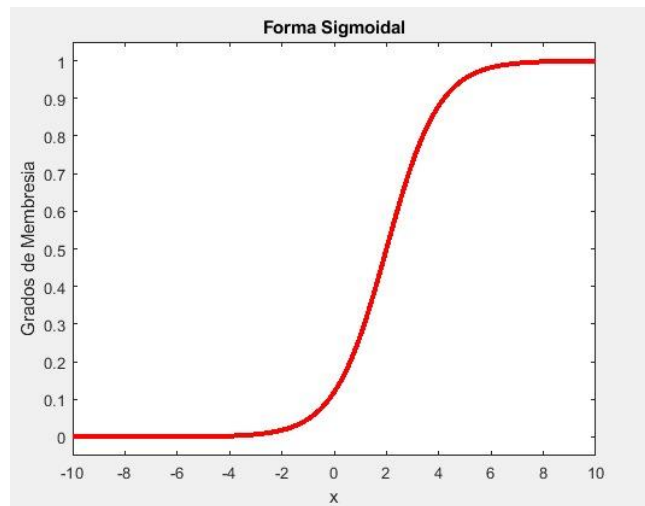


Figura 18-2: Función de pertenencia sigmoideal
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

- Forma trapezoidal

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \vee (x \geq d) \\ \frac{(x-a)}{(x-b)} & \text{si } x \in (a, b) \\ 1 & \text{si } x \in (b, c) \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & \text{si } x \in (c, d) \end{cases} \quad (6)$$

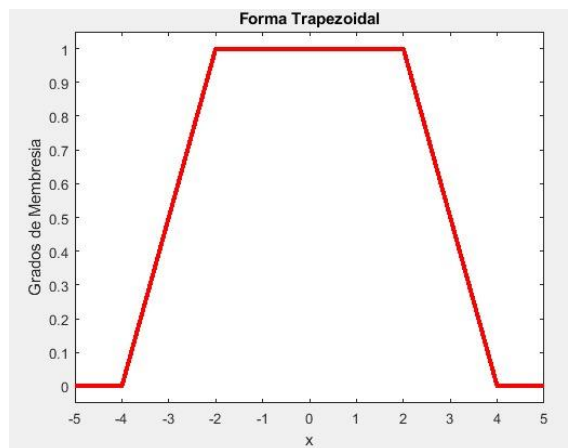


Figura 19-2: Función de pertenencia trapezoidal
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

- Forma gaussiana

$$A(x) = e^{-k \cdot (x-m)^2} \quad (7)$$

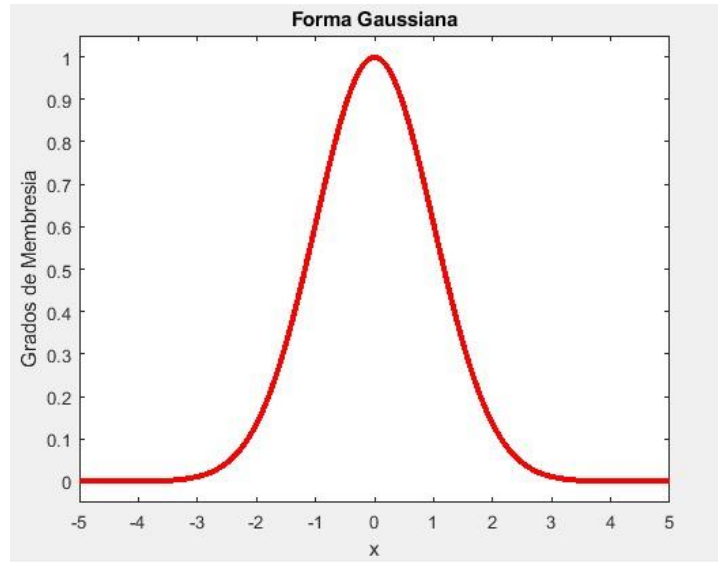


Figura 20-2: Función de pertenencia gaussiana
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

- Forma Singleton

$$A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = a \\ 0 & \text{si } x \neq a \end{cases} \quad (8)$$

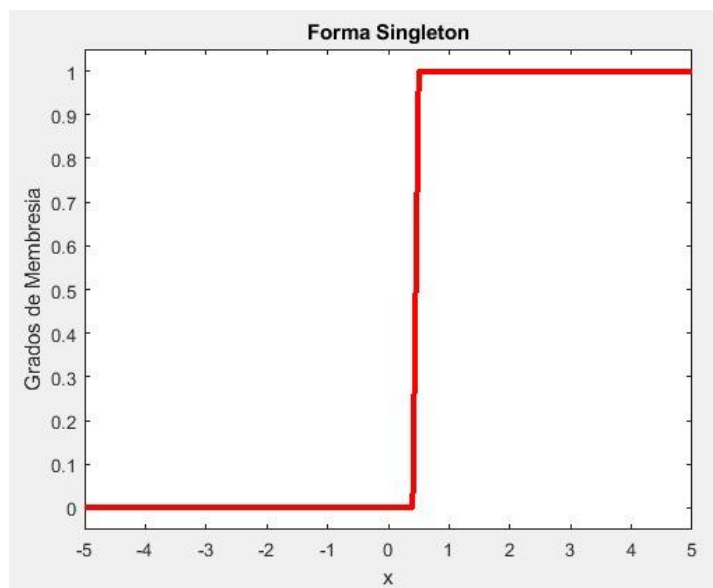


Figura 21-2: Función de pertenencia singleton
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

2.5.3.3. Operaciones difusas

En sistemas difusos o borrosos, los subconjuntos se utilizan para representar las variables lingüísticas en términos de etiquetas o términos lingüísticos. Para manipular estos subconjuntos, se utilizan operadores lógicos como complemento, unión e intersección. Es importante destacar que estos operadores no se aplican de manera convencional, como en la lógica booleana, sino que se definen en función de la teoría de conjuntos borrosos (Zadeh, 1965).

El complemento de un conjunto borroso A se define como el conjunto borroso que contiene todos los elementos que no pertenecen a A. En términos de la función de membresía, esto se puede expresar como:

$$\bar{\mu}_A(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (9)$$

La unión de dos conjuntos borrosos A y B se define como el conjunto borroso que contiene todos los elementos que pertenecen a A o a B. El operador lógico OR de Zadeh (max) se utiliza para definir la unión, lo que se expresa como:

$$\mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (10)$$

La intersección de dos conjuntos borrosos A y B se define como el conjunto borroso que contiene todos los elementos que pertenecen a A y a B. El operador lógico AND de Zadeh (min) se utiliza para definir la intersección, lo que se expresa como:

$$\mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (11)$$

Además, existen otros operadores lógicos que se utilizan con frecuencia en sistemas difusos, como el operador lógico AND de la multiplicación y el operador lógico OR de Lukasiewicz. El operador lógico AND de la multiplicación se utiliza para definir la intersección y se expresa como $\mu_A \cap B(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$. Por otro lado, el operador lógico OR de Lukasiewicz se utiliza para definir la unión y se expresa como:

$$\mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max[\mu_A(x) + \mu_B(x), 1] \quad (12)$$

En resumen, los operadores lógicos en sistemas difusos permiten manipular los subconjuntos borrosos y son necesarios para evaluar el antecedente de las reglas en los controladores y modelos borrosos. Cada operador tiene una función específica y se utiliza en función de las necesidades del problema que se esté resolviendo (Zadeh, 1965).

La Figura 22-2 muestra la representación gráfica de las operaciones lógicas de unión, intersección y complemento.

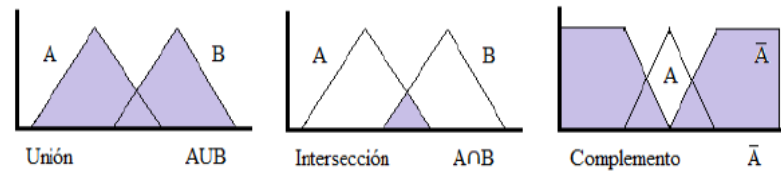


Figura 22-2: Representación de operaciones lógicas de unión, intersección y complemento.

Fuente: (Morcillo, 2011).

2.5.3.4. Variable lingüística

En los sistemas de razonamiento aproximado, las variables lingüísticas son fundamentales para representar el conocimiento. Una variable lingüística se define como una variable cuyos valores son palabras o frases en un lenguaje natural o artificial. La razón por la cual se utilizan variables lingüísticas es porque permiten representar elementos complejos o abstractos que no pueden ser definidos en términos numéricos, lo que los hace muy útiles en diversas aplicaciones, como en sistemas de control difuso o en la toma de decisiones (Morcillo, 2011).

La definición formal de una variable lingüística se compone de una quintupla que incluye el nombre de la variable (X), el conjunto de términos que la caracterizan (T(X)), el universo del discurso (U), una gramática libre de contexto (G) que genera los términos de la variable, y una regla semántica (M) que asigna un significado a cada término en T(X) (Morcillo, 2011).

El conjunto de términos T(X) está compuesto por los valores lingüísticos que pueden tomar la variable. Por ejemplo, en una variable lingüística que representa la temperatura, los términos podrían ser "frío", "templado", "caliente", etc. El universo del discurso U es el conjunto de todos los posibles valores que la variable puede tomar (Morcillo, 2011).

La gramática libre de contexto G se utiliza para generar los términos lingüísticos que caracterizan la variable. Por ejemplo, la gramática podría generar términos como "muy frío", "no muy caliente", etc. La regla semántica M es una función que asocia cada término en T(X) con un subconjunto difuso en U. Es decir, cada término en T(X) se asocia con un conjunto de valores de U que representan su significado (Morcillo, 2011).

En resumen, las variables lingüísticas son una herramienta poderosa para representar conocimiento en sistemas de razonamiento aproximado. Con la ayuda de la quintupla (X, T(X), U, G, M), es posible definir de manera precisa y formal las características de una variable lingüística y así utilizarla en diversas aplicaciones en las que se necesite procesar información compleja o difusa (Morcillo, 2011).

2.5.3.5. Sistema de inferencia difusa.

Un sistema de inferencia difusa es un tipo de sistema experto que utiliza el razonamiento aproximado para transformar un conjunto de entradas en una única salida escalar. Este tipo de sistemas se basa en la teoría de conjuntos difusos o borrosos, que permite la representación de la incertidumbre y la imprecisión inherente a muchos problemas del mundo real (R. Pérez, 2010, p.95)

La arquitectura de un sistema de inferencia difusa se compone de varios módulos, que se encargan de realizar diversas operaciones para obtener la salida deseada. El primer módulo es el de fuzzificación, que transforma los valores de las variables de entrada en conjuntos difusos mediante la asignación de grados de pertenencia a cada uno de los términos lingüísticos asociados a dichas variables. A continuación, se aplica el módulo de inferencia difusa, que utiliza las reglas borrosas definidas para relacionar los conjuntos difusos de entrada con el conjunto difuso de salida. Este módulo es el corazón del sistema, ya que es aquí donde se lleva a cabo el proceso de razonamiento aproximado (R. Pérez, 2010, p.95).

El siguiente módulo es el de defuzzificación, que convierte el conjunto difuso de salida obtenido en una salida concreta y precisa. Existen diferentes métodos para realizar esta operación, como el método del centroide, el método del máximo o el método del bisector, entre otros (R. Pérez, 2010, p.95).

Es importante destacar que las reglas borrosas que definen el sistema de inferencia difusa son expresadas de manera explícita, y no implícita como en otros tipos de sistemas expertos. Las reglas borrosas son reglas del tipo "si A es B, entonces C es D", donde A y C son variables de entrada y salida respectivamente, y B y D son términos lingüísticos asociados a las variables (R. Pérez, 2010, p.95)

En resumen, los sistemas de inferencia difusa son una herramienta poderosa para el procesamiento de información imprecisa y ambigua, y son ampliamente utilizados en aplicaciones como el

control de procesos, la toma de decisiones, la robótica, la inteligencia artificial y muchas otras áreas donde la incertidumbre y la imprecisión son un factor importante (R. Pérez, 2010, p.95).

La Figura 23-2, muestra la arquitectura simplificada de lo que es un sistema de inferencia borroso o difuso.

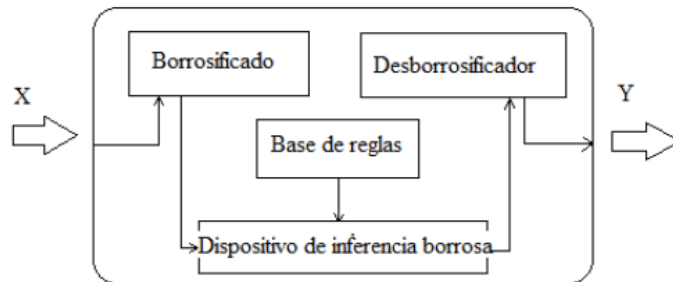


Figura 23-2: Arquitectura de un sistema de inferencia borrosa o difusa.

Fuente: (R. Pérez, 2010).

2.5.3.6. Módulo de fusificación.

Un sistema de inferencia difusa es un sistema experto con razonamiento aproximado que permite mapear un vector de entrada a una salida única mediante el uso de la lógica difusa. La arquitectura de un sistema de inferencia difusa consta de varios módulos, siendo los dos primeros bloques el módulo de fusificación del controlador (Pastelleto, 2012).

En el proceso de fusificación, el vector de entrada x se normaliza mediante constantes a un dominio normalizado antes de convertirse en valores lingüísticos mediante conjuntos difusos. Esta transformación prepara las entradas para el motor de inferencia, que calcula la salida en función de los valores de entrada y las reglas del controlador (Pastelleto, 2012).

El diseño del módulo de fusificación implica la determinación de las constantes de normalización y la estrategia de fusificación, que pueden variar según el problema y las necesidades específicas del sistema en cuestión.

En resumen, un sistema de inferencia difusa utiliza la lógica difusa para permitir un razonamiento aproximado en la toma de decisiones, lo que lo convierte en una herramienta útil para modelar y controlar sistemas complejos donde los valores numéricos no son suficientes o precisos. El módulo de fusificación es fundamental en este proceso ya que transforma los valores numéricos de entrada en valores lingüísticos representados por conjuntos difusos (Pastelleto, 2012).

2.5.3.7. Base de Reglas y motor de Inferencia.

La Base de Reglas y el motor de Inferencia son componentes clave en el diseño de sistemas de control difusos. El motor de inferencia utiliza valores lingüísticos de entrada para aplicarlos como antecedentes en las reglas de la Base de Reglas, calcular los consecuentes o resultados de cada regla, y finalmente combinar estos resultados para llegar al valor lingüístico de salida o resultado final (Mamdani, 1974). Para el diseño de estos módulos es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Definición clara de las entradas y salidas del controlador.
- Dominios, conjunto de términos, conjuntos difusos y funciones de pertenencia para entradas y salidas.
- Elección de la estructura, derivación y contenido de las reglas.
- Selección del motor de inferencia adecuado.
- Elección de métodos para el cálculo difuso, incluyendo operadores para la intersección, unión, implicación, composición y agregación.
- Todos estos datos deben formar parte de la base de datos del controlador para garantizar su correcto funcionamiento.

Por otro lado, la fusificación es el proceso mediante el cual se transforman los valores numéricos de las variables de entrada en valores lingüísticos, que son las etiquetas de los conjuntos borrosos o funciones de membresía. Esto permite la ejecución discreta de la información, es decir, se pueden fraccionar los valores de entrada en un número adecuado de partes y asignar un grado de correspondencia a cada elemento del universo del discurso borroso (Ponce, 2010, p.72).

Para hallar la cantidad de términos que son necesarios en un conjunto, se utilizan fraccionamientos difusos. El número de conjuntos difusos establece la complejidad del regulador, y cada conjunto difuso asume un significado lingüístico, como "negativo", "cero" o "positivo". Es importante realizar un mapeo a escala para convertir los valores medidos en las variables del universo discreto de manera uniforme o no uniforme, o mediante combinaciones de ambos (Ponce, 2010, p.72).

En resumen, para el diseño de sistemas de control difusos, se deben considerar aspectos clave como la definición clara de las entradas y salidas, la elección del motor de inferencia adecuado, la fusificación de los valores numéricos en valores lingüísticos y la utilización de fraccionamientos difusos para determinar la cantidad de conjuntos difusos necesarios. Todo esto permitirá obtener un control óptimo y eficiente del sistema (Ponce, 2010, p.72).

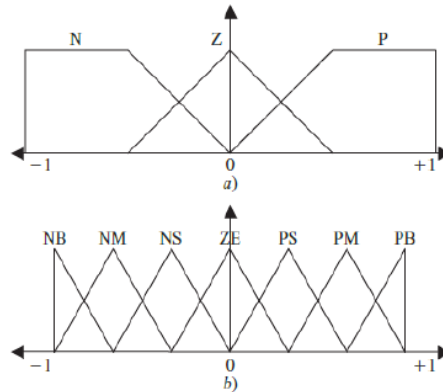


Figura 24-2: Ejemplo de un universo del discurso (dominio de la variable) fraccionado en funciones de pertenencia (o atributos).
Fuente: (Ponce, 2010).

2.5.3.8. Base de conocimiento.

La base de conocimiento es el conjunto de información que se utiliza para controlar una aplicación y alcanzar los objetivos establecidos por el regulador. Esta base está conformada por una base de datos y un conjunto de pautas lingüísticas para controlar la variable. La base de datos proporciona definiciones para la conformación de reglas y para el manejo de datos difusos, y también determina las metas de control y la forma en que los expertos realizan el control a través de propuestas. La unidad, que se refiere a la capacidad de un algoritmo de control difuso para deducir una acción de control oportuno a cada estado del proceso que se va a controlar, es una propiedad esencial de la base de conocimiento. La pericia de la base de datos incluye los soportes para la definición de los conjuntos difusos (Ponce, 2010, p.72).

Por otra parte, existen cuatro modos de derivación de las reglas difusas de control, que implican la consideración de la experiencia de los expertos, el conocimiento de ingeniería de control y las acciones de control de un operador, y la representación de propuestas condicionales que relacionan las variables de estado en el antecedente del proceso con las variables de control del proceso en las consecuencias (Ponce, 2010, p.73).

$$(A_1 \text{ es } \mu_{A1_1}) \wedge (A_2 \text{ es } \mu_{A2_1}) \wedge (A_i \text{ es } \mu_{Ai_k}) \therefore k = 1,2,\dots,m; i = 1,2,\dots,n \quad (13)$$

Dónde:

A_i : Cada uno de los dominios de los valores lingüísticos, por ejemplo, variable: temperatura, presión, caudal.

μ_{Ai_k} : Funciones de pertenencia o atributos de la variable lingüística, por ejemplo: alto, bajo, medio, grande, pequeño. Por lo normal asociado con un adjetivo calificador.

A : Variable simbólica que determina un universo del discurso o dominio de una variable.

\wedge : En este caso en particular, intersección de los grados de verdad de las funciones de pertenencia de una variable lingüística.

2.5.3.9. *Lógica de decisiones.*

En la lógica borrosa, el núcleo de un regulador borroso es utilizado para tomar decisiones. Se simula la lógica que comúnmente utilizan las personas para elegir sus acciones basadas en nociones borrosas, mediante la inferencia de acciones de control. Para esto, se emplean las reglas establecidas en la base de instrucciones y sus aplicaciones (Ponce, 2010).

Una explicación sencilla de la lógica de decisiones consiste en darle un carácter lingüístico a una variable univaluada o crisp, y establecer los conjuntos a los que pueda pertenecer, es decir, las funciones de pertenencia. Una misma variable puede pertenecer a uno o más conjuntos difusos dentro del universo del discurso, lo que ocasiona la excitación o quemado de dos o más funciones de pertenencia asociado a las reglas, pero los grados de verdad deben actuar sobre las reglas de alguna manera que permita tomar decisiones, esto se explica observando la Figura 25-2, donde en a) se observa que los grados de verdad asociado a la activación de una función de pertenencia de la variable, sirve para truncar, mientras que en b) sirve para escalar. Lo importante es que, en la agregación del consecuente, el área asociada a la consecuencia borrosa, se ve afectada cambiando su centroide en la medida que cambien los grados de verdad de las funciones de pertenencia activadas (Ponce, 2010).

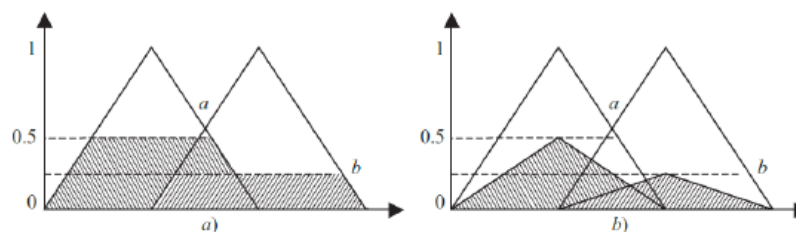


Figura 25-2: Grafica de la agregación de consecuentes, a) empleando la defusificación por truncamiento, b) empleando la defusificación por escalamiento.
Fuente: (Ponce, 2010).

2.5.3.10. *Módulo de Defusificación.*

El módulo de defusificación depende en gran medida del método implementado, ya sea Mamdani o Sugeno. En este estudio se implementa el método de Mamdani, el cual es una forma general de concebir cualquier otro método. En la Figura 25-2, se observa como los grados de verdad operan sobre las funciones de pertenencia de la salida o consecuente, y como estas se agregan mediante

la aplicación de una función máximo, por lo tanto, considerando las funciones de pertenencia que desagregan el universo del discurso, se tiene que la función de agregación de la salida viene dada por:

$$f_o(x) = \max([\mu_{o1}(x)]^\otimes, [\mu_{o2}(x)]^\otimes, \dots, [\mu_{o(n-1)}(x)]^\otimes, [\mu_{on}(x)]^\otimes) \quad (14)$$

En la ecuación (14) se tiene que una función de pertenencia i-ésima de salida es $\mu_{oi}(x)$ y su afectación por la regla activada, ya sea porque la trunca o la escala, como se vio en el apartado anterior, se expresa en la ecuación con la siguiente simbología, $[\mu_{oi}(x)]^\otimes$, y esto considerando una cantidad finita de funciones de pertenencia de salida n , con lo cual, aplicando el método del centroide para $f_o(x)$, definida en la ecuación (14) se tiene la ecuación (15) :

$$x_o = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot f_o(x) \cdot dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f_o(x) \cdot dx} \quad (15)$$

2.5.4. Reglas tipo Mamdani

Las reglas tipo Mamdani son un método popular para la implementación de sistemas de lógica difusa. Estas reglas, propuestas por Mamdani en 1975, son utilizadas para modelar sistemas donde la información disponible no es precisa y se requiere de un enfoque más intuitivo (Pastelleto, 2012).

En un sistema de reglas Mamdani, cada regla consta de dos partes: el antecedente y el consecuente. El antecedente es una expresión lingüística que describe las condiciones en las cuales se aplicará la regla. El consecuente es otra expresión lingüística que describe la acción a tomar si el antecedente es verdadero (Pastelleto, 2012).

En general, una regla Mamdani se representa como:

SI μ_1 es A1 Y μ_2 es A2 Y...Y μ_n es An ENTONCES v es B

Donde los μ_i y v son variables lingüísticas, y los A_i y B representan los valores lingüísticos (términos lingüísticos asociados a conjuntos borrosos) que dichas variables pueden asumir.

La inferencia en sistemas Mamdani comprende dos fases básicas. La primera fase es el cálculo de la parte "SI" de las reglas, en la cual se evalúa el grado de certeza o activación del lado

izquierdo de cada regla para los valores actuales de las variables de entrada. Si la regla que se evalúa es la "n", el grado de certeza o activación se representa por $\mu(n)$ (Mamdani, 1974)

En la segunda fase, se realiza el cálculo de la parte "ENTONCES" a partir del grado de activación determinado en la fase anterior. Para cada variable de salida en el consecuente de la regla, se asigna el conjunto difuso correspondiente modificado en el grado especificado por $\mu(n)$. La función de pertenencia del conjunto modificado se representa por $\mu(n)(v)$, donde "n" es la variable evaluada y "v" es la variable de salida (Pastelleto, 2012).

Las reglas tipo Mamdani tienen varias ventajas, entre ellas, que son más intuitivas y se adaptan mejor al lenguaje humano que otras técnicas de lógica difusa. Sin embargo, también tienen algunas limitaciones, como que no son capaces de manejar la incertidumbre en la misma medida que otras técnicas de lógica difusa más avanzadas (Pastelleto, 2012).

En cuanto a su clasificación, las reglas Mamdani se pueden dividir en dos categorías: reglas simples y reglas compuestas. Las reglas simples tienen un solo antecedente y un solo consecuente. Las reglas compuestas, por otro lado, tienen dos o más antecedentes y/o dos o más consecuentes. Además, las reglas compuestas pueden ser conjunciones o disyunciones. En una conjunción, todos los antecedentes deben ser verdaderos para que se aplique la regla, mientras que en una disyunción, solo uno de los antecedentes debe ser verdadero (Pastelleto, 2012).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Identificación de variables

3.1.1. Variables independientes

Las variables en el tiempo del nivel del reservorio o cota, y el caudal de entrada, por lo tanto, la cota de salida o destino del bombeo, es también una variable independiente.

3.1.2. Variables dependientes

Las variables dependientes son parámetros asociados a los centroides de las funciones de pertenencia de los conjuntos de salida para la determinación por defusificación de la orden del controlador como salida del sistema Mamdani. Finalmente, la orden de control obtenida con el PI difuso, así como también el caudal de salida a la cota de interés a la salida de la tubería de bombeo de la bomba de ariete

3.2. Operacionalización de variables

La matriz operacional de una variable se puede considerar como un cuadro lógico que establece una coherencia y una interrelación entre los aspectos metodológicos y teóricos. Esta matriz cuenta con una serie de características que definen su esencia y significado. En otras palabras, la matriz operacional permite organizar y visualizar de manera sistemática la forma en que se relacionan los diferentes elementos que componen una variable y cómo se pueden medir y analizar. Se trata de una herramienta clave en el diseño y la implementación de investigaciones, ya que facilita la identificación de las variables relevantes y sus relaciones, y permite establecer las estrategias de medición y análisis más adecuadas para cada caso. En resumen, la matriz operacional es un recurso valioso para garantizar la coherencia y la eficacia de los estudios y para obtener resultados precisos y confiables (Hernández et al., 2010).

Según (Hernández et al., 2010)“la operacionalización es el tránsito de la variable al ítem o valor. El paso de una variable teórica a indicadores empíricos verificables y medibles e ítems o equivalentes se le denomina operacionalización. La operacionalización se fundamenta en la definición conceptual y operacional de la variable. Cuando se construye un instrumento, el proceso más lógico para hacerlo es

transitar de la variable a sus dimensiones o componentes, luego a los indicadores y finalmente a los ítems o reactivos y sus categorías”.

En el proceso de operacionalización de las variables en un estudio de investigación, es esencial tener en cuenta la conceptualización de las mismas en relación con el problema que se está abordando. Dado que estas variables se miden de forma numérica, su dimensionalidad no se puede medir en una escala conceptual, ya que cada variable presenta su propia dimensión y su significado es conocido por aquellos que están familiarizados con el tema en cuestión. Sin embargo, en función de la naturaleza del tema y de la relevancia para el público objetivo del estudio, se pueden establecer dimensiones que sean comprensibles para todos, al igual que ocurre con el sistema métrico internacional. Es importante tener en cuenta que pueden existir consideraciones específicas relacionadas con la jerga utilizada en el campo de estudio, como, por ejemplo, las mediciones por unidad tomando como referencia los valores nominales. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta todas las consideraciones relevantes y utilizar una terminología clara y precisa para garantizar la comprensión y la coherencia en la medición y el análisis de las variables. Al hacerlo, se asegura que los resultados obtenidos sean precisos y significativos para el público objetivo y se puedan aplicar de manera efectiva en la práctica (Hernández et al., 2010).

Tabla 1-3: Operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
H_r	Cota del Reservorio	[m]	m.s. n.m. m.r.	- Metros sobre el nivel del mar. - Metros relativos, respecto a un punto establecido.	Altura en metros respecto al nivel del mar [m] Altura en metros respecto a punto específico establecido para la medición [m]	- Medición por triangulación satelital. - Medición mediante tomas de nivel.	- Sistemas de Posicionamiento Global - Nivel topográfico. - Teodolitos.	Metros.
H_o	Cota destino o altura final de bombeo.	[m]	m.s. n.m. m.r.	- Metros sobre el nivel del mar. - Metros relativos, respecto a un punto establecido.	Altura en metros respecto al nivel del mar [m] Altura en metros respecto a punto específico establecido para la medición [m]	- Medición por triangulación satelital. - Medición mediante tomas de nivel.	- Sistemas de Posicionamiento Global - Nivel topográfico. - Teodolitos.	Metros.

Tabla 1-3: Operacionalización de variables

VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
Q_i	Caudal de entrada a la .	$[m^3]$	Q	Caudal medido	Flujo volumétrico	- Presión diferencial placa orificio con sensores piezoeléctricos	- Flujómetro.	Metros cúbicos por segundo
C_i	Centroides de las .	$[V]$	\bar{V}	- Tensión media obtenida por modulación	Tensión Promedio	Medición electrónica.	Voltímetro	Unidad de trabajo por carga prueba
Y_c	Salida del controlado	$[V]$	V	- Tensión media en estado estacionario	Tensión instantánea	Medición electrónica.	Voltímetro	Unidad de trabajo por carga prueba
Q_o	Caudal de entrada a la .	$[m^3]$	Q	- Caudal medido	Flujo volumétrico	- Presión diferencial placa orificio con sensores piezoeléctricos	- Flujómetro.	Metros cúbicos por segundo

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Para la realización de esta investigación se deben cumplir dos etapas, siendo la primera asociada a la construcción de la bomba de ariete, y la segunda etapa, asociada a la instrumentación y colocación de actuador, siendo estos ítems, de manera específica, los caudalímetros y la válvula de comando para la maniobra del golpe de ariete de operación de la válvula.

Tabla 2-3: Operacionalización de variables, relación de dependencia, orden para la obtención de parámetros

Construcción de bomba de Ariete		Instrumentación y colocación de actuador (Caudalímetros y Válvula de Comando)	
Var. Ind.	Var. Dep.	Var. Ind.	Var. Dep.
H_r H_o Q_i	Q_o	H_r H_o Q_i	Q_o C_i Y_c

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

3.3. Matriz de Consistencia

Se trata de una herramienta compuesta por una estructura con múltiples secciones organizadas en filas y columnas, que tiene la capacidad de medir la consistencia y la relación lógica entre el título,

el problema a investigar, los objetivos planteados, las hipótesis formuladas, las variables consideradas, así como el tipo, método y diseño de investigación, la población y la muestra del estudio (Hernández et al., 2010).

Tabla 3-3: Matriz de Consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Implementación de un controlador basado en lógica borrosa en la válvula de impulso, para mejorar el control de bombeo de agua en un prototipo de ariete hidráulico, con el objetivo de asegurar un bombeo continuo de agua.	Implementar un controlador basado en lógica borrosa de tipo Mamdani aplicado a la válvula de impulso de un prototipo de ariete hidráulico para garantizar un bombeo permanente de agua.	¿Puede la implementación de un controlador basado en lógica borrosa de tipo Mamdani aplicado a la válvula de impulso de un prototipo de bomba de ariete hidráulico garantizar la entrega permanente de agua ante variaciones del caudal de entrada?	<p>V Ind.</p> <p>H_r</p> <p>H_o</p> <p>Q_i</p> <p>V Dep.</p> <p>C_i</p> <p>Y_c</p> <p>Q_o</p> <p>-</p>	<p>- Metros sobre el nivel del mar.</p> <p>- Metros relativos, respecto a un punto establecido.</p> <p>- Caudal medido</p> <p>- Tensión media obtenida por modulación.</p> <p>- Tensión media en estado estacionario.</p> <p>- Caudal medido.</p> <p>-</p>	<p>- Medición por triangulación satelital.</p> <p>- Medición mediante tomas de nivel.</p> <p>- Presión diferencial placa orificio con sensores piezoeléctricos</p> <p>- Medición electrónica.</p> <p>- Presión diferencial placa orificio con sensores piezoeléctricos.</p>	<p>- Sistemas de Posicionamiento Global</p> <p>- Nivel topográfico</p> <p>- Teodolito</p> <p>- Flujómetro</p> <p>- Voltímetro</p> <p>- Flujómetro.</p>

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

3.4. Tipo y diseño de la investigación

Este estudio de investigación es de tipo explicativo y no se enfoca en la creación de nuevas teorías, sino en el uso efectivo de la teoría existente para establecer relaciones de correlación entre variables (Hernández et al., 2010). El objetivo principal es implementar un controlador difuso que pueda operar una válvula en una bomba de ariete para garantizar el suministro de agua constante en todo momento. Aunque la experimentación se lleva a cabo en una réplica a escala de la bomba de ariete, se considera como un experimento de laboratorio, lo que permite tener un control total sobre las variables independientes que se manipulan. Además, la mayoría de los ajustes de los parámetros del controlador difuso se realizan a nivel computacional y se realizan correcciones pertinentes en base a criterios que consideran el comportamiento de la variable controlada o caudal de salida.

Métodos de investigación

En la ejecución del estudio, se aplicó el método lógico-inductivo, el cual consiste en la obtención de conclusiones a través de datos empíricos. Se registraron los caudales en el ariete ante diferentes niveles del embalse, y a partir de ellos, se determinaron los centroides de las funciones de pertenencia de salida que permiten la defusificación de la señal del controlador difuso.

3.5. Alcance de la investigación

El alcance del estudio se clasifica como exploratorio y descriptivo. La razón de ello radica en que el tema abordado presenta una escasa presencia en la literatura, lo que hace que el estudio se considere exploratorio. Además, se busca describir y cuantificar los fenómenos objeto de estudio, lo que conlleva a la clasificación del estudio como descriptivo.

3.6. Población de estudio

3.6.1. Unidad de análisis

Según el Doctor (Hernández et al., 2010) en muchos casos la unidad de análisis se equipará con la unidad de muestreo, la cual se define como el tipo de caso seleccionado para el estudio. Hernández destaca la importancia de definir previamente la unidad de muestreo antes de proceder a la selección de la muestra objeto de estudio, ya que la unidad elegida, junto con los indicadores, técnicas e instrumentos, permite obtener las respuestas a las preguntas de investigación.

Tabla 4-3: Tipo de caso que define la unidad de análisis en la investigación

Pregunta directriz de la investigación	Unidad de Análisis			
¿Al parametrizar las funciones de pertenencia de defusificación de los controladores borrosos, haciendo uso del método de optimización del gradiente decreciente, se podrá lograr una condición de operación estable, bajo el criterio de salida acotada ante una entrada de control acotada?	Muestras instantáneas de caudales de entrada y de salida, consigna o set point de flujo, y valores de los centroides de defusificación.			
	Muestra			Parámetros manipulados
	Q_i	Q_o	SP_Q	C_i
¿Cuál de los controladores ofrecerán un mejor criterio de desempeño ante una misma condición de control, durante un mismo o igual lapso de establecimiento, el controlador P, PI, PID?	Muestras instantáneas de caudales de entrada y de salida, consigna o set point de flujo, y valores de los centroides de defusificación.			
	Muestra			Parámetros manipulados
	Q_i	Q_o	SP_Q	C_i
¿Cómo sería la estructura de un controlador PI borroso y su desempeño simulado?	Muestras instantáneas de caudales de entrada y de salida, consigna o set point de flujo, y valores de los centroides de defusificación.			
	Muestra			Parámetros manipulados
	Q_i	Q_o	SP_Q	C_i

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

3.7. Diseño experimental

El diseño utilizado en esta investigación es experimental y se lleva a cabo en un entorno de laboratorio. El objetivo es operar sobre una réplica a escala de la bomba de ariete, para evaluar la eficacia del controlador difuso implementado mediante la medición de la respuesta de la válvula y la instrumentación instalada en el sistema.

El proceso de optimización implica un enfoque sistemático de ensayo y error, utilizando técnicas computacionales para desarrollar un modelo aproximado. Una vez que se ha establecido un modelo de tiempo muerto y respuesta de primer orden del sistema, se procede a ajustar los diferentes controladores difusos como se establece en las preguntas directrices.

3.8. Cronograma de actividades

Obtener los resultados de la investigación y transcribir dichos resultados, incluyendo todo lo involucrado para ello, exigió el cumplimiento del siguiente plan:

Tabla 5-3: Cronograma de actividades para realizar la investigación y tesis

ACTIVIDADES	MESES															
	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión de bibliografía	■	■														
Revisión del marco teórico			■	■	■	■	■	■								
Desarrollo de la metodología									■	■	■	■				
Desarrollo y procesamiento de resultados											■	■	■	■	■	■
Revisión y preparación del documento de tesis					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

3.9. Presupuesto

Tabla 6-3: Costo asociado a la investigación y redacción del documento de

ITEM	PRECIO
Libros y Artículos científicos	2000 usd
Software	0 usd
Computador	1200 usd
Tuberías	300 usd
Válvula	150 usd
caudalímetros	250 usd
Instrumentos de medición	1500
Material para la edición e impresión	200 usd
TOTAL	5600 USD

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diseño mecánico

4.1.1. Introducción

En la elaboración del prototipo de la bomba de ariete hidráulico, se ha tomado en cuenta diversos aspectos, tales como la mecánica de fluidos, diseño mecánico, ingeniería de materiales, entre otros. Se ha utilizado información teórica de diversas fuentes especializadas en energías renovables para llevar a cabo el diseño del prototipo. Además, se ha realizado pruebas de campo y cálculos matemáticos para asegurar el correcto funcionamiento de los componentes mecánicos. Debido a que se implementará un control electrónico en la válvula de impulso, es importante asegurar la precisión en la construcción de los elementos mecánicos para evitar fallas en el futuro.

4.1.2. Parámetros de diseño para el prototipo de ariete hidráulico

El diseño y fabricación del prototipo de ariete hidráulico se basarán en la configuración generalizada de los arietes hidráulicos, de la que obtendremos los parámetros de diseño y calculo como se muestra en la Figura 1-4 (Paredes & Tuquinga, 2013, p.5).

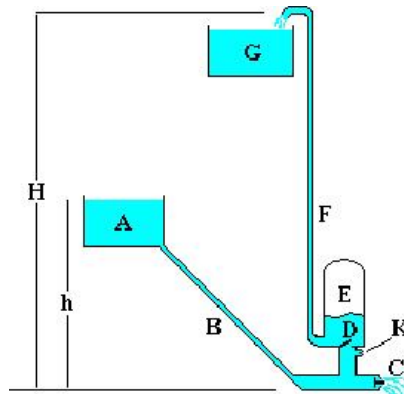


Figura 1-4: Configuración típica de una bomba de ariete.

Fuente: (Guilarte, 2017).

En donde:

H: altura total de elevación del agua tomando desde el ariete hidráulico hasta el reservorio.

h: Altura entre el pozo de captación y el ariete hidráulico.

A: Pozo de captación.

- B: Tubería de alimentación de agua hacia el ariete.
- C: Válvula principal (impulsión).
- D: Válvula tipo check de descarga.
- E: Cámara de amortiguamiento.
- F: Tubería de salida de agua presurizada.
- K: Válvula de ingreso de aire.

Para poner en operación el prototipo de ariete hidráulico se tomó como referencia un lugar aledaño a la ubicación de los arietes instalados, en la que nos permite trabajar fácilmente y hacer modificaciones. En este lugar se realizó mediciones con GPS (Global Position System) para determinar la altura del ariete hidráulico respecto al tanque de captación y el caudal de ingreso (Paredes & Tuquinga, 2013). De estas mediciones se obtuvo que el tanque de captación de agua se ubicará a 2858 m sobre el nivel del mar, mientras que el ariete ira ubicado a 2854 m sobre el nivel del mar. La diferencia de alturas nos da los siguientes parámetros:

$$h = 4 [m] \quad (16)$$

4.1.3. Altura entre el pozo de captación y el ariete hidráulico

La altura entre el pozo de captación y el ariete (h) definen la potencia y la cantidad de agua descargada en la salida del ariete, a mayor altura disponible del pozo de captación y el ariete, mayor será el agua descargada (Diamer & Chi, 2002).

4.1.4. Pozo de captación

En el diseño del pozo de captación se deben considerar 2 requerimientos como son: el volumen de agua y el nivel mínimo al que debe bajar el agua sobre la boca de la tubería de presión, de esto depende para calcular el diámetro adecuado de la tubería de alimentación desde el pozo de captación hacia el ariete (Diamer & Chi, 2002).

4.1.5. Cálculo de la distancia entre el pozo de captación y el ariete

La distancia entre el pozo de captación y el ariete no debe ser muy larga porque ocasiona pérdidas de fricción en la tubería y reduce la capacidad de bombeo y si es muy corta provoca un cierre prematuro de la válvula de impulsión imposibilitando el adecuado aumento de presión en el cuerpo del ariete (Paredes Godoy & Tuquinga Guzmán, 2013).

La longitud (L) y el diámetro (D) debe cumplir la inecuación y estar dentro de los límites $150 \leq L/D \leq 1000$, de lo contrario la operación del ariete será defectuosa.

La siguiente ecuación permite calcular la distancia de la tubería de impulso desde el pozo de captación hasta el ariete:

$$L = 5h \quad (17)$$

Dónde:

L= Distancia entre el pozo de captación y el ariete (m)

h= Altura entre el pozo de captación y el ariete hidráulico (m)

Si:

$$h = 4 [m] \quad (18)$$

Se tiene:

$$L = 5(4) = 20 [m] \quad (19)$$

$$150 \leq \frac{20}{0.05765} \leq 1000 = 346.9 \quad (20)$$

Al observar la inecuación y comparar los resultados determinamos que la longitud (L) está comprendida entre los límites de 150 min a 1000max (Diamer & Chi, 2002).

4.1.6. Selección del diámetro óptimo de la tubería de impulsión

La tubería de impulsión transporta agua a alta presión desde el depósito de agua hacia el ariete hidráulico, debido a la alta presión que se genera por el cierre instantáneo de la válvula de impulsión del ariete hidráulico se genera una altísima presión que luego es transmitida por todo el trayecto de la tubería, estos parámetros permitirán un funcionamiento correcto del ariete hidráulico (Saldarriaga et al., 2017).

Para seleccionar la tubería de presión se comparó las bondades de los materiales que posee la tubería de acero galvanizado, PVC y acero común o negro, esto se puede observar en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Características de tuberías de varios materiales

Material	Perdida por fricción	Corrosión	Peso	Costo	Presión de trabajo	Vida útil	C min	C max
PVC	5	4	5	4	3	3	150	150
Hierro galvanizado	4	4	4	4	5	5	120	120
Acero comercial	3	3	3	2	4	4	90	110

Fuente: (Paredes & Tuquinga, 2013).

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Como se puede observar en la tabla anterior, la tubería de hierro galvanizado posee mejores características, por la cual asumimos para este proyecto una tubería de dos pulgadas de acero galvanizado. En el manual de aceros de la empresa Dipac S.A se muestra las siguientes características para esta tubería:

Espesor del tubo = 2.65 mm

Presión interna que soporta el tubo = 21 kg/ mm²

Diámetro nominal del tubo = 2 in

Diámetro Interior del tubo = 57.65 mm

Diámetro exterior del tubo = 60.30 mm

El caudal que proporciona una tubería de presión de 2" de diámetro con las características antes mencionadas, se determina con la ecuación de Williams – Hazen (Saldarriaga et al., 2017).

$$Q = 0.2785 \times C \times D^{2.63} \times S^{0.54} \quad (21)$$

Donde:

Q = caudal de diseño, (m³ /s).

C = Coeficiente que depende de la rugosidad del tubo (m).

D = Diámetro interior del tubo lleno, (m).

S = Pendiente de la tubería entre el pozo de captación y el ariete [m/m]

L = longitud desde el depósito de captación hasta el ariete hidráulico.

Si:

C = 120 para hierro galvanizado según la tabla 3.1

D = 0.05765m

$h = 4\text{m}$.

$L = 20\text{m}$

Entonces:

$$S = \frac{h}{L} \Rightarrow S = \frac{4}{18} = 0.22 \quad (22)$$

$$Q = 0.2785 \times 120 \times 0.5765^{2.63} \times 0.2^{0.54} \Rightarrow Q = 0.007717 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 7.71 \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (23)$$

La válvula de impulso, descarga y la tubería conectada entre el pozo de captación y el ariete hidráulico son los elementos fijos más importantes porque soportan todas las fuerzas de choque y vibración que causa el fenómeno de golpe de ariete (Saldarriaga et al., 2017).

4.1.7. Cálculo del área de la tubería de impulsión

Para este cálculo se toma como base los datos de tubería proporcionados por el manual de DIPAC S. A.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \Rightarrow Q = \frac{\pi \cdot 0.05865^2}{4} = 0.00261 \text{ m}^2 \quad (24)$$

4.1.8. Velocidad del agua calculada dentro de la tubería de impulsión

Para este cálculo se toma como base los datos de tubería proporcionados por el manual de DIPAC S. A.

$$V_o = \frac{Q}{A} \Rightarrow V_o = \frac{0.00771}{0.00261} = 2.95 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (25)$$

4.2. Volumen del pozo de captación

Para mantener caudal constante en la tubería de presión y evitar que ingrese aire el volumen del tanque se considera lo que dice la bibliografía de (Saldarriaga et al., 2017). y se determina con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{0.693 \times A \times V_o^2}{i \times g} \quad (26)$$

Donde:

V = volumen mínimo del pozo de captación (m³)

A = área de la tubería de alimentación hacia el ariete (m²)

V_o = Velocidad del agua calculada dentro de la tubería de impulsión (m/s)

g = aceleración (m/s²)

i = pendiente de la superficie donde va asentado la tubería de alimentación (%)

Si:

$$\begin{aligned} A &= 0.00261 \text{ m}^2 \\ V_o &= 2.95 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ g &= 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ i &= 1\% = 0.01 \end{aligned} \quad (27)$$

Entonces:

$$V = \frac{0.693 \times 0.00261 \times 2.95^2}{0.01 \times 9.8} = 0.16 \text{ m}^3 \quad (28)$$

Para garantizar las pruebas en campo del ariete hidráulico y contar con la suficiente cantidad de agua de suministro se coloca un tanque de 1.1m³ de suministro, a pesar de que en los cálculos físicos solo se determina 0.43m³. Este tanque abastecerá al ariete hidráulico de agua y permitirá hacer las pruebas requeridas. La Figura 2-4 muestra el tanque de suministro (Saldarriaga et al., 2017).



Figura 2-4: Tanque de suministro de agua para el ariete hidráulico.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.3. Altura máxima del agua descargada

La altura (H) máxima de agua descargada se obtiene mediante la siguiente ecuación según la bibliografía.

H = se deberá escoger entre 10 y 12 veces la altura (h)

Si:

h = 4m entre el ariete y el pozo de captación

Se tiene:

$$H = 10 \times 4 [m] = 40 [m] \quad (29)$$

4.4. Cálculo de (Hr) total de pérdidas

El coeficiente total (Hr) de pérdidas, se determina por la siguiente ecuación:

$$H_r = 1 + \lambda \frac{L}{D_i} + \sum K \quad (30)$$

Dónde:

Hr = coeficiente de pérdidas totales en la tubería (m).

λ = coeficiente de resistencia de la tubería de alimentación.

$\sum K$ = sumatoria de las resistencias provocadas por codos, uniones y válvula de impulsión.

L = longitud de la tubería de impulso (m)

D_i = Diámetro útil interno de la tubería de alimentación hacia el ariete (m).

4.4.1. Cálculo del coeficiente de resistencia (λ)

El coeficiente de fricción o coeficiente de resistencia (λ) es una magnitud que se utiliza en mecánica de fluidos para describir la resistencia que opone un fluido al movimiento de un objeto sólido en su interior. Esta magnitud se define como la relación entre la fuerza de arrastre que ejerce el fluido sobre el objeto y la fuerza de inercia del fluido (Saldarriaga et al., 2017).

El valor del coeficiente de resistencia (λ) depende de dos factores fundamentales: la rugosidad relativa (ϵ) y el número de Reynolds (Re). La rugosidad relativa se define como la relación entre

la altura de las rugosidades presentes en la superficie del objeto y el diámetro hidráulico de la sección del objeto en la dirección del flujo. La rugosidad relativa es importante porque afecta la cantidad de turbulencia en el flujo del fluido alrededor del objeto, lo que a su vez influye en la cantidad de resistencia que el objeto experimenta (Saldarriaga et al., 2017).

El número de Reynolds (Re) es otra variable fundamental que influye en el valor del coeficiente de resistencia (λ). Este número se utiliza para caracterizar el régimen de flujo que se produce en un fluido alrededor de un objeto sólido. Se define como la relación entre la inercia del fluido y la viscosidad dinámica del mismo. En términos prácticos, el número de Reynolds indica si el flujo de un fluido es laminar o turbulento. El valor del coeficiente de resistencia (λ) aumenta con el número de Reynolds, ya que, a mayores velocidades y turbulencias, se produce mayor resistencia al movimiento del objeto (Diamer & Chi, 2002).

En conclusión, el cálculo del coeficiente de resistencia (λ) es una herramienta importante en la mecánica de fluidos, ya que permite predecir la cantidad de resistencia que un objeto sólido experimentará al moverse dentro de un fluido. Este valor depende principalmente de la rugosidad relativa (ϵ) y el número de Reynolds (Re), por lo que es importante tener en cuenta estos factores para obtener una medición precisa (Saldarriaga et al., 2017).

4.4.2. Cálculo del parámetro principal (Número de Reynolds)

Este parámetro está en función de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V_o Di}{\gamma} \quad (31)$$

En donde:

V_o = Velocidad del agua calculada dentro de la tubería de impulsión (m/s).

Di = Diámetro útil interno de la tubería de alimentación hacia el ariete (m)

γ = viscosidad cinemática del agua a 15 grados, (m^2/s), (ver anexo A)

Re = número de Reynolds

Si:

$$\begin{aligned} V_o &= 2.95 \frac{m}{s} \\ Di &= 0.05765m \\ \gamma &= 1.14 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s} \end{aligned} \quad (32)$$

Se tiene:

$$Re = \frac{2.95 \times 0.05665}{1.14 \times 10^{-6}} = 146\,594.29 \quad (33)$$

Según el valor obtenido de Reynolds el flujo es turbulento porque $Re \geq 4000$

4.4.2.1. *Obtención de la Rugosidad relativa.*

Este parámetro se determina por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{e}{Di} \quad (34)$$

Dónde:

Di= Diámetro útil interno de la tubería de alimentación hacia el ariete (m)

e = rugosidad absoluta de la tubería.

E= rugosidad relativa de la tubería.

Si:

$$Di = 0.05765 \text{ [m]} \quad (35)$$

e = 0.00015. Tubería de acero galvanizado (ver Anexo B)

Se tiene:

$$\varepsilon = \frac{0.00015}{0.05765} = 0.0026 \quad (36)$$

Una vez obtenidos los valores de (ε) y (Re) intersecamos en el diagrama de Moody y obtenemos el parámetro λ (ver Anexo C).

$$\lambda = 0.0258 \quad (37)$$

4.4.3. *Cálculo de la sumatoria (ΣK)*

En la Tabla 2-4 se observa el factor K para algunos accesorios (ver Anexo D):

Tabla 2-4: Valores K para algunos accesorios

ACCESORIOS	K
1 válvula de bola	0.15
1 neplo de 2 pulgadas	0.05
5 uniones de 2 pulgadas	0.05
1 unión tipo fushing	0.05

Fuente: (Paredes & Tuquinga, 2013)

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.4.4. Resistencia de la válvula de impulsión

El coeficiente (K) de resistencia de paso de la válvula de impulsión, se determina según (Paredes & Tuquinga, 2013) con la siguiente ecuación:

$$K = (1.645 \frac{A_c}{A_p} - 1)^2 \quad (38)$$

$$A_c = \frac{\pi(D_c)^2}{4} \quad (39)$$

$$A_p = \pi D_o S \quad (40)$$

Dónde:

A_p = área de desalojo de agua de la válvula de impulsión, (m²).

A_c = área interna del cuerpo principal del ariete, (m²).

D_o = diámetro del orificio de la válvula de impulso (m).

D_c = diámetro interno del cuerpo principal del ariete, (m).

S = carrera máxima de desplazamiento de la válvula de impulso, (m).

Si:

$$\begin{aligned} D_c &= 0.1107 \text{ m} \\ D_o &= 0.0577 \text{ m} \\ S &= 0.02 \text{ m} \end{aligned} \quad (41)$$

Tiene:

$$A_c = \frac{\pi(0.1107)^2}{4} = 0.0096 \text{ m}^2 \quad (42)$$

$$A_p = \pi * 0.0577 * 0.02 = 0.003625 \text{ m}^2 \quad (43)$$

Ponemos estos valores en la ecuación y se obtiene:

$$K = (1.645 \frac{0.00577}{0.003625} - 1)^2 = 2.61 \quad (44)$$

ΣK Será la suma de los valores anteriores:

$$\Sigma K = 2.61 + 0.05 + (5 * 0.05) + 1 + 0.15 = 4.06 \quad (45)$$

Reemplazando los valores en la ecuación de Hr se tiene:

$$Hr = 1 + 4.06 + 0.0258 \frac{20}{0.05765} \quad (46)$$

$$Hr = 14.01m \quad (47)$$

4.4.5. Cálculo de la velocidad de apertura y cierre de la válvula de impulsión

Para que la válvula de impulso se cierre oportunamente se debe calcular la velocidad necesaria del agua con la siguiente ecuación:

$$Vc = 0.5 \sqrt{\frac{2gh}{Hr}} \quad (48)$$

Dónde:

Vc = velocidad de cierre y apertura de la válvula de impulsión (m/s)

h = Altura entre el pozo de captación y el ariete hidráulico (m)

Hr = Coeficiente de pérdidas totales en la tubería (m)

Si:

$$\begin{aligned} h &= 4m \\ g &= 9.8 \frac{m}{s^2} \\ Hr &= 14.01m \end{aligned} \quad (49)$$

Se tiene:

$$Vc = 0.5 \sqrt{\frac{2 * 9.8 * 4}{14.01}} = 1.18 \text{ m/seg} \quad (50)$$

4.5. Cálculo de la presión (Ht) total de la carga ejercida en la válvula de impulsión

La presión (Ht), una vez que se cierre la válvula de impulsión se determinada por la suma de la altura (h) entre el pozo de captación y el ariete más la subida de presión (ha) debido al golpe de ariete.

$$H_t = h + h_a \quad (51)$$

Donde:

$$h_a = \frac{V_c * a}{g} \quad (52)$$

$$a = \frac{1466.28 \text{ m/seg}}{\sqrt{1 + \frac{D_i * K}{\delta E}}} \quad (53)$$

Di = Diámetro útil interno de la tubería de alimentación hacia el ariete (m)

K= módulo de elasticidad del agua (kg/cm²)

δ= espesor de la tubería (m)

E = módulo de elasticidad de la tubería (kg/cm²)

Vc = velocidad de cierre y apertura de la válvula de impulsión (m/seg)

g = aceleración (m/seg²)

Si:

$$D_i = 0,05657$$

$$K = 21938.775 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{ver Anexo E})$$

$$\delta = 2.65\text{mm} = 0.00265\text{m}$$

$$E = 2,1 * 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$V_c = 1.18 \text{ m/seg}$$

$$g = 9.81\text{m/seg}^2$$

Se tiene:

$$a = \frac{1466.28 \text{ m/seg}}{\sqrt{1 + \frac{0.05765 * 21938.775}{0.00265 * 2,1 * 10^6}}} = 1323.5685 \quad (54)$$

$$h_a = \frac{1.18 * 1323.5685}{9.81} = 159.36 \text{ m} \quad (55)$$

Si:

$$h_a = 159.36\text{m}$$

$$h = 4\text{m}$$

Entonces:

$$H_t = h + h_a \quad (56)$$

$$H_t = 4 + 159.36 = 163.36\text{m} \quad (57)$$

4.6. Diseño y construcción de la válvula de impulsión

La válvula de impulso es una parte muy importante del ariete, por la razón que es aquí donde se aplicara el control electrónico con la finalidad de variar el tiempo de apertura y cierre. Además, debe soportar el golpe de ariete, la fatiga del material, entre otras (Guilarte, 2017).

Considerando los términos mecánicos se logra construir una válvula que será regulada por un controlador electrónico utilizando el peso del agua ubicado en la parte superior de la misma. Esto permite que la válvula sea fácil de reemplazar, en la Figura 3-4 se aprecia la construcción total de la válvula (Guilarte, 2017).



Figura 3-4: Válvula de impulso.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.6.1. Cálculo del espesor de asiento y el diámetro de la válvula de impulsión

El diámetro de pie de la válvula (d_{pv}) viene determinado por la siguiente relación, según (Saldarriaga et al., 2017).

$$d_{pv} = 1.25 d_0 \quad (58)$$

Dónde: d_0 = diámetro del orificio de la válvula de impulso (m).

Si:

$$d_0 = 0,0577m \quad (59)$$

Se tiene que:

$$d_{pv} = 1.25 * 0.0577 \quad (60)$$

$$d_{pv} = 0.0721mm \quad (61)$$

El espesor del pie de la válvula de impulsión será ligeramente menor al espesor del pie de la válvula de descarga y de determina con la siguiente ecuación:

$$e = 0.14 d_0 \quad (62)$$

Dónde:

e = espesor del pie de la válvula, (m).

Si:

$$d_0 = 0,05765 \quad (63)$$

Se tiene:

$$e = 0.14 * 0.05765 \quad (64)$$

$$e = 0.008071m \quad (65)$$

4.6.2. Cálculo del diámetro (d_v) del vástago

El diámetro del vástago de la válvula viene dado por la siguiente ecuación, según (Paredes Godoy & Tuquinga Guzmán, 2013).

$$d_v = 0.12d_0 + 10 \quad (66)$$

Dónde:

d_v = diámetro del vástago de la válvula en (m).

Si: $d_0 = 57,65\text{mm}$

Se tiene:

$$d_v = 0.12 * 57.65 + 10 \Rightarrow d_v = 16.91\text{mm} \quad (67)$$

En la figura 4.4 se aprecia la construcción de la válvula de impulso con su debido asiento y vástago de acuerdo con los cálculos realizados anteriormente.



Figura 4-4: Asiento y vástago de válvula.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.6.3. Cálculo de la distancia de cierre de la válvula de impulsión

Para una correcta operación de la bomba de ariete, la válvula de impulsión deberá cerrarse lo más pronto posible, bajo esta condición es necesario crear una válvula liviana y de carrera corta, pero tampoco deberá ser muy liviana puesto que no se abrirá oportunamente en el ciclo de impulsión. Si la carrera es muy corta no expulsará suficiente agua reduciendo la velocidad dentro de la tubería de alimentación y por ende reduce la presión en la válvula de descarga (Saldarriaga et al., 2017).

Según (Diamer & Chi, 2002), la carrera máxima entre el asiento de la válvula de impulsión y la brida de cierre queda limitada al 25 – 33% del diámetro de la válvula de impulsión. Por tanto, la carrera de la válvula de impulsión se determina por la siguiente ecuación.

$$S = 0.29d_{pv} \quad (68)$$

Si:

$$d_{pv} = 0,072m \quad (69)$$

Se tiene:

$$S = 0.29 * 0.072 \Rightarrow S = 0.02m \quad (70)$$

4.6.4. Longitud del vástago

El vástago de la válvula de impulsión debe resistir la vibración, la corrosión y la fatiga del material, puesto que es el eje central por donde se transmiten las fuerzas de choque hacia los demás componentes mecánicos, y además es quien permite regular la carrera de la válvula en conjunto con un tornillo sin fin ubicado a un costado (Diamer & Chi, 2002).

La longitud total comprenderá desde el pie de válvula hasta la parte roscada más alta, para esto se considera las longitudes de los accesorios involucrados y el desplazamiento total de la válvula sin afectar su funcionamiento, por lo tanto, tenemos que:

$$L_v = 25cm \quad (71)$$

4.6.5. Cálculo el peso (W) de la válvula de impulsión

Para el peso total (W) de la válvula de impulsión se suman los pesos del pie de válvula, del vástago, tuercas y contratueras (Saldarriaga et al., 2017).

Peso del pie de la válvula.

$$W_1 = \frac{\gamma_a \pi (d_{pv}^2 - d_v^2) e}{4} \quad (72)$$

Dónde:

W_1 = peso del pie de la válvula (kg)

γ_a = peso específico acero (kg/m^3)

d_{pv} = diámetro de pie de válvula (m)

d_v = diámetro de vástago de la válvula de impulso (m)

e = espesor de la válvula (m)

Si:

$$\gamma_a = 7755 kg/m^3$$

$$d_{pv} = 0.072\text{m}$$

$$d_v = 0.016\text{m}$$

$$e = 0.008\text{m}$$

Se tiene:

$$W_1 = \frac{7755 * \pi(0.072^2 - 0.016^2) * 0.008}{4} \Rightarrow S = W_1 = 0.24 \text{ kg} \quad (73)$$

4.6.6. Cálculo del peso del vástago

Para calcular su peso se toma en cuenta el diámetro de 16mm. (Saldarriaga et al., 2017).

$$W_2 = \frac{\gamma_a \pi d_n^2 L_v}{4} \quad (74)$$

Dónde:

W2= peso del vástago, (kg)

dn= diámetro calculado, (m)

Lv= longitud calculada del vástago (m)

Si:

$$dn = 0.016\text{m}$$

$$L_v = 0.25\text{m}$$

Se tiene:

$$W_2 = \frac{7755 * \pi * 0.016^2 * 0.25}{4} \Rightarrow W_2 = 0.38\text{kg} \quad (75)$$

Cada tuerca tiene un peso de 0,008 kg, y cada arandela pesa alrededor de 0.0002835 kg. Si hay un total de 4 tuercas y contratuercas y 2 arandelas el peso total es el siguiente:

$$W_3 = (5 * 0.008) + 0.0002835 * 2 \Rightarrow W_3 = 0.04\text{kg} \quad (76)$$

Luego el peso total de la válvula será:

$$W_T = W_1 + W_2 + W_3 \quad (77)$$

Se tiene:

$$W_T = 0.24 + 0.38 + 0.04 \Rightarrow W_T = 0.66\text{kg} \quad (78)$$

4.6.7. Cálculo del área de cierre de la válvula de impulsión

Según (Paredes & Tuquinga, 2013) se determina con la siguiente ecuación:

$$A' = \frac{\pi}{4} d_{pv}^2 \quad (79)$$

Si:

$$d_{pv} = 0.072 \text{ m}$$

Se tiene:

$$A' = \frac{\pi}{4} 0.072^2 \Rightarrow A' = 0.004 \text{ m}^2 \quad (80)$$

4.7. Cálculo del coeficiente de resistencia de cierre

Para obtener este coeficiente (K_o) de resistencia de cierre se determina con la siguiente ecuación:

$$K_o = \frac{W \times g}{A' \times \gamma_{\text{agua}} \times V_c^2} \quad (81)$$

Donde:

K_o = Coeficiente de resistencia al cierre.

W = peso total de la válvula de impulsión (kg)

g = gravedad (m/s^2).

A' = área tota del pie de la válvula de impulsión.

γ_{agua} = densidad del agua a temperatura ambiente.

V_c = velocidad de cierre y apertura de la válvula de impulsión (m/s)

Si:

$$W = 0.66 \text{ kg}$$

$$g = 9.8 \text{ (m/s}^2 \text{)}$$

$$A' = 0.004 \text{ m}^2$$

$$\gamma_{\text{agua}} = 10 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$V_c = 1.18 \text{ m/seg}$$

Se tiene:

$$K_o = \frac{0.66 \times 9.81}{0.004 \times 1000 \times 1.18^2} \Rightarrow K_o = 1.16 \quad (82)$$

4.8. Cálculo del peso máximo requerido de la válvula de impulsión

Si el peso total de la de la válvula de impulsión cumple con la inecuación que se muestra a continuación entonces funcionara correctamente ariete hidráulico.

$$0 < W < \frac{2HA'\gamma K_0}{\lambda} \quad (83)$$

Para hallar el peso máximo de la válvula e impulsión adecuada para soportar el choque hidráulico y continuar con el ciclo normal de cerrarse y abrirse periódicamente se transforma la inecuación anterior en la siguiente ecuación:

$$W_{max} = \frac{2 * h * A * \gamma_{agua} * K_0}{H_r} \quad (84)$$

Si:

$$A' = 0.004 \text{ m}^2$$

$$\gamma_{agua} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$K_0 = 1.16$$

$$H_r = 14.01 \text{ m}$$

Se tiene:

$$W_{max} = \frac{2 * 4 * 0.004 * 1000 * 1.16}{14.01} \Rightarrow W_{max} = 2.64 \text{ kg} \quad (85)$$

Mediante el análisis del peso máximo que debe tener la válvula de impulsión para un óptimo funcionamiento y a la máxima capacidad de bombeo, se reemplaza en la inecuación anterior y se compara si los valores obtenidos están dentro del intervalo permitido como se muestra a continuación:

$$0 < 0.66 \text{ kg} < 2.64 \text{ kg} \quad (86)$$

El peso W está dentro del intervalo permitido por lo tanto la válvula de impulsión se cerrará y abrirá periódicamente para todos los ciclos de trabajo.

4.9. Diseño y construcción de la válvula de descarga

La ubicación de esta válvula se encuentra entre la cámara de aire y el cuerpo principal de la bomba de ariete. Esta válvula funciona inversamente a la válvula de impulso, de esta manera permite ingresar el agua a alta presión en una sola dirección evitando que regrese al cuerpo del ariete. La Figura 5-4 muestra la configuración de la válvula de descarga, en la que actúa un muelle que permitirá retornar prontamente y cerrarse antes de que el agua presurizada retorne al cuerpo del ariete (Diamer & Chi, 2002).



Figura 5-4: Válvula de descarga.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.9.1. Cálculo del área de paso de la válvula de descarga

El cálculo del área de paso de la válvula de descarga se basa en las hipótesis mencionadas en (Paredes & Tuquinga, 2013), de donde tenemos que:

1. El caudal de descarga (q) que atraviesa la válvula debe ser el mayor posible.
2. La velocidad del agua que atraviesa la válvula será de movimiento retardado y su valor igual al valor medio de la velocidad en la tubería de impulso necesaria para el cierre de la válvula de impulso.

Por tanto, el área de paso (A) será igual a:

$$A_{pd} = \frac{q}{V_d} \quad (87)$$

Dónde:

q = caudal de descarga, (m³/seg).

V_d = velocidad del agua a través de la válvula, (m/seg).

A_{pd} = área de paso de la válvula de descarga

El caudal de descarga (q) se basa en la siguiente ecuación:

$$q = Qa * \frac{h}{H} * \eta * 86400 \quad (88)$$

Dónde:

Qa = Caudal de alimentación del pozo de captación.

H: altura total de elevación del agua tomando desde el ariete hidráulico hasta el reservorio.

h: Altura entre el pozo de captación y el ariete hidráulico.

η = eficiencia del ariete

Para obtener la eficiencia del ariete se contempla la siguiente ecuación dada por (Saldarriaga et al., 2017).

$$\eta = 0.258 \sqrt{12.8 - \frac{H}{h}} \Rightarrow \eta = 0.258 \sqrt{12.8 - \frac{40}{4}} = 0.43 = 43\% \quad (89)$$

El prototipo de ariete necesita elevar 30 m.c.a. para ser óptimo, por la cual se calcula la eficiencia nuevamente con esta referencia.

$$\eta = 0.258 \sqrt{12.8 - \frac{30}{4}} = 0.59 = 59\% \quad (90)$$

El rendimiento calculado nos indica que el ariete entregará óptimamente el caudal requerido, para lo cual calculamos el caudal entregado con estos parámetros.

Sí:

Qa = 7.71 lt/s

H= 4m

h =40 m

η = 0.43 rendimiento calculado anteriormente

Se tiene:

Para una altura de 40m se tiene:

$$q = 7.71 * \frac{4}{40} * 0.43 * 86400 = 28,644.19 \frac{lit}{dia} \quad (91)$$

$$q = 0.33 \frac{\text{lit}}{\text{seg}}$$

$$q = 19.8 \frac{\text{lit}}{\text{min}} = 19.8 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \quad (92)$$

La velocidad del agua que pasará cuando se abre la válvula de descarga será igual a:

$$Vd = \frac{V_c}{2} \quad (93)$$

Si:

$$V_c = 1.18 \text{ m/seg}$$

Se tiene:

$$Vd = \frac{1.18}{2} = 0.59 \text{ m/s} \quad (94)$$

Si reemplazamos los valores calculados de q y Vd en la ecuación se tiene.

$$A_{pd} = \frac{19.8 \times 10^{-3}}{0.59} \Rightarrow A_{pd} = 0.0335 \text{ m}^2 \quad (95)$$

4.9.2. Cuerpo del ariete

El cuerpo del ariete tiene forma cilíndrica y está construido de acero galvanizado de 4" de diámetro y 3mm de espesor con la finalidad que soporte las tensiones y fatigas producidas por el fenómeno del golpe de ariete. Además, se conectan dos bridas principales que ayudan a conectar fácilmente la válvula de impulso y la cámara de presión donde se encuentra la válvula de descarga. En la figura 3.6 se puede notar el cuerpo principal del ariete.



Figura 6-4: Cuerpo principal del ariete hidráulico.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.9.3. Ensamblaje del ariete hidráulico

En vista que el ariete hidráulico está formado por partes móviles y empernadas es muy fácil realizar su montaje para las diferentes pruebas mecánicas. Solamente se debe tener en consideración el ajuste apropiado de los pernos y la colocación correcta de los empaques y sellos ente cada una de las piezas. La figura 3.7 muestra el ensamblaje total del ariete.



Figura 7-4: Ensamblaje total del ariete hidráulico.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.9.4. Tubería de alimentación

Para este proyecto se colocó 3 tuberías de tubo galvanizado de 2” para el transporte de agua desde el depósito hasta el ariete como se puede observar en la figura.



Figura 8-4: Tubería de alimentación e instalación total del ariete hidráulico.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.9.5. Sistema de control en la válvula de impulso

Se necesita un sistema de control para regular la altura del vástago de la válvula frente a un caudal de entrada variante para que el sistema de bombeo no se detenga. Para elegir el sensor de distancia y conocer la altura en que se encuentra el vástago de la válvula, al principio se experimentó con

sensores ópticos y ultrasónicos, pero se concluyó que son elementos muy inestables, por lo que se escogió trabajar con un potenciómetro lineal como el de la Figura 9-4 (Peña, 2020).

El potenciómetro lineal es un elemento resistivo, que al ser conectado a un voltaje de entrada de 5V, y al variar su posición, cambia su resistencia, generando un voltaje entre 0 V y 5 V.



Figura 9-4: Potenciómetro Lineal.
Fuente: (Peña, 2020).

Tabla 3-4: Especificaciones del Potenciómetro Lineal

Salidas	2 Analógicas
Tamaño	90 * 20 mm
Peso	20 g
Voltaje	3.3 – 5 V
Puerto	Analógico
Resistencia	10 K Ω

Fuente: (Paredes & Tuquinga, 2013).

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Según, la ventaja de usar un sensor puramente resistivo es su estabilidad. Además, la medida del rango de variación del potenciómetro tiene un alcance desde 0mm hasta 60 mm. Siendo un buen compromiso de medición, ya que la distancia de apertura de la válvula se encuentra aproximadamente entre 0mm a 30mm, afirmando que el sensor lineal será el ideal para el sistema. Los datos obtenidos de voltaje analógico en función de la distancia se presentan en la Tabla 4-4, y su comportamiento se observa en el Gráfico 1-4 (Peña, 2020).

Tabla 4-4: Tensión en función de la distancia del potenciómetro lineal

Distancia	Voltaje	Entrada Analógica Micro
0mm	0.00 V	0
5mm	0.014V	3
10mm	0.07 V	15
15mm	0.16 V	33
20mm	0.63 V	129
25mm	1.47 V	301
30mm	2.32 V	476
35mm	3.24 V	664
40mm	4.16 V	853
45mm	4.81 V	985
50mm	4.91 V	1006
55mm	4.97 V	1017
60mm	5 V	1023

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

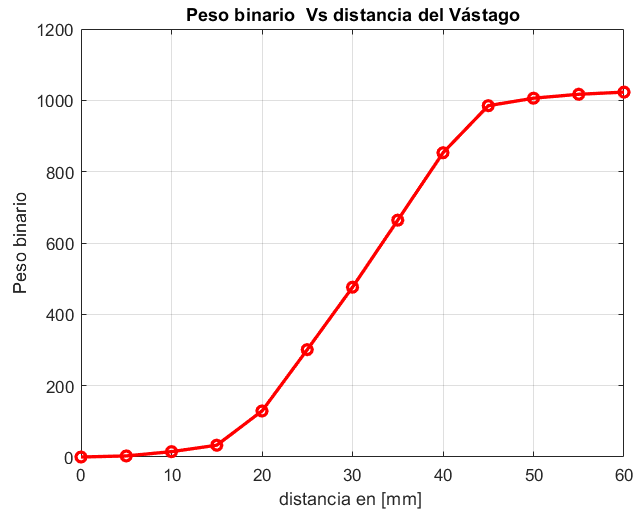


Gráfico 1-4: Gráfica Peso digital vs distancia del potenciómetro lineal.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Para desarrollar el modelo de la distancia del vástago de la válvula de la bomba de ariete en función del peso binario, se consideró el peso binario y la distancia del sensor resistivo y se determinó que no es una función lineal. Para que el sistema de control este balanceado se debe establecer una función de acuerdo con la gráfica. Por lo cual se hizo uso del ajuste de curva mediante la minimización del error cuadrático. La mejor representación matemática para esta curva es la ecuación (96):

$$desplazamiento = \frac{\ln\left(\frac{\text{peso binario}}{1039.7 - \text{peso binario}}\right)}{0.1735} + 31.0526 \quad (96)$$

Por ejemplo, si la lectura digital o peso binario es 1000, el desplazamiento es de 49,64 mm, tal y como se observa en la Gráfico 1-4.

Se representó la expresión obtenida como una curva de color azul en el plano especificando valores para la variable independiente de distancia entre 0 a 60 mm en intervalos de 0.5 mm (variable x), esto se muestra en el Gráfico 2-4.

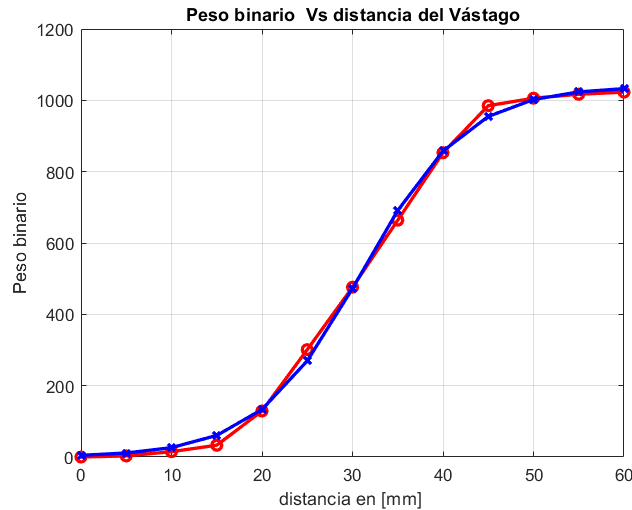


Gráfico 2-4: Gráfica Peso digital vs distancia del potenciómetro lineal, trazo rojo, y su predicción o curva de ajuste, trazo azul.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

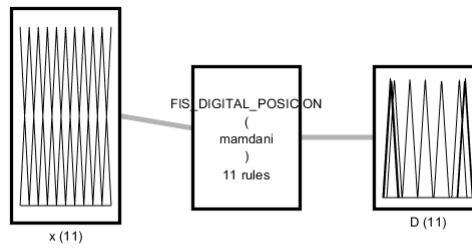
Considerando la ecuación del factor de correlación cuadrático de Person y la raíz del error cuadrático medio, ecuaciones (97) y (98) respectivamente, se obtienen los valores de 0.998344 y 17.15 valor binario de desviación, respectivamente para cada indicador.

$$r_y^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (97)$$

$$\sqrt{EcM} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (98)$$

No obstante, una caracterización difusa, empleando Mamdani, puede mejorar estos indicadores. En efecto, usando 11 conjuntos de pertenencia, tanto de entrada como de salida, y 11 reglas, se obtiene un factor de correlación cuadrático multivariable de 0.999912 y 3.94 valor binario de desviación o error cuadrático medio. La Figura 10-4 muestra la estructura del sistema difuso implementado con Mamdani, siendo la Gráfico 3-4 la representación gráfica de las funciones de pertenencia delta o triangular, que particionan los universos del discurso de la posición así como del universo del discurso del peso digital, finalmente la Tabla 5-4, es una representación simplificada de las reglas “si entonces” del sistema de inferencia borroso, este modelo puede ser analizado en este enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1PSOFqRPJq1ZYuiTHKYkZ1_VtHbThzitD?usp=share_link.



System FIS_DIGITAL_POSICION: 1 inputs, 1 outputs, 11 rules

Figura 10-4: Sistema difuso Mamdani para caracterizar el peso digital en función de la posición.

Fuente: Fuzzy Logic de Matlab
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

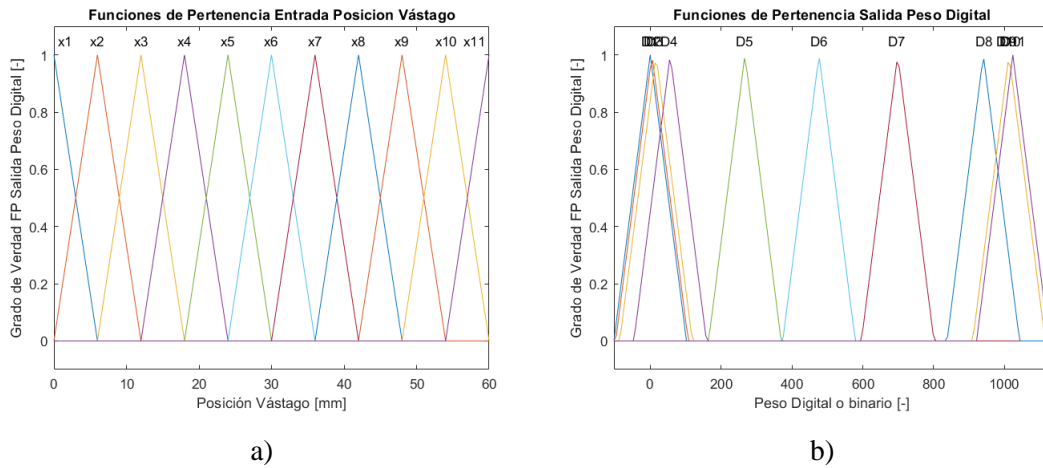


Gráfico 3-4: a) funciones de pertenencia del Universo del Discurso de la posición, b) funciones de pertenencia del Universo del Discurso de valores digitales.

Fuente: Fuzzy Logic de Matlab
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Tabla 5-4: Reglas que vinculan el antecedente y el consecuente

1	"x==x1 => D=D1 (1)"
2	"x==x2 => D=D2 (1)"
3	"x==x3 => D=D3 (1)"
4	"x==x4 => D=D4 (1)"
5	"x==x5 => D=D5 (1)"
6	"x==x6 => D=D6 (1)"
7	"x==x7 => D=D7 (1)"
8	"x==x8 => D=D8 (1)"
9	"x==x9 => D=D9 (1)"
10	"x==x10 => D=D10 (1)"
11	"x==x11 => D=D11 (1)"

Fuente: Fuzzy Logic de Matlab

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

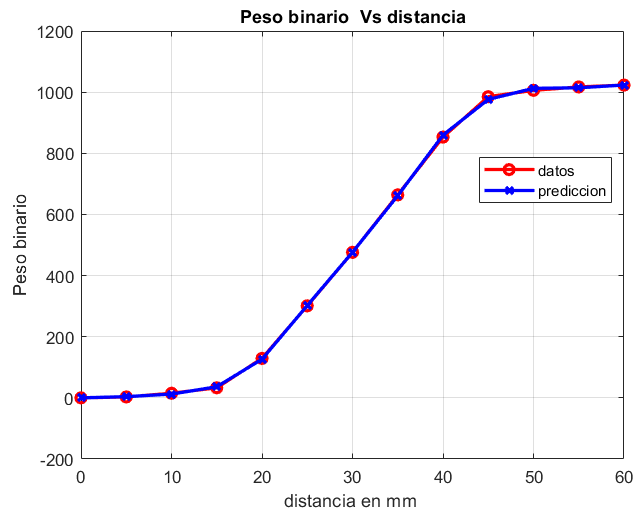


Gráfico 4-4: Gráfica Peso digital vs distancia del potenciómetro lineal, trazo rojo, y su predicción difusa o caracterización, trazo azul.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

El actuador del sistema es un motor de corriente continua (DC) que puede ser alimentado con un voltaje de 12V a 36 V. El motor DC escogido tiene la ventaja de poseer alto torque gracias a su caja reductora. Las características del motor se muestran en la Tabla 6-4 y Tabla 7-4. El motor DC, Figura 11-4, es el que mueve el tornillo que controla el vástago para la abertura de la válvula de impulso (Peña, 2020).



Figura 11-4: Motor DC.

Fuente: (Peña, 2020).

Tabla 6-4: Características del Motor DC

Modelo	775
Diámetro del Eje	5mm
Longitud del Eje	17mm
Longitud Corporal	66.7 mm
Diámetro de los pasos delanteros	17.4mm
Antiguo nivel alto	4.7mm
Diámetro del cuerpo	42mm
Longitud total del motor	98mm
Campo de instalación diagonal	28.8mm
Tamaño de agujero de montaje	M4
Orificio de montaje	2
Esfuerzo de torsión	2Kg.cm o 0.2 NM

Fuente: (Peña, 2020).**Realizado por:** (Flores, Jorge 2023).**Tabla 7-4:** Revoluciones del Motor DC

Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (RPM)
12	0.14	3500
18	0.15	4500
24	0.16	7000
30	0.17	8100
36	0.20	9000

Fuente: (Peña, 2020).**Realizado por:** (Flores, Jorge 2023).

Para un correcto funcionamiento del motor DC, es importante contar con un driver que brinde la posibilidad de controlar el giro del motor, así como su velocidad. El driver a utilizar es un puente H L298N, Figura 12-4, cuyas características se encuentran en la Tabla 8-4.

El Circuito integrado L298N cuenta con tres pines para cada canal (motor), dos de control (IN1, IN2) y uno de velocidad (ENA), el mismo que este puede ser alimentado por una señal PWM generada por el microcontrolador (Llamas, 2016).

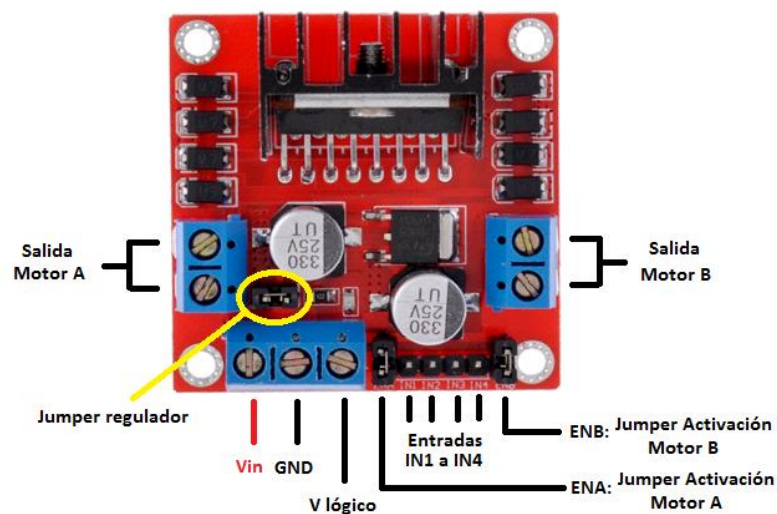
**Figura 12-4:** Puente H L298N**Fuente:** (Llamas, 2016).

Tabla 8-4: Características Puente H L298N

Circuito Integrado	L298N
Corriente Pico de Operación	4 A
Corriente Constante de Operación	2A
Voltaje de Operación	12 V – 35 V
Canales	2
Consumo Corriente Lógica	0 a 36mA
Potencia Máxima	25W
Peso	30g
Dimensiones	43 *43 *27 mm

Fuente: (Llamas, 2016).

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Para comprobar los datos de caudal de entrada y de salida se implementó en el sistema dos caudalímetros digitales, así el caudal de entrada se lo puede conocer mediante un dispositivo (sensor) que permite medir la cantidad de agua que pasa por la tubería., El sensor cuenta con ocho paletas en el interior que al ser girados por el flujo del agua generan un voltaje que es inducido por efecto hall a la salida, obteniendo una onda cuadrada con una frecuencia proporcional al caudal (Hubor, 2015).

El sensor de flujo empleado es el YF-DN50, que sirve para medir caudales de tuberías de dos pulgadas (2") de diámetro, generalmente mide caudales de agua, pero también puede medir líquidos de baja densidad. Consta de tres terminales (cable rojo: 5V, cable negro: GND y cable amarillo: Señal) (Hubor, 2015).

El caudal se determina dividiendo el factor k (que depende de las características del sensor) y la frecuencia (Hz). Para el sensor de flujo YF-DN50 el factor k es de 0.2, este valor depende del diámetro de tubería que se emplea, que en este caso es, de dos pulgadas (Hubor, 2015).

$$f(Hz) = K * Q(l/min) \quad (99)$$

$$Q(l/min) = \frac{f(Hz)}{K} \quad (100)$$



Figura 13-4: Caudalímetro YF-DN50

Fuente: (Hubor, 2015).

El caudalímetro YF-DN50 consta de las siguientes características como se encuentra en la Tabla 9-4.

Tabla 9-4: Características del Caudalímetro YF-DN50

Voltaje de Operación	5V – 18V DC
Consumo de Corriente	15mA máx.
Salida	Onda Cuadrada pulsante
Rango de Flujo	0 – 200L/min
Volumen promedio por pulso	83.3 ml
Pulsos por Litro	12
Factor de conversión	0.2
Rosca externa	2" NPS
Presión de trabajo máx.	1.75MPa (17 bar)
Temperatura de trabajo	5°C – 80 °C
Resistencia de insulación	>100M Ohm
Material	Plástico

Fuente: (Hubor, 2015).

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Para determinar la distancia del vástago de la válvula de impulso que debe tener como referencia el controlador difuso, es necesario crear un modelo que tenga en cuenta el caudal de entrada y las características de la válvula. Una vez que se conoce el caudal máximo, se puede utilizar la fórmula para obtener la distancia correspondiente al vástago.

En este caso, el caudal máximo encontrado fue de 7.71 litros por segundo. El caudal mínimo es de 0 litros por segundo en caso de que no haya ningún caudal. La Tabla 10-4 muestra los valores de caudal de entrada y la distancia correspondiente al vástago, determinados por la siguiente ecuación:

$$D = -6.25 \times Q(l/min) + 50 \quad (101)$$

Tabla 10-4: Caudal vs Distancia

Caudal	Distancia
0 L/min	50 mm
1 L/min	43.7 mm
2 L/min	37.5 mm
3 L/min	31.2 mm
4 L/min	25 mm
5 L/min	18.7 mm
6 L/min	12.5 mm
7 L/min	6.2 mm
8 L/min	0 mm

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

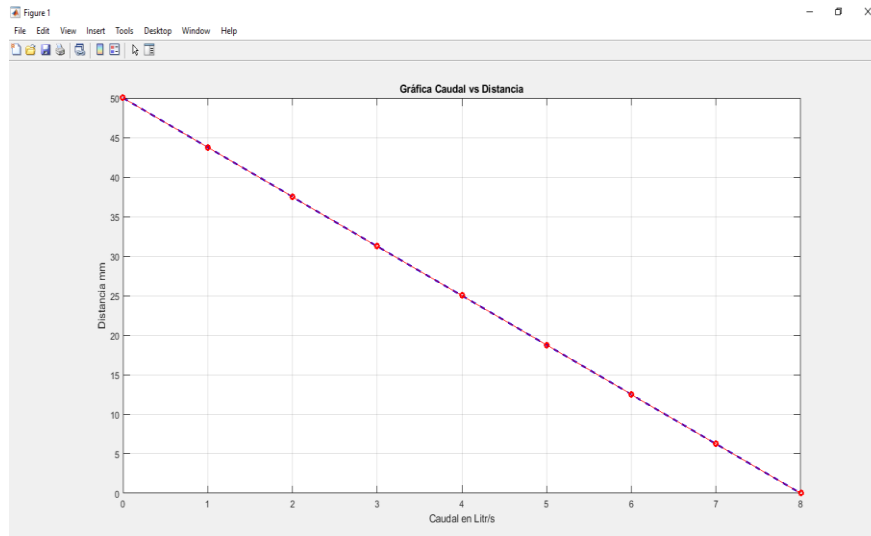


Gráfico 5-4: Modelo Caudal vs Distancia.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

De la misma manera se colocó otro sensor de caudal en el sistema que permita conocer los valores del flujo de salida, para hacer una comparación entre la entrada y la salida de caudal.

Como protección del sistema se instaló unos finales de carrera que limitan el recorrido del tornillo. Un final de carrera, Figura 14-4, es un sensor on-off tipo interruptor, que cierra o abre un circuito. Al ser detectado el final de carrera el motor automáticamente se apaga (Peña, 2020).



Figura 14-4: Final de Carrera
Fuente: (Peña, 2020).

La tarjeta de desarrollo Núcleo STM32-F030R8, que se muestra en la Figura 15-4, es la encargada de procesar los datos proporcionados por el sensor. Además, permite encender o apagar el motor mediante el controlador de lógica borrosa utilizando el driver (Perles, 2019).

La familia de microcontroladores STM32 ha sido desarrollada por ST Microelectronics y cuenta con un procesador de 32 bits, lo que le permite un alto rendimiento en tiempo real. Además, ofrece un procesamiento rápido de señales digitales y un bajo consumo de energía y voltaje (Perles, 2019).



Figura 15-4: STM32 Núcleo F030R8
Fuente: (Perles, 2019).

La STM32 Núcleo 4 (F030R8) posee una serie de características que se puede observar en la siguiente Tabla 11-4.

Tabla 11-4: Características del Microcontrolador STM32-F030R8

Microcontrolador	32 bits ARM Cortex-M4 Ref: STM32F401RET6
Velocidad	84MHz
Voltaje de Operación	3.3 V, 5 V
Voltaje de Entrada	7 V a 12 V
Pines para entrada – salida digital	14 (Todos son PWM)
Pines de entrada analógica	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Corriente continua en el pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	512 Kb
SRAM	96 Kb
ADC	12 bits, velocidad 2.4 Msps
Conectividad	USB 2.0 Full Speed con PHY

Fuente: (Perles, 2019) .

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.10. Diseño del Circuito Electrónico

El diseño del circuito de control cuenta con los componentes electrónicos seleccionados. Sin embargo, es necesario determinar los pines de la tarjeta de desarrollo que se utilizarán como entradas y salidas del sistema. Para controlar el motor DC, se necesitan tres pines: dos para control (IN1, IN2) y uno para velocidad (ENA). El potenciómetro lineal, que es un sensor de distancia, envía una señal analógica al microcontrolador. Los sensores finales de carrera envían señales digitales, mientras que los sensores de caudal transmiten señales de onda cuadrada. Por lo tanto, se requiere utilizar interrupciones digitales para determinar su frecuencia. Los pines que se utilizarán de la tarjeta de desarrollo se muestran en la Tabla 12-4. En la Figura 16-4, se muestra un modelo esquemático gráfico de la conexión.

Tabla 12-4: Etiqueta de Entradas y Salidas de la STM32-F030R8

ENTRADAS	PIN
Potenciometro Lineal	A1 (analógico)
Caudalímetro de Entrada	D2 (digital)
Caudalímetro de Salida	D3 (digital)
Final de Carrera Inferior	D10 (digital)
Final de Carrera Superior	D11 (digital)
SALIDAS	PIN
Control Motor IN1	D8 (digital)
Control Motor IN2	D9 (digital)
Control Motor ENA	A2 (analógico)

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

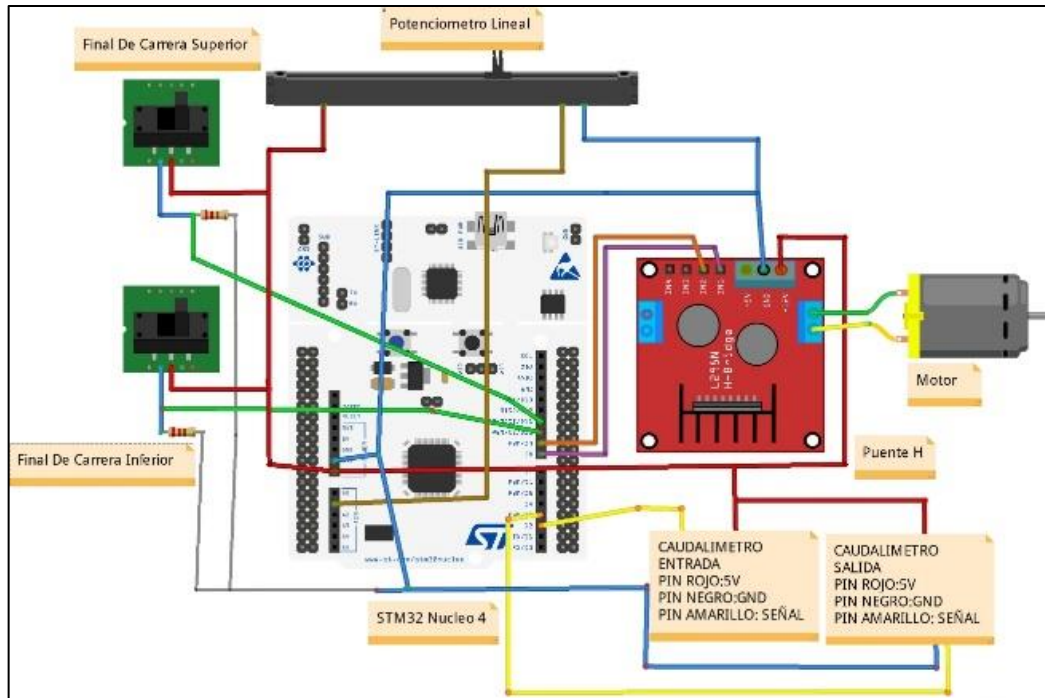


Figura 16-4: Esquema Gráfico del Circuito Electrónico.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Una vez que se especificaron los pines de entrada y salida del microcontrolador, se diseñó un shield (placa PCB) para conectar la STM32-F030R8 con el driver y los diferentes elementos electrónicos, lo que simplificó los cables y mejoró la estética del sistema.

Hay varios programas de diseño de PCB (Printer Circuit Board), que tienen tres ventanas principales: diseño esquemático, diseño de pistas y visualización en 3D.

Para diseñar el esquema del circuito electrónico, se buscaron todos los componentes (hardware) en una base ya establecida por el software. También se agregaron borneras que facilitan la conexión de los diferentes sensores del sistema y la alimentación de 12V para el motor, el microcontrolador y el driver. Una vez seleccionados los componentes, se conectaron todos los pines según el diagrama de la Figura 17-4. En la Figura 18-4 se muestra el diagrama esquemático diseñado en el software "Proteus".

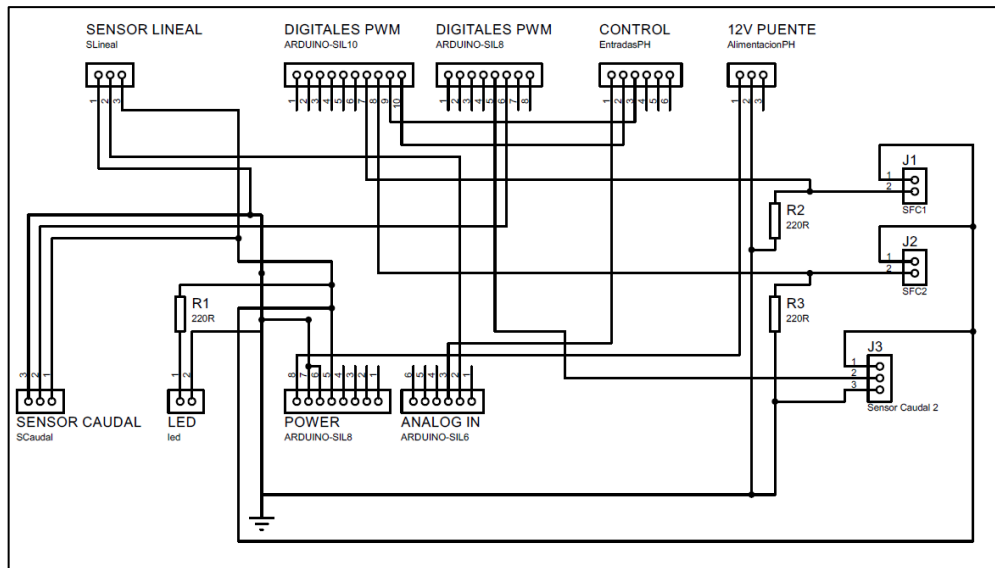


Figura 17-4: Esquema de conexión en el software Proteus.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

En el diseño de la placa PCB, se determinó el tamaño de la placa, la ubicación de los componentes y el ancho de las pistas. El diseño de la placa PCB se puede ver en la Figura 18-4.

Finalmente, se colocaron y soldaron los componentes electrónicos en la placa PCB, que luego se montó en la tarjeta de desarrollo. El resultado de la placa electrónica del sistema se puede ver en la Figura 19-4.

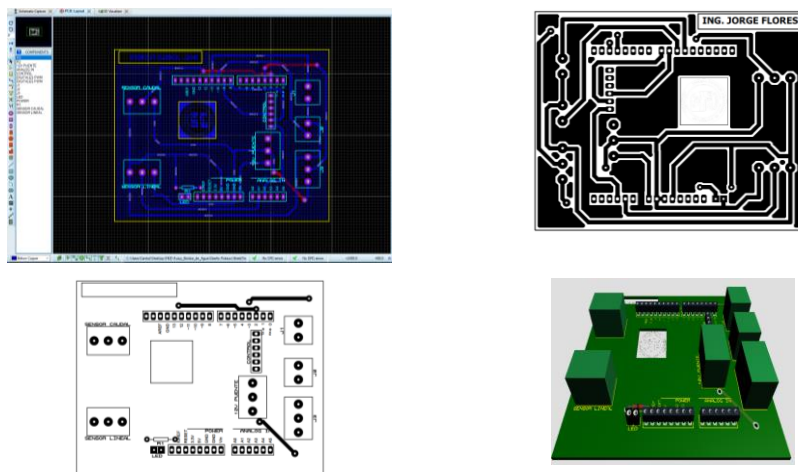


Figura 18-4: Diseño PCB en el software Proteus.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

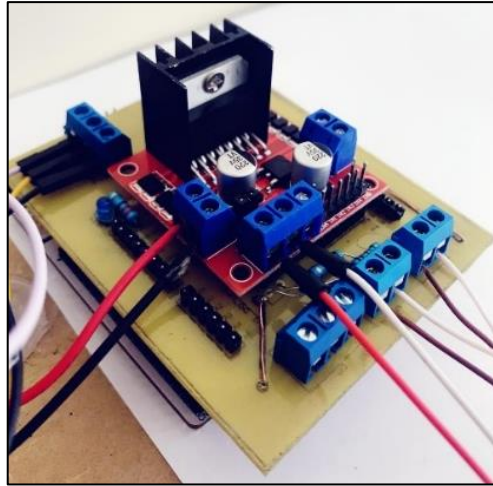


Figura 19-4: Resultado del Circuito Electrónico.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.11. Condiciones de operación de la bomba de ariete en lazo abierto

Construida la bomba de ariete, muchas cosas quedan al azar, aspectos como las pérdidas en la tubería y accesorios, elasticidad en la tubería, tiempos de obturación de la válvula, en fin, aspectos que deben ser evaluados una vez puesta en marcha, para proceder a realizar modelos simplificados que permitan desarrollar el controlador.

En esta sección se consideran aspectos como el nivel máximo de la cota del reservorio, esta es la condición que se considera la perturbación del sistema, puesto que, bajo condiciones normales, el estiaje ocasiona disminución del nivel de la cota por falta de lluvias. En el Gráfico 6-4 a), se observa el valor de cota máximo del reservorio constante, en un registro de 3 minutos. El sistema se concibe para que pueda regular por encima de este valor, claro está, pero más importante y razón del documento de tesis, es dar respuesta para cuando este valor baja.

En el Gráfico 6-4 b), se observa el transitorio y el estacionario de la puesta en marcha de la bomba de ariete, el cual ha sido registrado un lapso de 3 minutos. De manera razonable, se observa en trazo negro, un tope ideal que se presenta para cuando las velocidades del fluido se corresponden con el factor de Bernoulli, sin embargo durante los primeros segundos, aguas arriba de la bomba de ariete, y específicamente a la salida de la toma del reservorio, no se experimenta caudal pulsante, con cese de la velocidad del mismo, esto debido a que todavía las presiones debido a la columna de agua y el pulmón de amortiguamiento no han alcanzado las presiones de operación. Una vez que el sistema se estabiliza, se puede observar un caudal pulsante, con cese transitorio del mismo, tal y como se observa en el Gráfico 6-4 c). Un estudio realizado sobre la señal de caudal permite determinar su valor medio, siendo su valor el que se observa con trazo azul, siendo este de 465.0416 litros por minutos.

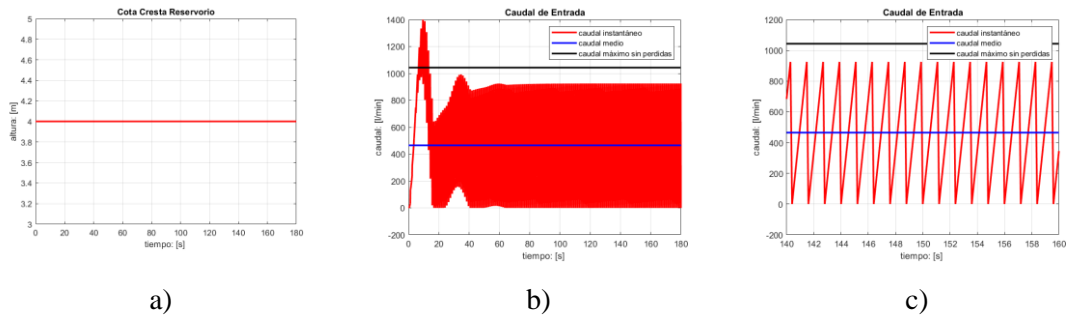


Gráfico 6-4: Condiciones de cota y caudal de entrada a la bomba de ariete, a) cota reservorio, b y c) caudal de entrada a la bomba de ariete.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Un estudio espectral, en el lapso de establecimiento como el observado en el Gráfico 7-4 c), permite determinar con precisión estadística la frecuencia de pulsación y el caudal promedio empleado en la bomba de ariete para elevar el agua.

El Gráfico 7-4 a), muestra las componentes espectrales del caudal de entrada en la bomba de ariete, observándose en el Gráfico 7-4 b) el valor promedio de 465.0416 litros por minutos y una frecuencia de pulsación de 0.8253 Hz o un período de 1.2116 segundos.

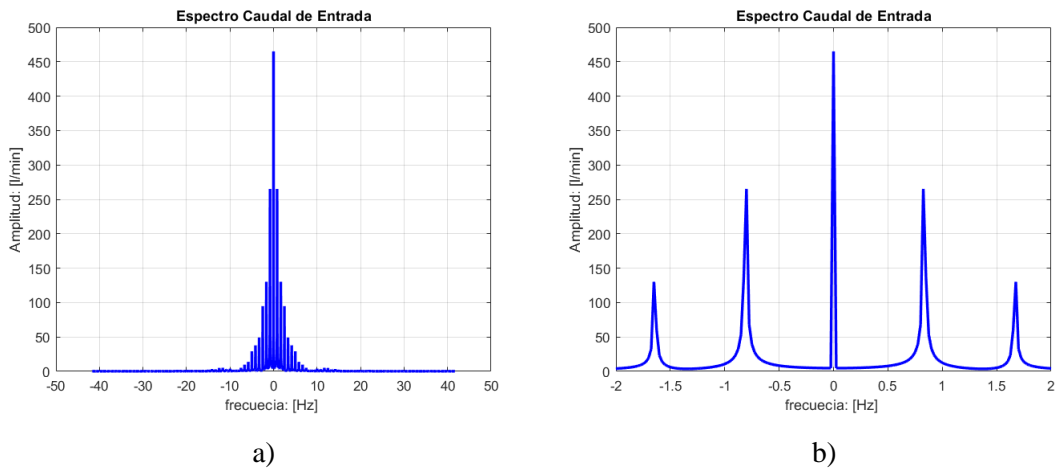


Gráfico 7-4: Espectro del caudal de entrada a la bomba de ariete.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

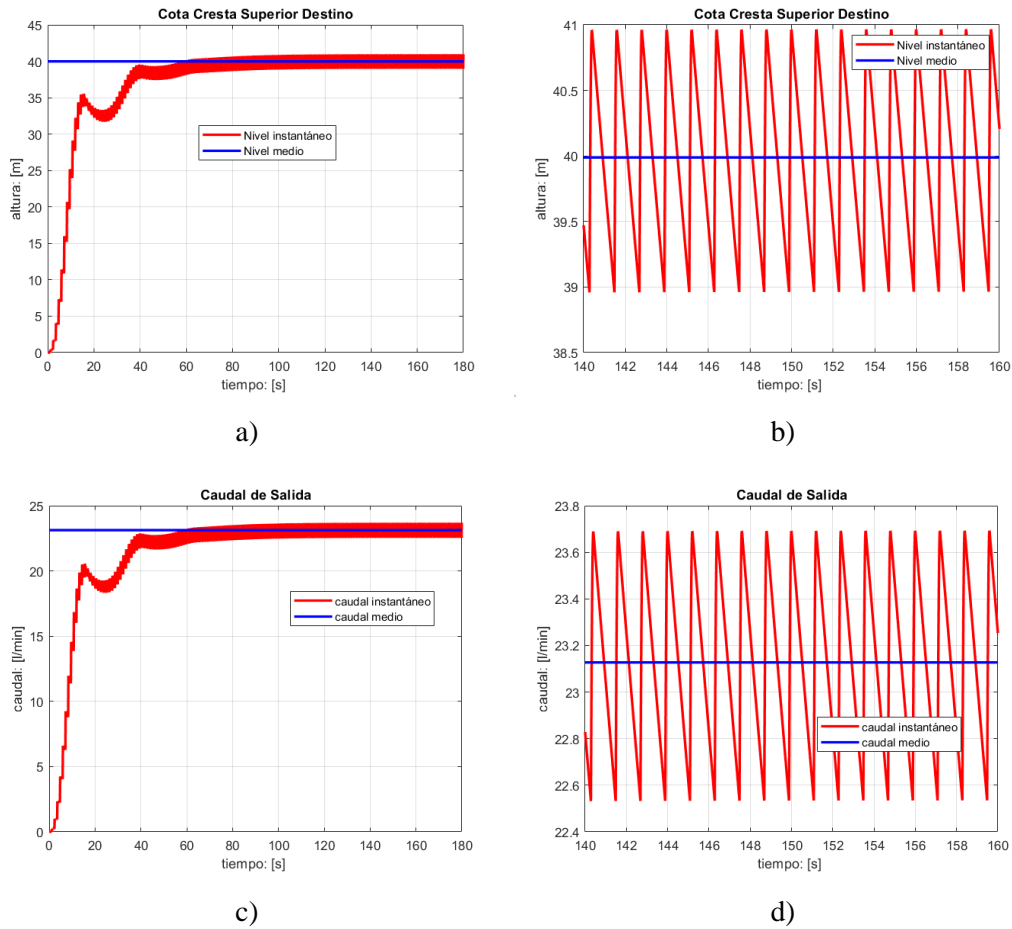


Gráfico 8-4: Condiciones de cota y caudal de salida de la bomba de ariete.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

El Gráfico 8-4, muestra el transitorio y el establecimiento de la puesta en marcha de la bomba de ariete, en a) se determina la altura con base en la presión medida aguas abajo, posterior al pulmón o reservorio de presión, resulta claro que la velocidad del caudal se produce una perturbación en la medición del nivel, todo esto justificado bajo la ecuación de balance de Bernoulli-Euler. En b) se tiene que en el establecimiento la cota alcanzada, estimada a partir de la presión, se encuentra entre 39 y 41 metros, de manera específica en 39.9881 metros. En c) Se observa que, pasado 60 segundos, es para cuando la bomba de ariete, logra remontar la cota de salida, observándose d) un flujo pulsante de media 23.1270 litros por minutos. Observe en b) el nivel de cota variante, en el estado estacionario, y d) el caudal de salida variante en correspondencia con la variación de cota.

4.12. Obtención de modelo de tiempo muerto más sistema de primer orden

Para poder lograr un modelo, primero se somete a experimentación al sistema con controladores clásico, en primer lugar, se evalúa un controlador proporcional, luego un controlador proporcional integral y finalmente un controlador proporcional integral derivativo.

4.12.1. Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional

Considerando una realimentación con base en la presión de la columna de agua para medir la altura de manera indirecta, se logró alcanzar una altura de poco más de 17 metros, esto debido a que toda el agua se perdía sin lograr un golpe de ariete significativo, razón por la cual la columna de agua no logró tomar la cota consigna de 40 metros. La variante de control con base a la altura debió ser implementada dado que no se pudo registrar flujo de agua a la cota de salida. Este comportamiento se observa en el Gráfico 9-4. En el Gráfico 9-4 a) se observa el comportamiento del caudal de entrada a la bomba de ariete. En b) se observa como la bomba de ariete, desde el punto de operación, puesta manualmente, se conmuta a modo automático, para que opere el controlador proporcional, y el resultado es un descenso de la cota de bombeo, por lo que c) se tiene un flujo nulo.

En conclusión, no se puede usar un control proporcional para una bomba de ariete.

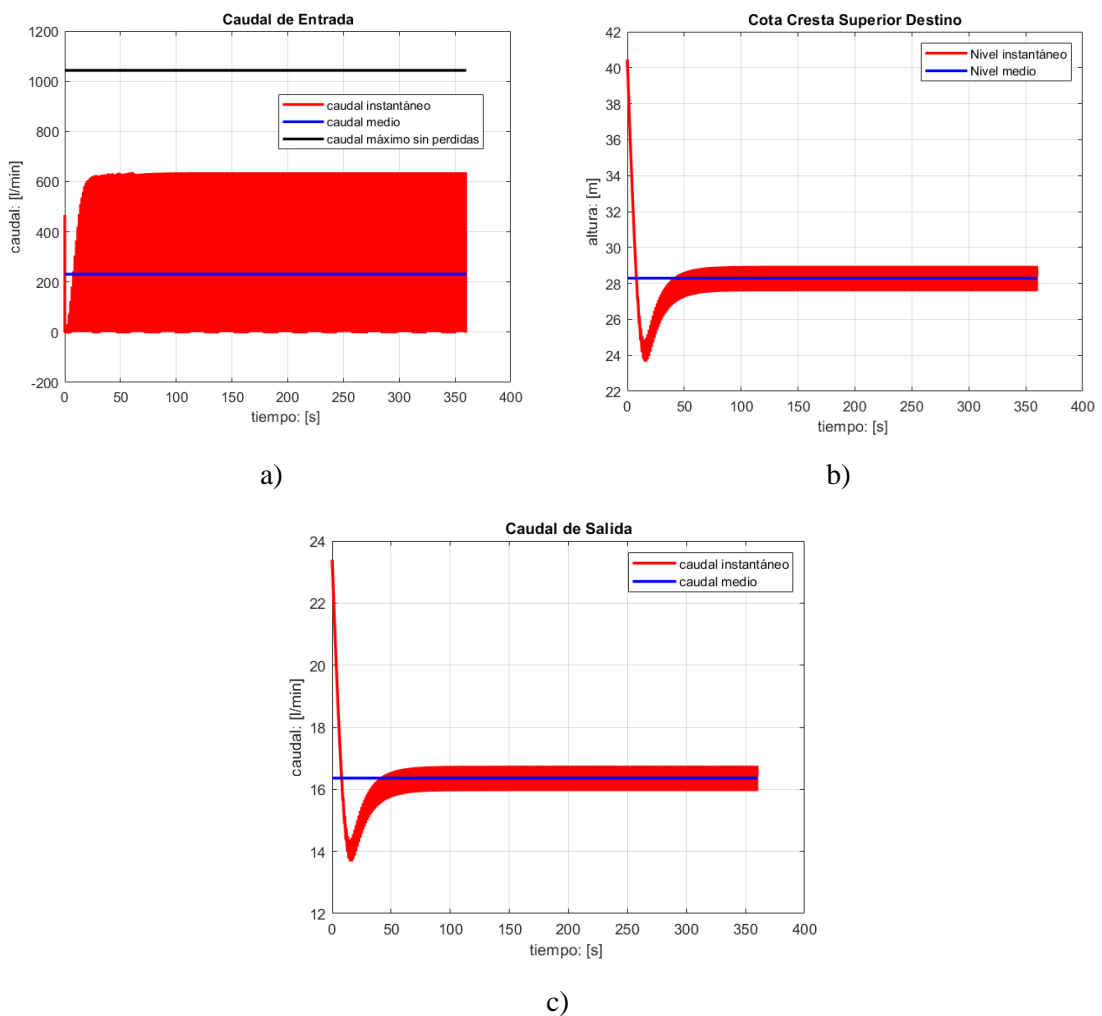


Gráfico 9-4: Comportamiento de la bomba de ariete con un control proporcional, para cuando se cierra el lazo de control considerando la altura y una consigna de altura.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.12.2. Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional integral

Colocando el punto de operación en modo manual, se procede en modo automático a evaluar la capacidad para mantener el punto de operación. El Gráfico 10-4 a) y b) muestran el comportamiento del caudal a la entrada de la bomba de ariete, durante la transición de modo de operación se experimenta una ligera perturbación. Gráfico 11-4 a) y b) así mismo, se observa la perturbación durante la conmutación de modo de regulación en la cota de agua. Esta medición es posible gracias a la medición piezoeléctrica de la presión, la cual permite conocer la altura al ser dividida por el peso específico del agua. Gráfico 12-4 a) y b) muestran el comportamiento del caudal de salida.

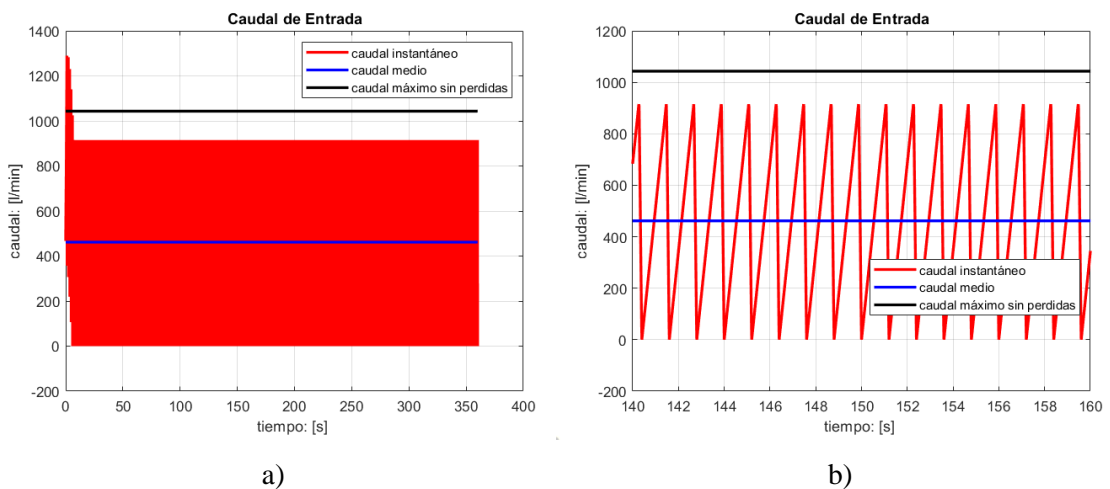


Gráfico 10-4: a) Caudal de entrada a la bomba de ariete, b) Acercamiento que aprecia la pulsación del caudal debido al golpe de ariete.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

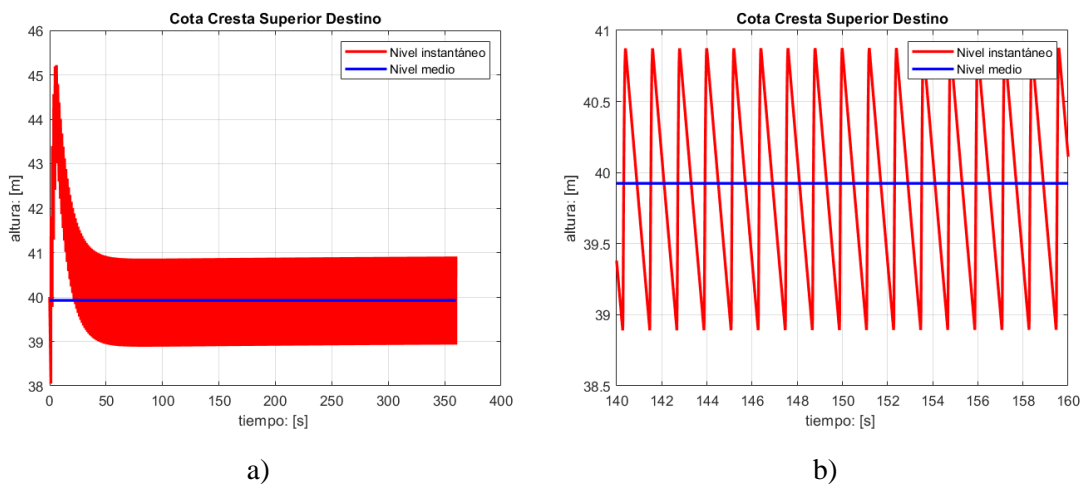


Gráfico 11-4: a) Cota de agua a la salida de la bomba de ariete, b) Acercamiento que aprecia la variación de la cota debido al golpe de ariete.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

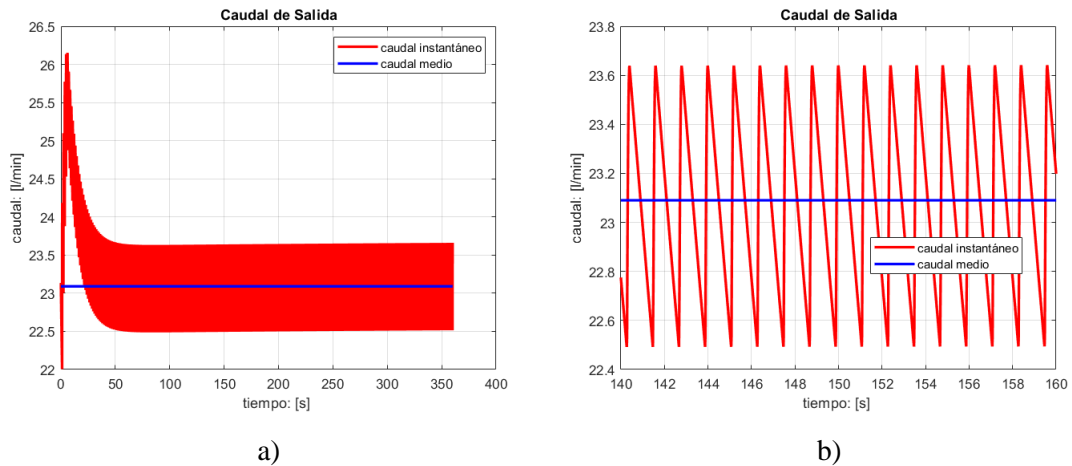


Gráfico 12-4: a) Comportamiento del caudal de salida de la bomba de ariete, b) Pulsación del caudal debido a la variación de cota de salida.

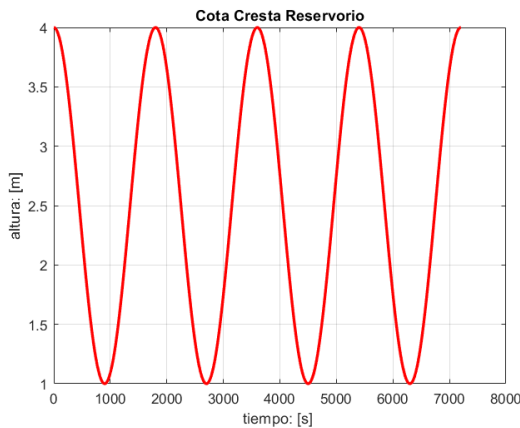
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Para realizar este controlador, los valores experimentales para la ganancia proporcional han sido de 0.000025 y la ganancia integral de 0.00005.

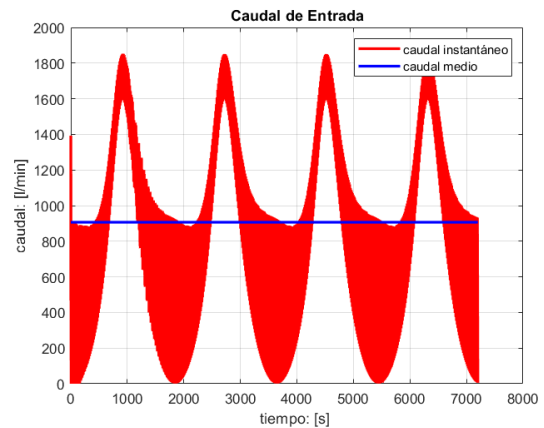
4.12.3. Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional integral ante perturbación de caudal

Considerando que la bomba de ariete ha sido diseñada para una cota de reservorio de 4 metros, para remontar una cota de 40 metros, el control proporcional integral debe ser capaz de manejar el peor de los escenarios, esto se presenta en condiciones de estiaje para cuando el nivel desciende. En este estudio se evalúa la capacidad de responder ante una variación sinusoidal desde el valor de cota de diseño de 4 metros hasta un mínimo de 1 metro. En el Gráfico 13-4 se observa en a) el comportamiento de la cota del reservorio y como esto afecta al caudal debido al proceso de regulación, Gráfico 13-4 b). La regulación logra mantener en una banda de variación de poco menos de 2 metros la cota superior de bombeo, esto se observa en el Gráfico 14-4 a), mientras que en el Gráfico 14-4 b) se observa como el caudal varía en poco más de 1 litros por minutos.

El controlador PI presenta un buen desempeño. La evaluación de la bondad de ajuste de la salida a la consigna de nivel se expresa con la raíz del error cuadrático medio, siendo este de un valor de 1.88 metros.



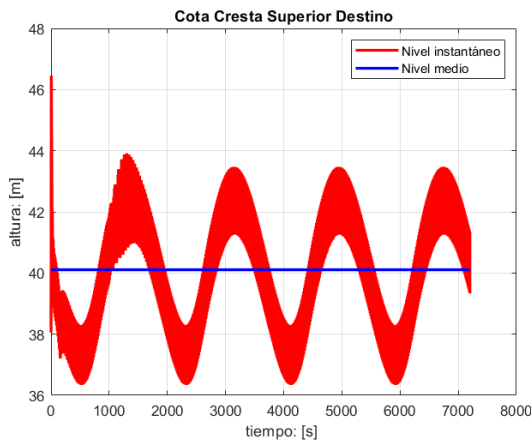
a)



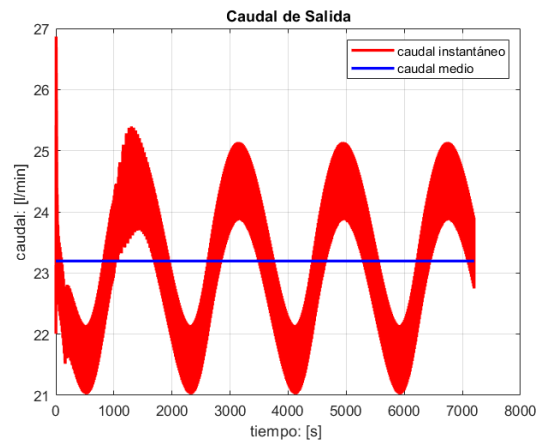
b)

Gráfico 13-4: a) Comportamiento de la cota del reservorio de la bomba de ariete, b) Comportamiento del caudal de entrada a la bomba de ariete.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).



a)



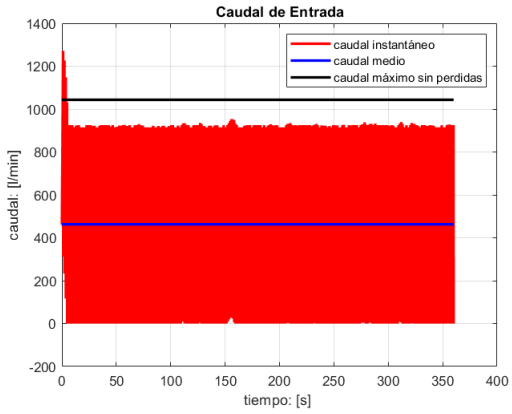
b)

Gráfico 14-4: a) Comportamiento del caudal de salida de la bomba de ariete, b) Pulsación del caudal debido a la variación de cota de salida.

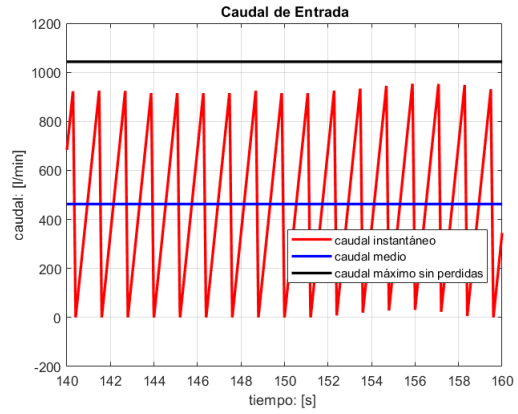
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.12.4. Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional integral derivativo

Colocando el punto de operación en modo manual, se procede en modo automático a evaluar la capacidad para mantener el punto de operación. El Gráfico 15-4 a) y b) muestran el comportamiento del caudal a la entrada de la bomba de ariete. Durante la transición de modo de operación se experimenta una ligera perturbación. Gráfico 16-4 a) y b) así mismo, se observa la perturbación durante la conmutación de modo de regulación en la cota de agua. Esta medición es posible gracias a la medición piezoeléctrica de la presión, la cual permite conocer la altura al ser dividida por el peso específico del agua. Gráfico 17-4 a) y b) muestran el comportamiento del caudal de salida.



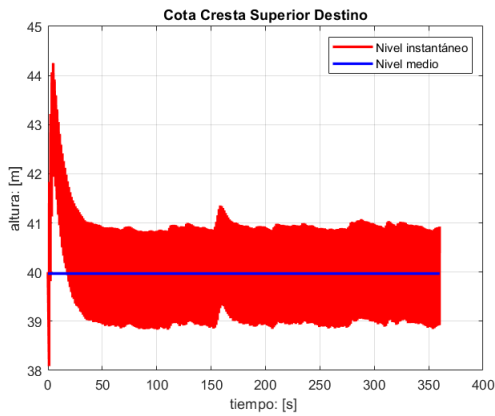
a)



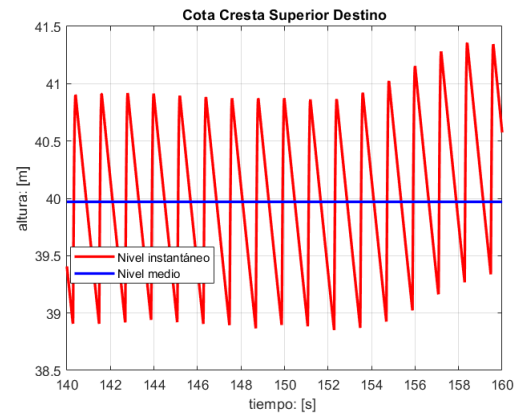
b)

Gráfico 15-4: a) Caudal de entrada a la bomba de ariete, b) Acercamiento que aprecia la pulsación del caudal debido al golpe de ariete.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).



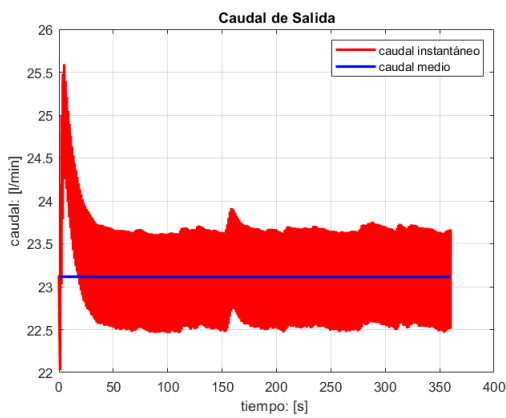
a)



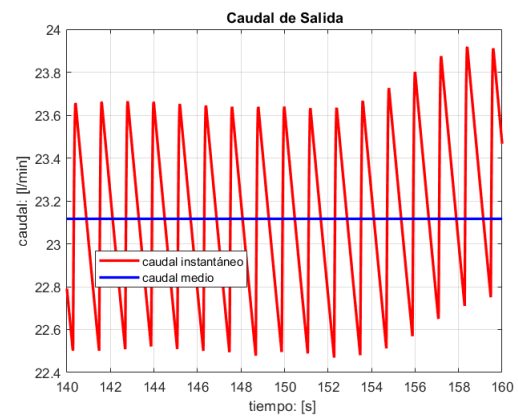
b)

Gráfico 16-4: a) Cota de agua a la salida de la bomba de ariete, b) Acercamiento que aprecia la variación de la cota debido al golpe de ariete.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).



a)



b)

Gráfico 17-4: a) Comportamiento del caudal de salida de la bomba de ariete, b) Pulsación del caudal debido a la variación de cota de salida.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Para realizar este controlador, los valores experimentales para la ganancia proporcional han sido de 0.000025, la ganancia integral de 0.00005, y la ganancia derivativa de 0.000025.

4.12.5. Comportamiento de la bomba de ariete con un controlador proporcional integral derivativo ante perturbación de caudal

Considerando que la bomba de ariete ha sido diseñada para una cota de reservorio de 4 metros, para remontar una cota de 40 metros, el control proporcional integral derivativo debe ser capaz de manejar el peor de los escenarios, esto se presenta en condiciones de estiaje para cuando el nivel desciende. En este estudio se evalúa la capacidad de responder ante una variación sinusoidal desde el valor de cota de diseño de 4 metros hasta un mínimo de 1 metro. En el Gráfico 18-4, se observa en a) el comportamiento de la cota del reservorio y como esto afecta al caudal debido al proceso de regulación, Gráfico 18-4 b). La regulación logra mantener en una banda de variación de poco más de 6 metros la cota superior de bombeo, esto se observa en el Gráfico 19-4 a), mientras que en el Gráfico 19-4 b) se observa como el caudal varía en poco más de 3.5 litros por minutos.

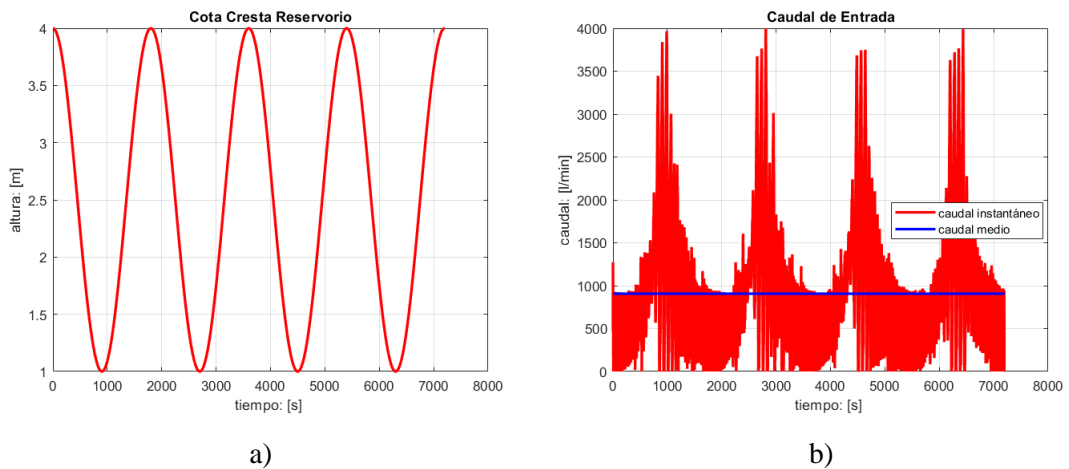


Gráfico 18-4: a) Comportamiento de la cota del reservorio de la bomba de ariete, b) Comportamiento del caudal de entrada a la bomba de ariete.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

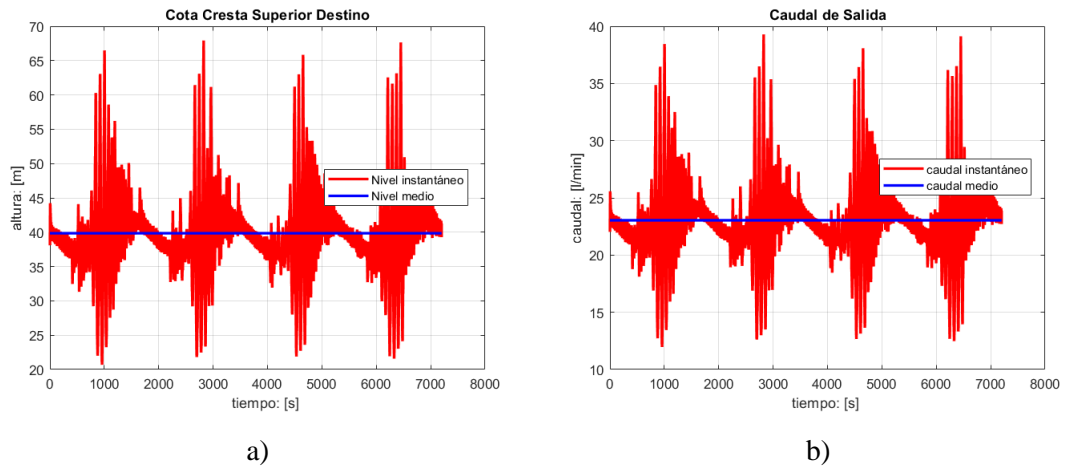


Gráfico 19-4: a) Comportamiento del caudal de salida de la bomba de ariete, b) Pulsación del caudal debido a la variación de cota de salida.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

El controlador PID presenta un desempeño mediocre o deficiente. La evaluación de la bondad de ajuste de la salida a la consigna de nivel se expresa con la raíz del error cuadrático medio, siendo este de un valor de 6.16 metros.

4.12.6. Obtención de un modelo de primer orden más tiempo muerto

La obtención de un modelo empírico simplificado pretende reproducir el comportamiento mas no explicarlo, es una herramienta que sirve para evaluar el desempeño de un controlador bajo condiciones exigentes, es por ello que un modelo de primer orden más tiempo muerto, es el caso simplificado con capacidad de oscilar, es decir, de inestabilizarse.

El modelo debe ser capaz de comportarse de manera semejante al sistema constituido por la bomba de ariete, así como también la salida del controlador. Por lo tanto, considerando como controlador para ambos sistemas, el representado por la ecuación (102), siendo la planta modelo la representada por la ecuación (103).

$$G_c(s) = K_p + \frac{1}{T_i s} \therefore K_p = 0.000025 \wedge T_i = 0.00005 \quad (102)$$

$$G(s) = \frac{43.6205 \cdot e^{-7.2s}}{2s + 1} \quad (103)$$

$$G(s) = \frac{25.2277 \cdot e^{-7.2s}}{2s + 1} \quad (104)$$

Para los fines de control, se tiene que ante el mismo controlador PI, el desempeño de la planta modelo para nivel es el obtenido con la ecuación (103) y para caudal es el obtenido con la ecuación (104).

El Gráfico 20-4 permite apreciar el comportamiento, ante una misma consigna cota superior, de ambos sistemas, siendo el Gráfico 21-4 la evidencia de un comportamiento semejante en las salidas de los controladores, siendo este valor entre 0 y 1 puesto que se corresponde con el ciclo útil del obturador de la bomba de ariete.

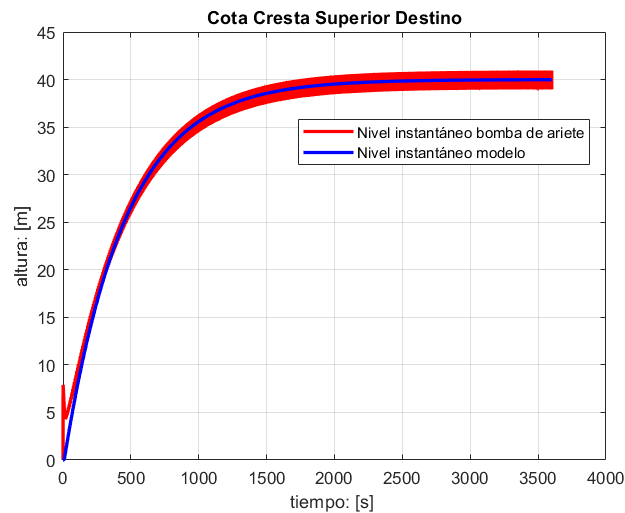


Gráfico 20-4: Comportamiento instantáneo de la cota de bombeo tanto del sistema de la bomba de ariete como de su modelo.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

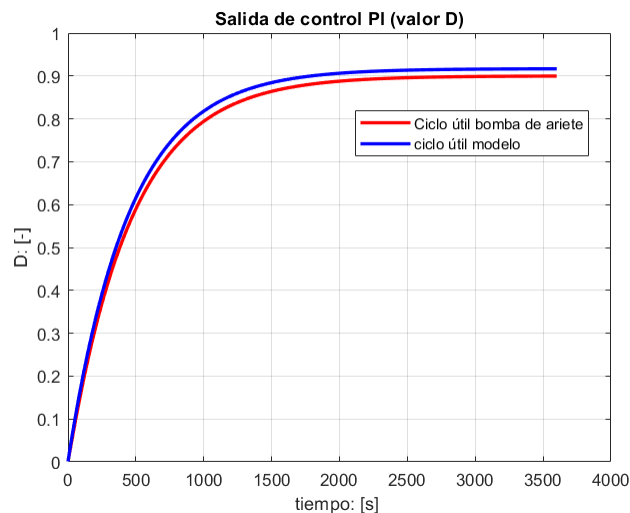


Gráfico 21-4: Comportamiento instantáneo de la orden de control o ciclo útil, tanto del sistema de la bomba de ariete como de su modelo.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

El Gráfico 22-4 permite apreciar el comportamiento, ante una misma consigna caudal de salida, de ambos sistemas, siendo el Gráfico 23-4 la evidencia de un comportamiento semejante en las salidas de los controladores, siendo este valor entre 0 y 1 puesto que se corresponde con el ciclo útil del obturador de la bomba de ariete.

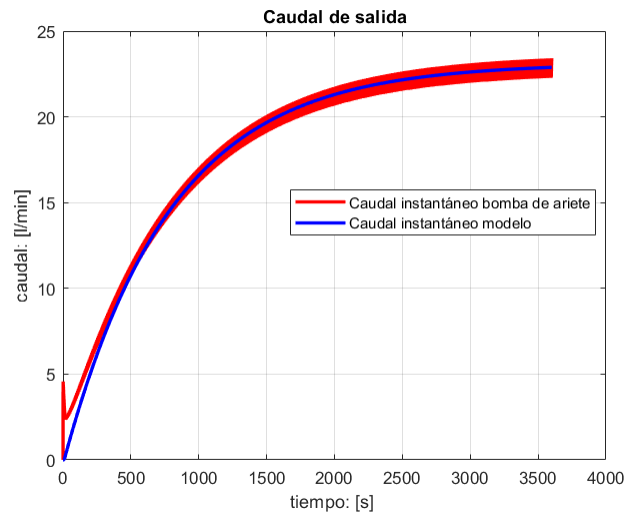


Gráfico 22-4: Comportamiento instantáneo del caudal de bombeo tanto del sistema de la bomba de ariete como de su modelo.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

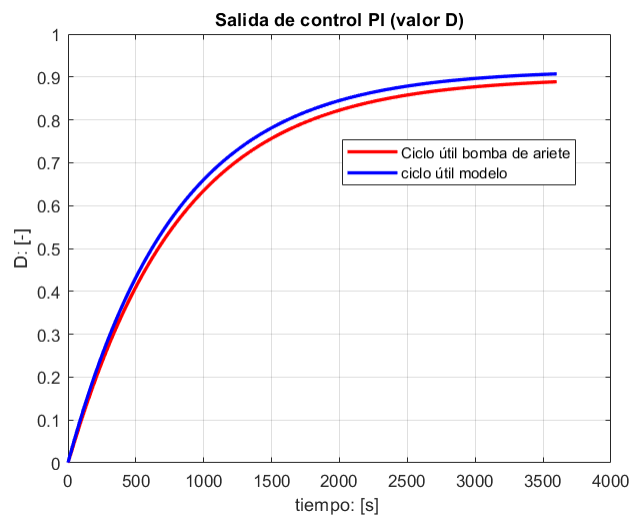


Gráfico 23-4: Comportamiento instantáneo de la orden de control o ciclo útil, tanto del sistema de la bomba de ariete como de su modelo.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.13. Parametrización de un controlador PI difuso, de tipo Mamdani, para caudal y nivel

Muchas cosas de las que se presentan a continuación forman parte de lo que se denomina sistemas expertos. En particular, un controlador difuso del tipo Mamdani, donde el experto en el sistema a controlar realiza sus inferencia y elucubraciones, y vierte en reglas de antecedentes y consecuentes que finalmente conllevan a una acción de control univaluada.

Con certeza el controlador a diseñar debe presentar un universo del discurso de salida entre 0 y 1, no obstante, como experto en control difuso, no queda de otra que tantear y acotar el universo del discurso asociado al efecto integral y proporcional. Deben ser tal las asunciones, que este mismo universo del discurso deberá ser funcional para ambas condiciones de operación en la regulación caudal o cota.

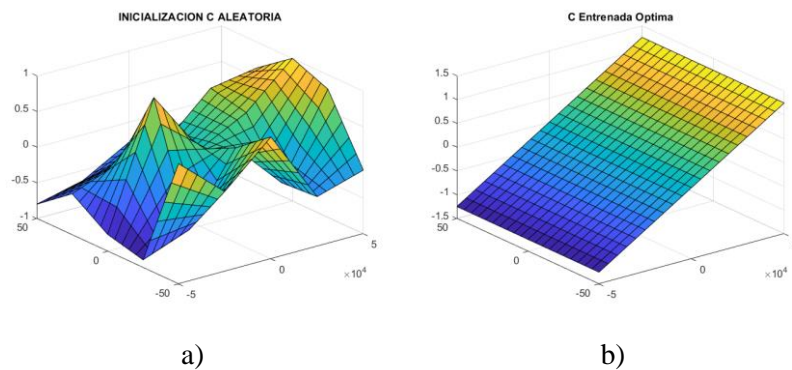


Gráfico 24-4: a) Superficie inicial determinada por los centroides del universo de salida, b) Superficie final determinada por los centroides del universo de salida.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

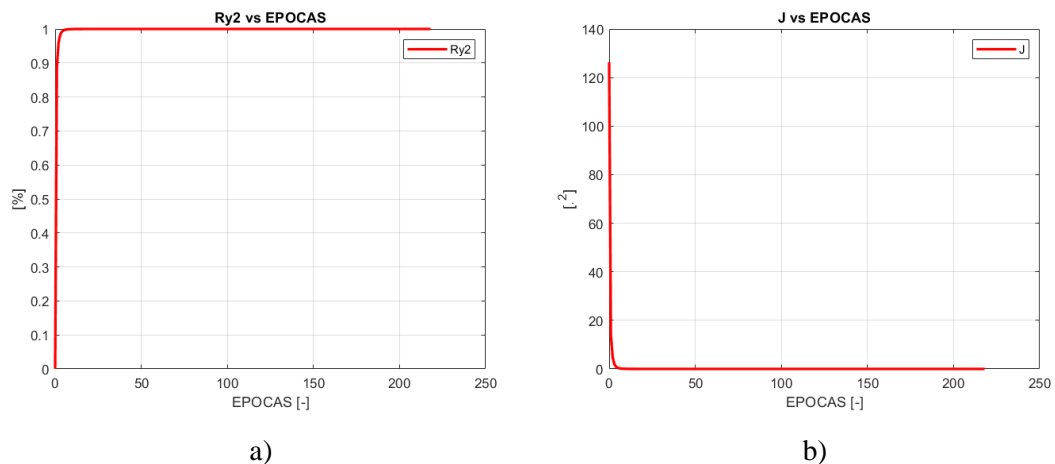


Gráfico 25-4: a) Evolución del factor de correlación cuadrático multivariable, b) Evolución de la función de costo.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Los gráficos Gráfico 24-4 y Gráfico 25-4 muestran el proceso de ajuste de los centroides de las funciones de pertenencia del universo del discurso de salida asociado a la salida del controlador. En los gráficos Gráfico 24-4 a) y b) se observan los centroides inicialmente, y su ajuste final, respectivamente. En los gráficos Gráfico 25-4 a) y b) Se evalúa el factor de correlación cuadrático multivariable de Pearson, en la medida que el sistema de inferencia borroso se ajusta para reproducir el comportamiento de la bomba de ariete bajo la condición de desempeño deseada, siendo el gráfico b) la función de costo cuyo gradiente decreciente determina el fin de ajuste de la posición de los centroides.

El Gráfico 26-4 muestra la evolución de los centroides de las funciones de pertenencia del universo de salida del controlador.

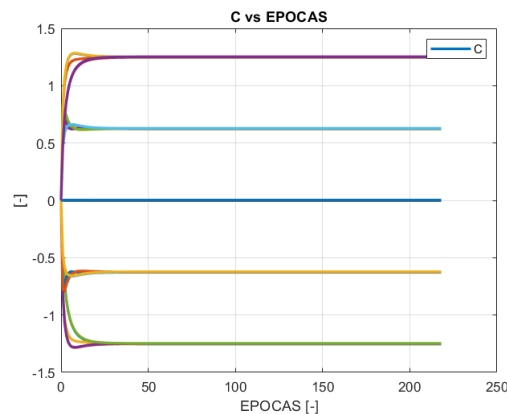


Gráfico 26-4: Evolución de los centroides de las funciones de pertenencia del universo de salida del controlador.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

Los gráficos Gráfico 27-4 y Gráfico 28-4 presentan la estructura del sistema borroso o difuso Mamdani y sus funciones de pertenencia.

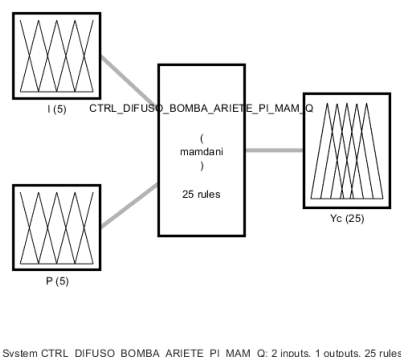


Gráfico 27-4: Estructura del sistema difuso Mamdani para el control.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

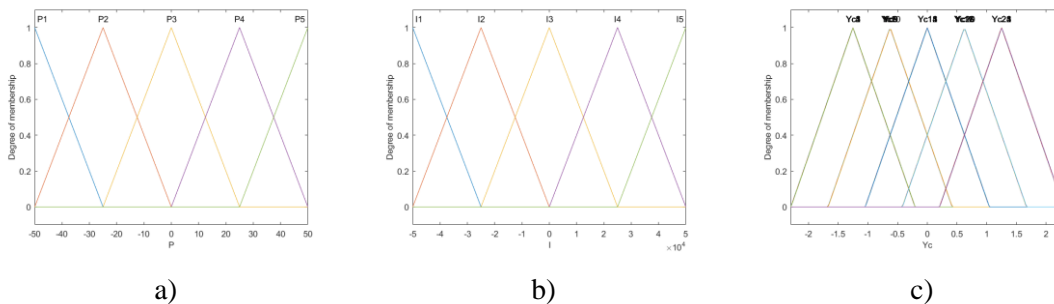


Gráfico 28-4: funciones de pertenencia asociada a) al efecto proporcional b) al efecto integral, y c) a la salida del controlador.

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

La Tabla 13-4 presenta las reglas de conocimiento experto que constituyen el antecedente y consecuente del controlador difuso Mamdani de tipo PI para regular el caudal o la cota de salida de la bomba de ariete.

Tabla 13-4: Reglas que vinculan el antecedente y el consecuente del controlador difuso Mamdani para la bomba de ariete.

regla	antecedente			consecuente	Peso	
1	"I==I1	&	P==P1	=>	Yc=Yc1	(1)"
2	"I==I1	&	P==P2	=>	Yc=Yc2	(1)"
3	"I==I1	&	P==P3	=>	Yc=Yc3	(1)"
4	"I==I1	&	P==P4	=>	Yc=Yc4	(1)"
5	"I==I1	&	P==P5	=>	Yc=Yc5	(1)"
6	"I==I2	&	P==P1	=>	Yc=Yc6	(1)"
7	"I==I2	&	P==P2	=>	Yc=Yc7	(1)"
8	"I==I2	&	P==P3	=>	Yc=Yc8	(1)"
9	"I==I2	&	P==P4	=>	Yc=Yc9	(1)"
10	"I==I2	&	P==P5	=>	Yc=Yc10	(1)"
11	"I==I3	&	P==P1	=>	Yc=Yc11	(1)"
12	"I==I3	&	P==P2	=>	Yc=Yc12	(1)"
13	"I==I3	&	P==P3	=>	Yc=Yc13	(1)"
14	"I==I3	&	P==P4	=>	Yc=Yc14	(1)"
15	"I==I3	&	P==P5	=>	Yc=Yc15	(1)"
16	"I==I4	&	P==P1	=>	Yc=Yc16	(1)"
17	"I==I4	&	P==P2	=>	Yc=Yc17	(1)"
18	"I==I4	&	P==P3	=>	Yc=Yc18	(1)"
19	"I==I4	&	P==P4	=>	Yc=Yc19	(1)"
20	"I==I4	&	P==P5	=>	Yc=Yc20	(1)"
21	"I==I5	&	P==P1	=>	Yc=Yc21	(1)"
22	"I==I5	&	P==P2	=>	Yc=Yc22	(1)"
23	"I==I5	&	P==P3	=>	Yc=Yc23	(1)"
24	"I==I5	&	P==P4	=>	Yc=Yc24	(1)"
25	"I==I5	&	P==P5	=>	Yc=Yc25	(1)"

Fuente: Fuzzy Logic de Matlab

Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

En el siguiente enlace puede disponerse de las simulaciones empleando Simulink de Matlab, evidenciando el comportamiento del regulador, considerando el modelo de primer orden más tiempo muerto para la bomba de ariete, para la regulación caudal y la regulación de cota o nivel. La Figura 20-4 muestran en el esquema de simulación a) Caudal y b) Cota o nivel.

https://drive.google.com/drive/folders/1PxMBPHCsmIG3_Th8kAtTX_5CM2mcAqQA?usp=share_link

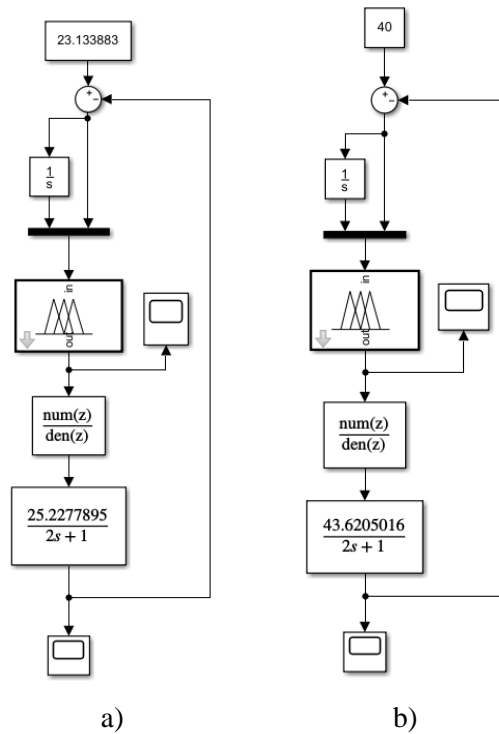


Figura 20-4: Regulación PI difuso de a) caudal y b) Cota o nivel.
Realizado por: (Flores, Jorge 2023).

4.14. Control de la Válvula de Impulso

Una vez que la placa PCB ha sido fabricada, se procede al diseño del controlador de la válvula de impulso. En este caso, se ha propuesto un controlador de lógica borrosa que toma en cuenta los parámetros de entrada y salida del sistema. La variable de entrada del controlador es el error de distancia, el cual es determinado por el sensor lineal que se muestra en la Tabla 4-4. Por otro lado, la variable de salida del controlador es el voltaje del motor, el cual puede variar entre +12 VDC y -12 VDC.

4.15. Programación en la tarjeta de desarrollo STM32 – F030R8

La programación de la tarjeta de desarrollo STM32-F030R8 requiere la descarga e instalación de los controladores correspondientes desde la página oficial de ST Microcontroladores en una PC. Finalmente, Para simplificar la lógica de programación, MBED incluye una librería Fuzzy (Lógica Difusa). En esta librería, se han definido los parámetros necesarios para las funciones de membresía, reglas de control, fusificación y defusificación, que son requeridos para implementar el controlador difuso del sistema. Una vez obtenido el área del nuevo conjunto difuso, se puede interactuar con el motor para controlar la abertura de la válvula de impulso, logrando una gestión precisa del sistema en función de los requerimientos específicos de la aplicación.

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1. Consideraciones Generales

Este proyecto representa una oportunidad para mejorar la eficiencia y la confiabilidad del ariete hidráulico, lo cual tiene implicaciones significativas en términos de ahorro de energía y optimización de recursos hídricos. Además, la implementación de los controladores diseñados sobre una plataforma embebida permitirá una mayor flexibilidad y adaptabilidad del sistema a diferentes aplicaciones y escenarios.

5.2. Descripción del plan de trabajo

La presente propuesta tiene como objetivo solicitar la aprobación, apoyo institucional y/o financiero para la ejecución del proyecto de desarrollo de un prototipo de válvula de impulso de ariete hidráulico con control automático implementado sobre una plataforma embebida. Este innovador prototipo combina la tecnología del ariete hidráulico con un control automático de vanguardia para garantizar un bombeo permanente de agua en aplicaciones diversas. Este proyecto representa una solución eficiente y sostenible para el suministro de agua en áreas rurales, comunidades remotas y proyectos agrícolas.

5.3. Objetivo del proyecto

Como se puede ver en capítulos anteriores el objetivo principal es el diseñar y desarrollar un prototipo de válvula de impulso de ariete hidráulico con control automático tipo borroso implementado sobre una plataforma embebida, optimizando el rendimiento del sistema mediante el diseño de algoritmos de control adecuados que permitan una regulación precisa del flujo y la presión del agua, integrando una plataforma embebida con los componentes del prototipo de la válvula de impulso, estableciendo la comunicación necesaria y asegurando la compatibilidad entre ellos.

Como complemento se realizará pruebas exhaustivas para evaluar el desempeño del prototipo en diferentes condiciones operativa, comparando sus resultados con sistemas convencionales existentes, para al final analizar los datos obtenidos de las pruebas y realizar ajustes o mejoras en el control automático, si es necesario, para optimizar su rendimiento y eficiencia en el bombeo permanente de agua.

5.4. Metodología propuesta

5.4.1. Investigación y análisis

Se realizará un estudio detallado de las necesidades de suministro de agua en las áreas rurales, comunidades remotas y proyectos agrícolas, identificando los desafíos y oportunidades específicos.

5.4.2. Diseño y desarrollo del prototipo

Se utilizará herramientas de diseño y simulación para desarrollar un prototipo de Válvula de Impulso de Ariete Hidráulico con control automático implementado sobre una plataforma embebida, teniendo en cuenta los requisitos del sistema y los objetivos de control.

5.4.3. Integración de componentes

Conectar la plataforma embebida con los componentes de la válvula de impulso, estableciendo una comunicación efectiva y asegurando la compatibilidad y sincronización adecuadas.

5.4.4. Prueba y evaluación

Se realizará pruebas rigurosas del prototipo en condiciones operativas reales, recopilando datos relevantes sobre el flujo, la presión y la eficiencia del bombeo de agua.

5.4.5. Mejora continua

Se analizará los resultados obtenidos, identificar áreas de mejora y realizar ajustes en el control automático para optimizar el rendimiento y la eficiencia del prototipo.

5.4.6. Informe final y presentación

Se elaborará un informe completo que documente el diseño, desarrollo, pruebas y resultados del prototipo, y realizar una presentación detallada para solicitar la aprobación, apoyo institucional y/o financiero.

5.5. Impacto esperado

La implementación del prototipo de válvula de impulso de ariete hidráulico con control automático tipo borroso garantizará un bombeo permanente de agua, ofreciendo los siguientes beneficios:

Acceso constante al agua: Proporcionar un suministro continuo de agua en áreas rurales, comunidades remotas y proyectos agrícolas, mejorando la calidad de vida y apoyando el desarrollo sostenible.

Eficiencia energética: Optimizar el uso de la energía hidráulica disponible, reduciendo los costos operativos y disminuyendo la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Sostenibilidad: Contribuir a la preservación del medio ambiente al utilizar una fuente de energía renovable y minimizar la huella de carbono.

Rentabilidad: Ofrecer una solución rentable a largo plazo al reducir los gastos de operación y mantenimiento en comparación con sistemas convencionales de bombeo de agua.

Se tiene la confianza en que este prototipo será una solución altamente efectiva para empresa, y personas dedicadas al sector agrícola el cual proporcionará un bombeo continuo y confiable de agua en sus proyectos. El compromiso es brindar un producto de calidad, servicio excepcional y colaboración a largo plazo para el éxito mutuo.

CONCLUSIONES

En conclusión, el prototipo de ariete hidráulico cuenta con variables y parámetros de operación clave para el diseño de un sistema de control eficiente. La implementación de un controlador basado en lógica borrosa de tipo Mamdani, tomando como entrada el error de distancia del vástago con valores entre 0 mm y 60 mm, y como salida el voltaje del motor con un rango de +12VDC a -12VDC, permitirá un control más preciso y estable del sistema en diversas condiciones de operación. Este enfoque de control difuso es una solución efectiva para el control de sistemas complejos en los que las variables de entrada y salida son difíciles de medir o modelar con precisión.

A través del conocimiento adquirido y la experiencia obtenida del ariete hidráulico, se logró diseñar un controlador basado en lógica borrosa tipo Mamdani. Este controlador permite garantizar la entrega permanente de agua al variar el tiempo de cierre de la válvula de impulso, lo que aumenta la eficiencia del sistema hidráulico. La obtención de las reglas de funcionamiento del ariete hidráulico fue fundamental para el diseño del controlador, el cual se ajusta a las variables y parámetros característicos de operación del prototipo. La aplicación de este controlador en el sistema hidráulico del ariete permitirá una mejor regulación de la entrega de agua y un funcionamiento más estable del sistema en general.

Se ha logrado implementar los controladores necesarios en la plataforma embebida para llevar a cabo el control difuso de la abertura y cierre de la bomba de ariete hidráulico, además de los drivers necesarios para el correcto funcionamiento del motor y el sensor que mide la distancia del vástago. De esta manera, se ha logrado integrar de manera eficiente todas las partes del sistema de control para garantizar un funcionamiento óptimo del ariete hidráulico y asegurar una entrega permanente de agua.

En el presente estudio se evaluó el sistema de control basado en lógica borrosa para el bombeo de agua en un ariete hidráulico en diferentes horarios y por un periodo de 15 días. Se registraron los valores de distancia del vástago y el caudal de entrada en una base de datos junto con la fecha y hora correspondiente. Luego de analizar los resultados, se concluye que el sistema de control implementado es efectivo para garantizar un bombeo permanente de agua en el ariete hidráulico. Estos resultados sugieren que la estrategia de control basada en lógica borrosa puede ser una alternativa viable para futuros proyectos en el campo de la automatización y control de sistemas hidráulicos disponibles al público.

RECOMENDACIONES

Al determinar las variables del ariete hidráulico, es fundamental tener un conocimiento profundo sobre su funcionamiento o contar con la asesoría de alguien experimentado en el manejo y operación de este tipo de máquinas. Es importante definir correctamente las variables que serán controladas para evitar errores en el proceso.

Es esencial tomar las precauciones necesarias al diseñar un controlador basado en lógica borrosa, ya que los datos a procesar son muy sensibles a cambios y pueden generar errores que afecten los resultados finales y el correcto control del ariete hidráulico. Se recomienda realizar pruebas exhaustivas y validar los resultados para asegurar un adecuado funcionamiento.

Al evaluar el sistema de control del ariete hidráulico, es necesario tener en cuenta los parámetros de diseño procesados y su correcta interpretación por el sistema de control. Esto garantizará una configuración adecuada del ariete y, como consecuencia, un bombeo permanente de agua. Se recomienda realizar pruebas en diferentes condiciones y ajustar el sistema de control en caso de ser necesario para lograr un óptimo desempeño.

GLOSARIO

3D: Tres dimensiones como es altura, anchura y profundidad.

A: Amperio.

AC: Corriente alterna.

DC: Corriente directa.

DIPAC S.A: Empresa que produce acero.

ENA: “Enable” que significa posibilitar.

ESPOCH: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

FUZZY: Lógica difusa o borrosa.

GND: “Ground” que significa tierra.

IN: Entrada.

M.S.N.M: Metros sobre el nivel del mar.

MBED: Plataforma embebida.

MF: Función de membresía.

MOODY: Flujo de fluidos en tuberías.

P: Proporcional.

PCB: “Printed Circuit Board” que significa placa de circuito impreso.

PI: Proporcional – integral.

PID: Proporcional – integral – derivativo.

PIN: Número de identificación personal.

PWM: “Pulse Width Modulation” que significa modulación por ancho de pulso.

RPM: Revoluciones por minuto.

STM32: STMicroelectronics microchip de 32 bits.

V: Voltio.

VDC: Voltaje de corriente continua.

BIBLIOGRAFÍA

- Colmenar, A., Borge, D., Collado, E., & Castro, M. (2015). *Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*. (1st ed.). Editorial UNED.
- Crespo, A. (2006). *Mecánica de Fluidos* (C. Carmona, Ed.; 1st ed., Vol. 3). Paraninfo.
<https://doi.org/978-84-9732-475-5>
- Czajkowski Jorge. (2007, May 5). *Ariete hidráulico*. Creative Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ariete_hidr%C3%A1ulico_01c.png
- Diamer, P., & Chi, M. (2002). Hydraulic ram handbook. *Zhejiang University of Technology, China*.
- Guilarte, D. (2017). *Caracterización de un ariete hidráulico multipulsor*. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Guzmán, D., & Castaño, V. M. (2006). *La Lógica difusa en ingeniería: Principios, aplicaciones y futuro*. 24(2), 87–107.
- Hernández, R., Fernández, C., & del Pilar Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación, 5ta Edición* (INTERAMERICANA, Vol. 5).
- Hubor. (2015). *¿Qué es proteus?* Hubor. <https://www.hubor-proteus.com/proteus-pcb/proteus-pcb/2-proteus.html>
- Lema, W. D. (2020). Implementación de un controlador difuso en la estación de presión para prácticas de control de procesos en el laboratorio de Instrumentación Virtual. *Universidad de Las Fuerzas Armadas*. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/25874/2/M-ESPEL-ENT-0211.pdf>
- Llamas, L. (2016, December 13). *Medir caudal y consumo de agua con Arduino y caudalímetro*. Luis Llamas. <https://www.luisllamas.es/caudal-consumo-de-agua-con-arduino-y-caudalimetro/>
- Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585–1588.

- Mataix, C. (1997). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (E. del Castillo, Ed.; 2. ed. (am)).
- Morcillo, C. G. (2011). *Lógica Difusa Una introducción práctica Técnicas de Softcomputing*.
https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf
- Navarro, R. (2004). *Ingeniería de control analógica y digital* (1st ed., Vol. 1). McGraw-Hill.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. PEARSON EDUCACION.
- Pardo, A. S. (2018). *Implementación de estrategias de control para la regulación de la plataforma FESTO*.
- Paredes, M., & Tuquinga, R. (2013). *Diseño e Instalación de un Sistema de Bombeo Mediante Ariete Hidráulico en la Comunidad de Airón Cebadas*.
- Pastelleto, S. (2012). *Diseño de Controladores Fuzzy*. Universidad. Nacional de Rosario.
- Peña, C. (2020). *Descubriendo Arduino* (M. Lederkremer, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Six Ediciones.
- Pérez, K. A. (2016). *Diseño de un equipo didáctico para el estudio del fenómeno de golpe de ariete en tuberías*. <https://www.industriasgsl.com/blog/post/que-es-un-sistema-de-control#:~:text=La%20apertura%20de%20los%20sistemas,pod%C3%ADa%20flotar%20sobre%20el%20agua>.
- Pérez, R. (2010). Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio. *Revista de Investigación de Sistemas e Informática*, 7(1), 91–104.
- Perles, Á. (2019). *ARM Cortex-M práctico. 1-Introducción a los microcontroladores STM32 de St*.
- Pino, R., Gómez, A., & Martínez Nicolás. (2001). *Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva* (Vol. 1). Universidad de Oviedo.
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia Artificial. Con Aplicaciones a la Ingeniería*.

Saldarriaga, J., Pulgarín, L., Cuero, P., & Duque, N. (2017). Software para la enseñanza de hidráulica de tuberías (Pipeline Hydraulics Academic Software). *Ibero-American Seminar on Water and Drainage Networks (SEREA 2017)*.

Sandoval, R. (2016). *Manual de construcción de un ariete hidráulico para el abastecimiento de agua*. [Tesis Doctoral]. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sasir, A. (2021, June 9). ¿ *Que es un Sistema de Control ? Industrias GSL*.

SEMPLADES. (2017). *Plan Nacional de desarrollo 2017 - 2021*.
<https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-10/Plan%20Nacional%20de%20Desarrollo%20Toda%20Una%20Vida%202017%20-%202021.pdf>

Sivanandam, S. N., Sumathi, S., & Deepa, S. N. (2007). *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. Springer.
<https://ia802902.us.archive.org/26/items/FuzzyLogicReferences/Introduction%20to%20fuzzy%20logic%20using%20MATLAB%20-%20S.%20N.%20Sivanandam%20C%20S.%20Sumathi%20and%20S.%20N.%20Deepa.pdf>

Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-15*(1), 116–132.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. In *INFOR~ATIO~ AND CONTROL* (Vol. 8).

ANEXOS

ANEXO A

Viscosidad cinemática del agua

TABLA 4. Propiedades físicas del agua a 1 bar

temperatura t °C	densidad ρ kg/m ³	módulo elasticidad $K \cdot 10^{-9}$ N/m ²	viscosidad dinámica $\mu \cdot 10^3$ N-s/m ²	viscosidad cinemática $\nu \cdot 10^6$ m ² /s	tensión superficial σ N/m	presión de vapor p_v kPa
0	999,8	1,98	1,781	1,785	0,0756	0,61
5	1000,0	2,05	1,518	1,519	0,0749	0,87
10	999,7	2,10	1,307	1,306	0,0742	1,23
15	999,1	2,15	1,139	1,140	0,0735	1,70
20	998,2	2,17	1,002	1,003	0,0728	2,34
25	997,0	2,22	0,890	0,893	0,0720	3,17
30	995,7	2,25	0,798	0,800	0,0712	4,24
40	992,2	2,28	0,653	0,658	0,0696	7,38
50	988,0	2,29	0,547	0,553	0,0679	12,33
60	983,2	2,28	0,466	0,474	0,0662	19,92
70	977,8	2,25	0,404	0,413	0,0644	31,16
80	971,8	2,20	0,354	0,364	0,0626	47,34
90	965,3	2,14	0,315	0,326	0,0608	70,10
100	958,4	2,07	0,282	0,294	0,0589	101,33

ANEXO B

Coefficiente de rugosidad absoluta del hierro galvanizado

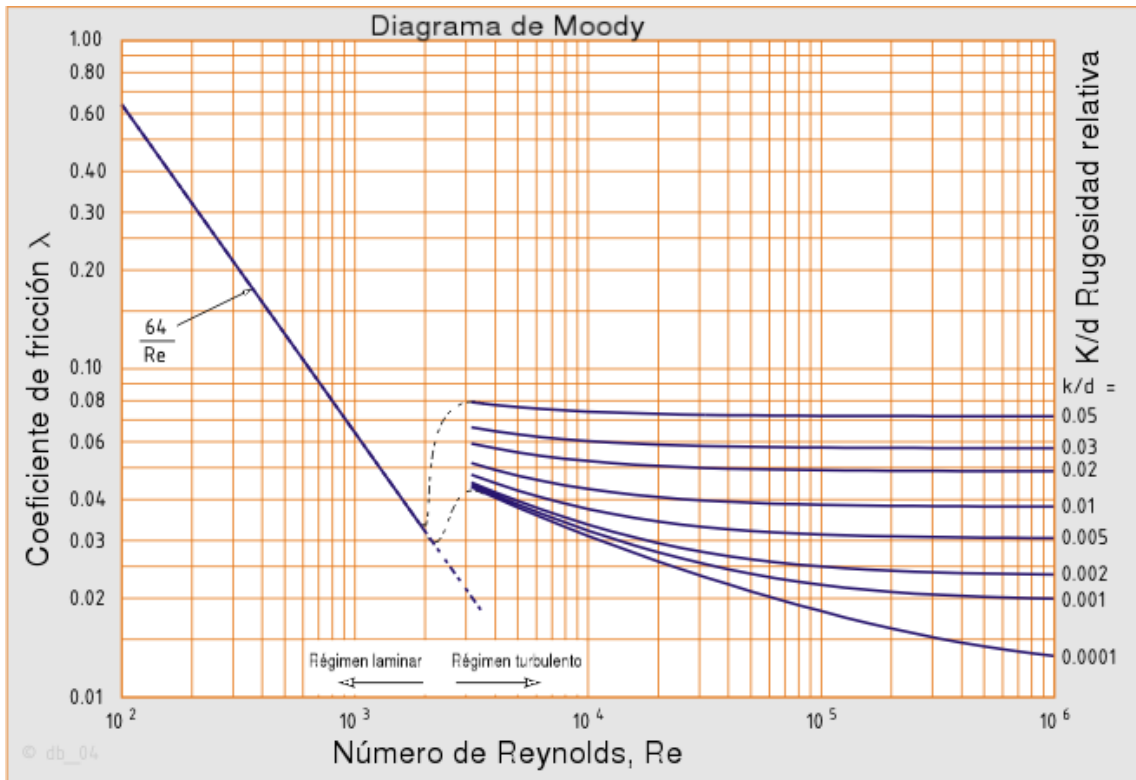
Material	Coefficiente de Manning n	Coef. Hazen- Williams C_H	Coef. Rugosidad Absoluta e (mm)
Asbesto cemento	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmaltado)	0.010	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrim.)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

(Fuente: Computer Applications in Hydraulic Engineering, 5th Edition, Haestad Methods)

Valores Típicos de Coeficientes de Rugosidad

ANEXO C

Diagrama de Moody



ANEXO D

Valores K para accesorios en tuberías



Nº de diámetros (L/D) y coeficientes K para diferentes accesorios

Accesorios	L/D	Diámetro nominal (en pulgadas)												
		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2-3	4	6	8-10	12-16	18-24	
		Valores de K												
Válv.de compuerta(abierta)	8	0.22	0.2	0.18	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.1	0.1	
Válv.de globo(abierta)	340	9.2	8.5	7.8	7.5	7.1	6.5	6.1	5.8	5.1	4.8	4.4	4.1	
Válv.de retención horizontal(check)	100	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	
Válv.de retención horizontal oscilatoria(check)	50	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.75	0.7	0.65	0.6	
Válv.de pie de disco(de huso)con colador	420	11.3	10.5	9.7	9.3	8.8	8.0	7.6	7.1	6.3	5.9	5.5	5.0	
Válv.de pie de disco con bisagra	75	2	1.9	1.7	1.7	1.7	1.4	1.4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9	
Codos estándar	90°	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	45°	16	0.43	0.4	0.37	0.35	0.34	0.3	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	90° radio largo	16	0.43	0.4	0.37	0.35	0.34	0.3	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	180°	50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.9	0.85	0.75	0.7	0.65	0.6
Curvas de 90°	20	0.54	0.5	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.3	0.28	0.26	0.24	
T en línea (con derivación en la línea principal y lateral cerrada)	20	0.54	0.5	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.3	0.28	0.26	0.24	
T en línea (con circulación por derivación)	60	1.62	1.5	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.9	0.84	0.78	0.72	

Adaptación de: Cameron Hydraulic data

Longitud equivalente = $L/D \times D$

ANEXO E

Módulo de elasticidad del agua

AGUA	Densidad, ρ	Peso específico, γ	Visco. dinámica, μ	Tensión superficial	Presión vapor	Mod elas. E
°C	kg / m ³	kN/m ³	(N s / m ²)	(N / m)	kPa	GPa
0	1000	9,81	1,75 10 ⁻³	0,0756	0,611	2,02
20	998	9,79	1,02 10 ⁻³	0,0728	2,34	2,18
50	988	9,69	5,41 10 ⁻⁴	0,0679	12,3	2,29
80	971	9,53	3,5 10 ⁻⁴	0,0626	47,4	2,2
100	958	9,4	2,82 10 ⁻⁴	0,0589	101,3	2,07