

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Mecatrónico*

PROYECTO TÉCNICO:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CONTROL
DE POSICIÓN DEL TORNILLO PILOTO DE UNA VÁLVULA
REDUCTORA DE PRESIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA
POTABLE DE LA EMPRESA DE TELECOMUNICACIONES, AGUA
POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE CUENCA -
ETAPA EP SECTOR 3.1 PARA REDUCIR PÉRDIDAS POR FUGA DEBIDO
A VARIACIONES DE PRESIÓN”**

AUTORES:

ANDRÉS FABIÁN CABRERA CARPIO
PAÚL ANDRÉS ROMÁN SÁNCHEZ

TUTOR:

ING. EDY LEONARDO AYALA CRUZ, MSc.

CO-TUTOR:

ING. DIEGO RENÉ URGILÉS CONTRERAS, MSc.

CUENCA - ECUADOR

2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Andrés Fabián Cabrera Carpio con documento de identificación N° 0105485833 y Paúl Andrés Román Sánchez con documento de identificación N° 0705182335, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CONTROL DE POSICIÓN DEL TORNILLO PILOTO DE UNA VÁLVULA REDUCTORA DE PRESIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA EMPRESA DE TELECOMUNICACIONES, AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE CUENCA - ETAPA EP SECTOR 3.1 PARA REDUCIR PÉRDIDAS POR FUGA DEBIDO A VARIACIONES DE PRESIÓN”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecatrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2020



Andrés Fabián Cabrera Carpio

C.I. 0105485833



Paúl Andrés Román Sánchez

C.I. 0705182335

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CONTROL DE POSICIÓN DEL TORNILLO PILOTO DE UNA VÁLVULA REDUCTORA DE PRESIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA EMPRESA DE TELECOMUNICACIONES, AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE CUENCA – ETAPA EP SECTOR 3.1 PARA REDUCIR PÉRDIDAS POR FUGA DEBIDO A VARIACIONES DE PRESIÓN”**, realizado por Andrés Fabián Cabrera Carpio y Paúl Andrés Román Sánchez, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2020



Ing. Edy Leonardo Ayala Cruz, MSc.

C.I. 0105627277

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

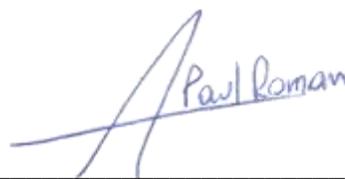
Nosotros, Andrés Fabián Cabrera Carpio con documento de identificación N° 0105485833 y Paúl Andrés Román Sánchez con documento de identificación N° 0705182335, autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CONTROL DE POSICIÓN DEL TORNILLO PILOTO DE UNA VÁLVULA REDUCTORA DE PRESIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA EMPRESA DE TELECOMUNICACIONES, AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE CUENCA - ETAPA EP SECTOR 3.1 PARA REDUCIR PÉRDIDAS POR FUGA DEBIDO A VARIACIONES DE PRESIÓN”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2020



Andrés Fabián Cabrera Carpio

C.I. 0105485833



Paúl Andrés Román Sánchez

C.I. 0705182335

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a mis padres Fabián Y Mónica quienes supieron brindarme a lo largo de esta etapa de mi vida el suficiente apoyo para no rendirme hasta alcanzar la meta. A mis hermanas Daniela y Tamara por su cariño y comprensión en todo este tiempo, que este logro les sirva como un ejemplo a seguir, sé que Daniela será una excelente arquitecta y Tamara será una grandiosa ingeniera. A mi familia pues siempre supieron aconsejarme para salir adelante. Y a todos mis amigos, siempre nos hemos apoyado, y siempre nos apoyaremos.

Andrés Fabián Cabrera Carpio

Dedico este trabajo de titulación a mis maravillosos padres, William y Ethel a quienes me han entregado su tiempo, energía, talento y amor para inculcarme valores y principios durante toda mi vida al apoyarme incansablemente para alcanzar la meta de convertirme en un excelente profesional, todo lo que soy se lo debo a ustedes. A mis hermanos Carlos, Carolina y William por estar a mi lado siempre y compartir conmigo momentos inolvidables, y a Yanella quien me acompaña y brindo siempre su apoyo incondicional hasta cumplir mi sueño.

A mi familia por ser mi fortaleza y lo más precioso que Dios me ha dado, a ustedes con todo mi cariño y amor.

Paúl Andrés

AGRADECIMIENTOS

Luego de haber culminado con este trabajo y también de haber pasado estos años dentro de la universidad, quiero agradecer de gran manera y de la forma más sinceras a mis padres, a mi madre Mónica quien me ha dado los mejores consejos para formarme como una persona con valores, y a mi padre Fabián quien me ha sabido ayudar cuando me he quedado estancado, enseñándome a salir de los problemas que se presentaban y transfiriéndome un poco de su experiencia. A mis hermanas que han estado siempre acompañándome y apoyándome, siento que su cariño es el más sincero que pueda encontrar.

Mi mayor gratitud para mis abuelos Miguel, Ruth, Luis y Magdalena quienes estuvieron a mi lado durante gran parte de mi vida, me educaron y enseñaron a siempre salir adelante y con sus experiencias me supieron guiar.

Agradezco a mis tíos quienes me han acompañado y ayudado en los momentos que mis padres no lo han podido, siendo un pilar fundamental dentro de mi formación y que cuando he necesitado de ellos nunca han dudado en estar ahí, en especial para mis tíos Miguel, Boris y Lucía, sin su ayuda muchos de los logros que he obtenido no se hubieran podido realizar.

Así también extendiendo mi gratitud a mis amigos del colegio y de la universidad que han estado en los momentos de felicidad, pero también en los momentos de dificultad, desde el colegio siempre hemos sabido apoyarnos y sin perder la amistad verdadera, gracias a Gabriel, Bryan, Gonzalo, Diego, Juan Pablo, Daniel y Pablo. A los amigos que hice en la universidad Maya, Doménica, Alejandro, Jeans y sobre todo a mi compañero y amigo durante estos cinco años Paúl, con quien logré realizar esta tesis, juntos logramos cumplir nuestra meta, durante estos últimos cinco años ha sido una gran compañía en los peores y en los mejores momentos. Y a mi primo Geovanny, con quien desde pequeños hemos sido como hermanos, con quien compartí muchas experiencias en donde ambos aprendimos bastante, no solo de la parte académica, sino de la parte social.

Por último, y no por eso menos importante, agradezco a los profesionales que ayudaron con la elaboración de este proyecto, a los ingenieros Edy Ayala y Diego Urgiles tutor y cotutor respectivamente de la tesis quienes nos han brindado su conocimiento y tutela de inicio a fin, al Ing. Pablo Muñoz quien nos ha brindado su apoyo y conocimientos dentro de la empresa ETAPA EP, al Ing. Johan Aban quien fue mi tutor de pasantías y que luego sin compromiso alguno nos ayudó con los temas técnicos que desconocíamos, y al Sr. Carlos Pañi quien nos acompañó durante las pruebas dentro de la cámara en la cual nuestro prototipo funcionó.

Andrés Fabián Cabrera Carpio

AGRADECIMIENTOS

Durante el largo camino para la realización de este trabajo siempre estuvieron cerca de mí personas especiales que supieron brindarme su tiempo, palabras de ánimo y apoyo por ello las llevo en mi mente y corazón al tiempo que agradezco a Dios Todopoderoso que se encuentren en mi vida entre estas personas especiales son:

Mis padres William y Ethel, quienes han sido para mí un ejemplo de fortaleza y constancia para alcanzar esta meta, por sus sabios consejos para enfrentar los problemas y nunca rendirme, gracias por su amor, gran paciencia y apoyo incondicional quiero que sepan que son muy valiosos para mí y les agradezco por creer en mí. También quiero expresar mis agradecimientos a mis queridos hermanos: Carlos, Carolina y William por estar a mi lado en cada etapa de mi vida para tenderme una mano siempre, y como no podía faltar la princesa de nuestras vidas mi pequeña sobrina Sofía, gracias por tu sonrisa.

De manera especial quiero agradecer a mis tutores Ing. Edy Ayala, Ing. Diego Urgiles e Ing. Pablo Muñoz por su amabilidad y disposición para brindarme su dirección y sugerencias para la exitosa culminación de este trabajo. Al Ing. Luis Carchi quien si empre tuvo la diligencia de responder mis dudas y compartir consejos.

A mi primo Michael Sánchez por su colaboración al atender mis requerimientos en cuanto a baterías y cargador de las mismas para cristalizar mi idea en este proyecto, al Sr. Carlos Pañi, trabajador de la empresa Etapa quién nos abrió la cámara para poder acceder a ésta para realizar pruebas hasta que funcionó, a mi gran amigo Andrés Cabrera, compañero de aula y de tesis por su ayuda y entrega para cumplir esta meta, también al Ing. Fabian Cabrera por su guía todo este tiempo y a la Ing. Mónica Carpio por su atención permanente. Finalmente extendiendo mis agradecimientos a todos mis amigos Israel, Jeans y a los demás amigos que hice durante la universidad como a quienes, aunque están lejos sé que puedo contar siempre con ustedes.

Paúl Andrés

RESUMEN

El presente documento contiene la información teórica de la opción de titulación bajo la modalidad de proyecto técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico. El tema surge a partir de la necesidad de automatizar una válvula de reducción de presión actualmente instalada en la red de distribución de agua potable de ETAPA EP del sector 3.1 (Red alta), el cual alimenta las zonas 02 y 04 (ver anexos); la regulación de presión de dicha válvula es netamente manual, razón por la cual, una vez configurada la presión de salida, ésta permanecerá constante a lo largo del tiempo. La válvula actualmente instalada es de la marca OCV modelo 127-3, su presión de salida es configurada mediante un tornillo piloto. La válvula “OCV 127-3” reduce la alta presión de entrada a una previamente establecida y da como resultado una presión de salida constante a lo largo del tiempo, cuando haya cambios en el consumo de agua potable la válvula se encargará de garantizar que la presión permanezca constante. Inicialmente en dicha red de distribución no existe un sistema capaz de variar de forma automática la configuración de la presión de salida, por esto se actuó mediante el prototipo con un control ON-OFF sobre el tornillo piloto para controlar su posición y por ende regular la presión de salida según un horario definido, el cual se obtiene en base a un análisis de caudal de consumo en dicha red. Al cambiar la presión de salida en la red en función de diferentes horarios se logra disminuir las pérdidas de agua potable que se produzcan por fugas dentro de las tuberías en la red de distribución, ya que mientras menor sea la presión menor será la cantidad de agua que logre escapar por dichas fugas. La reducción que se obtiene de gestionar la presión de salida en el horario establecido es alrededor de 7500 metros cúbicos por año, lo que en términos económicos representa un ahorro de \$900 a la empresa ETAPA EP y además el índice de agua no contabilizada se reduce del 13.71% al 2.71%, lo que indica que la mayor cantidad de perdidas está en las tuberías de la red de distribución en las zonas 02 y 04 en el sector 3.1.

GLOSARIO

- **VRP.** – Válvula reductora de presión.
- **Presión aguas arriba.** – Presión del agua potable antes de reductor de presión.
- **Presión aguas abajo.** – Presión del agua potable después del reductor de presión.
- **PLC.** - Controlador Lógico Programable.
- **CC.** – Corriente continua.
- **ETAPA EP.** – Empresa pública municipal de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado y saneamiento de Cuenca.
- **L/S.** – Litros sobre segundo.
- **IANC.** – Índice de agua no contabilizada.
- **mm.** – Milímetros.
- **m³.** – Metros cúbicos.
- **mca.** – Metros de columna de agua.
- **psi.** – Libra de fuerza por pulgada cuadrada.
- **N.** – Newtons.
- **Nm.**– Newtons por metro.
- **Primera fase.** – Periodo sin gestión de presión.
- **Segunda fase .** –Periodo con gestión de presión.
- **PLA.** – ácido poliláctico.
- **Mean Filter.** – Filtro medio.

ÍNDICE

DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	VIII
GLOSARIO	IX
ÍNDICE	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema de estudio	2
1.2 Justificación	2
1.3 Grupo Objetivo	3
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL	5
2.1 Teorema de Bernoulli	5
2.2 Redes de agua potable	6
2.3 Pérdidas técnicas o reales	8
2.3.1 Tipos de fugas de agua potable y sus principales causas	8
2.4 Operaciones para el control y reducción de pérdidas de agua potable	9
2.5 Gestión de presiones	12
2.6 Índice de agua no contabilizada (IANC)	13
2.7 Válvula reductora de presión	13
2.8 Modulación de la presión basada en el tiempo	15
2.8.1 Alternativas para modulación de presión basada en el tiempo	15
2.9 El golpe de ariete	19
2.9.1 Cálculo del golpe de ariete en redes de agua potable	20
2.9.2 Fórmulas de Allievi y Micheaud	21
2.9.3 Cálculo en redes con tuberías de dimensiones variables	22
2.9.4 Efectos del golpe de ariete	23
2.10 Control de encendido – apagado	23
2.11 Propuesta de Solución	24

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE SISTEMA ELECTRÓNICO	27
3.1 Consideraciones de diseño del sistema electrónico	27
3.1.1 Actuator: Motor	27
3.1.1.1 Cálculo de torque necesario para el motor	28
3.1.1.2 Cálculo de la velocidad necesaria para el motor	29
3.1.2 Transmisor de presión	32
3.1.3 Driver: Puente H	33
3.1.4 PLC	34
3.1.5 Elaboración del sistema electrónico de control ON/OFF	35
3.2 Configuración de dispositivos electrónicos	37
3.2.1 Conexión de transmisor de presión	38
3.2.2 Conexión PLC – Puente H – Motor	39
3.2.3 Conexión de todos los dispositivos electrónicos	40
3.3 Programación de PLC Siemens LOGO! 12/24RCE	41
3.3.1 Entrada analógica	43
3.3.2 Amplificador analógico	43
3.3.3 Conmutador analógico de valor umbral	44
3.3.4 Temporizador semanal	45
3.3.5 Generador de pulsos asíncronos	47
3.3.6 Programación adicional	48
3.4 Programa de sistema electrónico de control ON/OFF	49
3.5 Sistema electrónico físico	51
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE SISTEMA MECÁNICO	52
4.1 Modelado tridimensional	53
4.1.1 Modelado tridimensional de conjunto tornillo piloto	53
4.1.2 Modelado tridimensional de motor ZHENG ZWL-31ZY	54
4.2 Modelado de componentes mecánicos en Inventor®	55
4.2.1 Modelado de acople de tornillo piloto con eje del motor	55
4.2.2 Modelado de estructura soporte del motor	56
4.2.2.1 Modelo de base del motor	57
4.2.2.2 Modelado del brazo 1 y 2	58
4.3 Análisis estructural	61
4.3.1 Primer análisis	62
4.3.2 Segundo análisis	64
4.4 Implementación del sistema mecánico	66
CAPÍTULO 5. RECOPIACION Y ANALISIS DE DATOS	67
5.1 Recopilación de datos	67
5.1.1 Macromedición	67
5.1.2 Micromedición	68

5.1.2.1	Primera fase con presión de salida constante de 60 psi día / 60 psi noche	69
5.1.2.2	Segunda fase con presión de salida variable de 60 psi día / 40 psi noche	69
5.2	Análisis de datos	69
5.2.1	Macromedición	69
5.2.1.1	Primera fase con presión de salida constante de 60 psi día / 60 psi noche	69
5.2.1.2	Segunda fase con presión de salida variable de 60 psi día / 40 psi noche	76
5.2.2	Programación de horarios en PLC	81
5.2.3	Micromedición	83
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		84
6.1	Disminución del caudal y volumen de 00h30 a 03h30	84
6.2	IANC primera fase	85
6.3	IANC segunda fase	86
6.4	Pérdidas en términos de volumen y económicos	87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		89
REFERENCIAS		90
ANEXOS I UBICACIÓN DEL SECTOR		94
9.1	Mapa de sectores de Cuenca	94
9.2	Mapa sector 3.1 de Cuenca	95
ANEXO II SISTEMA ELECTRÓNICO		96
10.1	Plano del sistema de control	96
10.2	Programación de PLC	97
ANEXO III PLANOS MECÁNICOS		98
11.1	Vista explosionada sistema de acople	98
11.2	Vista explosionada sistema mecánico	99
11.3	Entorno tornillo piloto	100
11.4	Tornillo piloto	101
11.5	Acople tornillo piloto-motor	102
11.6	Base del motor	103
11.7	Barra superior (Brazo 1)	104
11.8	Cierre superior	105

11.9 Barra inferior (Brazo 2)	106
11.10 Cierre barra inferior	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Tubería horizontal con fuga	6
Fig. 2. Esquema de red de agua potable	7
Fig. 3. Esquema de altura piezométrica en sector A	8
Fig. 4. Métodos para la reducción de pérdidas físicas en sistemas de agua potable	10
Fig. 5. Red de distribución de agua potable reductor de presión	13
Fig. 6. Diagrama de válvula reductora de presión [18]	14
Fig. 7. Pegasus [20]	16
Fig. 8. Dispositivo PEGASUS implementado en válvula reductora [20]	16
Fig. 9. Válvula CLA-VAL 90-35 [21]	18
Fig. 10. Válvula CLA-VAL PCM 90-01 [22]	18
Fig. 11. CLA-VAL D12 [23]	19
Fig. 12. Ilustración de diferentes tuberías en una red de agua potable.....	22
Fig. 13. Comportamiento de control ON-OFF	23
Fig. 14. Esquema gráfico del funcionamiento del sistema electromecánico.....	25
Fig. 15. Esquema gráfico del conexionado del PLC	25
Fig. 16. Esquema de medición de torque	28
Fig. 17. Motor DC ZHENG ZWL-31ZY 5RPM [33]	32
Fig. 18. Transmisor KOBOLD SEN-8601B065	33
Fig. 19. Puente H L298N [34]	34
Fig. 20. LOGO! 12/24RCE [36].....	35
Fig. 21. LOGO! AM2 [37]	35
Fig. 22. Diagrama de bloques de sistema de control.....	37
Fig. 23. Esquema inicial de conexión de dispositivos electrónicos	38
Fig. 24. Esquema de conexión de transmisor de 2 hilos [41].....	39
Fig. 25. Esquema de conexión de pines de transmisor de presión	39
Fig. 26. Esquema de conexión de PLC - Puente H - Motor	40
Fig. 27. Esquema de conexión de sistema electrónico de control.....	41
Fig. 28. Diagrama de flujo de programación del PLC	42
Fig. 29. Configuración de bloque de entrada analógica.....	43
Fig. 30. Configuración de bloques de amplificadores analógicos.....	44
Fig. 31. Configuración de bloques de conmutador analógico de valor umbral	45
Fig. 32. Configuración de bloque de temporizador semanal.....	46

Fig. 33. Configuración de bloque de generador de pulsos asíncronos	47
Fig. 34. Configuración de subprograma adicional	48
Fig. 35. Configuración de bloque de registro de datos.....	49
Fig. 36. Configuración de pantalla de LOGO!.....	49
Fig. 37. Programa de control de posición del tornillo piloto en LOGO! Soft Confort	50
Fig. 38. Sistema electrónico en físico	51
Fig. 39. Conjunto Válvula reductora de presión y tornillo piloto	52
Fig. 40. Sistema de tornillo piloto modelado en Inventor®.....	53
Fig. 41. Sistema de tornillo piloto real	53
Fig. 42. Plano mecánico de motor ZHENG ZWL-31ZY	54
Fig. 43. Motor ZHENG ZWL-31ZY modelado en Inventor®.....	54
Fig. 44. Modelo tridimensional de acople Motor - Tornillo piloto	55
Fig. 45. Esquema de piezas de soporte del motor	56
Fig. 46. Modelado tridimensional de base del motor	57
Fig. 47. Vista de agujeros roscados en base de motor.....	58
Fig. 48. Ensamble de acople y base de motor	58
Fig. 49. Modelado tridimensional de brazo 1 y 2.....	59
Fig. 50. Ilustración de división en brazos para el montaje.....	60
Fig. 51. Modelado tridimensional de estructura soporte del motor	60
Fig. 52. Ensamble de componentes mecánicos en Inventor ®.....	61
Fig. 53. Ensamble primera simulación.....	62
Fig. 54. Efecto de las cargas W y G aplicadas en el sistema simulado en Inventor®.....	63
Fig. 55. Aplicación del torque en el sistema	64
Fig. 56. Efecto del torque sobre el conjunto simulado en Inventor®	65
Fig. 57. Sistema mecánico implementado.....	66
Fig. 58. Historial de caudal (l/s) del 10 de febrero al 4 de marzo de 2020	68
Fig. 59. Caudal de lunes a viernes.....	71
Fig. 60. Caudal sábados y domingos.....	72
Fig. 61. Caudal semanal	73
Fig. 62. Caudal mínimo típico.....	75
Fig. 63. Caudal lunes a viernes	77
Fig. 64. Caudal promedio sábados y Domingos.....	78
Fig. 65. Caudal de lunes a domingo	79

Fig. 66. Caudal mínimo.....	80
Fig. 67. Programación de presión superior.....	82
Fig. 68. Programación de presión inferior.....	82
Fig. 69. Volumen Micromedido en las dos fases	83
Fig. 70. Volumen micromedido total de las dos fases.....	85
Fig. 71. Pérdidas sin gestionar la presión en 8 días.....	86
Fig. 72. Resultados de gestionar la presión en 15 días.....	87
Fig. 73. Pérdidas anuales.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Determinación de método para cálculo de golpe de ariete	20
Tabla 2. Valores orientativos del adimensional k [27]	21
Tabla 3. Datos obtenidos para cálculo de torque	29
Tabla 4. Especificaciones técnicas de tuberías PVC Plastigama [31]	30
Tabla 5. Resultados primer análisis de tensiones.	63
Tabla 6. Resultados segundo análisis de tensiones.....	65
Tabla 7. Caudal promedio diario.	70
Tabla 8. Caudales mínimos.	74
Tabla 9. Caudal semanal (18 de febrero-4 de marzo).....	76

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto estuvo enfocado a la reducción de pérdidas de agua potable en la red de distribución del sector R3.1 (Red alta) de Cuenca mediante ingeniería. Para esto se realizó una recopilación y un análisis de las muestras del consumo de agua potable según las instrucciones entregadas por la empresa ETAPA EP. Posterior a esto, se procedió a realizar una propuesta de diseño de un sistema mecatrónico que permita controlar de forma automática la posición del tornillo piloto de la válvula reductora de presión, dado que dicho tornillo será el encargado de modificar la presión de salida de dicha válvula. Este sistema mecatrónico se dividió en dos componentes, el electrónico que se encarga de automatizar la válvula de una manera preprogramada, y el componente mecánico que se basa en un mecanismo que permita acoplar los dispositivos electrónicos con el tornillo piloto. Para finalmente construirlo, implementarlo y hacer las pruebas respectivas.

El levantamiento de información de caudales se realizó con la ayuda de un caudalímetro portátil ultrasónico, instalado aguas arriba de la válvula, que registra el caudal de entrada en la válvula reductora de presión. Para el análisis de la información, se realizaron gráficas de dichos caudales logrando observar los horarios donde el consumo se reduce a los valores mínimos en ese sector, logrando establecer las horas a las cuales el prototipo trabajará. Después de realizar este análisis, más la experiencia del personal de ETAPA EP, se determina los horarios para el funcionamiento del dispositivo mecatrónico.

En el diseño electrónico se busca un método que logre mover el tornillo piloto de la válvula reductora de presión de forma automática. Para esto se elige un motor que funcione como actuador, puesto que puede generar los movimientos que se necesitan para mover el tornillo piloto y como esto debe realizarse según un horario definido, adicionalmente se busca un dispositivo programable que logre ejecutar órdenes en horas específicas, siendo un PLC la mejor opción. Por último, para monitorear la presión de salida se busca un transmisor de presión que cumpla con los rangos de presión de dicho sistema.

El sistema mecánico se propone luego de haber definido el actuador que se utilizará para mover al tornillo piloto, y de haber establecido la ubicación de dicho actuador. Buscando de esta forma la mejor geometría que permita obtener un diseño óptimo para la implementación del sistema en la válvula reductora de presión. Una vez que se genera la propuesta se procede

a su construcción e implementación para determinar si cumple con los objetivos propuestos. Para esto se realizaron macromediciones y micromediciones en el sector, antes y después de haber instalado el prototipo, para definir las pérdidas de agua potable en la red del sector 3.1. Finalmente se determina que las pérdidas en el sistema han disminuido, indicando que la prototipo logra cumplir con su cometido. Así también, estos resultados indican que una gestión de presiones en los horarios establecidos en el sector puede reducir las pérdidas en las redes de agua potable originadas por fugas, por lo tanto, independientemente del método para controlar la VRP, las pérdidas en este sector pueden disminuir con una gestión de presión.

1.1 Problema de estudio

En una red de distribución de agua potable existen pérdidas por fugas, originadas en la falta de hermeticidad en las tuberías, generalmente provocada por triza duras y roturas, accesorios deficientes, juntas elastoméricas defectuosas, etc. estas pérdidas se incrementan si la presión del agua es alta. Debido a estas pérdidas, la empresa ETAPA EP deja de facturar un volumen de agua considerable, lo cual genera pérdidas económicas. La presión del agua es controlada con una cámara de reducción de presión instalada al ingreso de los subsectores 02 y 04, la cual está seteada con un valor fijo de presión de salida, dicha presión es ajustada en función de la presión mínima requerida en el punto más alto de la zona, esto quiere decir que la presión siempre es la misma y en diferentes horas del día es innecesariamente alta, generando una pérdida también alta por las fugas.

1.2 Justificación

La gestión de la presión del agua es uno de los métodos principales para el control de las pérdidas por fuga [1], si se logra ajustarla a la presión mínima necesaria a las diferentes horas del día las pérdidas por ende serán menores. En las redes de distribución de agua potable existen cámaras que controlan la presión de salida del agua, las cámaras existentes en la empresa ETAPA EP no poseen un control que logre variar la presión aguas abajo en función de la demanda a diferentes horas del día [2]. Siendo la presión configurada la mínima que se requiere durante el día en el punto más elevado de la zona, por lo que resulta excesiva para otras horas de mínima demanda de servicio. Por esta razón se pretende variar la presión de

la cámara en función de dicha demanda, logrando de esta forma tener una presión menor cuando la demanda no sea alta, produciendo, por lo tanto, que las pérdidas también sean menores. La presión de salida de la cámara reductora de presión es ajustada mediante un tornillo piloto, razón por la cual, se pretende actuar sobre dicho tornillo. Para variar la posición del tornillo y por ende la presión de salida se diseñará un sistema electrónico, encargado de variar la posición del piloto según las diferentes horas del día. Para lograr acoplar el sistema electrónico con el piloto se deberá diseñar un sistema mecánico. Una vez diseñado e implementado el sistema en la cámara de presión las pérdidas por fuga podrán ser reducidas, disminuyendo el desperdicio de agua potable, generando un ahorro económico para la empresa, y para las personas que posean fugas internas en sus domicilios. Actualmente en el mercado existen válvulas reductoras de presión que pueden solventar este problema, sin embargo, estos dispositivos tienen un costo elevado, razón por la cual se pretende realizar el control antes mencionado en la válvula ya existente por un costo menor [2].

1.3 Grupo Objetivo

La empresa ETAPA EP es la beneficiaria directa, ya que tendrá menores pérdidas por fugas en la red de distribución de agua potable para ofrecer un mejor servicio.

Los beneficiarios indirectos son los abonados de la empresa ETAPA EP quienes hacen uso de los servicios de agua potable, ya que en caso de fugas internas su pérdida será menor.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir un prototipo para el control de posición del tornillo piloto de una válvula reductora de presión en la red de distribución de agua potable de la empresa ETAPA EP sector 3.1 para reducir pérdidas por fuga debido a variaciones de presión.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Analizar el consumo de agua potable del sector 3.1 para determinar niveles de presión a la salida del sistema y establecer una curva de funcionamiento de la válvula reductora de presión en función del análisis de consumo y de los requerimientos de la empresa ETAPA EP.

2. Diseñar un sistema de control para regular la posición del tornillo piloto de la válvula reductora de presión.
3. Diseñar un sistema mecánico para acoplar el piloto de la válvula reductora de presión al sistema de control.
4. Acoplar el prototipo en la línea de distribución para realizar pruebas de funcionamiento y calibración del equipo según las especificaciones de la empresa ETAPA EP.

CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Teorema de Bernoulli

Para poder entender la dinámica de un fluido se debe conocer sobre el teorema de Bernoulli, el cual logra relacionar la presión, la rapidez de un flujo y la altura para que un fluido ideal pueda fluir [3]. Es importante recalcar que este análisis es aplicable para flujos estacionarios, incompresibles, no viscosos y no rotatorios [4], para el caso de una red de distribución de agua potable puede ser aplicable siempre y cuando no sea una distancia considerablemente larga, ya que en pequeñas distancias la viscosidad puede ser omitida [5].

Para conseguir la ecuación se debe aplicar el teorema del trabajo y la energía al fluido, para un fluido que se encuentra en una tubería horizontal, el cual puede ser considerado para generalizar la red de agua potable, tuberías internas en una casa, etc. La ecuación se reduce a la siguiente:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(y_2 - y_1) \quad \text{ec.(1)}$$

Donde:

- p : Presión.
- ρ : Densidad del fluido.
- g : Gravedad.
- v : Rapidez del fluido.
- y : Altura con respecto a una referencia.

Los subíndices 1 y 2 hacen referencia a dos puntos cualesquiera del tubo en el cual el fluido se está transportando.

De la ecuación antes mostrada se puede notar que si la velocidad es mayor la presión debe ser menor, y viceversa [4]. En una red de agua potable la velocidad varía en función del consumo del sector, por lo tanto, la presión se encontrará variando constantemente. También es importante notar que si se logra analizar las variaciones de velocidad o caudal diarios en un sistema de agua potable se podrá determinar cuál es el índice diario del consumo en dicho sistema.

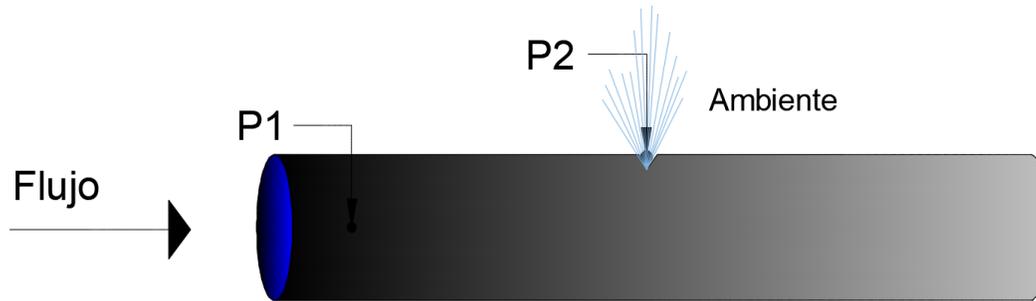


Fig. 1. Tubería horizontal con fuga

Si el análisis cambia asumiendo una tubería horizontal con una rotura (fuga), como se ilustra en la Fig. 1. En la cual el punto 2 será el más próximo a la rotura. La ecuación se ajusta de la siguiente manera:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \right)} \quad \text{ec. (2)}$$

Con esta ecuación se puede observar por lo tanto que a mayor presión en el punto 1, mayor será la velocidad en el punto de fuga. Comparado con una red de distribución de agua potable con una fuga esto demuestra que mientras mayor sea la presión del agua mayor será la velocidad con la que el agua sale por la rotura, en otras palabras, mientras mayor sea la presión del agua, mayor será la fuga.

Por lo tanto, si existe una fuga en una red, lo mejor sería que la presión sea menor, para que de esta forma la pérdida también sea menor.

2.2 Redes de agua potable

Los sistemas de agua potable están constituidas de diversos componentes, encargados de captar, transportar, potabilizar, desinfectar, regular y distribuir el agua a las diferentes partes de un sector [6], con el objetivo de remediar los problemas de abastecimiento de este recurso en las ciudades [7].

Una red de distribución de agua potable normalmente está constituida por tuberías, accesorios y estructuras que transportan el agua desde los tanques de agua potable hasta los domicilios de los habitantes, los cuales pasarían a ser abonados de la empresa distribuidora.

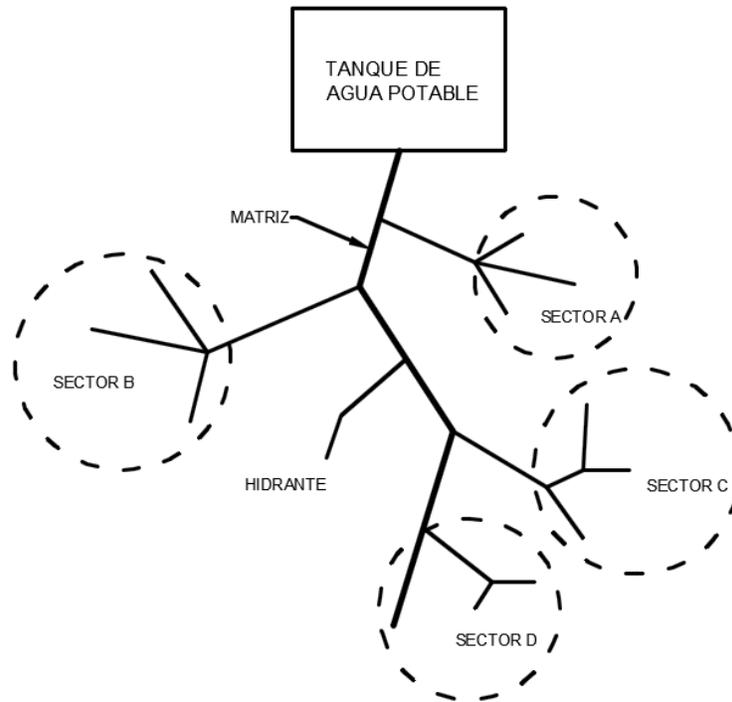


Fig. 2. Esquema de red de agua potable

Una red de agua potable alimenta a diferentes sectores en una ciudad, en cada sector habrá diferentes números de habitantes y también el tipo de consumidores variará, entre residenciales y comerciales. En la Fig. 2 se puede observar cómo se puede distribuir la red de agua potable. Como se mencionó, cada sector puede ser diferente, para lo cual cada uno tendrá requerimientos diferentes y por tanto la red deberá ser configurada de diferente forma.

En el diseño de la red de distribución se debe tener en cuenta los diámetros de tuberías, dimensiones, los parámetros y ubicación de los equipos de bombeo o válvulas para lograr entregar una presión apta para los consumidores [4]. Dependerá de la geografía de la localidad los dispositivos que se utilizarán para garantizar la presión en los diferentes sectores.

Si se supone que en la Fig. 2 el tanque está a mayor altura sobre el nivel del mar (en una montaña) y los sectores a una menor altura sobre el nivel del mar, según el teorema de Bernoulli [3] las presiones irán incrementando a medida que el agua baja, siendo la presión en el sector D mayor a las demás. Ocasionando que cada sector deba ser aislado y regulada su presión por separado. Estos problemas se dan en ciudades que se encuentran en lugares montañosos o con geografías irregulares.

Al momento de separar un sector para ser analizado se debe tener en cuenta el punto crítico, el cual es el lugar más alto dentro de dicho sector. En el punto crítico se debe garantizar que la presión de agua sea la mínima suficiente para su consumo. En la ciudad de Cuenca la presión que se debe garantizar es de al menos 20 mca o 30 psi [2], por lo tanto, ésta será la presión que se debe alcanzar en los puntos críticos. La Fig. 3 es una gráfica que muestra la red de distribución dentro de un sector, visualizando la altura sobre el nivel del mar (msn), en este caso el “DOMICILIO B” se encuentra en el punto crítico, y el “DOMICILIO C” es el punto con mayor presión.

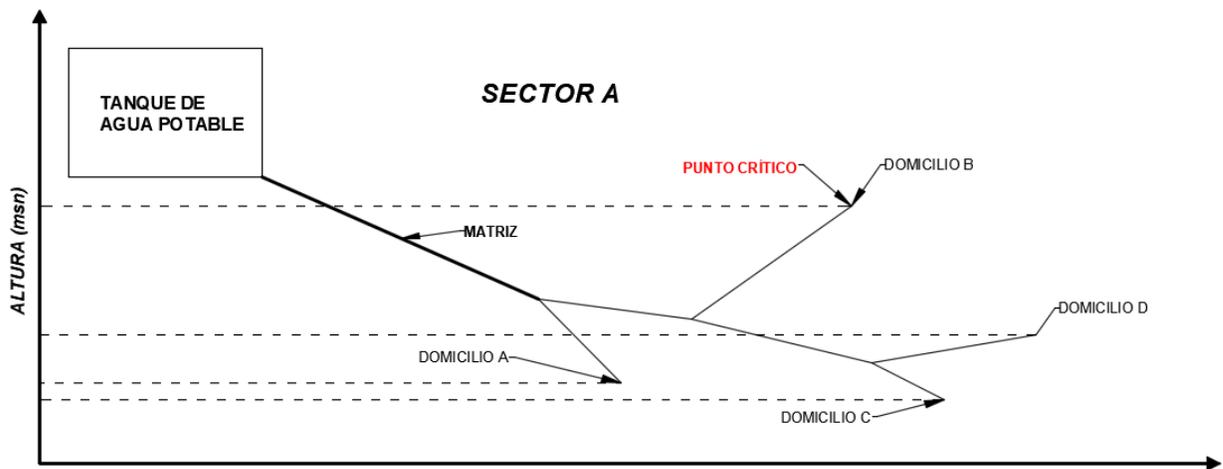


Fig. 3. Esquema de altura piezométrica en sector A

2.3 Pérdidas técnicas o reales

Las pérdidas técnicas dentro de las redes de distribución de agua potable hacen referencia a la cantidad de agua que no puede ser detectada en la micro medición y que por lo tanto no puede ser cobrada. Dicho volumen no puede ser contabilizado porque representa el agua que se escapa de la red debido a alguna fuga existente.

También puede ser definido como la diferencia entre el volumen de agua suministrado en la red y el volumen recibido por los clientes, debido a defectos en la red de distribución de agua potable. La presión de la red se asocia a la cantidad de pérdidas técnicas [8].

2.3.1 Tipos de fugas de agua potable y sus principales causas

Una fuga en una red de distribución de agua potable es el escape indeseado de agua en cualquier segmento de dicho lugar. Cuando las fugas se encuentran antes de los

micromedidores de los domicilios presentan una pérdida económica para la empresa distribuidora, y cuando se encuentran después de dichos micromedidores, es decir, dentro de los domicilios, la pérdida económica es para los abonados [9].

Se pueden definir tres tipos de fugas, los cuales son:

- **Visibles:** Se da cuando el agua logra subir hasta la superficie al aire libre, la visualización de dicha fuga no siempre indica que el origen de la fuga se encuentra exactamente debajo.
- **Ocultas pero visibles:** Son las que se encuentran dentro de pozos o cámaras de válvulas y se pueden observar con facilidad al abrir el espacio en cuestión.
- **Fugas no visibles:** Son las que se filtran directamente hacia el suelo para luego drenarse en tuberías de alcantarillado. Normalmente es difícil ubicar donde se encuentran estas fugas [9].

Usualmente las razones que originan las fugas son:

- Presión alta.
- Corrosión interna y externa.
- Efectos del tráfico de vehículos (vibraciones absorbidas por el sistema).
- Mala calidad de los materiales y accesorios, o errores de montaje e implementación.

2.4 Operaciones para el control y reducción de pérdidas de agua potable

Dado que el agua es un recurso vital para que los humanos puedan vivir es importante saber usarla con consciencia, pues su desperdicio podría reducir aceleradamente las reservas. También hay que recordar que el agua dulce no solo es importante para el consumo humano, sino también es un producto indispensable para la industria agrícola. La gran cantidad de agua perdida por fugas en las redes de distribución de agua potable y por lo tanto la cantidad de agua suministrada sin facturación pueden ser los factores que dificultan la entrega de agua, especialmente en países en desarrollo y transición [10]. Por esto se ve necesario que exista un correcto control de las pérdidas de agua potable, y sobre todo se debe enfocar en reducir dichas pérdidas. El banco mundial estima que la cifra actual para todos los niveles de agua no facturada se encuentra entre el 30–50% del agua producida [11]. En Cuenca (Ecuador) se estima que la cantidad de agua no contabilizada es aproximadamente del 30% [2].

Dentro de las operaciones que se pueden llevar a cabo para la reducción de pérdidas por fugas se tiene la gestión de pérdidas físicas. Para esto se tienen cuatro acciones que se pueden llevar a cabo para lograr reducir pérdidas físicas, las cuales se presentan en la Fig. 4 y son [10]:

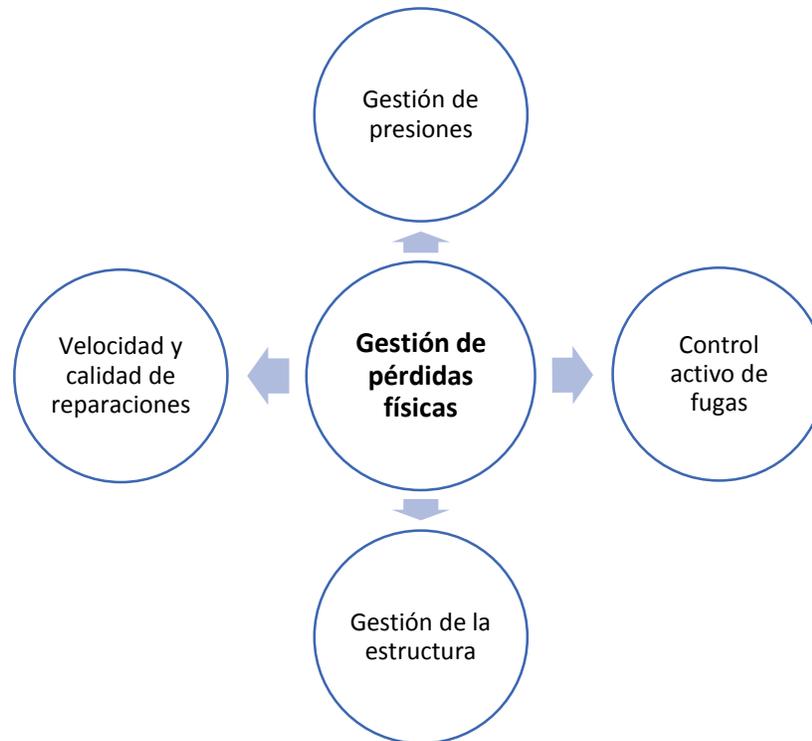


Fig. 4. Métodos para la reducción de pérdidas físicas en sistemas de agua potable

- **Gestión de presiones:** Se podría decir que gran parte de los problemas en las redes de agua potable se debe de forma directa o indirecta a la presión existente. En general, la que mayor problema genera es la presión más alta de lo necesario, provocando un mayor caudal de agua en los puntos de fuga [12]. Por lo tanto, una menor presión logrará disminuir las pérdidas reales [10], para esto una gestión eficiente de la presión óptima en el sistema logrará tener un control sobre las pérdidas, entregando la presión necesaria en el momento necesario.
- **Control activo de fugas:** Este es un método de intervención para disminuir las pérdidas técnicas, para lo cual la empresa deberá utilizar dinero, trabajadores y equipos técnicos referentes [10]. Es decir, lo que se hace aquí es monitorear constantemente la red para descubrir si existen fugas nuevas y poder actuar rápido.
- **Velocidad y calidad de reparaciones:** Como la detención de fugas no siempre es instantánea se debe actuar lo más rápido posible al momento de repararla, pues

mientras más se demore más agua se perderá. Así también la reparación debe ser de calidad para que no se repita. Para esto el personal encargado debe estar correctamente capacitado, motivado y con el equipo pertinente disponible de forma inmediata. También la empresa deberá tener el stock de los materiales o accesorios que se necesitan con mayor frecuencia para lograr efectuar una respuesta eficiente.

- **Gestión de la estructura:** Este método se basa en la adquisición de materiales que sean económicos, pero a su vez logren cumplir con una vida útil larga y su funcionamiento sea eficiente, para de esta forma garantizar que no se producirán roturas que generen fugas. Este método junto con la gestión de presiones ayuda a prolongar la vida útil de la infraestructura y esto aparte de reducir las pérdidas técnicas también reduce la probabilidad de que se produzcan nuevas roturas.

Hay que tener en cuenta que existen muchos factores que provocan que se vayan generando nuevas pérdidas reales en los sistemas de distribución, por esto la empresa primero debe definir cuáles son estos factores logrando de esta forma elegir una forma efectiva para la gestión de pérdidas físicas. La aplicación de un solo método puede ser tan eficaz y rentable como la aplicación de diferentes métodos, siempre y cuando se haya definido primero los factores desencadenantes en el sector de aplicación [13].

En base a experiencias en otras ciudades se ha determinado que para disminuir las pérdidas con el método de reparación de fugas se debería realizar este procedimiento a una velocidad muy complicada, casi imposible, caso contrario la pérdida podría incluso aumentar [9]. Esto se debe a que cuando se tapan fugas la presión se redistribuye, aumentando ligeramente en las fugas restantes, e incrementando el caudal en dichos puntos.

Tomando en cuenta todo lo antes mencionado, en función de la realidad de la ciudad se ve conveniente aplicar una gestión de presiones [2]. La empresa ETAPA EP ya tiene instaladas válvulas reguladoras que logran controlar la presión en su sistema, pero estas no logran realizar una óptima gestión de la presión pues su presión de salida es constante y como se mencionó anteriormente se necesita que la presión sea la justa en el momento necesario, proceso que se profundizará durante el desarrollo del presente capítulo.

2.5 Gestión de presiones

Los ahorros que una gestión de presiones puede generar son substanciales y el gasto puede amortizarse rápido pues la inversión requerida no suele ser alta [9]. La aplicación óptima consiste en ajustar y controlar la presión a la mínima requerida, garantizando que el agua llegará sin problemas hasta el punto crítico de la red. Los efectos positivos son reducir las pérdidas reales y eliminar las fluctuaciones de presiones fuertes o transitorias, las cuales podrían incluso crear nuevas roturas en el sistema.

La relación entre presión y fuga indica que, como regla general, el porcentaje que se disminuye a la presión equivale de una forma aproximada al porcentaje disminuido en el caudal de la fuga en las redes grandes.

Para un mejor control de la presión en la red se utiliza una válvula reguladora de presión (VRP), y las maneras en las que se pueden operar son cuatro [14]:

1. **Salida fija:** Este es el sistema de control de presión más simple, en donde se configura una presión de salida y esta se queda constante a lo largo del tiempo.
2. **Modulación de la presión basada en el tiempo:** La presión aguas abajo es configurada de acuerdo con un horario, usualmente para bajar la presión en la noche, pues aquí los caudales suelen ser menores.
3. **Modulación de la presión basada en el flujo:** En este método se procede a variar la presión de salida en función de distintos caudales, logrando tener la presión mínima necesaria en el sector durante picos de flujo o para que la VRP se abra automáticamente cuando la demanda así lo requiera.
4. **Modulación de la presión de control remoto:** Este es el método más avanzado de modulación de presión, aquí la presión de salida está variando continuamente en función de sensores de presión que están ubicados en puntos estratégicos de la red.

En las redes de distribución de ETAPA se utiliza el método de salida fija, por lo tanto, se requiere aplicar el siguiente método, el cual modula la presión de salida en función de un horario, así mismo, con el objetivo de reducir la presión en las noches.

2.6 Índice de agua no contabilizada (IANC)

El índice de agua no contabilizada refleja el valor de agua no facturada debido a las pérdidas por fuga presentes en la red de distribución o que no registran los micromedidores, estas fugas se pueden presentar tanto por el deterioro de las tuberías de la red o instalaciones de mala calidad. El agua no contabilizada es un índice de eficacia en la red y financiero [15]. Este indicador porcentual se calcula como la diferencia entre el volumen de agua entregado en las redes y el consumido por los usuarios dado por la siguiente ec.(3) [16]:

$$IANC = \frac{V_{Macromedido} - V_{Micromedido}}{V_{Macromedido}} * 100 \% \quad ec.(3)$$

Donde

- $V_{Macromedido}$ = Volumen de macromedición.
- $V_{Micromedido}$ = Volumen de micromedición.

El índice de agua no contabilizada en la ciudad de Cuenca es de aproximadamente el 30% [2].

2.7 Válvula reductora de presión

Una válvula reductora de presión ajustable es un dispositivo utilizado en redes transportadoras de agua potable en donde se necesita tener una presión controlada, la cuál debe ser menor a la presión existente en el origen de la red, como se puede observar en la Fig. 5. La válvula reductora de presión se coloca en serie a la red de agua potable en la cuál va a trabajar.



Fig. 5. Red de distribución de agua potable reductor de presión

La presión de salida es configurada con un tornillo piloto, el cual es denominado “piloto reductor de presión”. El piloto reacciona a la presión aguas abajo. Si la presión sobrepasa el valor predefinido, el piloto permite la acumulación de presión en la cámara de control,

provocando un cierre en la válvula, logrando que la presión aguas abajo descienda a un nivel igual al predefinido. En el caso contrario, si la presión aguas abajo es inferior a la predefinida, se libera la presión en la válvula de control, abriendo la compuerta para que la presión aumente y logre acercarse a la deseada [17].

En la Fig. 6 se puede observar un diagrama de los componentes que generalmente constituyen el conjunto de una válvula reductora de presión.

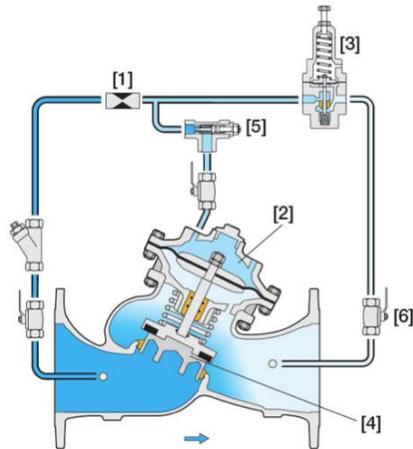


Fig. 6. Diagrama de válvula reductora de presión [18]

Donde:

- 1) Restricción.
- 2) Cámara superior de control.
- 3) Piloto.
- 4) Tapón V-Port.
- 5) Válvula de aguja de control.
- 6) Llave para cierre manual.

Por lo tanto, el ajuste de la presión de salida de la válvula reductora se la realiza de forma manual, manipulando la posición del piloto reductor de presión, el cual a su vez también cambiará la apertura interna de la válvula básica de control. Cabe recalcar que un cambio brusco en la apertura o cierre de dicha válvula podrá ocasionar un golpe de ariete aguas abajo o aguas arriba, del cual se hablará más adelante.

En una red de distribución de agua potable, este reductor es configurada para mantener una presión aguas abajo baja y constante, pero asegurando que la presión sea suficiente para

puntos críticos y para horarios específicos durante el día. Como se puede notar, la desventaja es que la presión será constante, pero la demanda no lo es, por lo que un buen programa de gestión de la presión debería ajustar la presión de salida necesaria para las diferentes horas del día, para que de esta forma las pérdidas por fuga sean menores.

Este tipo de VRP se encuentra instalado en las redes de agua potable de ETAPA EP, su presión de salida es constante, para lo cual se debería cambiar por una válvula que pueda variar su presión de salida en función de horarios, o en su defecto encontrar la manera de automatizar las válvulas existentes.

2.8 Modulación de la presión basada en el tiempo

La modulación de presión basada en el tiempo logra establecer una presión aguas abajo superior en el día e inferior en la noche, pues el consumo en el día es mayor y en la noche es menor (dependiendo del sector), para lograr esto la VRP necesita tener un control lógico programable (PLC) el cual será el encargado de controlar la válvula. Para que la configuración no cause problemas se debe analizar los horarios de demanda de los clientes, con esto se sabrá en qué momento necesitarán que la presión sea alta, y en qué momento dejan de requerir el servicio, para a este horario asignarle la presión baja. A este método se le puede optimizar haciendo un análisis del consumo diario de agua y su relación con la presión en el punto crítico durante un determinado tiempo, logrando obtener patrones de presión de salida necesarios en diferentes horas del día. El PLC deberá ser el encargado de garantizar que la presión sea la necesaria en los horarios definidos, siendo el que module la presión entre los diferentes puntos [19].

Cabe recalcar que el PLC no debe generar cambios bruscos en la presión de salida de la VRP, el cambio entre el ajuste de presiones de salida debe ser suave y progresivo, caso contrario puede producir averías en la válvula o roturas en la red [19].

2.8.1 Alternativas para modulación de presión basada en el tiempo

Para lograr efectuar la modulación de presión por horarios se necesita una implementación extra para la VRP, actualmente existen ya en el mercado soluciones que pueden ser compradas e integradas a la red.

Pegasus+ 3g



Fig. 7. Pegasus [20]

En la actualidad, una de las opciones para controlar la presión en las válvulas reductoras de las redes de distribución del agua potable es PEGASUS. Este dispositivo es un controlador de válvulas hidráulicas reguladoras de presión, donde la presión de salida es modulada en función de dos parámetros, tiempo o caudal.

Las aplicaciones de PEGASUS, según describe el fabricante, son:

- Control modulado de la Presión de salida de la Válvula Reductora: las presiones máxima y mínima se predeterminan mecánicamente. Dentro de estos límites, el controlador electrónico Pegasus ajusta proporcionalmente la salida para crear los perfiles de presión deseados.
- Los perfiles de presión de salida pueden definirse en función del tiempo y/o del caudal. Se pueden establecer perfiles de presión diferenciados para cada día o para diario/fin de semana.
- Registro de datos de caudal y presiones aguas arriba y aguas abajo de la válvula.
- Transmisión de datos por GPRS.

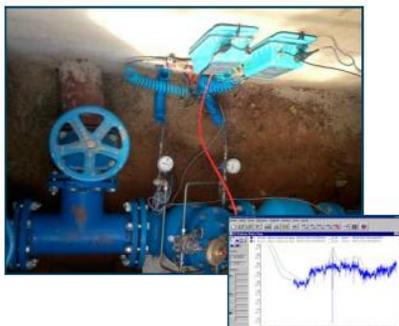


Fig. 8. Dispositivo PEGASUS implementado en válvula reductora [20]

Además, el dispositivo PEGASUS cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

Señales de entrada

- 1 canal de Caudal: entrada digital, tipo REED o pulso libre de tensión (frecuencia máxima 128 Hz).
- 2 canales de Presión: transductores internos de presión de rango 0 a 5 bar, 0 a 10 bar, 0 a 15 bar y 0 a 20 bar.

Características de control

- Infinitos valores de la regulación de la presión de salida, modulable por caudal o por tiempo.
- Reloj en tiempo real, formato 24 h.
- Cambio automático de horario de verano a horario de invierno y viceversa.
- Funcionamiento en modo fallo, ante la ausencia de pulsos de entrada.

Alimentación

- Batería de litio con autonomía mínima de 5 años, bajo condiciones normales de uso.
- Batería reemplazable al final de su vida útil.
- Transductores de presión internos alimentados por la batería del registrador.

Características físicas

- Carcasa de aleación de aluminio con protección IP68, totalmente sumergible.
- Dimensiones: 250 x 175 x 90 mm.
- Peso: 3 Kg.
- Temperatura de trabajo: -10°C a +70°C.

CLA-VAL 90-35

Otra opción disponible en el mercado es la válvula CLA-VAL 90-35, que es una válvula autónoma y automática para la regulación de presión mediante la conmutación de una electroválvula, por ello se tiene un rango de regulación de dos presiones, la presión alta normalmente utilizada en los periodos de alto consumo y la presión baja normalmente utilizada en las noches que son periodos de consumo bajo. En esta válvula se puede configurar la presión por telemando o mediante un programador.



Fig. 9. Válvula CLA-VAL 90-35 [21]

CLA-VAL PCM 90-01

Para la reducción de la presión aguas abajo también hay disponible en el mercado la válvula CLA-VAL PCM 90-01 que permite reducir la presión de distribución de un sector de la red y mantiene la presión constante sin ser afectada por los cambios de caudal. Esta válvula puede realizar el control mediante una señal 4-20 mA para configurar el valor de consigna a distancia. Por lo general en los sistemas SCADA se utilizan los pilotos motorizados.



Fig. 10. Válvula CLA-VAL PCM 90-01 [22]

CLA-VAL D12

La modulación o gestión de presión puede ser efectuada por el controlador CLA-VAL D12 junto con el actuador de baja potencia CVM y el piloto CPM, que es un controlador de baja potencia capaz de una regulación hidráulica eficiente donde la energía eléctrica es muy baja.

Este dispositivo regula la presión aguas abajo mediante el actuador CLA-VAL CVM y el piloto CPM.

Las características técnicas del dispositivo son las siguientes:

- **Alimentación:** De 6 a 24 V.
- **Consumo:** 10 mA stand By, 30 mA en uso.
- **Entradas:** 2 entradas analógicas 0-5V o 4-20 mA.
- **Salidas:** 4 solenoides (6 VDC).
- **Protecciones:** Cortocircuito y polaridad inversa.
- **Comunicaciones:** GPRS Modem Quad Band, Bluetooth, USB.



Fig. 11. CLA-VAL D12 [23]

2.9 El golpe de ariete

El golpe de ariete es un fenómeno producido por cambios repentinos en un flujo (puede producirse en cualquier líquido) gracias a una apertura o cierre súbito de una válvula [24] o también al activar o desactivar una máquina hidráulica. Se genera en los sistemas que contengan el flujo de un líquido a presión, siempre que en dicho sistema exista un dispositivo que se cierre de forma total o parcial, alterando de esta forma su caudal [25]. Puede generarse aguas arriba o aguas abajo de la válvula de una tubería [26].

La razón por la que una fluctuación en el caudal de un líquido puede generar un golpe de ariete es por el cambio inmediato que sufre la energía cinética con la que el líquido se está moviendo, ya que dicha energía debe encontrar la forma de disiparse y para hacerlo se transforma en presión, la cual puede ser positiva o negativa [27]. Al cerrar de forma instantánea una válvula se produce un golpe de ariete positivo, por el contrario, al abrir de forma rápida una válvula se genera un golpe de ariete negativo. Esta presión ha logrado

romper grandes canales de transporte de agua, causando graves daños en el sistema, reduciendo incluso su vida útil [25].

2.9.1 Cálculo del golpe de ariete en redes de agua potable

Entre los métodos para el cálculo del golpe de ariete existen dos, la fórmula de Allievi y la fórmula de Micheaud. Cada fórmula es usada dependiendo del tiempo T tomado para cerrar una válvula y de la longitud L de la tubería involucrada [27].

Para determinar que ecuación es la indicada para cada caso se debe conocer si la relación entre T y L producen una conducción larga o por el contrario una conducción corta. En el caso de una conducción larga se aplica la ecuación de Allievi y en el caso de una conducción corta se aplica la fórmula de Micheaud. El tipo de conducción dependerá de la longitud crítica, la cual se calcula de la siguiente forma [27]:

$$L_c = \frac{c * T}{2} \quad \text{ec. (4)}$$

Donde:

- L_c = Longitud crítica.
- c = Celeridad de la onda.
- T = Tiempo de cierre.

Si $L > L_c$ la conducción es larga, por el contrario, si $L < L_c$ la conducción es corta. Finalmente, la Tabla 1 resume en qué casos se aplicará cada fórmula.

Tabla 1. Determinación de método para cálculo de golpe de ariete

Caso	Tipo de conducción	Fórmula para usar
$L > L_c$	Conducción larga	Allievi
$L < L_c$	Conducción corta	Micheaud

La celeridad es una de las propiedades necesarias para determinar un posible golpe de ariete, y se describe como la velocidad a la cual viaja una perturbación de presión de pequeña amplitud dentro de un fluido [28]. Se calcula con la fórmula de Joukowski, la cual utiliza el módulo de elasticidad del material, la densidad del líquido y las dimensiones de la tubería. Para el caso puntual del agua se utiliza una fórmula ampliamente extendida, determinada por Allievi, la cual es [27]:

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k * \frac{D}{e}}} \quad \text{ec.(5)}$$

Donde:

- k = Valor orientativo adimensional en función del material.
- D = Diámetro interior de la tubería.
- e = Espesor de la tubería.

Adicionalmente, en la Tabla 2 se puede observar algunos valores del adimensional k para algunos materiales.

Tabla 2. Valores orientativos del adimensional k [27]

Material	k
Hierro y acero	0.5
Hormigón	5
Fundición	1
Fibro cemento	Aprox. 5,4
Plomo	5
PVC	Aprox. 33

2.9.2 Fórmulas de Allievi y Micheaud

Dentro del desarrollo de los métodos para lograr calcular el golpe de ariete, Allievi propone una ecuación para determinar la variación de presión producida dentro de una tubería por efectos de un golpe de ariete en caso de conducciones largas, la cual es [27]:

$$\Delta P = \rho * c * V \quad \text{ec. (6)}$$

Donde:

- ρ = Densidad.
- c = Celeridad de la onda.
- V = Velocidad del flujo.

En cambio, Micheaud indica la ecuación que será usada para calcular la variación de presión en el caso que la conducción sea corta, aquí se incluye el tiempo de cerrado de la válvula [27].

$$\Delta P = 2 * \frac{L * V * \rho}{T} \quad \text{ec. (7)}$$

Donde:

- L = Longitud de la tubería.
- V = Velocidad del flujo.
- ρ = Densidad.
- T = Tiempo de cierre de la válvula.

2.9.3 Cálculo en redes con tuberías de dimensiones variables

En una red de agua potable donde las dimensiones de las tuberías varían a lo largo de su distribución (Fig. 12) el cálculo es diferente. Para este se debe considerar los valores medios de los parámetros necesarios para el cálculo del golpe de ariete. Los valores adicionales que deben ser calculados son la velocidad media de la onda ec.(8) y el valor medio de la velocidad del flujo ec.(9).

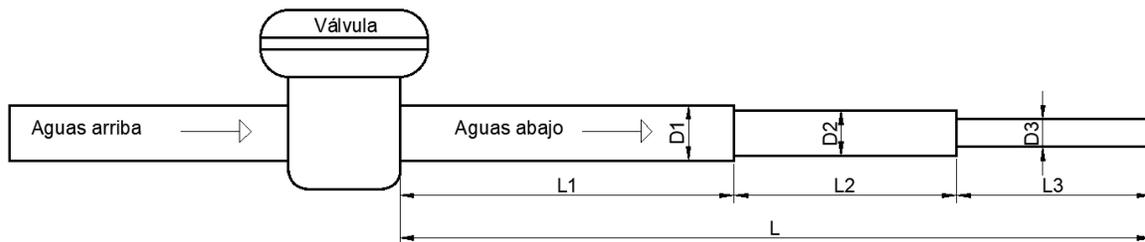


Fig. 12. Ilustración de diferentes tuberías en una red de agua potable

$$c = \frac{L}{\sum(L_i/c_i)} \quad \text{ec. (8)}$$

$$V = \frac{\sum(L_i * V_i)}{L} \quad \text{ec. (9)}$$

L corresponde a la longitud total de la unión de las diferentes tuberías, mientras L_i , c_i y V_i corresponden a la longitud, celeridad y velocidad de flujo de la tubería de diámetro D_i

respectivamente. Tanto c_i como V_i son calculados previamente de forma independiente en cada sección.

2.9.4 Efectos del golpe de ariete

Debido al gran aumento de presión dentro de las tuberías producido por un golpe de ariete una red de agua potable puede sufrir grandes consecuencias, como son [24]:

- Ruido.
- Vibraciones.
- Ruptura de tuberías.
- Falla en accesorios hidráulicos dentro de la red.

Esto puede ocasionar serios gastos para la empresa a cargo del agua potable, razón por la cual debe ser evitado.

2.10 Control de encendido – apagado

El control de encendido – apagado, también conocido como *control ON-OFF* o *control bang-bang* es un sistema de lazo cerrado en el cual su dispositivo o actuador sólo podrá tener dos estados de operación. Aquí la señal de error producirá los diferentes estados, si la señal de error es positiva el controlador envía al dispositivo corrector final a unas de sus dos posiciones, si la señal de error es negativa el controlador ubicará al corrector final en la posición contraria [29]. En la **Fig. 13** se puede observar un ejemplo de control ON – OFF donde se establece un setpoint de temperatura, cuando la señal de error supera el límite el actuador se desactiva, en cambio, si la temperatura desciende el actuador se desactiva.

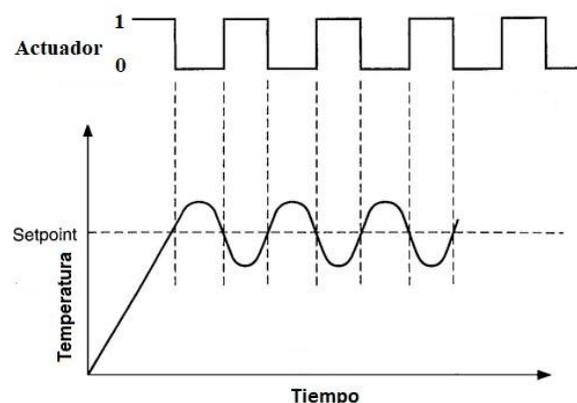


Fig. 13. Comportamiento de control ON-OFF

Como se pudo observar en la **Fig. 13**, el comportamiento de la temperatura es oscilatorio, este es uno de los problemas de este tipo de control ya que la respuesta de la temperatura no es inmediata al cambio de estado del actuador.

2.11 Propuesta de Solución

En base a la teoría antes expuesta, se pretende crear una alternativa, a las actualmente existentes en el mercado, para controlar la posición del tornillo piloto de la válvula "OCV 127" ubicada en el sector 3.1 de Cuenca, el cual alimenta las zonas 02 y 04; para lograr regular la presión dentro de la red de agua potable.

A dicha válvula se le añadirá un sistema mecatrónico capaz de controlar el piloto reductor de presión en función de las diferentes horas del día. Para esto se propone acoplar un actuador al piloto por medio de una pieza mecánica, dicho actuador será un motor de corriente continua, el cual podrá definir el sentido de giro por medio de un driver (puente H), logrando controlar el cierre o apertura del piloto.

Para controlar el movimiento del motor se utilizará un PLC, el cuál indicará mediante el puente H en qué dirección girar hasta que la presión de salida sea la configurada. Para verificar la presión de salida se utilizará un transmisor de presión con salida analógica de 4-20 mA, esta señal será la que ingrese a la entrada analógica del PLC para poder definir qué salida de relé sea activada, y según esto la dirección de giro del motor D.C. Esto se puede visualizar de una forma gráfica en la Fig. 14.

El control de posición del motor se realizará con un sistema de control de lazo cerrado del tipo ON – OFF debido a que este permite activar o desactivar la dirección de giro del motor hasta llegar a la presión deseada. No es necesario un control más complejo ya que la válvula reductora de presión se encuentra controlando que la presión se mantenga en el punto deseado, de esta forma se logra solventar el defecto oscilatorio de un control ON – OFF. Gracias a que los periodos de transición de horario son amplios no se necesita ajustar el tiempo de respuesta, por lo que tampoco es necesario un controlador que realice este proceso.

En el PLC se programará las presiones deseadas en las diferentes horas del día, para esto se realizará un análisis previo de consumo. Mediante dicho análisis se podrá conocer el

comportamiento del consumo en el sector para programar en el PLC en que valor deberá estar la presión aguas abajo a las diferentes horas del día.

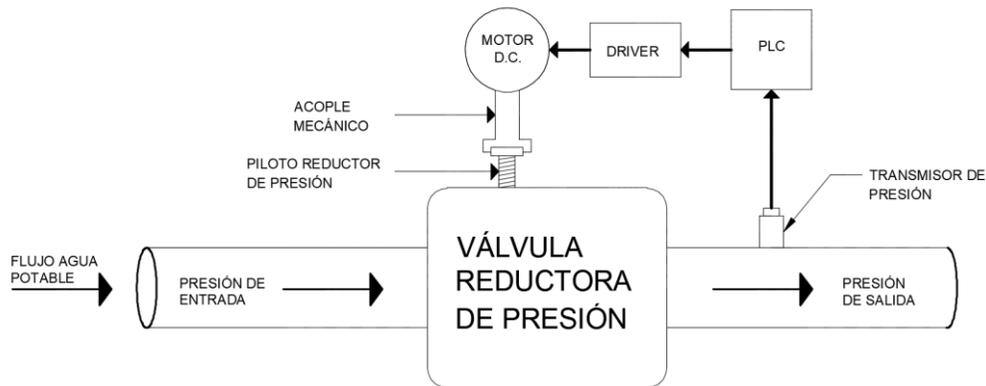


Fig. 14. Esquema gráfico del funcionamiento del sistema electromecánico

En la Fig. 15 se puede apreciar un esquema del funcionamiento del PLC, indicando que este utilizará una entrada analógica, y dos salidas de relé, las cuales irán al driver para definir la dirección de giro del motor de corriente continua como se muestra en la Fig. 15.

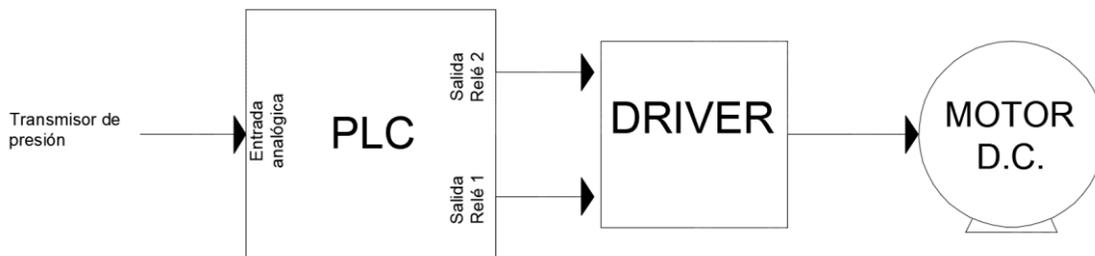


Fig. 15. Esquema gráfico del conexionado del PLC

De esta forma se logrará controlar la posición del piloto reductor de presión de forma automática en función de las horas del día, estableciendo la presión mínima necesaria en dichas horas, logrando una disminución en las pérdidas por fuga. También se deberá determinar el torque necesario para mover el tornillo piloto, pues será un parámetro necesario para identificar el motor que debe ser utilizado. Al momento de elegir el motor también se deberá tener en cuenta la velocidad de este para no ocasionar golpes de ariete, y por último se deberá analizar la velocidad de respuesta de la VRP ante el movimiento del piloto, pues será un parámetro para tener en cuenta en la programación. Todo esto muy aparte de la toma de datos que se deberá realizar (micro medición y macro medición) para poder efectuar el análisis de consumo en el sector.

Para la parte mecánica se debe realizar un modelo que se adapte a las condiciones, que logre acoplarse al sistema existente de la forma más fácil posible, de un material resistente a las condiciones ambientales y que su estructura misma logra soportar las fuerzas a las que estará sometido, tomando siempre en cuenta que deberá ser un ensamble fácil de colocar y de retirar para el personal de la empresa.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE SISTEMA ELECTRÓNICO

Para la elaboración del sistema que logre controlar la posición del tornillo piloto se necesita diseñar un sistema electrónico capaz de comandar un actuador a diferentes horas del día. Dado que el objetivo es abrir o cerrar el tornillo piloto de la VRP, hasta llegar a una presión de salida deseada, se propone como actuador utilizar un motor de corriente continua, el cual deberá ser programado con un dispositivo electrónico, que mediante un sensor logre crear un lazo cerrado de control. Este lazo de control monitoreará con el sensor cual es la presión de salida y en base a ella controlar la posición del actuador. Por lo tanto, los componentes que van a constituir el sistema de control son:

- Controlador Lógico Programable, PLC.
- Actuador, Motor de CC.
- Sensor de presión.
- Driver para comandar motor de CC.

Se debe tener en cuenta que en el lugar no existe alimentación de corriente, por lo tanto, la fuente de alimentación provisional será una batería de 12 V.

El sistema de control será del tipo ON/OFF, cuando la presión se encuentre en su punto de referencia el actuador se apagará, cuando no lo esté se prenderá hasta encontrar su referencia.

3.1 Consideraciones de diseño del sistema electrónico

3.1.1 Actuador: Motor

El actuador para utilizar como ya se mencionó va a ser un motor, puesto que este puede fácilmente dar el movimiento giratorio que se necesita para cambiar la posición del tornillo piloto. Por lo tanto, lo importante del motor será que tenga la posibilidad de invertir su giro, para que de esta manera logre con el giro horario apretar el tornillo y con el giro antihorario aflojar el tornillo, y sobre todo que sea capaz de colocarse automáticamente en la posición requerida.

Actualmente existen muchos tipos de motores de corriente continua, teniendo por ejemplo los servomotores o los motores por paso, los cuales pueden ubicarse en una posición exacta, recordar que la posición del tornillo equivale a una salida de presión, la cual va a ser

determinada según un horario. Los servomotores logran ubicarse en una posición exacta, la cuál puede ser programada en función de un horario, pero el costo de estos motores puede llegar a ser muy altos. Lo mismo sucede con los motores de paso, por esta razón la alternativa apropiada para este proyecto es utilizar un simple motor de corriente continua, pero que sea capaz de generar el torque necesario para mover el tornillo.

El motor tendrá que ser guiado por el PLC, para que este indique cuando girar, para que sentido girar, y también le indique cuando detenerse, esto en función del horario predefinido. Para que el PLC sepa a qué lado debe girar al motor se guiará del sensor de presión, si la presión es más alta de la que la programación requiere, entonces el PLC indicará al motor que gire en sentido antihorario para apretar al tornillo piloto, y viceversa.

3.1.1.1 Cálculo de torque necesario para el motor

El torque del motor deberá ser el suficiente para lograr mover el tornillo, para lo cual se debe medir cual es el torque de apriete del tornillo. Esto se hizo directamente en la cámara con la ayuda de un dinamómetro, una llave y un calibrador. Con la ayuda de la ecuación ec.(10) [30] se puede calcular el torque conociendo la fuerza necesaria para mover el tornillo y la distancia perpendicular entre el punto donde se ejerce la fuerza y el eje.

$$M = F * d \quad \text{ec.(10)}$$

Entonces, lo que se hace es colocar la llave como se muestra en la Fig. 16, en el extremo izquierdo se encaja el tornillo, luego se coloca el dinamómetro a una distancia d del eje, el dinamómetro estará entre la llave y la fuerza aplicada, para que de esta forma mida la fuerza que se necesitó para lograr mover el tornillo.

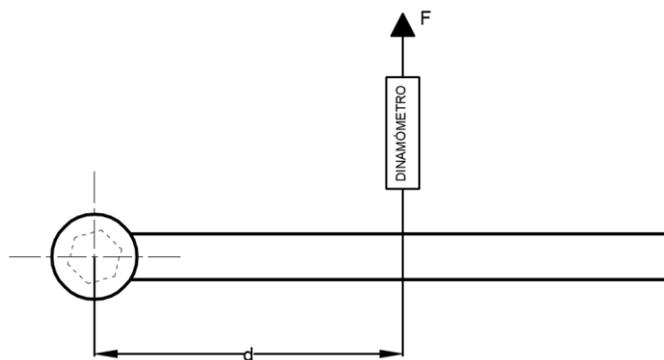


Fig. 16. Esquema de medición de torque

Luego se empezó a tomar diferentes medidas de fuerza a diferentes distancias, obteniendo torques aproximados entre ellos, obteniendo de esta forma el torque mínimo necesario que el motor deberá tener.

Tabla 3. Datos obtenidos para cálculo de torque

# medición	d (mm)	F (N)	T (Nm)
1	60	16,1	0,966
2	60	16,3	0,978
3	84	11,3	0,9492
4	84	11,6	0,9744
5	110	9,3	1,023
6	110	10	1,1
Torque promedio:			0,99843333

Luego de realizado los cálculos con los datos mostrados en la Tabla 3 se determina que el torque necesario para mover el tornillo piloto en promedio es de 0.99 Nm, por lo tanto, el torque que se buscará es de al menos el doble, con esto se garantiza su funcionamiento en caso de que se presente algún inconveniente, y para que el motor no esté trabajando al límite.

3.1.1.2 Cálculo de la velocidad necesaria para el motor

Otro parámetro muy importante es la velocidad del motor, pues como se indicó en la introducción, un movimiento muy rápido del tornillo piloto puede producir golpes de ariete en la red, lo cual es muy peligroso porque puede destruirla. Para determinar la velocidad del motor primero se determinará el tiempo mínimo con el cual se debe cerrar la válvula para no producir daños en las tuberías de hierro del sector, también se debe saber con cuantas vueltas el piloto cierra la VRP. Conociendo el tiempo mínimo necesario para cerrar la válvula y a cuantas revoluciones esto equivale se puede determinar la velocidad máxima que el motor debe poseer. Una velocidad superior a esta produciría un cierre muy rápido.

Primero se procede a calcular el tiempo de cierre mínimo en la red de distribución de agua potable del sector en el que se va a trabajar. Los parámetros necesarios para el cálculo son los siguientes:

- Caudal máximo de agua potable en la red: $30 L/s = 0.03 m^3/s$.
- 1110 m de tubería PVC Plastigama de Ø160 mm.

- 200 m de tubería PVC Plastigama de Ø 110mm.
- 63 m de tubería PVC Plastigama de Ø 211mm.
- Longitud total de red de distribución: 1521 m.

Con estos parámetros ya se sabe las características dimensionales de la red de distribución de agua potable, ahora guiándose en la tabla de Plastigama se puede obtener sus respectivos diámetros internos, espesores y su máxima presión de trabajo, datos que son los que se van a utilizar en los cálculos. Estos datos se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de tuberías PVC Plastigama [31]

Diámetro Nominal	Diámetro Interior	Espesor Tubería	Presión de Trabajo
mm	mm	mm	MPa
160	147.6	6.2	1.0
110	101.6	4.2	1.0
63	58.2	2.4	1.0

Como se indicó en el capítulo anterior, para calcular el golpe de ariete primero se debe determinar si la conducción es larga o corta, pues de esto dependerá la ecuación que se utilizará. En la Tabla 1 se encuentra la consideración para determinar el tipo de conducción, como se puede apreciar esta depende de la longitud crítica, la cual se procede a calcular con la ec.(4). En esta ecuación se necesita el tiempo de cierre y la celeridad media de la onda.

Primero se calculará la celeridad de la onda en cada tubería con la ec.(5) y posteriormente la celeridad media de la onda con la ec.(8). El subíndice 1 hace referencia a la tubería de Ø63 mm, el subíndice 2 hace referencia a la tubería de Ø110 mm, y el subíndice 3 hace referencia a la tubería de Ø160 mm. El factor “k” es obtenido de la Tabla 2. La razón por la que se utilizan valores medios es dada a que las tuberías de la red son de distintos diámetros, como ya se explicó en el capítulo anterior, por lo tanto, su disposición puede ser comparada a la ilustrada en la Fig. 12.

$$c_1 = 339.86 \text{ m/s}$$

$$c_2 = 340.25 \text{ m/s}$$

$$c_3 = 342.8 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, la celeridad media es:

$$c = 344.33 \text{ m/s}$$

Ahora se necesita el tiempo de cierre, aquí lo que se va a hacer es colocar un tiempo de cierre conociendo la velocidad de un motor del mercado, para luego determinar si dicha velocidad está dentro de los límites.

El motor en cuestión es de 5 RPM, por lo tanto, quiere decir que da una revolución en 12 segundos, sabiendo que la válvula se cierra con 3 vueltas al tornillo el motor lograría el cierre en 36 segundos. Este dato será el utilizado para el cálculo, si el resultado es favorable el motor puede ser de esta velocidad.

Se procede a calcular la longitud crítica con la ec.(4).

$$L_c = \frac{36 * 344.33}{2} = 6197.9m$$

Como la longitud crítica es mayor que la longitud de la red la conducción es corta, por ende, la ecuación para determinar el golpe de ariete a utilizar es la de Micheaud, esta es la ec.(7).

Para la ecuación de Micheaud se necesita la velocidad promedio, la cual se calcula con la ec.(9), como se muestra adelante.

$$V = 2.7744 \text{ m/s}$$

Finalmente se obtiene el golpe de ariete.

$$\Delta P = 0.233MPa$$

La densidad utilizada para el agua potable es de $997 \frac{kg}{m^3}$ asumiendo una temperatura de 25 °C [32].

Como se pudo observar, con un motor que cierre la VRP a 5 RPM el golpe de ariete es de 0.233 MPa, según la Tabla 4 la presión máxima de trabajo es de 1 MPa, eso quiere decir que esa velocidad no provocaría problemas. Sin embargo, en la programación como protección adicional se impedirá que el motor gire todas las vueltas de forma seguida, su movimiento será por pulsos, pero con este cálculo se garantiza que en el caso de que el motor se vaya de largo, por algún desperfecto en el programa, no dañará las tuberías de la red.

Por lo tanto, se determina que el actuador a utilizar será un motor con las siguientes características:

- **Velocidad:** 5 RPM
- **Torque:** 2 Nm
- **Voltaje:** 12 V
- **Dirección de giro:** Horario y antihorario.

El motor escogido que logra cumplir con estas características es el ZHENG ZWL-31ZY de 5RPM (Fig. 17). Pues cumple con todo lo antes mencionado.



Fig. 17. Motor DC ZHENG ZWL-31ZY 5RPM [33]

3.1.2 Transmisor de presión

El sensor que se utilice debe ser capaz de conectarse a la válvula reductora de presión, para esto deberá tener una entrada de 3/8", y lograr captar presiones de más de 80 psi. Aparte debe poder enviar la señal captada hacia un PLC como señal analógica en tiempo real.

En el mercado existen muchos sensores que cumplan estas características, pero lo que les diferencia es el tipo de señal analógica que pueden entregar. Hay los que envían señales de 4-20 mA y los que envían señales de 0-10 V, los segundos son mucho más caros por lo cual la inclinación va hacia los sensores de 4-20 mA.

El transmisor elegido que cumple con estas características es el KOBOLD SEN-8601B065, que se muestra adelante.



Fig. 18. Transmisor KOBOLD SEN-8601B065

Sus especificaciones son:

- Sensor pasivo.
- Presiones de trabajo: 0 a 6 bar = 0 a 87 psi.
- Tipo de señal analógica de salida: 4-20 mA.
- Entrada macho de 1/2".

La única especificación que varía es la entrada, para lo cual se utilizará un adaptador de 1/2" a 1/4".

3.1.3 Driver: Puente H

Como se indicó, el motor debe moverse de forma horaria o antihoraria en función de lo que el PLC ordene. Para esto el dispositivo más sencillo que se puede utilizar es un puente H, el cual tiene dos entradas digitales, con el pulso en la una entrada se lograr efectuar un giro en

sentido horario, y con un pulso en la otra entrada se consigue un giro contrario. De esta forma el PLC dará un pulso en la entrada que produzca el giro necesario.

El puente H escogido es el L298N, ya que cumple perfectamente con las características necesarias y se muestra a continuación en la Fig. 19.

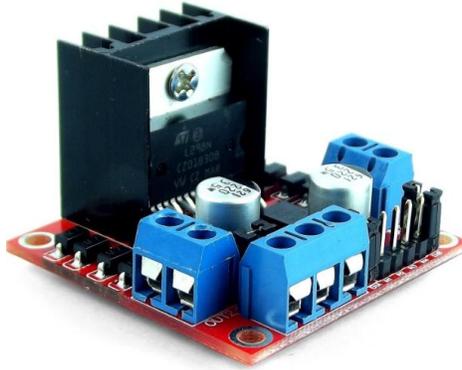


Fig. 19. Puente H L298N [34]

Sus características principales son [35]:

- Suministro de voltaje hasta 46 V.
- Corriente DC hasta 4 A.
- Protección para temperaturas altas.
- Alta inmunidad al ruido.
- Suministro de voltaje lógico: 7 V.
- Voltaje de detección: -1 a 2.3 V.
- Disipación total de energía: 25 W.
- Temperatura de funcionamiento: -25 a 130 °C.

Con estas características logra manejar el motor que será utilizado tranquilamente, ya que el motor es de 12 V. Así también la corriente máxima es alta, garantizando que el dispositivo no fallará, por último, las temperaturas ambientales que resiste son las necesarias.

3.1.4 PLC

Para lograr realizar el control en función de un horario se necesita un equipo programable que tenga un calendario integrado y que su reloj no se desconfigure en caso de cortes de energía. Aparte debe tener la posibilidad de recibir señales analógicas del tipo 4-20mA,

incluir entradas digitales por si se requiere conectar un pulsante o un selector, debe poder conectarse con el puente H y por último su alimentación debe ser de 12 V.

En el mercado existen muchos PLCs de diferentes marcas y diferentes modelos que cumplen con la mayoría de las características antes mencionadas, pero pocos poseen un calendario semanal. Por lo tanto, el PLC designado es de la marca SIEMENS, uno de sus PLCs más básicos, el “LOGO! 12/24RCE” (Fig. 20) junto con su módulo de expansión de entradas analógicas “LOGO! AM2.



Fig. 20. LOGO! 12/24RCE [36]

Su módulo de expansión mostrado en la Fig. 21 permite conectar dos entradas analógicas de 4-20 mA y su voltaje de alimentación es igualmente de 12 V. Lo cual lo hace funcional para ser conectado con el transmisor antes indicado, y también puede ser conectado a la batería de 12 V que estará alimentando al proyecto de manera provisional.



Fig. 21. LOGO! AM2 [37]

3.1.5 Elaboración del sistema electrónico de control ON/OFF

Un sistema de control generalmente está constituido por subsistemas y procesos, los cuales están unidos entre ellos para controlar las salidas de los procesos. Son útiles en lugares remotos o peligrosos [38]. En un sistema de control realimentado existe una determinada

relación entre la salida y la entrada de referencia. Estas son comparadas y su diferencia se utiliza como medio de control [39].

Los sistemas pueden ser de:

- **Lazo abierto:** Está formado por un dispositivo transductor de entrada, el cual transforma la señal de entrada a una que pueda ser reconocida por el controlador. A su vez, el controlador maneja un proceso o una planta. Su principal característica es que no puede compensar ninguna perturbación que varíe la señal de entrada.
- **Lazo cerrado:** Este solventa la imposibilidad que tienen el lazo abierto de actuar ante una perturbación. Al igual que el anterior tiene un transductor de entrada que da una señal que puede ser manejada por el controlador, pero también mide la señal de salida y la introduce nuevamente al controlador para poder compararla [38].

Dado que se va a utilizar un sistema de control ON/OFF que únicamente active o desactive los relés del PLC en función de la presión de salida de la VRP el sistema es de lazo cerrado. Aquí el transmisor de presión será el transductor que entregue la señal de entrada, la cuál será reconocida por el controlador (PLC). Posteriormente el PLC comparará la señal de entrada con un parámetro de referencia establecido dentro del programa y en función de este manejará al motor, activando Q1 (ON) en caso de que la presión sea inferior a la programada, activando Q2 (ON) en caso de que la presión sea superior a la programada o desactivando las salidas (OFF) en caso de estar en la presión deseada. Las perturbaciones que sucedan en la presión de salida debido al consumo variable de agua potable del sector serán compensadas por la misma VRP, ya que como se mencionó anteriormente esta se encarga de mantener la presión de salida constante.

En otras palabras, el controlador lo que hará es revisar la presión de salida de la válvula reductora de presión y compararla con la configurada en el programa para luego en función de ella controlar la posición del tornillo piloto hasta obtener una presión de salida deseada.

Dado que la VRP se encontrará todo el tiempo ajustando la presión de salida no se necesita que el controlador esté todo el tiempo trabajando, lo único que deberá hacer es activarse en los horarios que necesite cambiar la posición del tornillo para variar la presión de salida. Estará activo el tiempo que tarde en mover al tornillo hasta la posición que produzca la presión de salida deseada y luego se desactivará. Aparte como medida de seguridad cada dos

horas revisará la presión de salida para constatar que el tornillo si se quedó en la posición requerida. El diagrama de bloques de este sistema se ilustra en la Fig. 22.

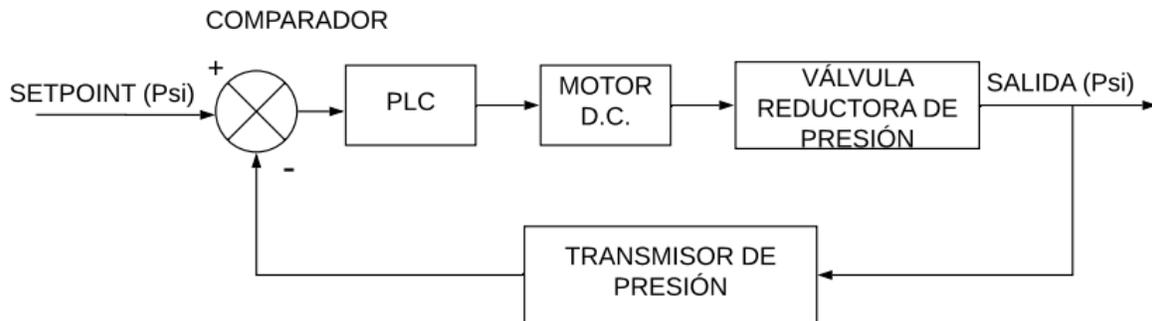


Fig. 22. Diagrama de bloques de sistema de control

El enlace entre el motor y la válvula reductora de presión será un mecanismo, cuyo diseño se encuentra en el siguiente capítulo. La conexión de los dispositivos electrónicos se indicará posteriormente dentro de este capítulo, y el acople entre el transmisor de presión y la válvula reductora de presión se realiza de manera sencilla dentro de la cámara.

3.2 Configuración de dispositivos electrónicos

Una vez que se escogió los elementos que serán utilizados para el sistema de control electrónico se procede a conectarlos entre sí, de tal manera que cumplan con su propósito de forma correcta. Todos los dispositivos serán conectados al PLC, así que se partirá desde él como un centro de operaciones. Primero se realizará un esquema rápido en el que se tenga una idea de cómo van a ir conectados los dispositivos (Fig. 23), luego se profundizará en la conexión de cada ellos.

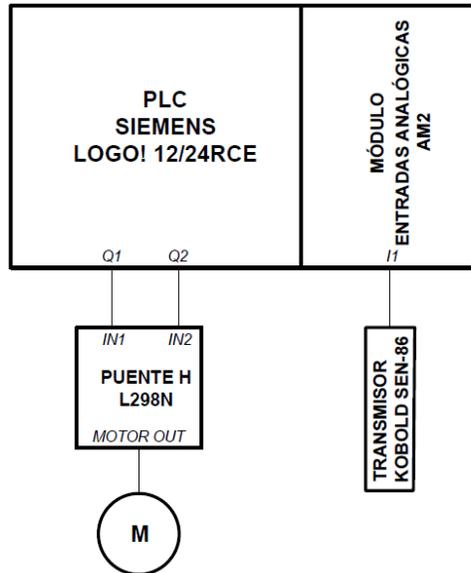


Fig. 23. Esquema inicial de conexión de dispositivos electrónicos

En la Fig. 23 se tiene un esquema que indica de una forma elemental como se conectarán los dispositivos entre sí, este no incluye la fuente de alimentación, ni los sistemas de protección. Como se puede observar, al PLC se conectará el módulo de expansión y el puente H, el puente H se conectará al motor y el módulo de expansión será el que se conecte con el transmisor de presión. Es muy importante notar el sentido de giro del motor, IN1 producirá el giro horario y este se conectará a Q1 en el PLC, por ende, IN2 producirá el giro antihorario y este será activado mediante Q2. Las líneas del esquema que conectan a los dispositivos son solo representaciones del orden en el que se realizarán las conexiones, mas no representan como realmente irán conectados los cables de cada uno de ellos.

Ahora que se ha asignado la disposición de los dispositivos electrónicos se procede a enlazar a cada uno de ellos, por último, se mostrará el esquema eléctrico final.

3.2.1 Conexión de transmisor de presión

El transmisor de presión como se indicó anteriormente es analógico del tipo pasivo, con una salida analógica de corriente 4-20 mA. Al ser un dispositivo pasivo este no necesita ser alimentado con una fuente externa, el fenómeno físico que va a medir será el encargado de producir las variaciones en el sensor [40]. Un sensor del tipo pasivo se puede asemejar con un potenciómetro, cuando al potenciómetro se le varía la posición este variará el voltaje en el circuito, en este caso al ser transmisor de corriente variará la corriente dentro de un circuito.

Por lo tanto, se debe crear un circuito cerrado donde se conecte el transmisor en serie al módulo de entradas analógicas, de tal manera que este sirva como un amperímetro. La conexión entre el módulo y el transmisor se muestra en la Fig. 24.

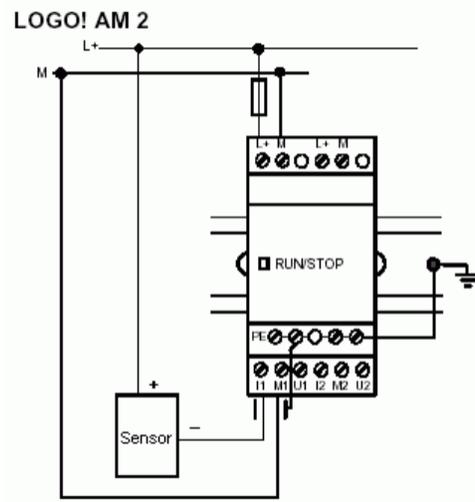


Fig. 24. Esquema de conexión de transmisor de 2 hilos [41]

El transmisor de presión tiene cuatro pines para su respectiva conexión, dado que se utilizará el tipo de conexión de 2 hilos su manera de conexión se muestra en la siguiente figura.

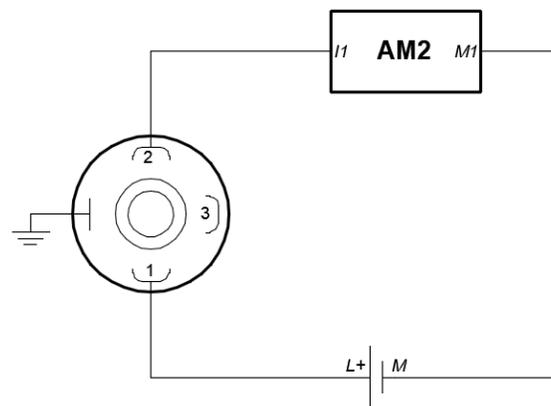


Fig. 25. Esquema de conexión de pines de transmisor de presión

Tomar en cuenta que “L+” hace referencia al positivo del suministro de energía y “M” hace referencia a tierra, o negativo del suministro de energía.

3.2.2 Conexión PLC – Puente H – Motor

La conexión entre el motor y el PLC a través del puente H es más simple, lo importante que se debe tomar en cuenta es que Q1 provoque un giro horario y Q2 el giro antihorario, para

esto el motor debe estar conectado con su positivo en el positivo del puente H, así mismo el negativo del motor deberá ser conectado al negativo del puente H.

Las salidas Q1 y Q2 del PLC son salidas de relé, y el puente H necesita un voltaje positivo para activar los giros del motor. Por lo tanto, el suministro de energía que activará IN1 e IN2 del puente H será el de la fuente de voltaje, y el relé estará en la mitad de ellos para cerrar el circuito cuando sea necesario. Es decir, cuando se quiera producir el giro horario el PLC activará Q1 cerrando el circuito desde el positivo de la fuente hasta IN1, y para el giro antihorario lo mismo, pero con Q2 e I2 respectivamente. El esquema de conexión del circuito mencionado se muestra en la Fig. 26.

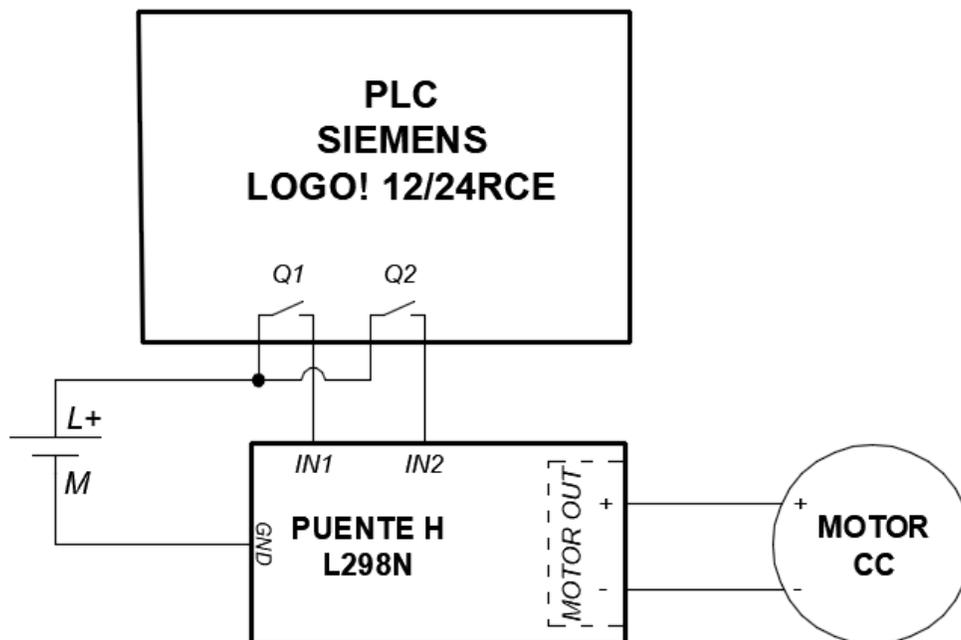


Fig. 26. Esquema de conexión de PLC - Puente H - Motor

De esta forma se logra tener un control de la dirección de giro del motor desde el PLC, para posteriormente lograr ubicar al tornillo piloto en la posición deseada.

3.2.3 Conexión de todos los dispositivos electrónicos

Uniendo las conexiones anteriores se logra obtener todo el sistema electrónico finalmente armado, de forma esquemática el circuito resultante se puede observar en la Fig. 27 El plano eléctrico para su respectivo armado con la debida protección e interruptor se muestra en los anexos.

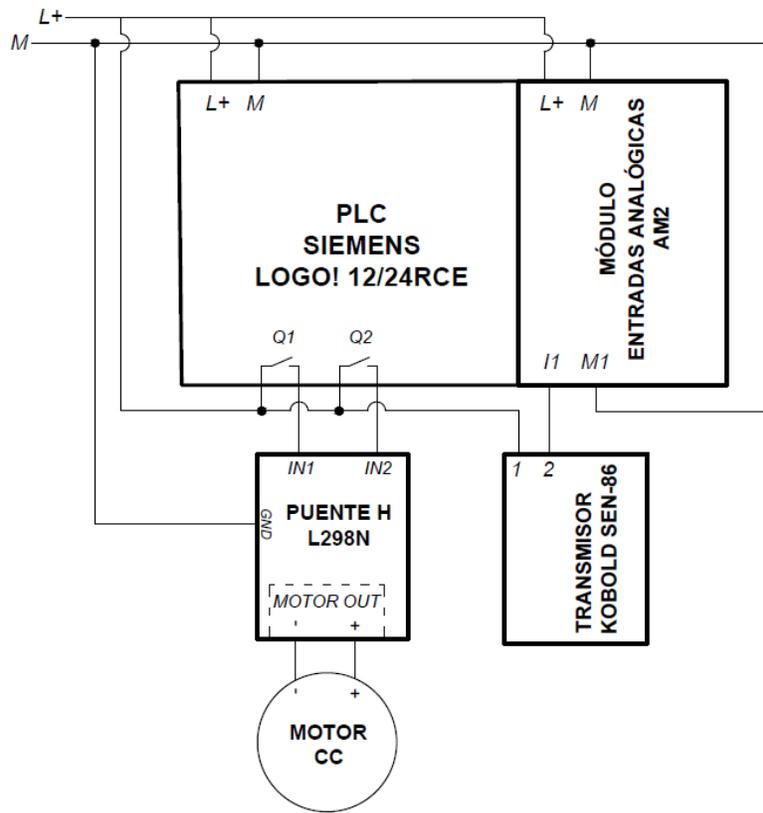


Fig. 27. Esquema de conexión de sistema electrónico de control

Imágenes del circuito armado de forma física se encuentran en los anexos de este documento, la simbología de “L+” y de “M” corresponde al puntal positivo y negativo respectivamente de la batería utilizada de forma provisional. La batería que será empleada es una EXIWILL de 12V con una capacidad de 105 Ah.

Una vez realizadas las conexiones se procede a programar el PLC.

3.3 Programación de PLC Siemens LOGO! 12/24RCE

Para programar el PLC se necesita utilizar el software “LOGO! Soft Comfort”. Los parámetros para tomar en cuenta en el programa son Q1 que genera un giro horario, por lo tanto, este será el encargado de subir la presión y Q2 que por el contrario, genera un giro antihorario el cual bajará la presión. También se debe tomar en cuenta que el motor no puede girar por un tiempo indefinido, según una revisión en la cámara se determinó que lo óptimo es mover el motor por 4 segundos y esperar 30 segundos hasta que la presión de salida se estabilice, repetir este ciclo hasta llegar a la presión deseada.

Para conseguir satisfacer estos requisitos se deben usar los siguientes bloques:

- Entradas analógicas.
- Amplificador analógico.
- Conmutador analógico de valor umbral.
- Temporizador semanal.
- Función “AND” y “OR”
- Generador de impulsos asíncronos.
- Salidas de relé.

Las funciones “AND” y “OR” son comparadores lógicos que activan su salida en función de las entradas, la función “AND” activa la salida cuando todas las entradas están activadas, la función “ON” activa la salida cuando una o varias entradas están activadas. Al estado de activado se denominará como “HIGH” y al estado de desactivado como “LOW”. Los demás bloques deben ser configurados y se indicará cada uno de ellos adelante.

El Software “LOGO! Soft Comfort” permite tres tipos de programaciones: Diagrama de funciones (programación por bloques), diagrama de contactos (programación por escalera) y diagrama UDF. Se usará la programación por bloques, siguiendo el diagrama de flujo que se presenta a continuación en la Fig. 28.

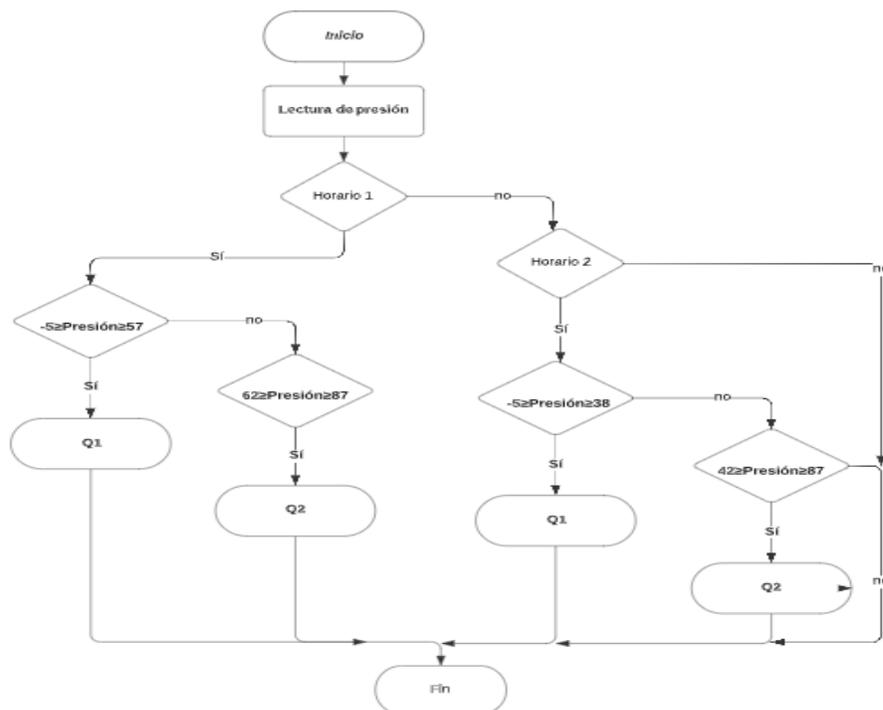


Fig. 28. Diagrama de flujo de programación del PLC

3.3.1 Entrada analógica

En este bloque únicamente se establece la entrada analógica física que será utilizada. Para lo cual se elige la 3 ya que la 1 y 2 corresponden a las entradas analógicas propias del PLC que son del tipo 0-10 V. Los datos receptados por la entrada analógica son convertidos en valores de 0 a 1000 [42]. El bloque queda configurado como se muestra en la Fig. 29.

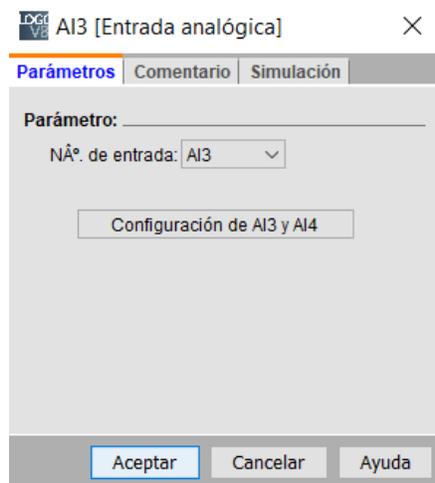


Fig. 29. Configuración de bloque de entrada analógica

3.3.2 Amplificador analógico

Como se indicó anteriormente, los valores analógicos que entran desde el sensor de 4-20 mA al PLC son transformados en valores digitales de 0-1000. Con el bloque del amplificador analógico se puede multiplicar los valores digitales por un factor de ganancia (Gain) y luego desplazar el punto cero del rango de valores (offset) [42]. Con lo cual se puede obtener un valor equivalente al valor real medido, que en este caso es de la presión.

Para obtener una escala del valor real medido (0 – 87 psi) se necesitarán tres bloques (Fig. 30):

- El primero transformará los valores captados por la entrada analógica a valores de 0 – 1000 correspondientes a un sensor analógico 4-20 mA, esto lo hace automáticamente el bloque seleccionando en la opción correspondiente.
- El segundo bloque transforma los valores a una escala de 0 – 100.
- Por último, realiza la escala a los valores reales medidos de 0 – 87.

Para conocer los valores de “Gain” y “Offset” se puede hacer un cálculo o simplemente colocar los valores máximos y mínimos del rango de medida, y el programa automáticamente calculará los valores de “Gain” y “offset”. Realizado esto se obtiene los datos en medidas de presión para facilitar la programación ingresando directamente los valores de presión en Psi en los bloques de conmutadores analógicos de valor umbral. Para conectar con dichos bloques se debe poner un bloque de marca analógica en medio.

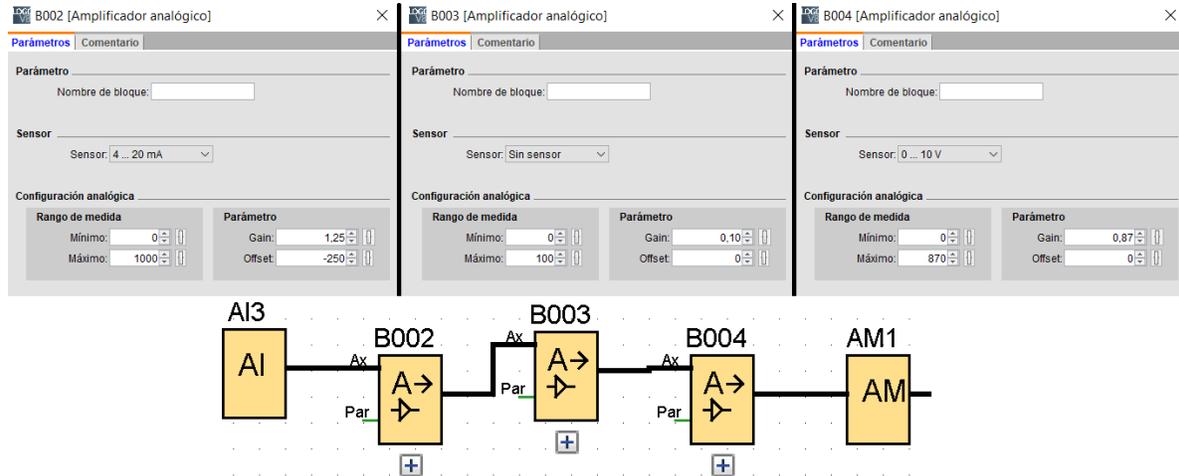


Fig. 30. Configuración de bloques de amplificadores analógicos

3.3.3 Conmutador analógico de valor umbral

Este bloque activa o desactiva su salida en función de dos umbrales parametrizables, en la entrada “Ax” se conecta la señal analógica que va a ser evaluada [42]. En otras palabras, en el bloque se ingresan dos valores, cuando la señal analógica está dentro del intervalo de estos valores se activa, caso contrario permanece desactivada.

Por lo tanto, estos bloques serán los utilizados para colocar al motor en una posición deseada en función de la presión de salida de la VRP. Por cada presión programada se necesitarán dos bloques:

- El primer bloque se activará si la presión está por debajo de la deseada, por lo tanto, activará la salida Q1, pues como se mencionó anteriormente esta producirá el giro horario provocando que el tornillo piloto suba la presión de salida.
- El segundo bloque se activará si la presión está por encima de la deseada, por ende, activará la salida Q2, para de esta forma producir un giro antihorario en el tornillo piloto y que la presión de salida baje.

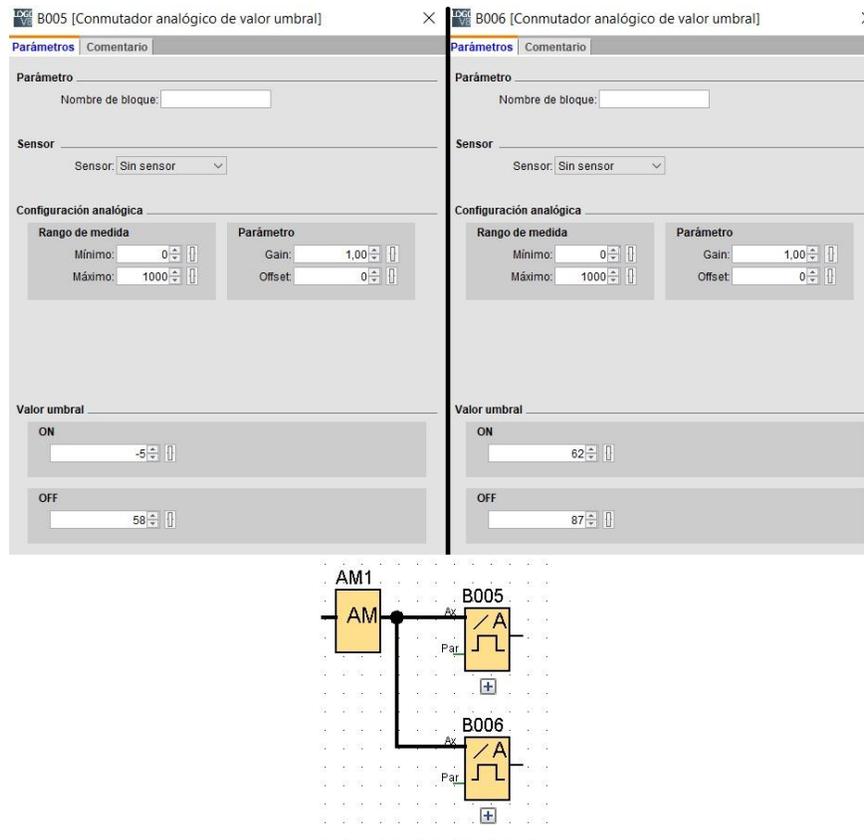


Fig. 31. Configuración de bloques de conmutador analógico de valor umbral

Cuando la presión se encuentre en el punto medio de estos dos bloques Q1 y Q2 se desactivarán, logrando dejar al tornillo en la posición que configuran a la VRP en la presión de salida deseada. En la Fig. 31 se puede observar la configuración de dos bloques para obtener una presión de salida de 60 psi. Si el valor analógico se encuentra entre -5 y 58 psi girará al motor en sentido horario. Si el valor analógico se encuentra entre 62 y 87 psi girará al motor en sentido antihorario. Si el valor analógico se encuentra entre 58 y 62 el motor se quedará quieto. La presión es 60 psi, pero se deja un margen de ± 2 ya que la presión no logra estar siempre fija debido a perturbaciones en la red y normalmente dicha presión se mantiene variando en dicho intervalo.

3.3.4 Temporizador semanal

Este bloque es sencillo, aquí se programará los horarios en los cuales se activarán las diferentes configuraciones de presión. Como ya se mencionó, el controlador no va a estar siempre funcionando, solo se activará cuando sea la hora en la cual debe cambiar al tornillo de posición, se ha calculado que esto le puede tomar 5 minutos al motor, razón por la cual se

programa para que se active 10 minutos. Posteriormente el controlador se va a activar cada cierto tiempo para verificar que la posición del tornillo piloto sea la correcta, pero esto no coge mucho tiempo, así que se activará por 5 minutos.

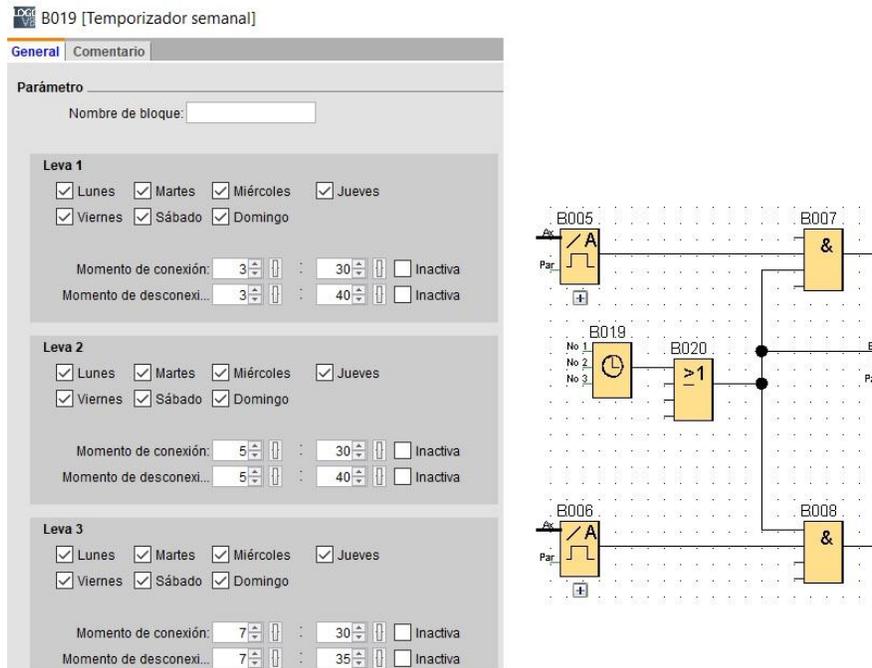


Fig. 32. Configuración de bloque de temporizador semanal

Por ejemplo (Fig. 32), si se determina que a las 3:30am se debe producir un cambio de presión esta será la hora que se programará en el bloque, es decir, 3:30 am será el “momento de conexión” y 3:40 am el “momento de desconexión”. Si va a realizar esto todos los días entonces se coloca un “check” en las casillas de todos los días. Y luego se establecen horarios posteriores para que revise por 5 minutos. En la Fig. 32 también se puede observar cómo este bloque activa los dos bloques de conmutador analógico de valor umbral que fueron mostrados en la Fig. 31, entonces, cuando el temporizador semanal se active hará que el motor gire hasta conseguir la presión de 60 psi. También se puede observar que hay un “OR” luego del temporizador, esto es para poder activar la configuración de 60 psi en diferentes horarios. Luego del análisis de datos de la macro medición se determinarán los horarios que serán programados en los demás bloques de temporizador semanal.

3.3.5 Generador de pulsos asíncronos

El movimiento del motor no puede ser indefinido, pues al mover el tornillo la válvula tarda un pequeño tiempo en estabilizar su presión de salida. Por esto los movimientos del motor deben ser siguiendo un ciclo determinado, para esto se usará el generador de impulsos asíncrono.

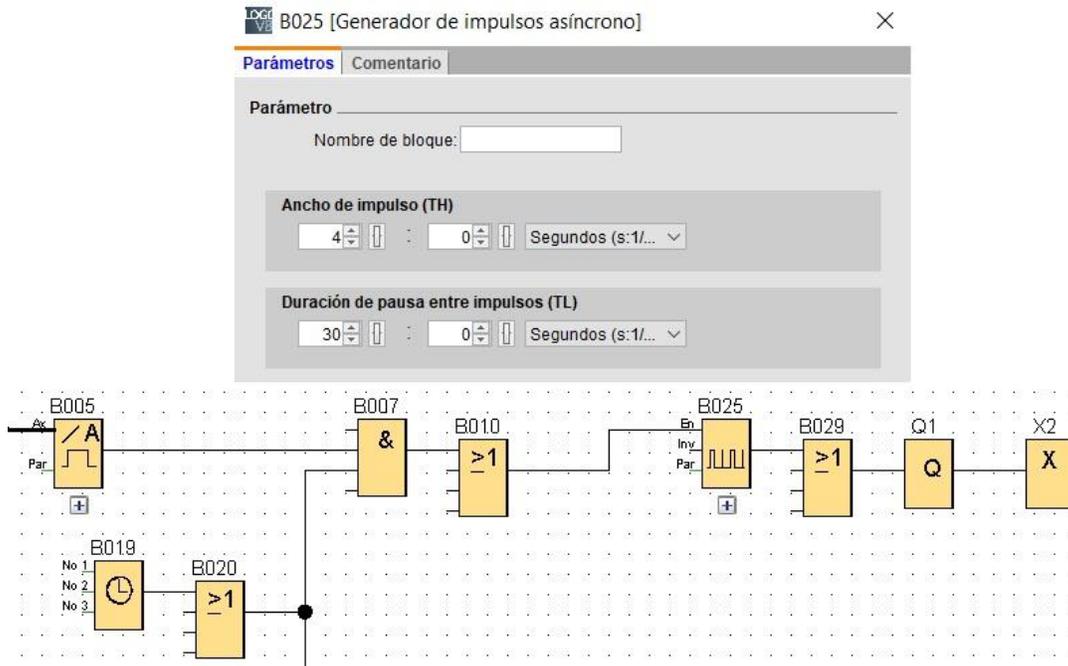


Fig. 33. Configuración de bloque de generador de pulsos asíncronos

En base a las revisiones realizadas en la válvula se ha determinado que la presión de salida podría tardar hasta 30 segundos en estabilizarse, por esto se debe programar que el motor, tanto para el lado derecho como para el lado izquierdo, gire por un pequeño instante y luego espere 30 segundos. Esto se realiza con el generador de pulsos asíncronos, el cual estará antes de la salida Q1 y Q2, de tal forma que cuando estos vayan a ser activados lo hagan en base a estos pulsos. Colocar este bloque antes de las salidas también logra ser como una medida de seguridad, para que sea cual sea la razón por la que se ha provocado la activación de Q1 y Q2 lo hagan por pulsos. En la Fig. 33 se muestra cómo queda programado este bloque y su conexión en el diagrama de bloques, nótese que se encuentra antes de la salida Q1 y después del bloque que activará la salida.

3.3.6 Programación adicional

Aparte de controlar la posición del tornillo para obtener una salida de presión en base a un horario se añadirá unos bloques adicionales para revisar cada media hora que la válvula reductora de presión no se haya cerrado por algún error en el programa principal. Con esto se garantizará que la presión no se encuentre bajo a la mínima requerida en función de los requerimientos de ETAPA EP [2].

Por lo tanto, se añadirá una rama adicional al programa que con la ayuda de un generador de pulsos asíncrono cada media hora revisará si la presión se encuentra entre -5 y 27 psi, y en el caso de estar dentro de ese rango activará a Q1 para que apriete el tornillo y suba la presión de salida de la válvula. Esta rama adicional se muestra adelante.

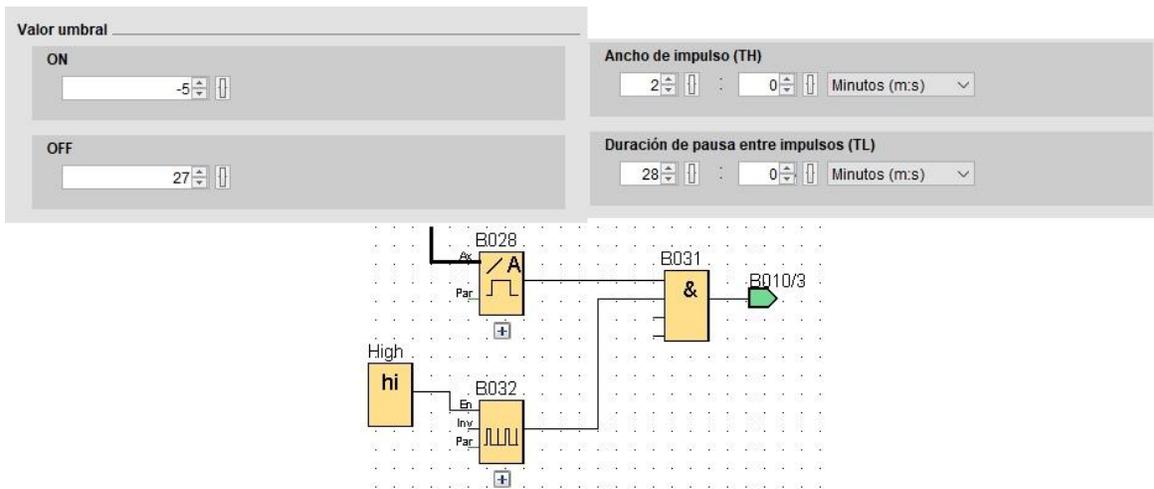


Fig. 34. Configuración de subprograma adicional

También, para obtener un registro de las presiones de salida de la VRP durante parte del tiempo que estará instalado el prototipo se colocará un bloque de registro de datos. Esto permitirá revisar el histórico de presiones de salida y cerciorarse de que el sistema ha estado trabajando correctamente. Registrará la presión cada 5 minutos, y se activará luego de haber colocado el prototipo en la cámara, para esto se usa el generador de pulsos asíncronos y el temporizador semanal respectivamente mostrado en la Fig.35.

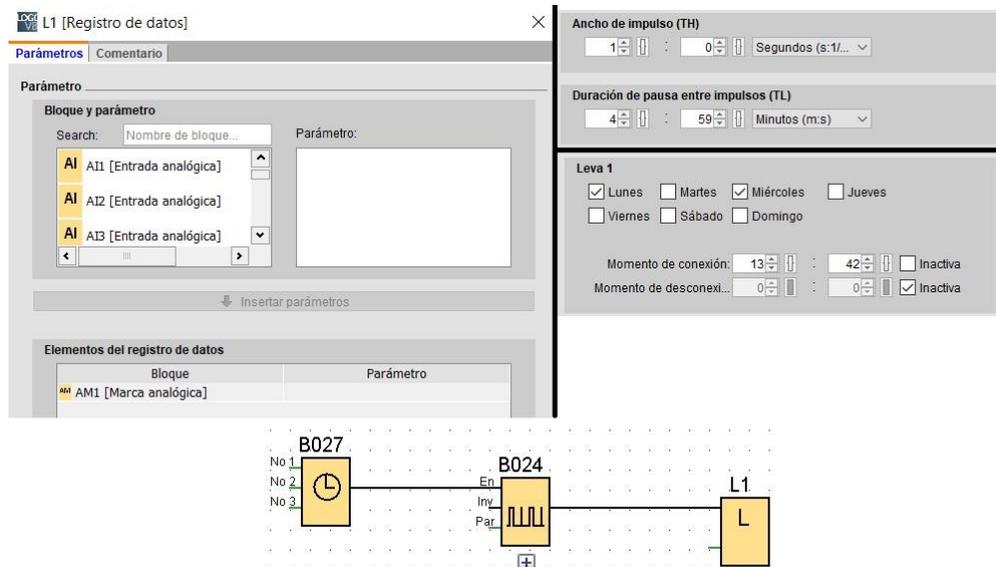


Fig. 35. Configuración de bloque de registro de datos

Por último, se configura un bloque para programar cual será la información que muestre la pantalla del PLC. La información que se requiere mostrar es la hora, fecha y la presión de salida de la válvula medida por el transmisor de presión como se muestra en la siguiente figura.

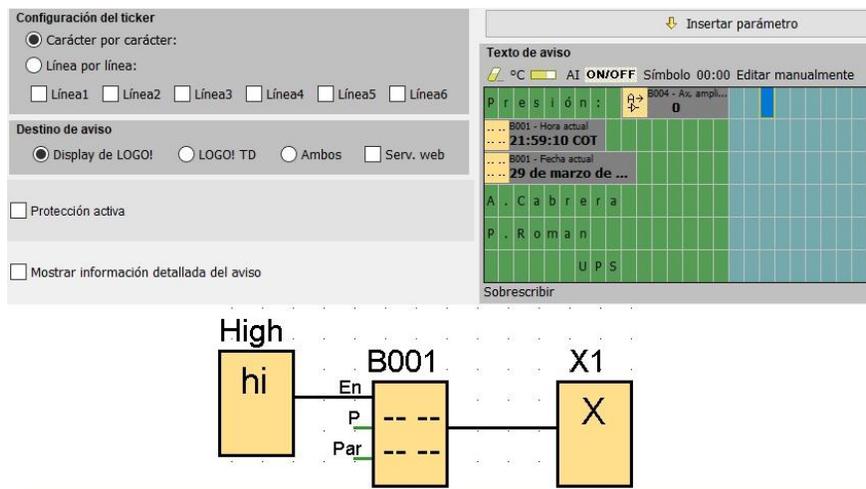


Fig. 36. Configuración de pantalla de LOGO!

3.4 Programa de sistema electrónico de control ON/OFF

Una vez unido todos los bloques anteriores con la ayuda de las funciones “AND” y “OR” se obtiene el programa final, el cual logra controlar la posición del tornillo piloto hasta conseguir una presión de salida programada por horarios. En la Fig. 37 se puede observar el programa

que será cargado al PLC para cumplir con el control de la posición del tornillo piloto de la válvula reductora de presión.

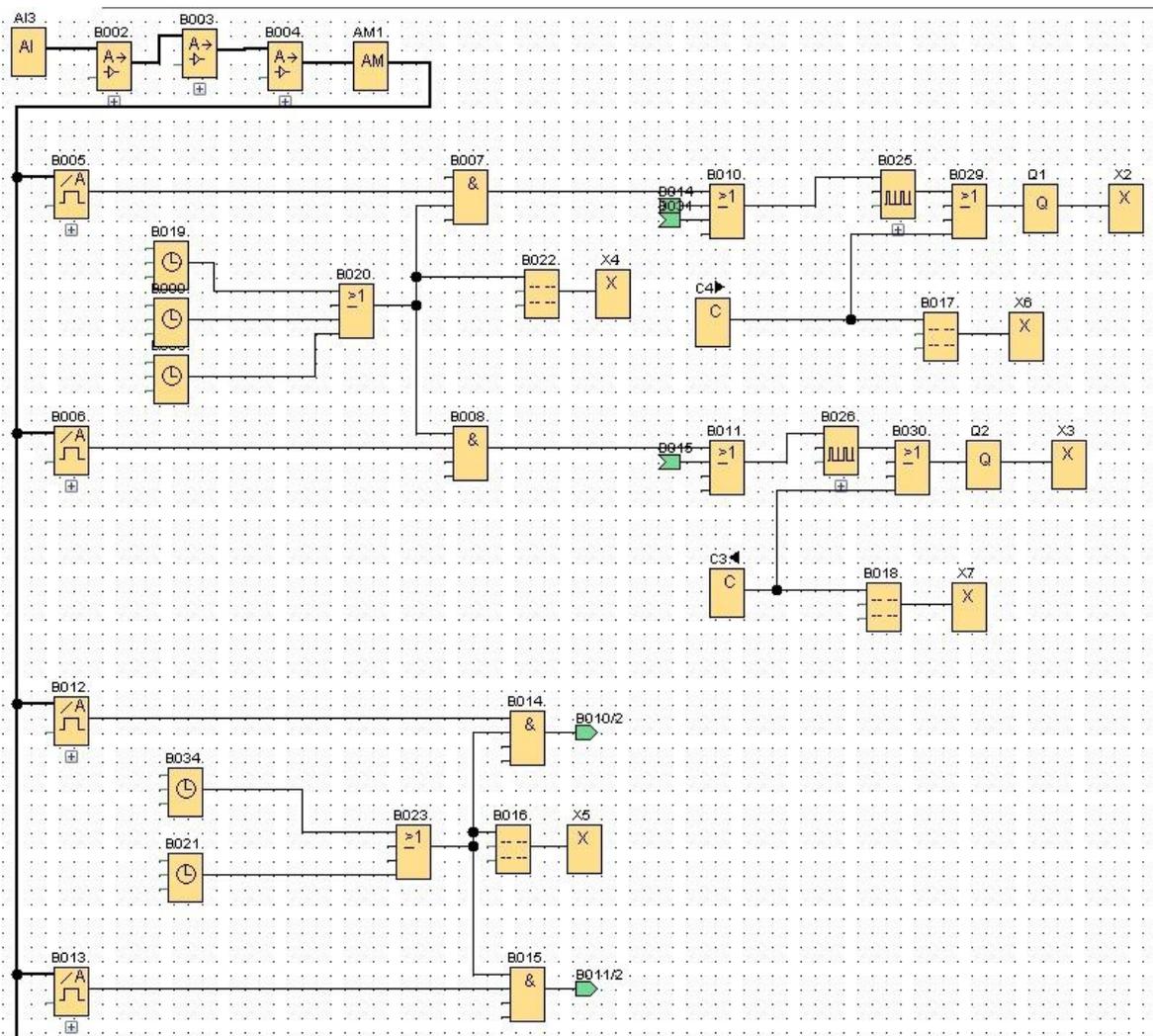


Fig. 37. Programa de control de posición del tornillo piloto en LOGO! Soft Confort

El programa ilustrado anteriormente puede configurar dos presiones diferentes, los bloques “B005” y “B006” serán los que establezcan una presión de salida, mientras los bloques “B012” y “B013” establecerán otra presión de salida. Luego se pueden añadir pares adicionales de umbrales para nuevas configuraciones de presión.

Con la ayuda de los bloques lógicos “OR” se permite activar las salidas si es que vienen de un par de umbrales o de otro par de umbrales, es decir, si vienen de una configuración de presión o de otra.

El par de umbrales de cada presión se activarán con la ayuda de un bloque “AND”, el cual tendrá en su entrada los horarios con los que debe activarlos. Si estos horarios no se activan los umbrales tampoco lo harán.

Adicionalmente con otros bloques “OR” se programa que las salidas Q1 y Q2 también puedan ser activadas desde las flechas del panel del PLC, esto por si un operador quiere mover al tornillo manualmente. Con la flecha derecha apretará el tornillo piloto de la VRP y con la izquierda lo aflojará.

De esta forma se concluye con el programa para el control de la posición del tornillo piloto de la válvula reductora de presión, en base al análisis de la macro medición se configuran los horarios en el programa.

3.5 Sistema electrónico físico

Siguiendo el diseño electrónico se realiza el armado del sistema en una caja metálica, con las debidas conexiones y protecciones. El cual es mostrado adelante.



Fig. 38. Sistema electrónico en físico

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE SISTEMA MECÁNICO

En este capítulo se describe una propuesta del sistema mecánico que enlaza al sistema electrónico de control con la válvula reductora de presión. El sistema mecánico se compone de dos partes: El acople entre el eje del motor y el tornillo piloto, y la estructura mecánica que de soporte al motor.

Con el objetivo de facilitar el modelado de estos componentes se dibuja de manera tridimensional el conjunto del tornillo piloto con medidas aproximadas a las reales y el motor de corriente continua ZHENG ZWL-31ZY en el software “Inventor® 2018” de Autodesk, así como también se realiza el análisis finito en el mismo software para determinar los factores de seguridad y los posibles desplazamientos en los materiales escogidos para la elaboración de los componentes, los cuales deben ser aptos para ambientes húmedos. En la Fig. 39 se observa el entorno donde se encuentra el tornillo piloto, junto a la válvula reductora de presión.



Fig. 39. Conjunto Válvula reductora de presión y tornillo piloto

Como se puede notar en la Fig. 39 (b), el motor quedaría suspendido en el aire al momento de ubicarlo frente al tornillo, y la altura al suelo es de 1m por lo que no es factible colocar una base. La solución es crear una estructura que se fije desde algún elemento existente y que no interfiera con el funcionamiento de la válvula. Por lo tanto, se elige la estructura que sostiene al piloto para a partir de ella modelar el soporte mecánico del motor. El desplazamiento lineal del tornillo es de 5 mm, por lo tanto, el motor puede estar fijo y este desplazamiento se pueden incluir dentro del acople entre el motor y el tornillo.

4.1 Modelado tridimensional

4.1.1 Modelado tridimensional de conjunto tornillo piloto

Para modelar la pieza que acople el tornillo piloto con el eje del motor y la estructura de sujeción se necesita tener la representación gráfica del entorno actual del tornillo. Para esto se tomaron medidas del tornillo piloto y del sistema donde se encuentra, posteriormente se ingresan las medidas al software y se realiza la pieza tridimensional, cabe mencionar que se tomaron en cuenta los elementos que serán necesarios para el momento de modelar el acople y la estructura del motor. Elementos adicionales, como los cuatro tornillos alrededor del tornillo piloto no fueron dibujado, el resultado en 3D se muestra en la Fig. 40, los planos en los anexos 11.3 y 11.4 y el sistema real en la Fig. 41.

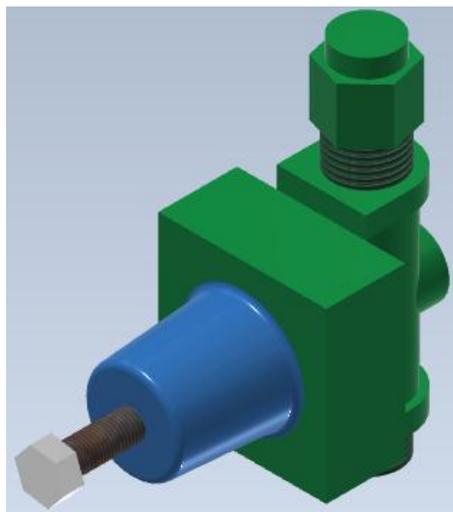


Fig. 40. Sistema de tornillo piloto modelado en Inventor®



Fig. 41. Sistema de tornillo piloto real

4.1.2 Modelado tridimensional de motor ZHENG ZWL-31ZY

Tener el motor modelado en el software es esencial para diseñar la base donde se sostendrá. Las medidas más importantes son las del eje del motor y los orificios donde se insertarán los tornillos para sujetarse a la estructura mecánica, estos datos son obtenidos del plano mecánico entregado por la empresa ZHENG (Fig. 42) [33], las medidas faltantes son conseguidas con la ayuda de un calibrador.

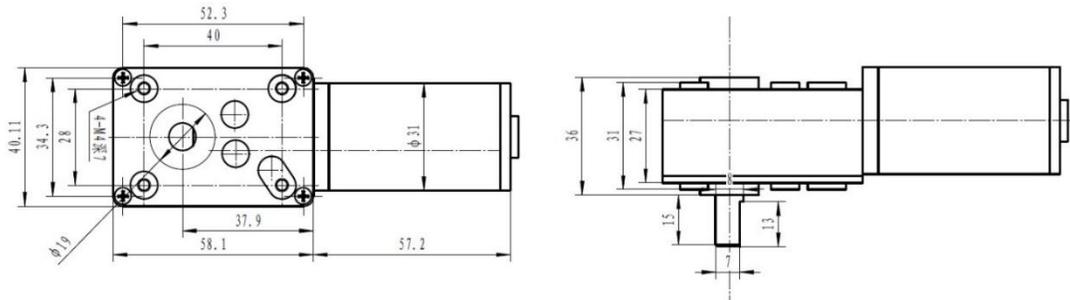


Fig. 42. Plano mecánico de motor ZHENG ZWL-31ZY

Como en el caso anterior, en el modelo se incluyeron las partes del motor que son importantes y las que podrían ocasionar conflicto con el diseño de la estructura mecánica. De tal manera se obtiene el modelo indicado en la Fig. 43.

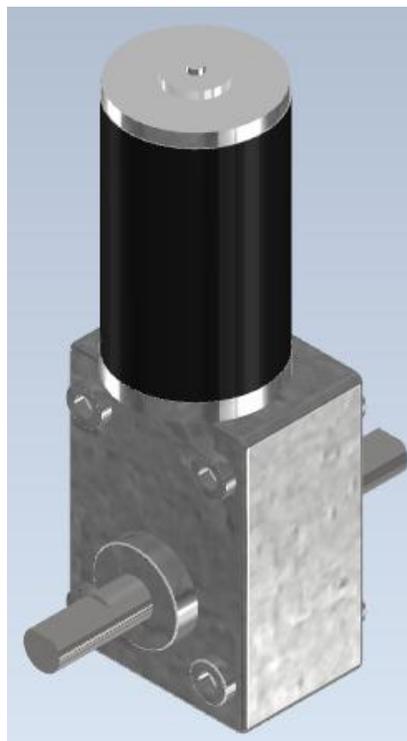


Fig. 43. Motor ZHENG ZWL-31ZY modelado en Inventor®

4.2 Modelado de componentes mecánicos en Inventor®

Una vez modelado el motor, el tornillo piloto y la superficie fija, el diseño de las piezas mecánicas resulta más sencillo. Con el software Inventor® se diseña cada componente y se procede a ensamblar para verificar su funcionalidad.

4.2.1 Modelado de acople de tornillo piloto con eje del motor

El acople que enlace al eje del motor con el tornillo debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Permitir un desplazamiento lineal de 5 mm a la cabeza del tornillo.
- Soportar un torque de 2 Nm.
- Resistir en ambientes húmedos.

Con estas premisas, se procede a dibujar el acople presentado en la Fig. 44 (a) y (b), partiendo desde los modelos creados en “Inventor® 2018”. El material elegido a utilizar es aluminio, debido a la facilidad de su mecanización y la capacidad de trabajar en ambientes húmedos.

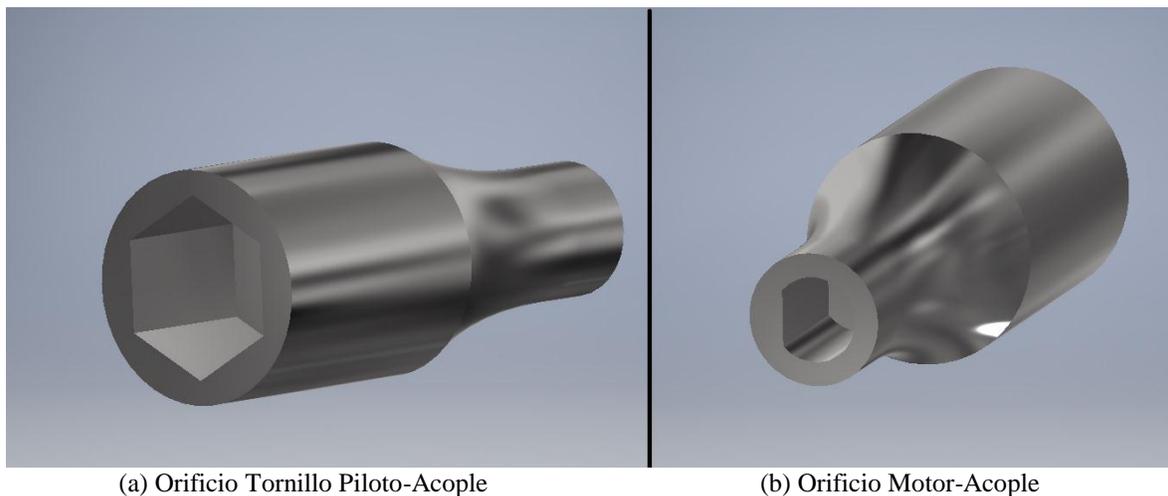


Fig. 44. Modelo tridimensional de acople Motor - Tornillo piloto

El acople resultante es de tipo cilíndrico, con diferentes diámetros para disminuir el peso total de la pieza. En la Fig. 44 (a) se observa el orificio donde se colocará el tornillo piloto y este permitirá que la cabeza del tornillo se desplace libremente de forma lineal. Por otro lado, en la Fig. 44 (b) se muestra el orificio en el cual se colocará el eje del motor, su ajuste será de apriete para que el motor logre transmitir su movimiento al tornillo de una forma más eficiente. Los planos mecánicos de este acople se encuentran en el anexo 11.5.

4.2.2 Modelado de estructura soporte del motor

Una vez dibujado el acople que unirá al motor con el tornillo piloto se modela la estructura de sujeción que dará soporte al motor, las condiciones que debe cumplir esta estructura son las siguientes:

- Mantener el eje del motor siempre alineado con el eje del tornillo piloto.
- Resistir en ambientes húmedos.
- Soportar su propio peso.

El modelado en el software facilita el diseño dado que puede trabajar sobre las piezas ensambladas. La estructura está compuesta de tres piezas representadas en la Fig. 45 las cuales facilitan su proceso de mecanización, el montaje y desmontaje del prototipo en la válvula reductora de presión.

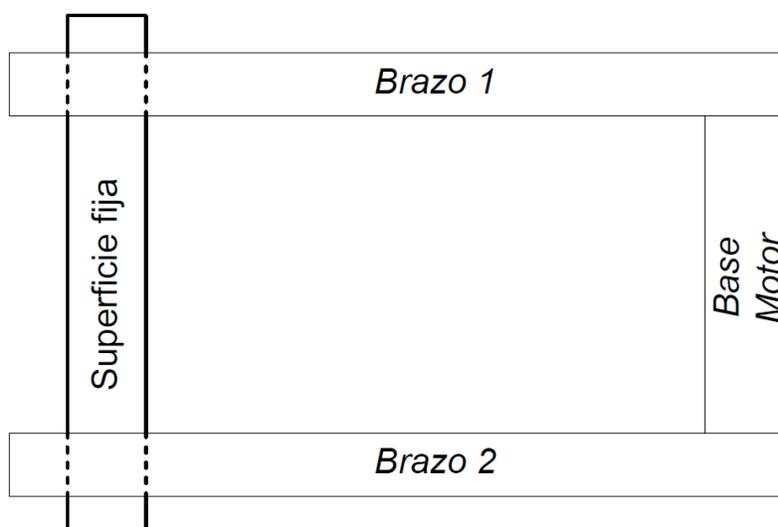


Fig. 45. Esquema de piezas de soporte del motor

La Figura previamente mostrada indica únicamente de forma esquemática las denominaciones de cada pieza, la disposición de cada una y como se enlazan. Los brazos serán los que tengan contacto y sujeción a la superficie fija y sostendrán la base del motor. La superficie fija sobre la cual se sujetará la estructura tiene un ancho de 6.9 mm por tanto, se utilizará una platina de aluminio con un espesor próximo a éste. La platina será de 1/4", es decir, aproximadamente 6.35 mm, esta medida será la considerada al modelar las tres piezas.

4.2.2.1 Modelo de base del motor

El primer elemento creado es la pieza base que sostiene al motor mediante tornillos y esta a su vez se fija a la brazos 1 y 2 como en el esquema mostrado anteriormente, el espesor corresponde a la platina de aluminio existente en el mercado y su representación se basa en las medidas ilustradas en la Fig. 46.

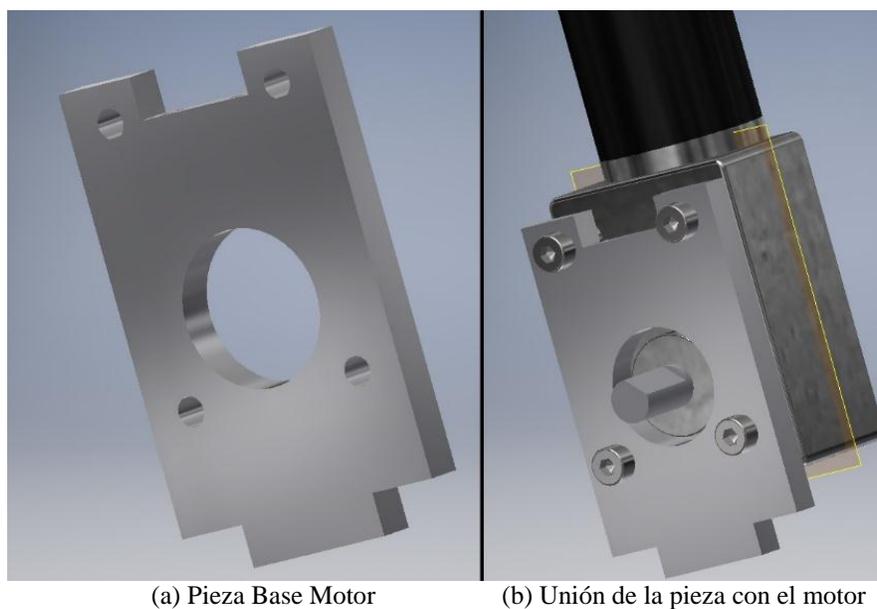
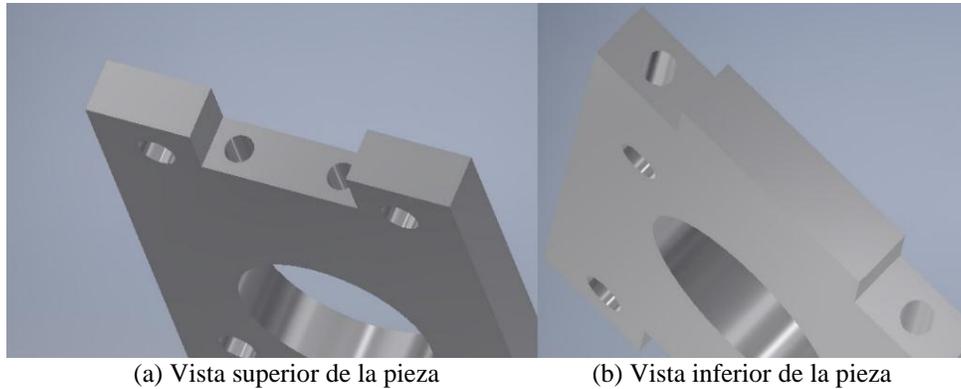


Fig. 46. Modelado tridimensional de base del motor

Como se observa en la Fig. 46 (a) la pieza es una placa simple donde se colocará el motor con la ayuda de cuatro tornillos “Allen M4” como se aprecia en la Fig. 46 (b). Los agujeros pasantes para los tornillos tienen ajuste de juego mientras que el agujero central no tiene ninguna función más que permitir que el perfil salido del eje del motor no choque con la placa, por lo tanto, no tienen ningún tipo de ajuste. Para que esta pieza se enlace correctamente con los brazos se diseñan las pestañas superiores e inferiores con una profundidad de 6.35 mm. y se colocan agujeros roscados en cada lado para fijar las piezas con la ayuda de tornillos “Allen M3” como se observa en la Fig. 47. Nótese que el tipo de pestañas superior es diferente al inferior esto se debe a que los agujeros para los tornillos “Allen M3” se cruzarían con los agujeros pasantes de los tornillos que sostendrán al motor.



(a) Vista superior de la pieza

(b) Vista inferior de la pieza

Fig. 47. Vista de agujeros roscados en base de motor

La posición elegida para la ubicación de estas pestañas no es al azar, las superficies de contacto con los brazos están a una distancia tal que la estructura compuesta logre colocarse en la superficie en la cual irá fijada, esto se observa más adelante en la Fig. 51. Esto explica porque no se modela la pestaña superior igual a la inferior desplazando su posición más arriba, si se hiciera esto ya no se podría colocar los brazos de forma perpendicular a la superficie fija. Los ajustes de estas pestañas serán los adecuados para mantener fija la estructura, los planos mecánicos para su mecanizado se encuentran en el anexo 11.6.

4.2.2.2 Modelado del brazo 1 y 2

El ensamble de acople y base de motor que se muestra en la Fig. 48 con el sistema explosionado en el anexo 11.1 permiten el modelado de los brazos 1 y 2.

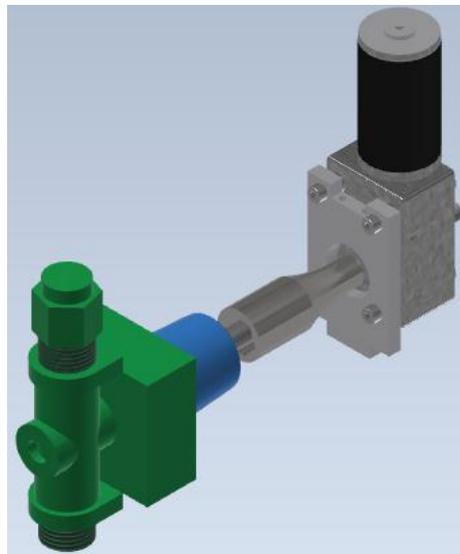


Fig. 48. Ensamble de acople y base de motor

Por consiguiente, el brazo 1 tiene una pestaña que encaja en la pestaña superior de la base del motor como se muestra en la Fig. 49 (a), mientras el brazo 2 tiene una pestaña que encaja en las pestañas inferiores de la base del motor como se muestra en la Fig. 49 (b). También tienen orificios pasantes que coincidan con los orificios roscados de la base del motor. La longitud de estos brazos será obtenida mediante el ensamble, tomando en cuenta que el tornillo está en el desplazamiento lineal máximo, tomando en cuenta que el espesor sea el mismo de la base del motor.

Luego de determinar la longitud de cada brazo para llegar desde la base del motor hasta la superficie fija se modela la geometría para fijar los brazos de la estructura con la superficie. Para esto se copia el contorno de la superficie fija y se lo plasma en el brazo con un ajuste que garantice el adecuado acoplamiento. Los diseños resultantes se ilustran en la Fig. 49 y sus medidas se observa en el anexo 11.7 y 11.9.

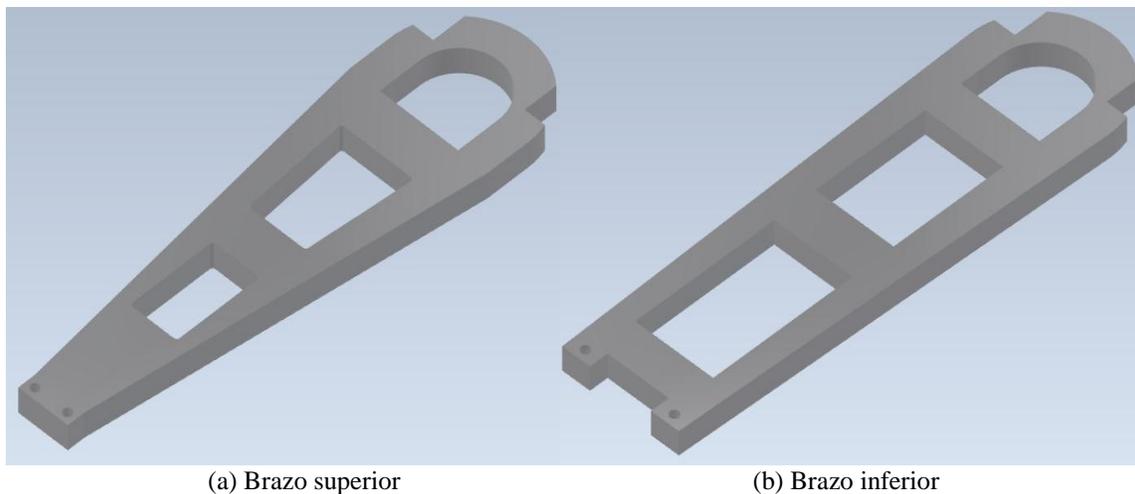


Fig. 49. Modelado tridimensional de brazo 1 y 2

Como se explica anteriormente, por un extremo los brazos tienen las pestañas para poder encajar con la base del motor con sus respectivos agujeros pasantes para tornillos “Allen M3”, estas pestañas son diferentes en cada brazo dado que el soporte del motor no es igual en su parte superior e inferior como se observa en la Fig. 47. Por el otro extremo los contornos en los brazos son iguales dado que tienen que fijarse en la superficie, la cual tiene el mismo contorno tanto en la parte superior como en la inferior. Para disminuir el peso de la estructura se realiza los dos vaciados en cada brazo, los cuales posteriormente serán verificados con el análisis estructural que logren soportar las cargas a los que se verán sometidos.

Por último, a cada brazo se debe dividir en la zona donde se encuentra el perfil de sujeción, para lograr el montaje de dichos brazos en la superficie fija real. Como estas piezas son divididas por la mitad se deben colocar agujeros para luego con la ayuda de tornillos “Allen M3” volverlas a unir. Los agujeros en la pieza más pequeña serán pasantes, y los agujeros en la pieza grande serán roscados. Los brazos quedan divididos como se muestra en la Fig. 50 y las medidas las nuevas piezas se aprecian en el anexo 11.8 y 11.10.

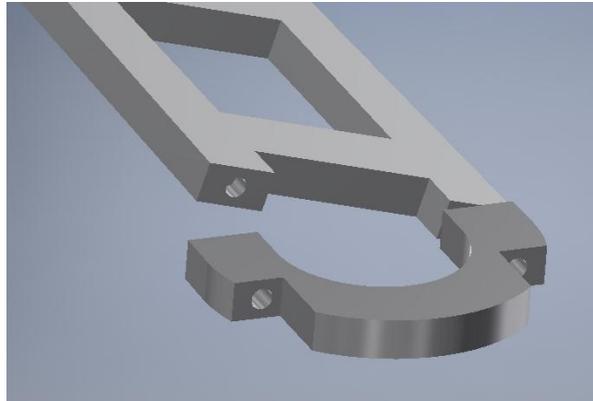


Fig. 50. Ilustración de división en brazos para el montaje

Finalmente se ensamblan todas las piezas verificando que calcen entre ellas, esto indica que las medidas son las adecuadas garantizando que podrán ser montadas en la válvula reductora de presión. En la Fig. 51 se aprecia el modelado resultante, donde se comprueba que las piezas se acoplan.

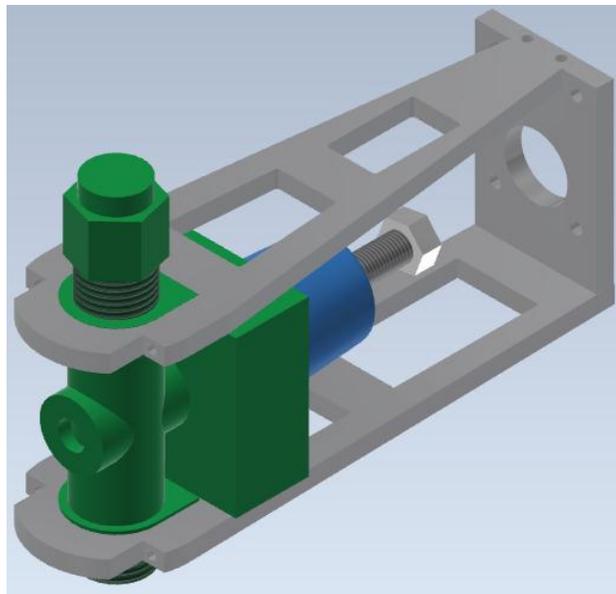


Fig. 51. Modelado tridimensional de estructura soporte del motor

Como una ayuda adicional para verificar que los modelos son correctos y sus medidas son las apropiadas se imprimieron las piezas en PLA para luego ser armadas en la válvula reductora de presión. Se confirma que las medidas de los brazos quedaron 5mm más cortas, esto sucede al no tomar en cuenta la medida de una tuerca existente en el piloto. A continuación, se añade los 5mm en la longitud de los brazos y se imprime nuevamente para corroborar que las nuevas medidas sean adecuadas. Al probar la segunda impresión 3D se aprecia que las medidas son correctas, cotejando que el modelo está bien para ser mecanizados en aluminio. En la Fig. 52 se muestra cómo queda finalmente ensamblada toda la propuesta de la estructura de sujeción y el acople entre el motor y el tornillo piloto para su control de posición y la vista en explosión del sistema se encuentra en el anexo 11.2.

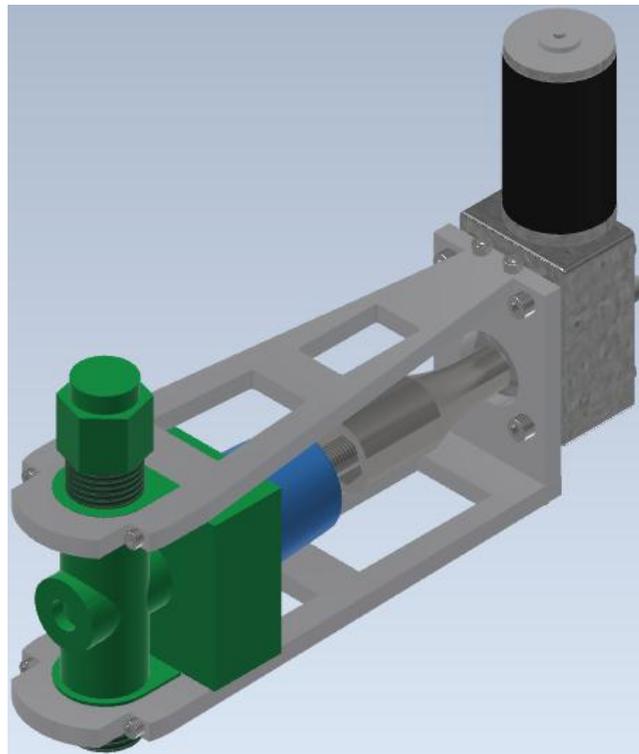


Fig. 52. Ensamble de componentes mecánicos en Inventor ®

4.3 Análisis estructural

Para el análisis estructural se utiliza el método de elementos finitos que ofrece el software “Inventor® 2018”. El análisis estático de la estructura depende del correcto ensamblaje, la selección del material de cada pieza, posición, tipo de material y características de los tornillos y finalmente aplicar las cargas en el lugar preciso donde éstas actuaran.

La primera parte del análisis consiste en simular únicamente el peso propio de la estructura y del motor en el extremo, la segunda parte radica en simular el torque de 2 Nm ejercido en el eje del motor. Al concluir se espera determinar los factores de seguridad y los desplazamientos que estas cargas producen.

4.3.1 Primer análisis

Los pasos para realizar correctamente este análisis son:

- 1) El ensamble debe estar correctamente armado con todos los elementos incluidos los tornillos que se utilizarán.
- 2) Seleccionar el material Aluminio H14 y acero inoxidable de las piezas y tornillos respectivamente.
- 3) Indicar cuáles serán las superficies fijas que están conformadas por el contorno del conjunto del tornillo piloto.
- 4) Indicar la posición de las cargas y su dirección, la única carga a la cual está sometida la estructura es el peso del motor de 450g que en fuerza (W) equivale a 4.44 Newtons.
- 5) Indicar la dirección de la gravedad (G).

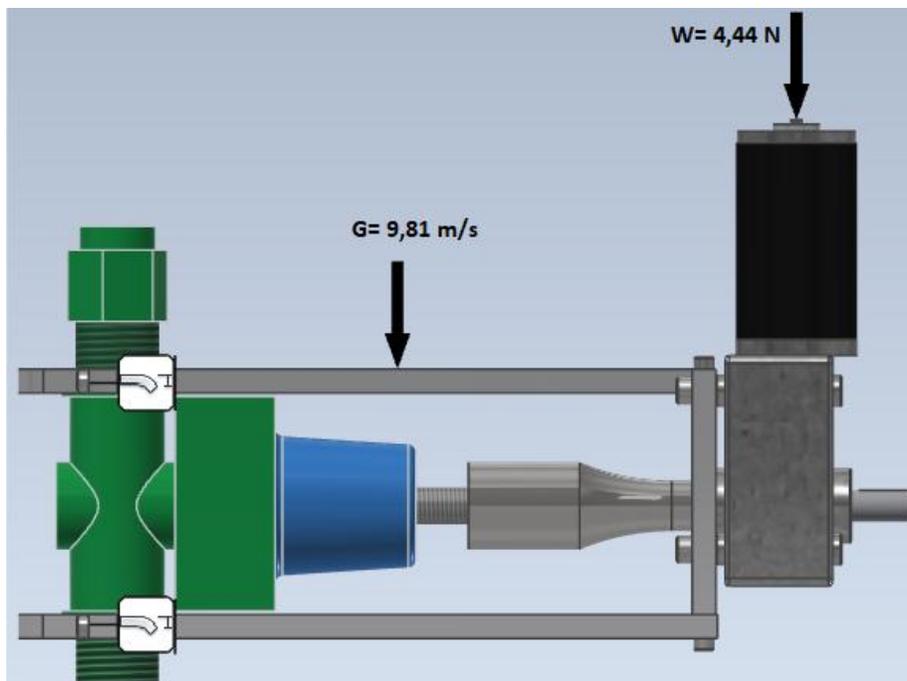


Fig. 53. Ensamble primera simulación

En la Fig. 53 se observa el estado inicial de la simulación, todos los tornillos están correctamente colocados, el material de la estructura es el correspondiente, la gravedad está representada por la flecha de la mitad y en el extremo derecho se encuentra el peso generado por el motor. Luego de esto se inicia la simulación, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5. Resultados primer análisis de tensiones.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	336901 mm ³	
Masa	1,60745 kg	
Tensión de Von Mises	0,0000000175781 MPa	4,39453 MPa
Primera tensión principal	-1,06958 MPa	4,39168 MPa
Tercera tensión principal	-5,67786 MPa	1,03738 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,003899 mm
Coefficiente de seguridad	15 su	15 su

En la Tabla 5 se presenta los resultados como el factor de seguridad, que para este caso es un valor alto llegando a 15, también se muestra que el desplazamiento es relativamente nulo para esta aplicación. Por lo tanto, se puede concluir que la estructura es capaz de resistir su propio peso. En la Fig. 54 se puede observar una interpretación de las deformaciones máximas que sufriría la estructura, en base a la escala de colores de la izquierda se puede observar donde se produce el mayor desplazamiento, el cual está ubicado en el extremo donde está el motor. Dado que una platina aluminio de 1/4" de espesor es un material para resistir mayores cargas que un motor de 1lb el desplazamiento máximo es de 0.0039 mm, para esta aplicación es un desplazamiento insignificante.

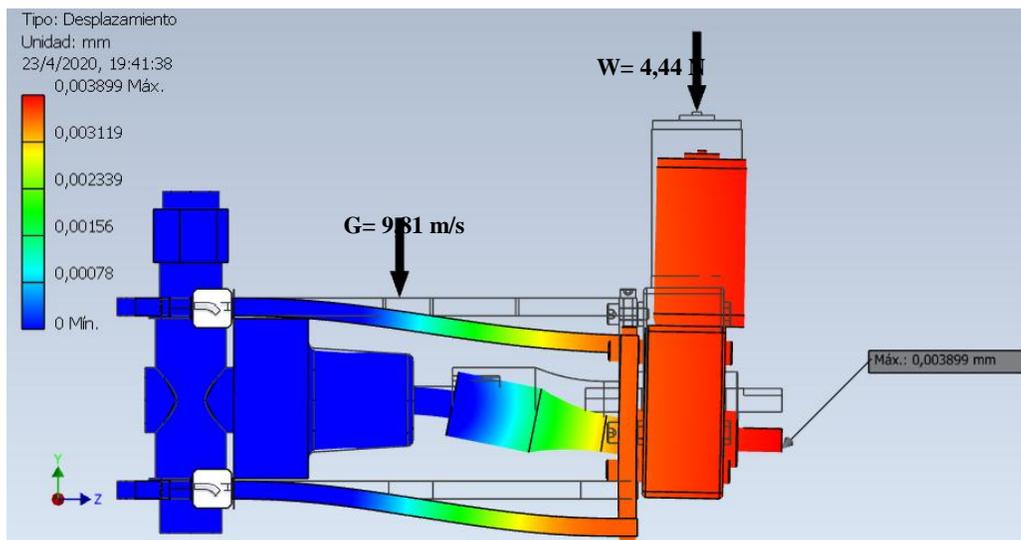


Fig. 54. Efecto de las cargas W y G aplicadas en el sistema simulado en Inventor®

4.3.2 Segundo análisis

Para el segundo análisis se introduce el torque generado por el motor. En un caso normal el torque del motor se transfiere directamente al tornillo y lo moverá, pero en el caso de que el tornillo esté bloqueado el torque se distribuirá directamente en la estructura mecánica.

Los pasos para realizar correctamente este análisis son:

- 1) El ensamble debe estar correctamente armado con todos los elementos incluidos los tornillos que se utilizarán.
- 2) Seleccionar el material Aluminio H14 y acero inoxidable de las piezas y tornillos respectivamente.
- 3) Indicar cuáles serán las superficies fijas que están conformadas por el contorno del conjunto del tornillo piloto.
- 4) Indicar la posición de las cargas y su dirección, en este caso será el torque ubicado en el eje del motor.

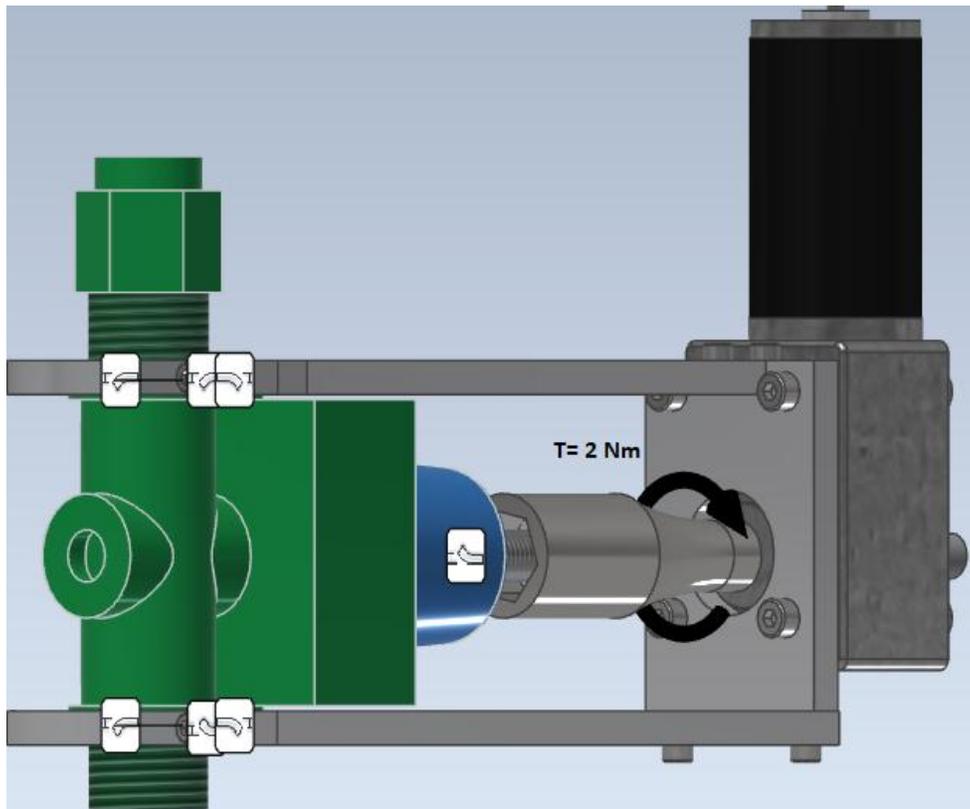


Fig. 55. Aplicación del torque en el sistema

En la Fig. 55 se muestra el estado inicial de la segunda simulación, todos los tornillos están correctamente colocados, el material de los elementos está correctamente determinado. La ubicación en la cual se generará el momento par de 2 Nm en el caso de bloquearse el tornillo está en el eje del motor, los puntos fijos son el tornillo y los contornos del conjunto del tornillo piloto. Luego de esto se procede a iniciar la simulación, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados segundo análisis de tensiones.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	336901 mm ³	
Masa	1,60745 kg	
Tensión de Von Mises	0 MPa	0,0200569 MPa
Primera tensión principal	-0,00140932 MPa	0,0131061 MPa
Tercera tensión principal	-0,0129455 MPa	0,00146243 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,00000780968 mm
Coefficiente de seguridad	15 su	15 su

En la Tabla 6 se presentan los resultados como el factor de seguridad de la estructura en el caso de que el tornillo piloto por alguna razón se encuentre bloqueado y éste es de 15. Por lo tanto, se garantiza que en este caso hipotético causara daños en el motor, siendo este último cuatro veces más barato que toda la estructura mecánica. Como se puede observar en la Fig. 56, el desplazamiento es ínfimo, esto quiere decir que mientras el motor esté funcionando la estructura mantendrá fijo al motor permitiendo que todo el torque se pueda trasladar al tornillo piloto.

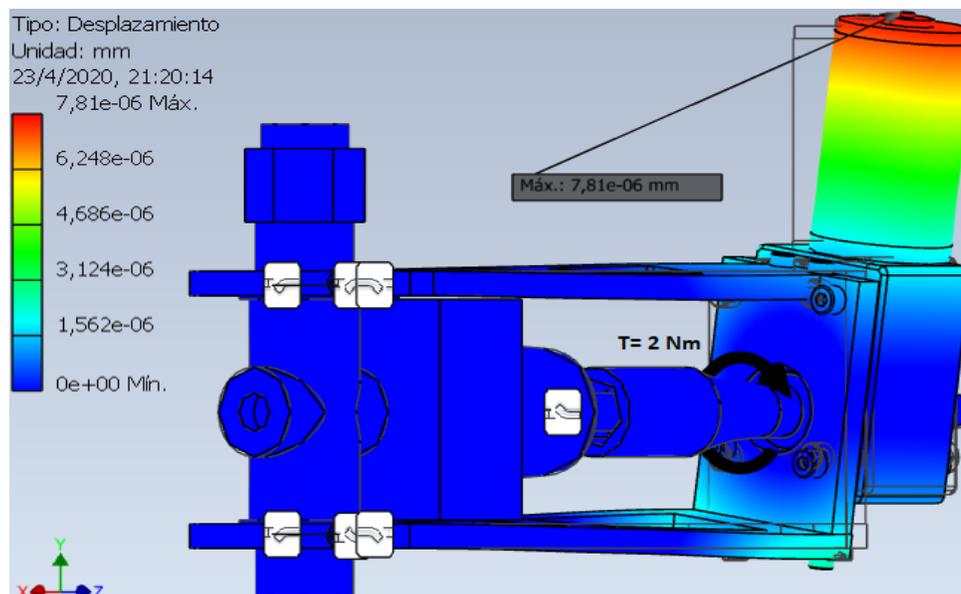


Fig. 56. Efecto del torque sobre el conjunto simulado en Inventor®

En base a los dos análisis de tensión se logra concluir que la estructura mecánica es funcional, resiste a las cargas bajo las cuales está sometida. En consecuencia, el espesor de la placa es el correcto y las medidas son apropiadas.

4.4 Implementación del sistema mecánico

Una vez que el modelado ha demostrado que las medidas encajan correctamente en la válvula reguladora de presión y su análisis de tensión da un factor de seguridad alto se procede a mecanizar las piezas para su ensamblaje. Posteriormente se procedió a entregar los planos mecánicos a la empresa “Ingmatricom”, para el respectivo mecanizado. El resultado final muestra el montaje en la válvula reguladora de presión como se muestra en la Fig. 57.

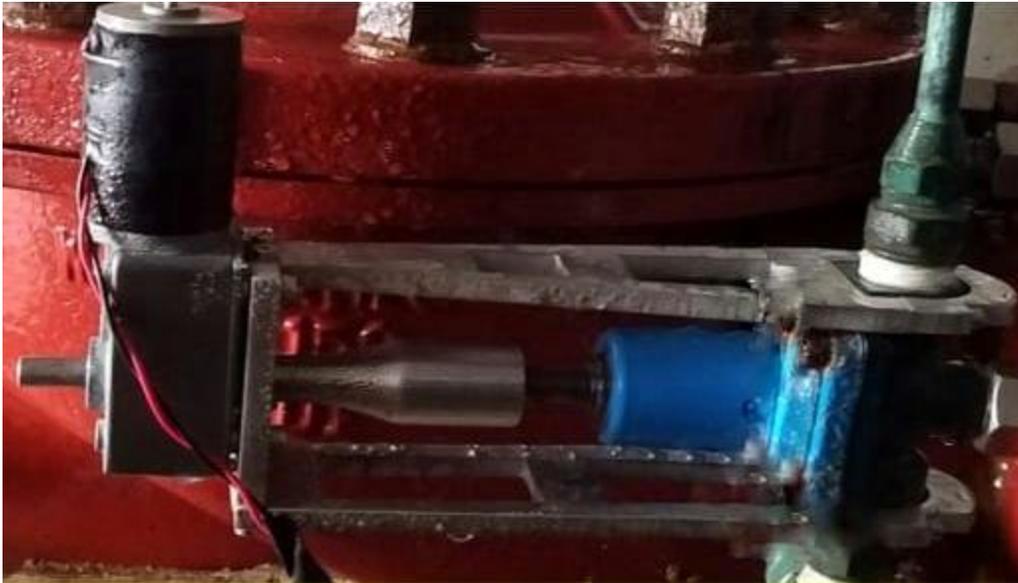


Fig. 57. Sistema mecánico implementado

CAPÍTULO 5. RECOPIACION Y ANALISIS DE DATOS

En este capítulo se detalla la recopilación y análisis de datos mediante macromedición y micromedición dividida en dos fases: sin gestionar y otra gestionando la presión de salida en la válvula reductora de presión en el sector 3.1 zonas 02 y 04. Luego, en el análisis de datos a nivel de macromedición, en la primera fase se examinan las curvas de caudal para determinar horarios en los cuales es factible gestionar la presión y en la segunda fase se analiza la reducción que se obtuvo en el caudal mínimo diario del agua potable debido a la modificación del valor de presión de salida en la VRP. En la micromedición se analiza el consumo de agua potable de la primera fase y se compara con el consumo de la segunda fase para observar si existe disminución debido a la gestión de presión.

5.1 Recopilación de datos

La recopilación de datos se divide en dos formas: macromedición y micromedición medición. La medición a nivel macro refleja el volumen de agua entregado por ETAPA en un periodo determinado y la medición a nivel micro muestra el volumen de consumo de los hogares, negocios e instituciones en el mismo periodo en el sector respectivo.

5.1.1 Macromedición

Para conocer el volumen de agua potable distribuido al sector 3.1 la empresa ETAPA instaló el equipo Chrono-flo 430, equipo de medición por ultrasonido, capaz de registrar valores cada cinco minutos de caudal expresados en litros sobre segundos (l/s). Estos valores de caudal se deben transformar a volumen para determinar el consumo total. El funcionamiento del equipo inició martes 10 de febrero de 2020 y registro datos hasta el día 4 de marzo de 2020. Este tiempo se divide en dos fases: La primera fase que comprende desde el mediodía del 10 de febrero hasta el mediodía del 18 de febrero de 2020, periodo en donde no se gestiona la presión. Por lo general, la presión de salida en la VRP en el primer periodo es de 60 psi, valor que se mantiene constante día y noche. Este valor de presión ha demostrado no generar molestias para la población del sector, sin embargo, hay que mencionar que, la presión de salida se puede modular manualmente según la necesidad del sector. El segundo periodo, en donde se gestiona la presión de salida nocturna de 60 psi a 40 psi con el prototipo instalado

en VRP, comprende desde el 18 de febrero después del mediodía hasta las 09h00 del 4 de marzo de 2020, fecha cuando se retira todos los equipos de la cámara.

En el primer periodo el equipo instalado registra 2304 muestras de caudal y luego se procede a ingresar estas muestras a Excel para su representación gráfica. El segundo periodo de recopilación, que contiene 4241 muestras. De la misma manera que se procede en la primera fase, se introducen estas muestras recopiladas de la segunda fase al Excel para obtener la curva de caudal presente en el sector.

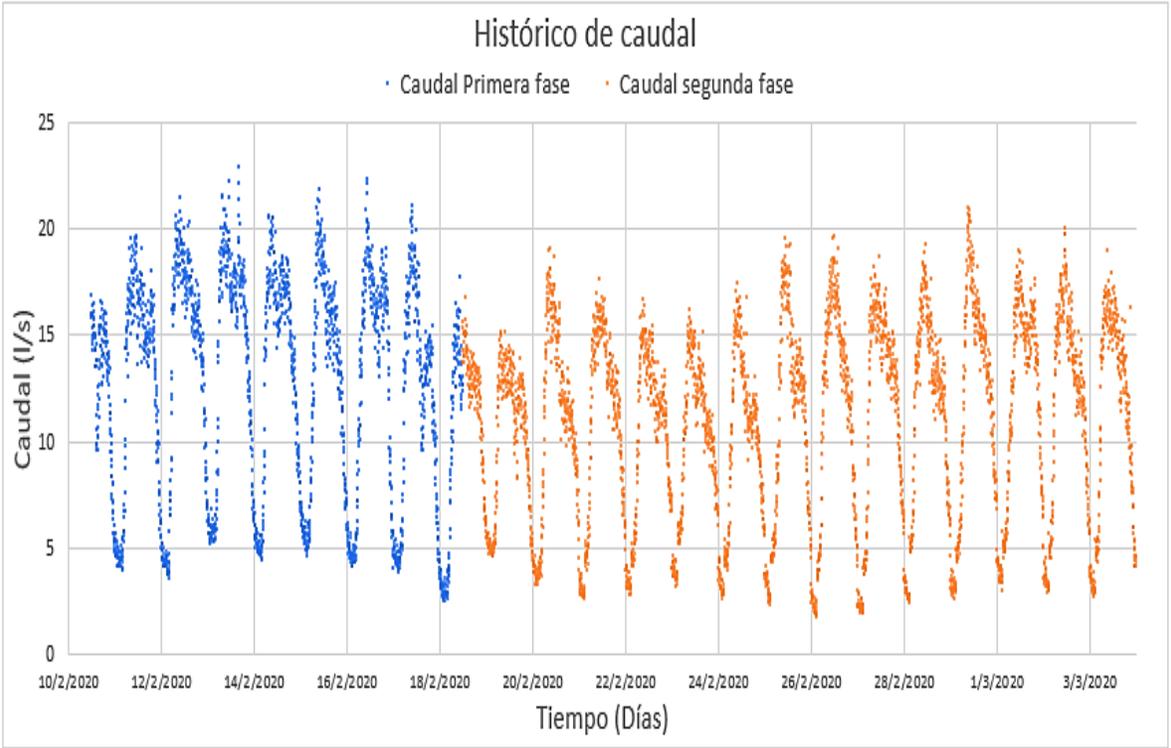


Fig. 58. Historial de caudal (l/s) del 10 de febrero al 4 de marzo de 2020

5.1.2 Micromedición

Para conocer los niveles de consumo micro, es decir, a nivel domiciliario se realiza la lectura de todos medidores de agua instalados en los subsectores 02 y 04. Esta zona de estudio cuenta con 914 medidores de agua y una pequeña parte de estos medidores se encuentran dentro de las viviendas por lo cual no se registró dicho valor de consumo, sin embargo, para estos casos se revisó el historial de los medidores con la finalidad de obtener un valor promedio de consumo. Este promedio se transformó para la cantidad de días que comprende la primera y segunda fase, es decir, 8 días y 15 días respectivamente.

5.1.2.1 Primera fase con presión de salida constante de 60 psi día / 60 psi noche

La primera lectura se realiza al mediodía 10 de febrero de 2020 y la segunda lectura, así mismo, al mediodía del 18 de febrero del mismo año. La diferencia entre ambas lecturas proporciona el consumo por medidor expresado en volumen en unidades de metros cúbicos.

En la primera lectura se registró el consumo de 871 medidores, quedando 43 medidores faltantes, los cuales fueron promediados según su historial de consumo y en la segunda lectura se registró 866 medidores, de estos 48 medidores faltantes, se promediaron según los registros de consumo promedio de ETAPA. Luego de realizar este proceso obtenemos que el consumo durante los 8 días es de 7602,18 metros cúbicos.

5.1.2.2 Segunda fase con presión de salida variable de 60 psi día / 40 psi noche

Como punto de partida se considera la segunda lectura de la primera fase y se realiza otra lectura por la mañana el día 4 de marzo de 2020 para contrastar el volumen de agua consumido en el sector. La lectura inicial cuenta con 866 registros de consumo y la final con 850 lecturas, por lo tanto, el consumo en 48 medidores para la lectura inicial y 64 medidores para lectura final fueron promediados según su historial. El valor de consumo total registrado es de 13628,05 metros cúbicos.

5.2 Análisis de datos

5.2.1 Macromedición

En los datos obtenidos de macromedición se analiza que el comportamiento de caudal sea semejante entre cada día. Además, se observa los horarios diarios donde el caudal es mínimo para efectuar una regulación de presión de salida con la finalidad de reducir estos caudales.

5.2.1.1 Primera fase con presión de salida constante de 60 psi día / 60 psi noche

En los registros de macromedición se analiza que el comportamiento diario sea semejante con el propósito de programar un único horario de modificación de presión de salida que será aplicado en la fase posterior, luego se determina en qué momento del día, de acuerdo al comportamiento del caudal mínimo, es el más propicio para reducir la presión a través de la VRP, aprovechando su capacidad para obtener la presión más baja posible sin afectar

notoriamente las condiciones del servicio, especialmente en el punto de control, el punto más alto del sector; es decir, el de menor presión de servicio.

5.2.1.1.1 Comparación de comportamiento de caudal

Para realizar la comparación del comportamiento de caudal en el sector es necesario tener los datos promediados por hora, como se observa en la Tabla 7, con la finalidad de obtener graficas sencillas únicamente para su análisis de comportamiento. Cabe mencionar que, en la Tabla 7 se muestra los valores de caudales diarios promediados por hora, y expresados en litros/segundos para realizar la comparación. La primera comparación que se realiza es de lunes a viernes, luego sábados y domingos y finalmente una comparación entre ambos. El valor de caudal registrado de agua potable es mayor en la mañana, luego desciende durante la tarde y finalmente alcanza los valores mínimos durante la noche y la madrugada. Esta conducta se repite con valores similares de lunes a viernes. Es importante acotar que, el caudal máximo se registra en la mañana, alrededor de las 09h00, mientras que el caudal mínimo se registra en la noche, alrededor de las 03h00 como se muestra en la Fig. 59. La variación en los valores de caudal de lunes a viernes es mínima, hasta 1 l/s, por lo que no representa una variación significativa para implementar un horario especial para cada día.

Tabla 7. Caudal promedio diario.

Hora	Q(l/s) Lunes	Q(l/s) Martes	Q(l/s) Miércoles	Q(l/s) Jueves	Q(l/s) Viernes	Q(l/s) Sábado	Q(l/s) Domingo
0:00:00	4,75	4,33	5,03	6,36	6,04	6,71	5,96
1:00:00	4,66	3,86	4,37	5,64	5,38	5,92	5,01
2:00:00	4,24	3,74	4,37	5,80	5,04	5,70	4,58
3:00:00	4,52	3,69	4,13	5,75	4,93	5,06	4,57
4:00:00	5,33	4,33	5,36	6,33	5,44	5,64	4,77
5:00:00	9,63	7,86	10,64	10,95	9,67	7,53	6,76
6:00:00	14,51	12,96	16,69	17,31	15,66	11,48	10,36
7:00:00	16,23	15,04	18,40	19,04	17,88	14,52	13,57
8:00:00	17,42	15,90	18,75	19,00	18,32	18,11	16,21
9:00:00	19,65	15,97	19,21	19,25	19,10	19,92	17,28

10:00:00	17,81	16,27	19,15	18,74	17,92	19,19	20,31
11:00:00	18,25	15,31	18,25	19,03	16,97	18,48	18,71
12:00:00	15,95	15,95	17,76	16,97	15,85	18,18	17,88
13:00:00	15,60	16,91	17,38	17,22	16,57	16,11	17,36
14:00:00	12,81	16,21	18,27	17,44	17,17	15,44	16,17
15:00:00	11,29	15,38	17,31	17,39	17,54	15,80	16,19
16:00:00	13,67	14,89	16,31	19,12	16,84	16,00	14,67
17:00:00	14,02	14,53	15,47	17,37	17,61	15,43	16,61
18:00:00	14,51	15,41	15,77	17,48	16,03	15,66	17,50
19:00:00	14,53	16,14	15,85	16,49	14,70	13,92	16,51
20:00:00	13,18	14,87	14,82	14,62	13,52	13,36	17,15
21:00:00	11,34	12,44	13,72	13,03	12,59	12,08	15,23
22:00:00	8,28	9,68	11,53	10,78	10,19	9,65	9,41
23:00:00	5,70	7,01	8,40	7,74	8,72	7,44	6,29

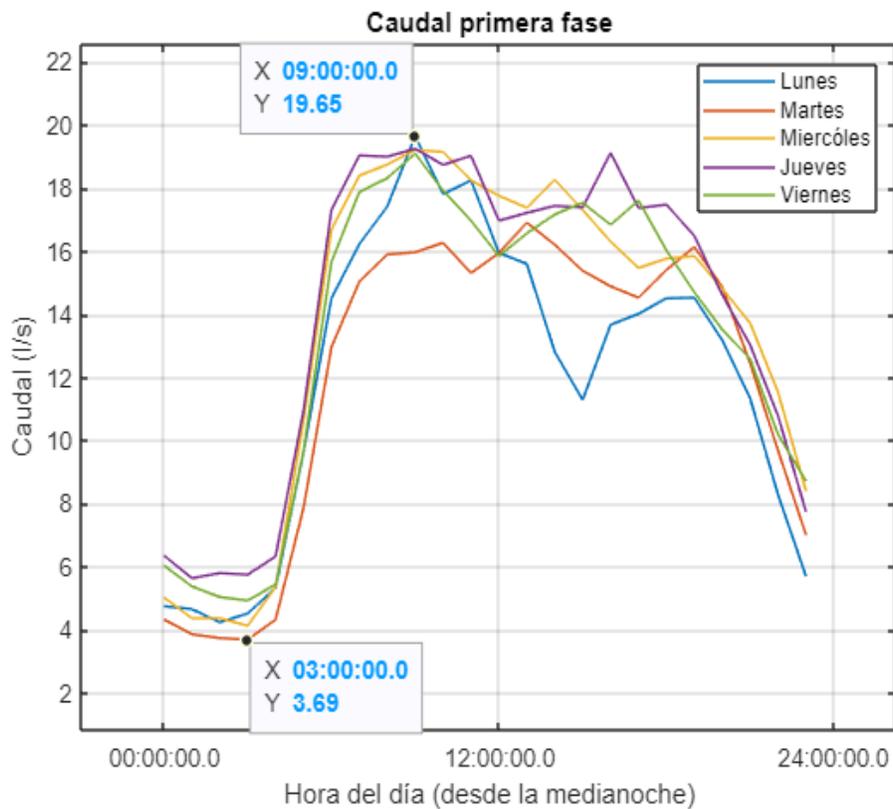


Fig. 59. Caudal de lunes a viernes

Así como en el caso anterior, se analiza el comportamiento de los valores caudal por hora, pero de los sábados y domingos. Los fines de semana tienen un caudal máximo y mínimo superior a los días que se mencionan anteriormente. Entre estos dos días de los fines de semana, el domingo registra un caudal mínimo inferior al sábado como se muestra en la Fig. 60; este comportamiento es muy normal que se puede explicar, ya que al ser un sector predominantemente residencial, los sábados la población se encuentra en su mayoría en las viviendas, generando un consumo mayor, y con el mismo razonamiento, los domingos al ser un día de descanso y preparación para el inicio de semana, la personas entran en una actividad reducida, especialmente en la noche. En general, los valores de caudal de sábados y domingos son cercanos, difieren hasta 1 l/s en los valores máximos, mínimos y media. Asimismo, esta variación es insignificante para implementar un horario especial para cada día y basados en la experiencia del Ing. Pablo Muñoz se determina que es conveniente utilizar la misma configuración de presión para estos días [2].

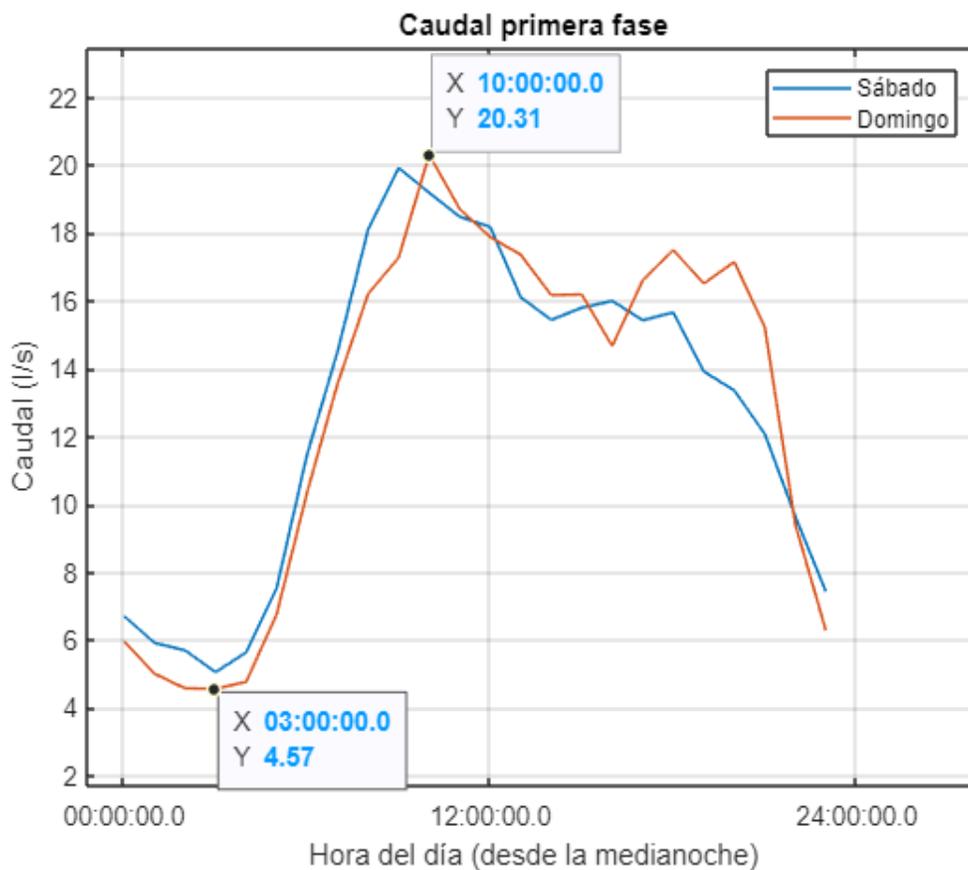


Fig. 60. Caudal sábados y domingos

Las Fig. 59 y Fig. 60 muestran que valores de caudales inyectados al sector de lunes a viernes son similares y sábados y domingos también, dado esto se analiza las gráficas combinadas. Como se aprecia en la Fig. 61 tenemos las curvas de caudal registradas por el equipo de lunes a viernes y, así como también las curvas de caudal de los sábados y domingos. El valor de caudal máximo promedio de lunes a domingo es de 19,19 l/s y el mínimo promedio es de 4,60 l/s. Una vez analizados todos los valores máximos y mínimos se determina que el comportamiento es similar entre estos días y la variación de caudal no representa una cifra importante para configurar horarios de gestión de presión específicos diario; con una gestión de presión general es suficiente para reducir el volumen de pérdidas por fuga de forma eficaz [2].

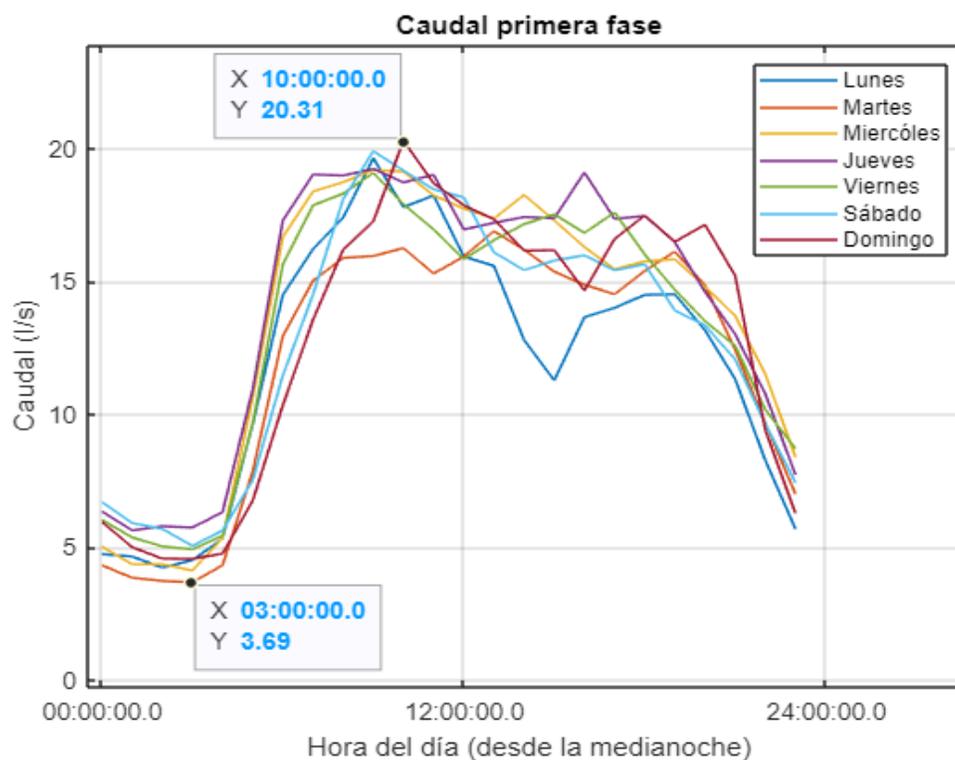


Fig. 61. Caudal semanal

Una vez definido que la gestión de presión es la misma para cada día porque tienen un comportamiento similar, es importante analizar los horarios de caudal mínimo diarios para realizar la gestión. Cabe recordar que, Etapa mantiene la presión de salida de la VRP de 60 psi, siendo la de entrada 70 psi, logrando una reducción de un 15%, sin embargo, es posible a través de la regulación dinámica, es decir de forma horaria, aprovechar de mejor manera la capacidad instalada de la VRP, sobre todo en las noches como se presenta a continuación.

5.2.1.1.2 Caudal mínimo

El análisis de caudal mínimo es importante porque al reducir la presión durante el horario de menor consumo, es decir mayor presión disponible, se puede reducir en gran medida las pérdidas por fuga, por este motivo se analiza el momento de registro de estos caudales mínimos para definir los horarios en que la presión de salida disminuirá. Cabe recordar que para este análisis del caudal mínimo el periodo seleccionado es de 8 días, desde el mediodía del 10 de febrero 2020 al 18 de febrero del mismo año.

A continuación, se presenta la Tabla 8 con los valores caudal mínimos diarios registrados que se dan durante la madrugada, excepto los días donde se realiza algún trabajo en la VRP, estos valores fluctúan de las 01h56 hasta las 03h56. Por el motivo mencionado anteriormente se pretende moderar la presión durante este lapso de menor caudal diario.

Tabla 8. Caudales mínimos.

Día	Q min (l/s)	Hora de registro
2/10/2020	5,06	3:56:27
2/11/2020	4,00	2:36:10
2/12/2020	3,61	2:26:07
2/13/2020	5,18	4:06:07
2/14/2020	4,45	2:06:07
2/15/2020	4,59	3:56:07
2/16/2020	4,10	1:56:07
2/17/2020	3,84	3:21:07
2/18/2020	2,52	2:56:07

A continuación, en la Fig. 62 se muestra la representación gráfica de los valores de caudal mínimo diario registrados por el equipo. El caudal mínimo promedio de este periodo es de 4,27 l/s.

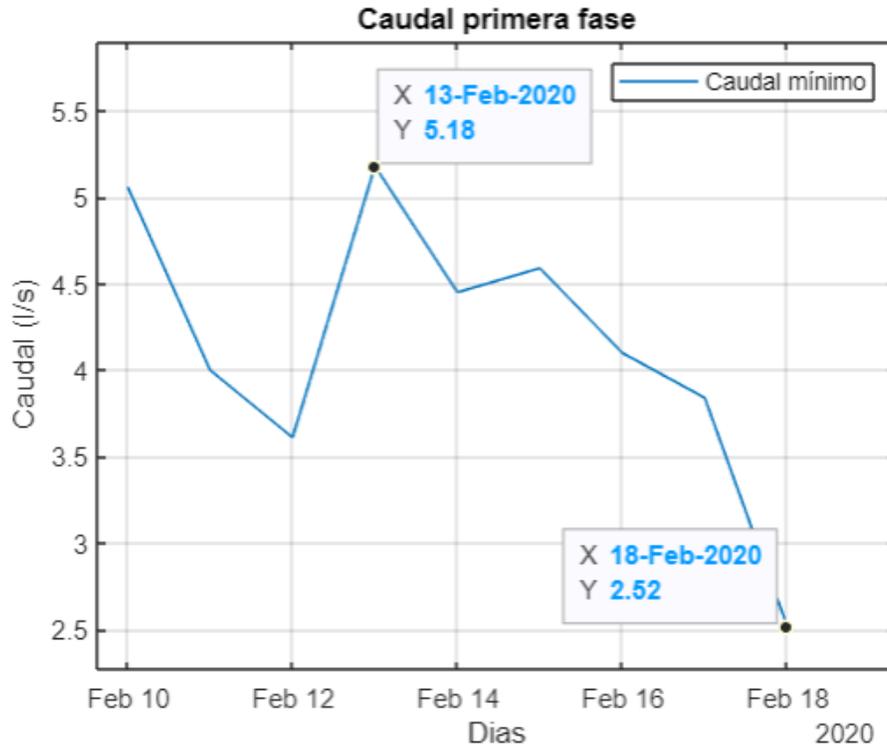


Fig. 62. Caudal mínimo típico

En el horario de los caudales mínimos se reduce la presión de salida a 40 psi, es decir una reducción de 20 psi en comparación a la anterior presión de salida de la VRP, para observar cómo afecta esto en el comportamiento del caudal y las pérdidas por fuga [2]. Sin embargo, aunque existen valores mínimos diarios entre las 01h56 y 04h06 no significa que se disminuye la presión en este rango. De acuerdo con la experiencia, esta reducción no podrá ser antes de las 00h30 ni después de las 03h30, puesto que en la mayoría de las zonas de la ciudad la actividad humana decae fuertemente a partir de las 00h30 y se reinicia rápidamente desde las 03h00 a 03h30. En este periodo se puede ver el menor consumo.

5.2.1.2 Segunda fase con presión de salida variable de 60 psi día / 40 psi noche

Una vez implementado el prototipo para el control de la posición del tornillo piloto que regula la presión de salida en la válvula reductora de presión del sector 3.1 es necesario verificar que el comportamiento del consumo de agua potable no cambie de manera drástica, por este motivo se realiza una comparación de los datos obtenidos en la segunda fase con los de la primera fase.

5.2.1.2.1 Comparación de comportamiento de caudal

Para la segunda fase se realiza un análisis similar a la primera fase para contrastar los cambios en el caudal. En la Tabla 9 se observan los nuevos valores de caudal diarios por hora obtenidos de las muestras registradas por el equipo Chrono-flo 430.

Tabla 9. Caudal semanal (18 de febrero-4 de marzo).

Hora	Q(l/s) Lunes	Q(l/s) Martes	Q(l/s) Miércoles	Q(l/s) Jueves	Q(l/s) Viernes	Q(l/s) Sábado	Q(l/s) Domingo
0:00:00	4,47	4,78	3,65	3,62	3,85	4,05	4,78
1:00:00	3,45	4,06	2,99	4,98	4,57	4,81	5,44
2:00:00	3,10	3,75	2,81	4,82	4,37	4,68	5,34
3:00:00	4,47	4,74	3,59	5,46	5,49	5,47	6,34
4:00:00	5,07	5,46	4,37	6,14	6,22	6,12	7,07
5:00:00	7,39	7,79	7,40	9,49	9,34	8,32	9,17
6:00:00	11,45	11,83	12,22	14,88	13,70	12,16	12,66
7:00:00	13,35	14,20	14,27	16,82	15,58	15,38	14,24
8:00:00	15,00	16,00	14,53	17,64	15,98	17,13	15,70
9:00:00	16,47	17,12	14,92	17,92	16,89	18,14	17,00
10:00:00	16,15	17,10	15,23	17,92	17,08	17,43	17,32
11:00:00	16,97	16,08	15,57	17,87	16,89	16,86	17,20
12:00:00	14,97	15,95	15,15	16,37	15,97	15,96	16,11
13:00:00	14,33	16,00	15,17	16,44	15,74	15,45	14,92
14:00:00	14,02	14,42	13,87	15,21	15,08	16,02	15,11
15:00:00	12,87	13,06	12,81	14,29	13,88	14,76	14,00
16:00:00	12,22	13,10	12,40	13,88	13,88	14,06	13,11
17:00:00	11,69	13,38	13,17	13,42	13,88	14,12	12,74

18:00:00	12,05	13,22	12,44	14,21	13,43	14,12	13,04
19:00:00	12,28	12,34	11,80	13,28	13,37	13,77	14,96
20:00:00	11,15	11,84	11,34	12,98	12,97	13,37	13,94
21:00:00	10,31	10,15	9,69	11,28	11,61	12,16	12,14
22:00:00	8,52	7,90	7,72	9,64	9,16	9,96	10,22
23:00:00	6,61	5,79	5,56	7,84	7,61	8,25	8,15

Para el segundo periodo el comportamiento es similar al primer periodo, es decir, los valores máximos de caudal se registran durante la mañana, entre las 09h00 y las 10h00, luego disminuye hasta alcanzar el mínimo valor durante la madrugada, entre 02h00 y 03h00. Esto quiere decir que no se modificó el comportamiento del caudal en el sector debido a la instalación del prototipo en la VRP, pero si existe una reducción en el valor del caudal mínimo nocturno, satisfaciendo la razón para la cual fue instalado. La Fig. 63 muestra los caudales registrados de lunes a viernes y la Fig. 64 los caudales de sábados y domingos para el segundo periodo.

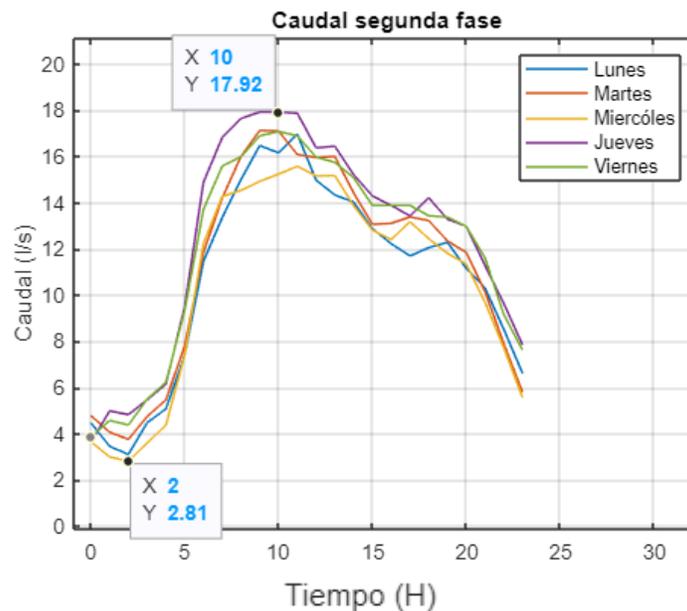


Fig. 63. Caudal lunes a viernes

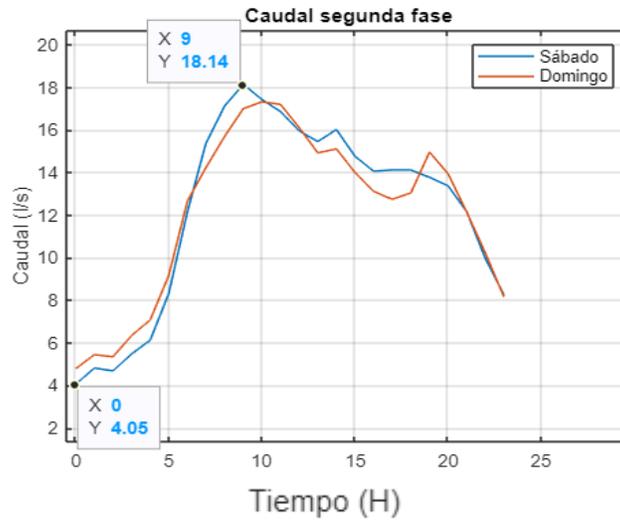


Fig. 64. Caudal promedio sábados y Domingos

Una vez mostrado que el comportamiento de lunes a viernes es similar, además sucede lo mismo los sábados y domingos, entonces se compara el comportamiento entre ambos como se muestra en la Fig. 65 donde los caudales de lunes a domingo son más aproximados entre ellos a diferencia del primer periodo. Después de haber analizado todos los valores de caudal mínimos se determina que el prototipo no modifica el comportamiento del caudal, sino solo su valor disminuye por efecto de decrementar la presión de salida durante la noche de forma automática, configurando en el valor mínimo aceptable, es decir 40 psi.

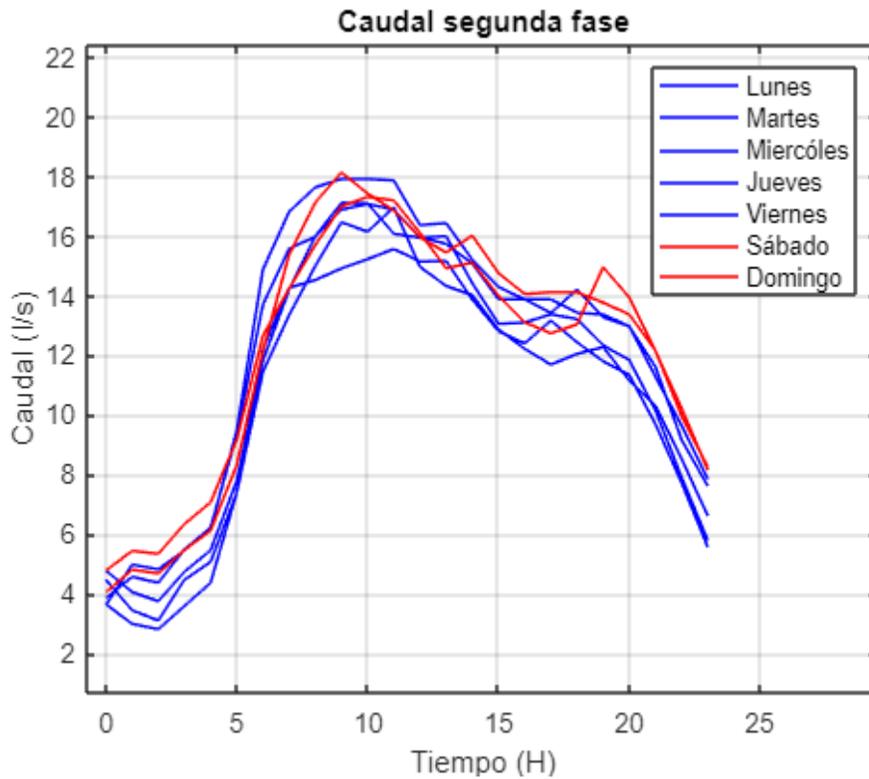


Fig. 65. Caudal de lunes a domingo

5.2.1.2.2 Caudal mínimo

El valor mínimo de caudal que se registra en la segunda fase es de 0,98 l/s el 4 de marzo de 2020 como se aprecia en la Fig. 66, pero caudal mínimo promedio del segundo periodo es de 2,63 l/s. La reducción de caudal en este horario debido a la gestión de presión, de forma automatizada, supone una disminución en las pérdidas por fuga.

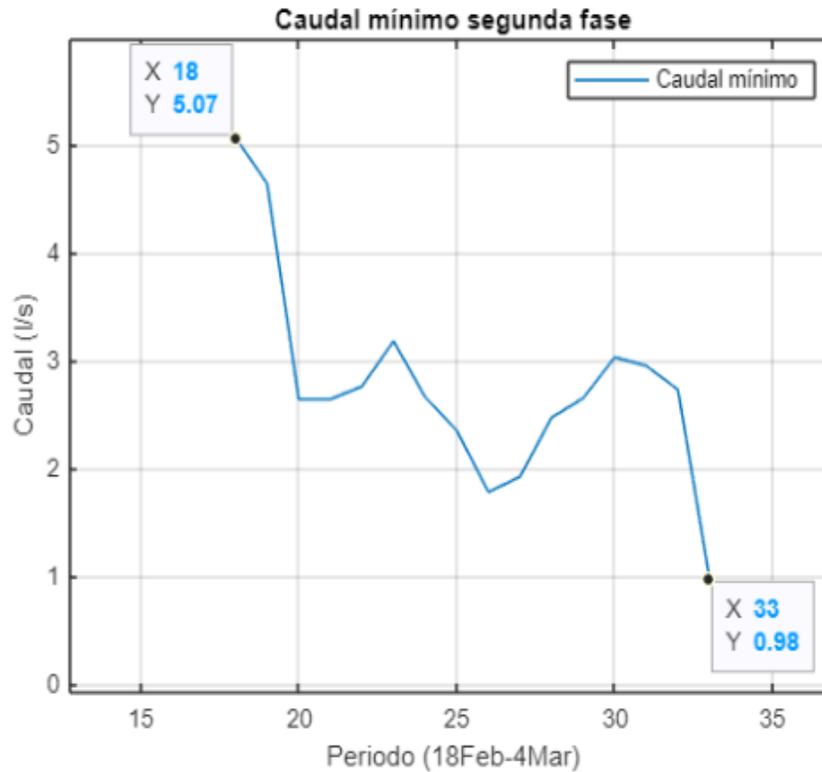


Fig. 66. Caudal mínimo

En la primera fase los caudales mínimos promedios de lunes a viernes son de 4,19 l/s, valor que se reduce para la segunda fase por la gestión de presión a 2,74 l/s, una reducción del 34,6% en el caudal mínimo de los días laborables. Los sábados y domingos de la primera fase registran un caudal mínimo promedio de 4,35 l/s, mientras que, en la segunda fase, en estos mismos días, se registra un caudal mínimo promedio de 2,9 l/s, lo que significa una reducción del 33,33 % en caudales mínimos de los fines de semana. Por último, la reducción total en el caudal mínimo promedio es de 40 %, porque se reduce el caudal mínimo de la primera fase de 4,27 l/s a 2,6 l/s para la segunda fase.

5.2.2 Programación de horarios en PLC

Una vez realizado el análisis de los datos se define dos presiones de salida una máxima y una mínima junto a su horario de funcionamiento. La presión de salida mínima será de 40 psi y actuará desde las 00h30 hasta 03h30 y la máxima de 60 psi estará presente durante el horario cuando no funcione la presión mínima, estos valores de presión garantizan no generar reclamos en el sector 3.1 ya que el usuario más alto en cota se encuentra muy próximo a la ERP y posee una cota similar. [2]. Por lo tanto, estos valores de presión y horarios se ingresan al software LOGO! Soft Comfort para que luego este programa sea cargado al PLC el cual controlará la presión de salida en la VRP mediante el motor mostrado en el capítulo anterior.

En la Fig. 67 se puede observar la programación de la presión de salida máxima en los dos bloques B005 y B006, mientras que en la Figura Fig. 68 se encuentra la programación de la presión de salida mínima, la cual se encuentra en los bloques B012 y B013. Los horarios programados son los mencionados anteriormente y se añadió en la programación dos revisiones para que el PLC sea capaz de comprobar que la presión de salida en VRP sea la establecida, estas revisiones se hacen cada dos horas, es decir, a las 05h30 y 7h30 programados en el bloque B019 para garantizar un buen funcionamiento y no generar molestias en el sector de la misma forma se establecen dos horas adicionales a la 01h30 y a las 02h30 para comprobar que se alcanza la presión mínima deseada programados en el bloque B021 sin presentar errores, cabe recalcar que para evitar efectos no deseados como roturas de tuberías debido al golpe de ariete que se puede presentar en la red de agua potable la presión de salida se modifica de manera progresiva durante 10 minutos.

El programa completo en donde se observan todos bloques de programación se encuentra en el anexo 10.2. En el programa final se pueden agregar más horarios y más configuraciones de presión en caso de que se desee afinar más los ajustes de presión a las diferentes horas del día. También es importante acotar que una vez realizado el programa y cargado en el PLC los horarios programados pueden ser reprogramados desde el mismo PLC, para esto se deberá cambiar los parámetros en los bloques antes indicados.

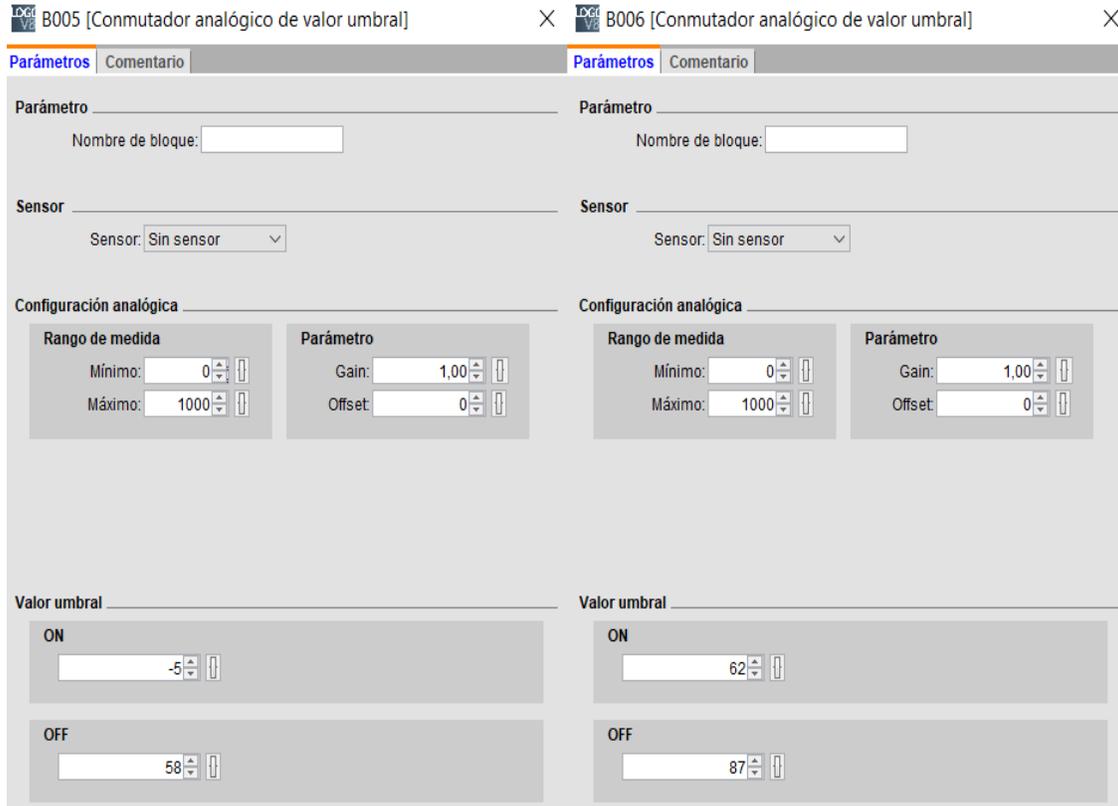


Fig. 67. Programación de presión superior

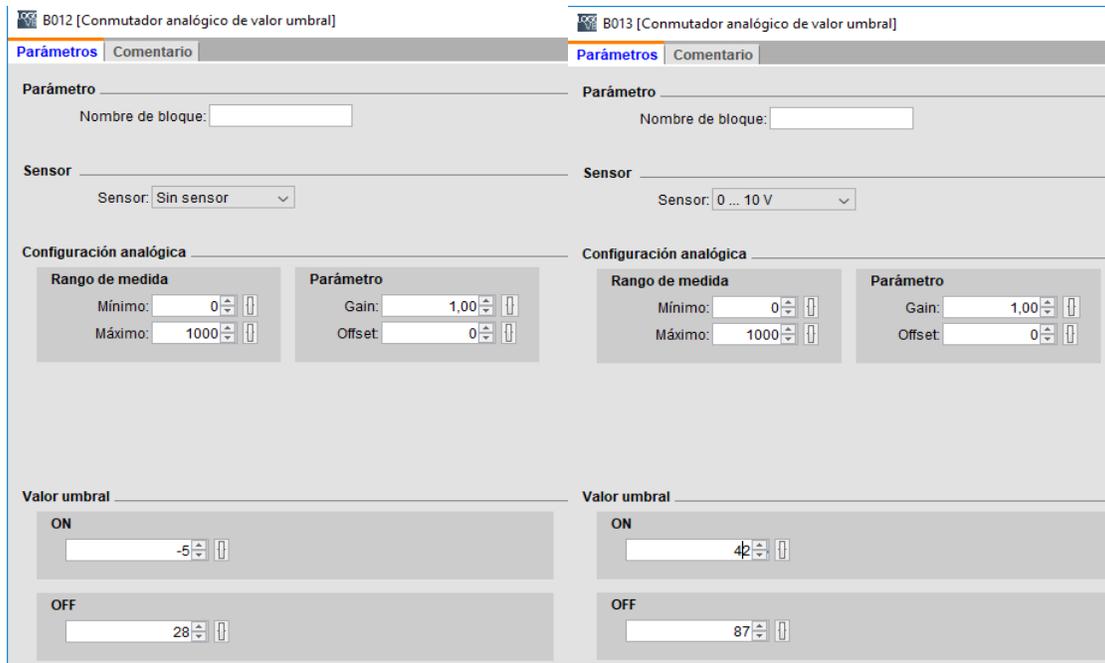


Fig. 68. Programación de presión inferior

5.2.3 Micromedición

Las micromediciones realizadas muestran que los volúmenes consumidos de agua potable son de 7602,18 metros cúbicos y 7268,29 metros cúbicos para la primera y segunda fase respectivamente. Sin embargo, se debe mencionar que se realizó una transformación en el volumen de la segunda fase de 15 días a un periodo de 8 días para comparar el consumo de la segunda fase con respecto a la primera con la misma cantidad de días. La diferencia de volumen de la primera fase con la segunda fase es de 333,89 metros cúbicos. Es preciso indicar que la reducción en la presión podría implicar una reducción del consumo de agua potable lo que significa una disminución en los ingresos de la empresa. Entendiéndose como consumo, el volumen que circula por el medidor, pudiendo ser aparte del consumo normal de la vivienda, fugas en las redes internas.

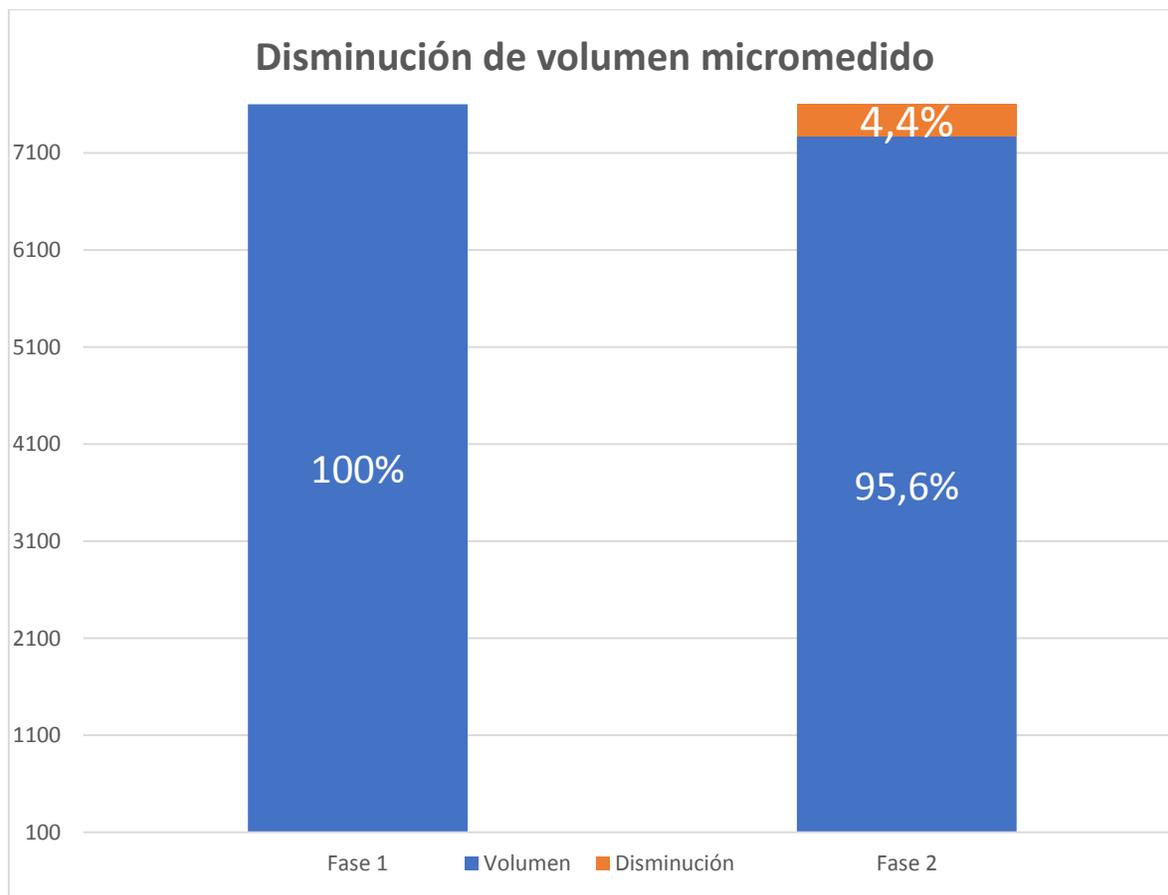


Fig. 69. Volumen Micromedido en las dos fases

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron de gestionar la presión de salida en el horario de menor consumo, es decir la reducción en el caudal nocturno de 00h30 hasta las 03h30, así como se analiza la reducción en el volumen en dicho instante. Otro parámetro que se muestra en este capítulo es el índice de agua no contabilizada de dos fases, sin gestionar y gestionando la presión de salida de la VRP. Luego de calcular el IANC para cada periodo, se observa la diferencia que existe en este índice entre ambos periodos y se determinará si la mayor pérdida de agua potable está en las tuberías de la red de distribución. Además, se expresa los beneficios a un año de gestionar la presión de salida de la VRP en el horario de menor consumo en términos económicos y de volumen.

6.1 Disminución del caudal y volumen de 00h30 a 03h30

En el primer periodo el caudal promedio entre las 00h30 y las 03h30 es 4,79 l/s cuando no se gestiona la presión, en cambio, en el segundo periodo, donde se regula la presión de salida en la VRP mediante el prototipo en este mismo horario, se obtiene un caudal promedio de 3,41 l/s, es decir, se reduce un 28,8% del caudal.

En cuanto al volumen en la primera fase durante el horario mencionado es de 390,33 metros cúbicos en un periodo semanal, mientras que en la segunda fase es de 244,09 metros cúbicos en la misma cantidad de días. El volumen de diferencia entre ambas fases es de 146,24 metros cúbicos, es decir, se reduce un 37,46% aproximadamente por la gestión de presión nocturna. Cabe recalcar que para segundo periodo solo se tomaron 8 días para comparar la reducción entre ambos periodos.

En la Fig. 70 se muestra el volumen total de ambas fases y la reducción del volumen que se obtiene en el horario mediante el prototipo de regulación de presión en la VRP.

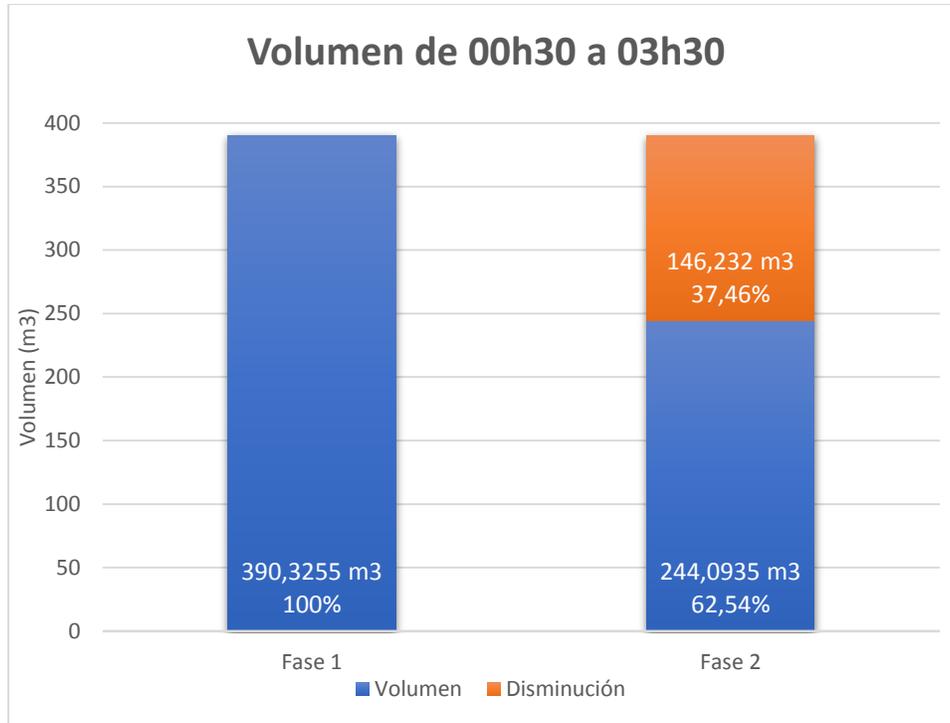


Fig. 70. Volumen micromedido total de las dos fases

6.2 IANC primera fase

Para calcular el índice de agua no contabilizada se utilizan los parámetros de volumen macromedido y micromedido, la micromedición mostrada anteriormente viene expresada en términos de volumen (m^3), sin embargo, la macromedición está expresada en términos de caudal (l/s), por lo tanto, el primer paso para calcular este índice es transformar dicho valor a volumen (m^3). Para calcular el índice de agua no contabilizada (IANC) de la primera fase sin gestionar la presión de salida en horario de caudal mínimo se debe aplicar la ec.(3) mostrada a continuación:

$$IANC = \frac{V_{Macromedido} - V_{Micromedido}}{V_{Macromedido}} * 100 \% \quad ec.(3)$$

Donde:

$V_{Macromedido}$ = Volumen de macromedición.

$V_{Micromedido}$ = Volumen de micromedición.

$$IANC = 13,71\%$$

El valor del índice refleja las pérdidas totales de agua potable en el sector 3.1. En la Fig. 71 se muestra de mejor manera este índice.

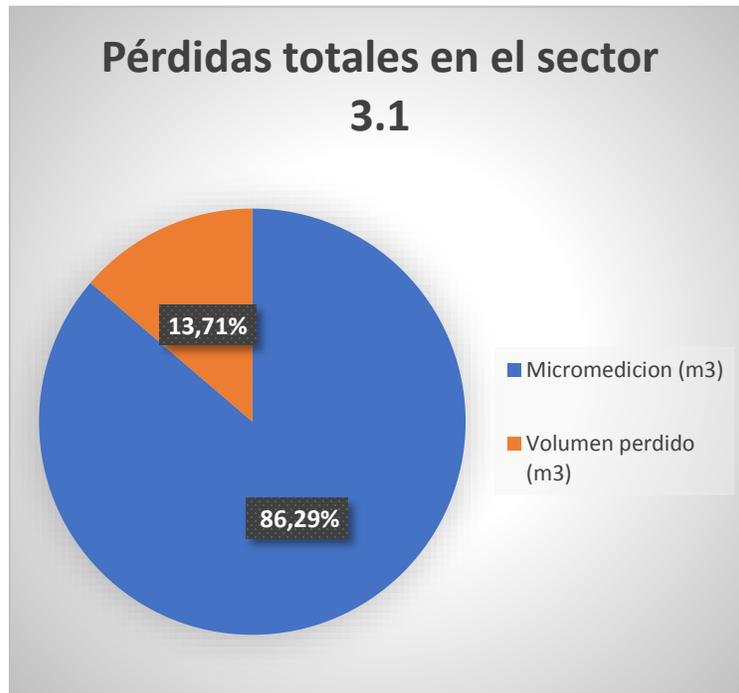


Fig. 71. Pérdidas sin gestionar la presión en 8 días

6.3 IANC segunda fase

Para calcular el índice de agua no contabilizada de la segunda se procede de la misma manera, es decir, mediante el ec.(3). Una vez que tenemos todos los datos en las unidades correctas el resultado es el siguiente:

$$IANC = 2,71 \%$$

Este valor del índice refleja igualmente la cantidad de agua potable que pierde la empresa en el sector 3.1, no obstante, es menor que el anterior índice y su reducción se debe en gran parte a la gestión de presión mediante el prototipo instalado en la VRP. En la Fig. 72 se muestra de mejor manera este índice.



Fig. 72. Resultados de gestionar la presión en 15 días

En la primera y segunda fase se calculan los índices de agua no contabilizada en un periodo sin gestionar y otro gestionando la presión de salida en la VRP respectivamente. En la segunda fase el porcentaje de agua no contabilizada se reduce de 13,71% a 2,71% en pérdidas totales. Esta reducción significa que la mayor cantidad de pérdidas son por fugas presentes en las tuberías de la red de distribución del sector 3.1 y gracias a la automatización de la VRP se obtuvo un mejor resultado. Es necesario aclarar que el índice de agua no contabilizada no solo refleja las pérdidas en las tuberías de la red de distribución, sino las pérdidas totales, como por ejemplo el volumen de agua no contabilizado por medidor debido a su sensibilidad, entre otras.

6.4 Pérdidas en términos de volumen y económicos

En términos de volumen, la empresa ETAPA anualmente pierde en el sector 3.1 alrededor de 20073,89 metros cúbicos de agua debido a que no existe una gestión de presión nocturna, es decir, en el horario de caudal mínimo. Por el contrario, las pérdidas de volumen de agua con el prototipo instalado realizando una gestión de presión de manera automatizada en presencia del caudal mínimo nocturno, se reducen a 12553,38 metros cúbicos de agua en las tuberías de la red de distribución por año, por lo que se ahorra 7520,51 metros cúbicos de agua, lo que significa un menor desperdicio y una mayor eficiencia productiva y ambiental.

En términos económicos, el volumen de agua perdido por no gestionar la presión representa \$2409 al año. Sin embargo, esta pérdida se puede reducir, si se realiza la gestión de presión nocturna, a \$1506 por año, es decir, se ahorra alrededor de \$903 por año como se muestra en la Fig. 73. Estos valores se calculan a partir del costo de producción en planta establecido en \$0,12 ctvs. por metro cúbico de agua potable. Es importante señalar que en Cuenca existen varias estaciones reductoras, por lo cual si se gestiona la presión en todas las zonas que tengan presiones elevadas, el ahorro volumétrico y económico para la empresa puede ser mayor mediante este prototipo.

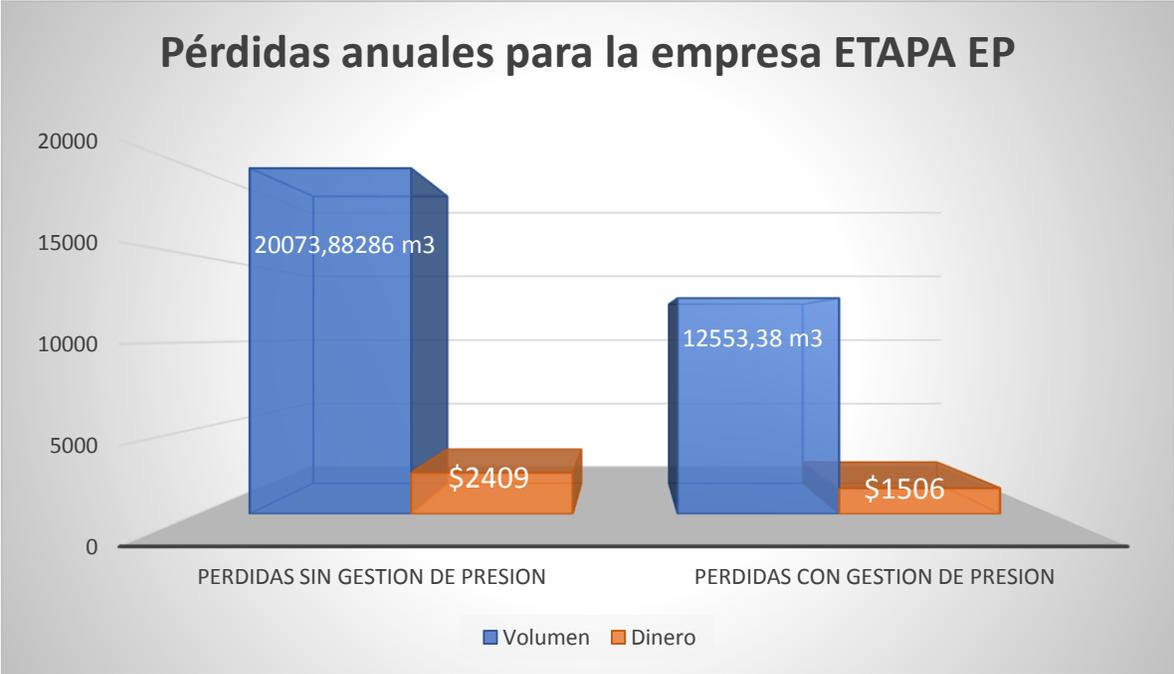


Fig. 73. Pérdidas anuales

La gestión de presión reduce las pérdidas por fuga en la red de distribución de agua potable, así como también reduce las pérdidas por fuga internas de los domicilios en el sector 3.1, y aunque la disminución de presión podría significar un menor volumen en la micromedición, se reduce el desperdicio de agua y este no incide de manera significativa en la facturación de la empresa, resultando beneficiados ETAPA y sus clientes en dicho sector.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró cumplir con el diseño del sistema electrónico de forma exitosa porque cada componente escogido cumple su función de manera correcta. El PLC elegido es sencillo de manejar, resistente y no requiere del software únicamente para su programación, la entrada analógica del PLC realiza correctamente la digitalización de la señal para su posterior manejo en el sistema de control, el transmisor de presión cubre el rango necesario de valores que necesita medir y el puente H no ocupa gran espacio en la caja metálica. Este sistema electrónico es abastecido por una batería de 12V y 105Ah que dura una semana por las condiciones ambientales.

El sistema mecánico cumple con los requisitos, el motor de 2Nm mueve el tornillo piloto con facilidad gracias al acople y la estructura mecánica soporta las cargas a las que está sometida por lo cual une de manera correcta el sistema electrónico con la VRP. El aluminio escogido para el acople y la estructura logra un correcto trabajo en el entorno húmedo junto a los tornillos de acero inoxidable para las uniones.

El prototipo cumple con el control de posición del tornillo piloto de la VRP para configurar el valor de presión de salida en 60 psi para el horario de mayor consumo y de 40 psi para el de menor consumo logrando disminuir las pérdidas por fuga en 7500 metros cúbicos de agua potable por año en la red de distribución y reduce el IANC del 13.71% al 2.71 % produciendo un ahorro para la empresa ETAPA de \$900 únicamente en las zonas 02 y 04 sin producir molestias en el sector 3.1 y la inversión para desarrollar este prototipo no sobrepasa los \$1000, por lo tanto es inferior a los dispositivos que se encuentran actualmente en el mercado.

Este prototipo puede ser utilizado también para realizar análisis en las diferentes válvulas reductoras de presión de la ciudad para determinar en qué sectores vale la pena ubicar un control de presiones, así como también para estudiar los efectos que una gestión de presión puede provocar. Además, al ser un prototipo, se puede realizar mejoras en el sistema mecánico junto al desarrollo de análisis más profundos para garantizar el funcionamiento permanente en la válvula. Otra opción que se puede implementar al prototipo es el IOT con una instalación de un punto wifi cercano de la cámara para que los datos registrados se guarden en la nube y controlar la presión de salida desde un dispositivo.

REFERENCIAS

- [1] T. J. y L. A. O., «Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships.,» de *IWA Specialised Conference 'Leakage 2005'*, Halifax, 2005.
- [2] P. Muñoz Bravo, Interviewee, *Pérdidas por fuga de agua potable en la red de distribución de ETAPA EP*. [Entrevista]. 19 Septiembre 2019.
- [3] S. -. Zemansky, «Mecánica de fluidos,» de *Física universitaria volumen 1. Decimosegunda edición*, México, PEARSON EDUCACIÓN, 2009, pp. 469-470.
- [4] R. Resnick, D. Halliday y K. Krane, «Dinámica de fluidos,» de *Física Vol 1.*, México, Continental, p. 445.
- [5] M. Potter y D. Wiggert, «Flujo en tuberías,» de *Mecánica de fluidos*, Thomson, p. 511.
- [6] L. F. Sandoval, J. R. Ruiz, Z. Flores y A. B. Juárez León, «Sistema para control y gestión de redes de agua potable de dos localidades de México,» *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 34, n° 1, 2013.
- [7] J. M. Matés, *El desarrollo de las redes de agua potable: modernización y*, Universidad de Jaén.
- [8] M. P. Monsalve Monroy y J. A. Uribe Gomez, *Programa de reducción de pérdidas de agua en la red de distribución del sistema de acueducto del municipio de San Gil*, Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana, 2011.
- [9] INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, *Conceptos de reducción y control de pérdidas,*, México: FONDO PARA LA COMUNICACIÓN Y LA EDUCACIÓN AMBIENTAL, 2007.
- [10] VAG, GIZ, IWG-KIT y IEC-FHNW, «Guía para la reducción de las pérdidas de agua,» Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo, Alemania, 2010.
- [11] B. L. R. y M. P. Kingdom, «The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries,» World Bank, Washington, 2006.
- [12] F. M. J. G.-S. R. P. Antonio Vela, *ESTRATEGIAS ÓPTIMAS PARA LA REDUCCIÓN DE PERDIDAS DE AGUA EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO*, Universidad Politécnica de Valencia.

- [13] J. S. R. y. K. G. Thornton, *Water Loss Control*, McGraw-Hill, 2008.
- [14] M. Farley, *Leakage Management and Control*, WHO, 2001.
- [15] A. R. Caldera Ortega, *Agua, participación privada y gobernabilidad : Cambio institucional en el servicio de agua potable y alcantarillado en la ciudad de aguascalientes (1989-2001).*, México, D.F: Red Caleidoscopio, 2006.
- [16] O. A. Benavides, «Repositorio Universidad de los Andes,» Diciembre 2003. [En línea]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/21267/u250662.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 15 Enero 2020].
- [17] BERMAD, *Válvula reductora de presión Serie 700*.
- [18] «Controlvalves,» [En línea]. Available: controlvalves.com. [Último acceso: 01 Noviembre 2019].
- [19] Palmer environmental, *ControlMate Users's Guide*, CM UG Issue 1, 2001.
- [20] Hwm-latinoamerica.com, «PEGASUS+ 3G CONTROLADOR DE VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESIÓN,» 2019. [En línea]. Available: https://hwm-latinoamerica.com/wp-content/uploads/2019/06/PEGASUS-3G_LAT.pdf. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [21] Cla-val.es, «CLA-VAL 90-35 Válvula de modulación de presión con conmutación por electroválvula,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.cla-val.es/wp-content/uploads/2019/07/090035-V.-modulacion-contr.-electrova%CC%81lvula.pdf>. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [22] Cla-val.es, «CLA-VAL PCM 90-01 Válvula de estabilización de presión aguas abajo Piloto hidráulico motorizado 4-20 mA,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.cla-val.es/wp-content/uploads/2019/07/Cla-Val-PCM-90-01-Va%CC%81lvula-estabilizadora-de-presion-ag.abajo-con-piloto-hidraulico-motorizado-4-20mA.pdf>. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [23] Cla-val.co.uk, «CLA-VAL D12 Low Power Electronic Valve Controller,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.cla-val.co.uk/user/products/Datasheets/D12001DE.pdf>. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [24] G. A. O. Masek, Artist, *EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE*. [Art]. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006.

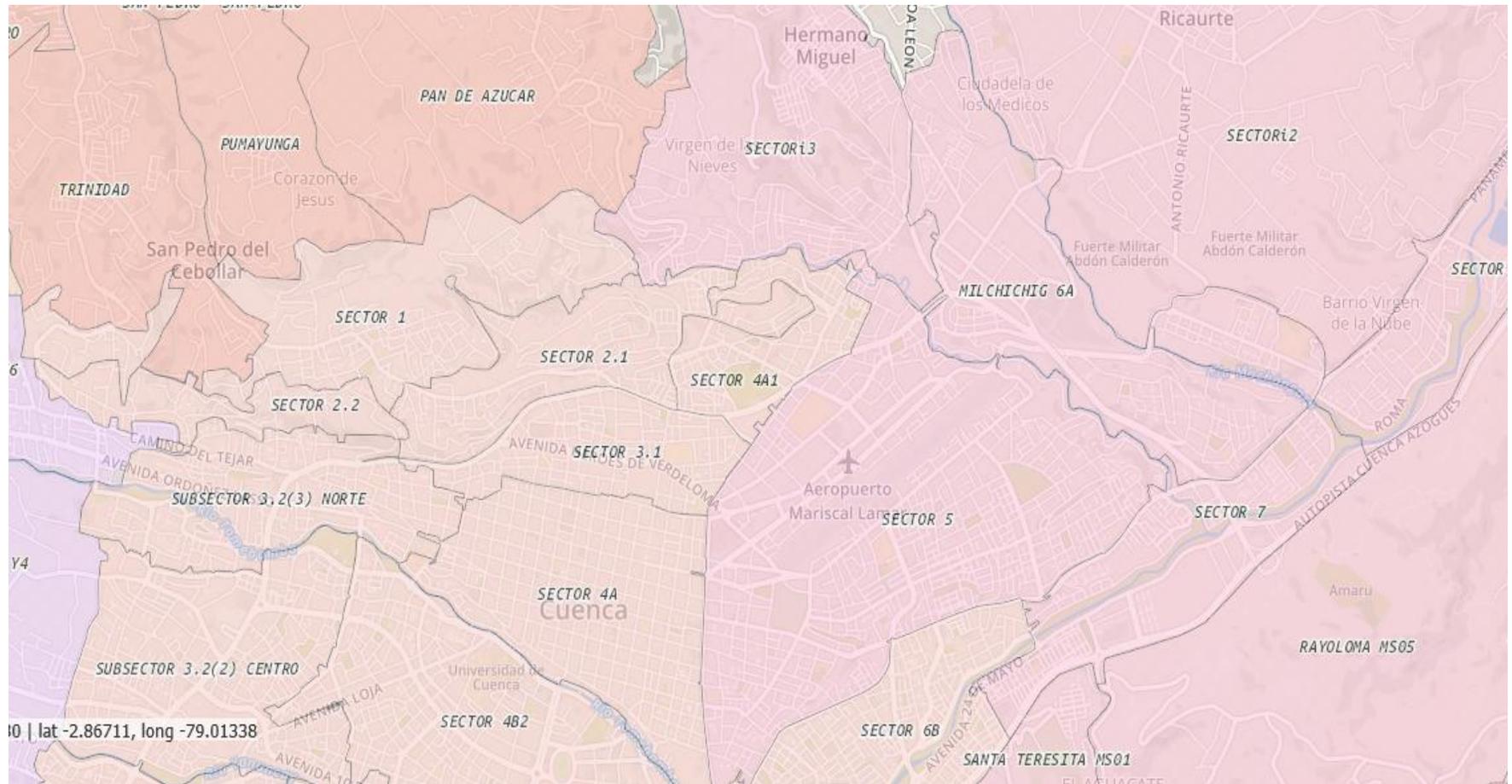
- [25] J. Franzini B. y E. J. Finnemore, «Golpe de ariete,» de *Mecánica de fluidos con aplicaciones en Ingeniería*, Madrid, McGraw-Hill, 1999, p. 358.
- [26] V. L. Streeter, «Descripción del fenómeno del golpe de ariete 4ta edición,» de *Mecánica de fluidos*, México, McGraw-HILL, 1996, p. 634.
- [27] J. A. Soriano, «Cierre Gradual,» de *Mecánica de fluidos incomprensibles y turbomáquinas hidráulicas 5ta Edición*, Madrid, Ciencia 3, 2002, pp. 400-410.
- [28] M. C. Potter y D. C. Wiggert, «Velocidad del sonido y el número de Mach,» de *Mecánica de fluidos 3ra Edición*, Thomson, p. 377.
- [29] T. J. Maloney, «Sistemas realimentados y servomecanismos,» de *Electrónica Industrial Moderna*, Mexico, Prentice Hall, p. 294.
- [30] R. C. Hibbeler, «Momento de un par,» de *Ingeniería Mecánica Estática Decimo Segunda Edicion*, Prentice Hall, p. 148.
- [31] Plastigama, *PRESIÓN UZ Sistemas de presión por sellado elastomérico U/Z*, 2015.
- [32] M. A. Boles y Y. A. Cengel, «Tabla A-3 Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes,» de *Termodinámica 7ma Edición*, México D.F., McGRAW-HILL, 2012, p. 912.
- [33] ZHENG, «zhengkemotor.com,» [En línea]. Available: zhengkemotor.com/product/zhengkemotor_product_Dc_Worm_Gearmotor_31zy_634JSX_zwl_31zy.html. [Último acceso: 2019 Diciembre 27].
- [34] naylampmechatronics, «naylampmechatronics.com,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/drivers/11-driver-puente-h-l298n.html>. [Último acceso: 27 Diciembre 2019].
- [35] STMICROELECTRONICS, *L298N Datasheet*, 2000.
- [36] SIEMENS, «siemens LOGO! Basic Modules,» [En línea]. Available: <https://new.siemens.com/us/en/products/automation/systems/industrial/plc/logo/logo-basic-modules.html>. [Último acceso: 27 Marzo 2020].
- [37] SIEMENS, «siemens LOGO! Expansion Modules,» [En línea]. Available: <https://new.siemens.com/fr/fr/produits/automatisation-entrainement/systemes-automatisation/industrial/plc/logo/logo-expansion-modules.html>. [Último acceso: 27 Marzo 2020].

- [38] N. S. Nise, «Control System Definition,» de *Control Systems Engineering 6th edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2011, p. 2.
- [39] K. Ogata, «Introducción a los sistemas de control,» de *Ingeniería de control moderno*, Prentice Hall, 2005, p. 6.
- [40] A. Serna Ruiz, F. A. Ros García y J. C. Rico Noguera, «Los sensores y su clasificación,» de *Guía práctica de sensores*, España, Creaciones Copyright, 2010, p. 3.
- [41] SIEMENS, «support.industry.siemens.com,» 16 Febrero 2004. [En línea]. Available: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/18301878/conexi%C3%B3n-de-un-sensor-a-32-hilos?dti=0&lc=es-AR>. [Último acceso: Enero 10 2020].
- [42] Siemens, LOGO! Manual, Siemens AG, 2003.
- [43] J. L. Argüelles Ojeda , *Proyectos Seis sigma*, Reverté, 2018.
- [44] H. Gutierrez Pulido y R. d. I. V. Salazar, *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*, McGraw-Hill Interamericana, 2013.
- [45] J. L. Otegui, *Análisis de fallas: Fundamentos y aplicaciones en componentes mecánicos*, Eudem, 2013.
- [46] G. Castro Rosales y N. P. Sisto, «"Precio y manejo del agua urbana en México.",» 2015.

ANEXOS I UBICACIÓN DEL SECTOR

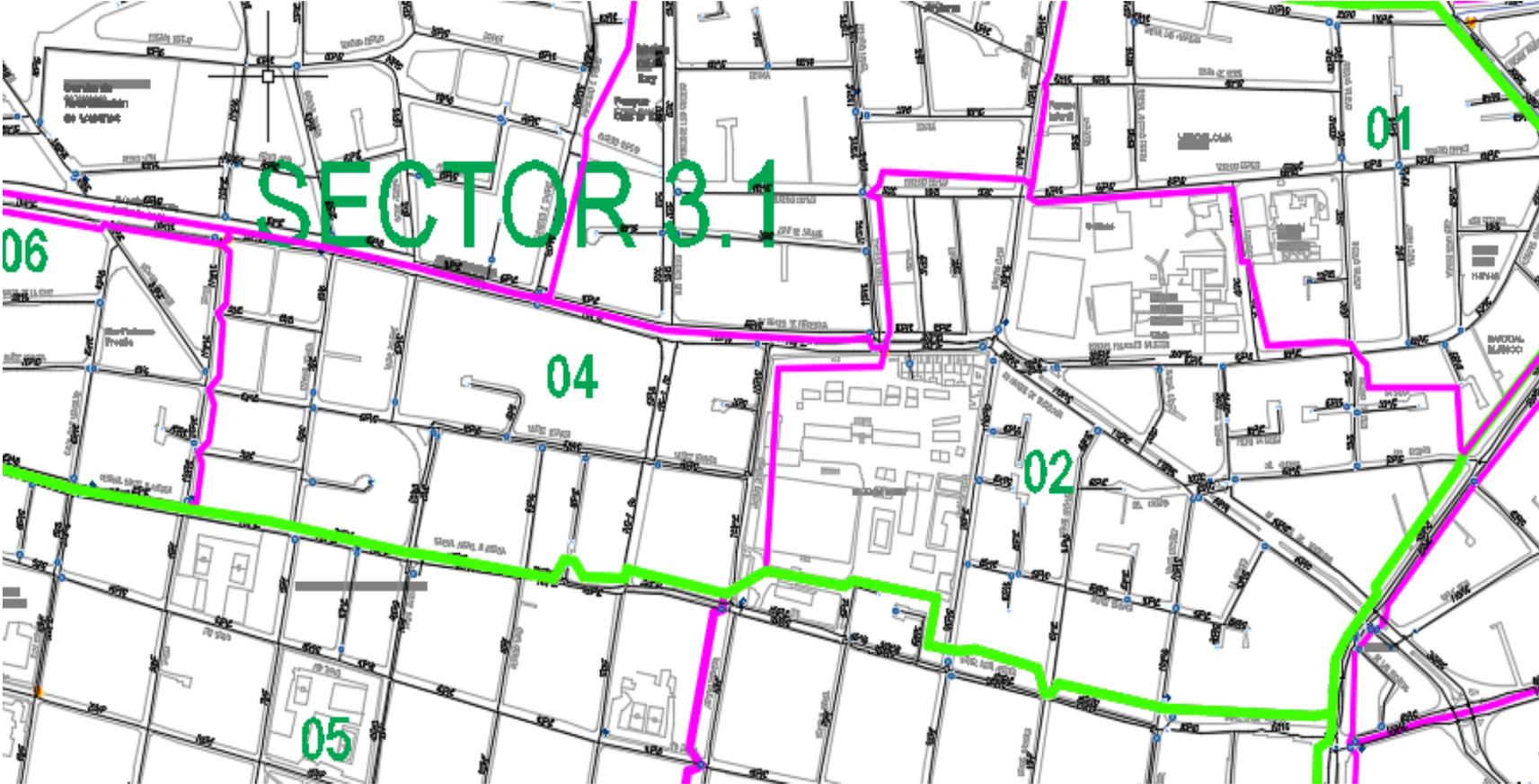
9.1 Mapa de sectores de Cuenca

La siguiente Figura muestra como la empresa ETAPA tiene sectorizado la ciudad de Cuenca para la distribución de agua potable.



9.2 Mapa sector 3.1 de Cuenca

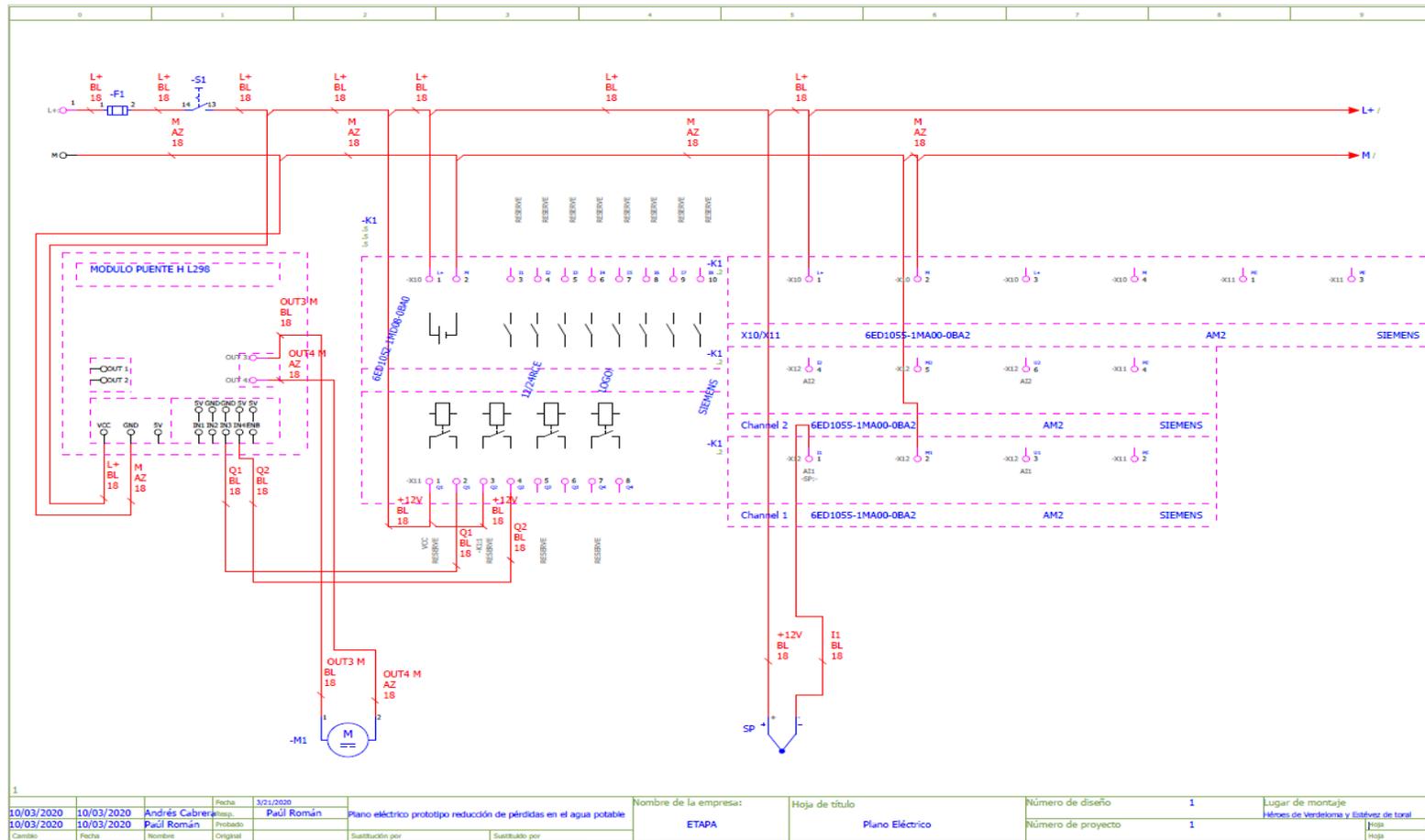
A continuación se muestra el sector 3.1 donde se realiza la regulación de presión.



ANEXO II SISTEMA ELECTRÓNICO

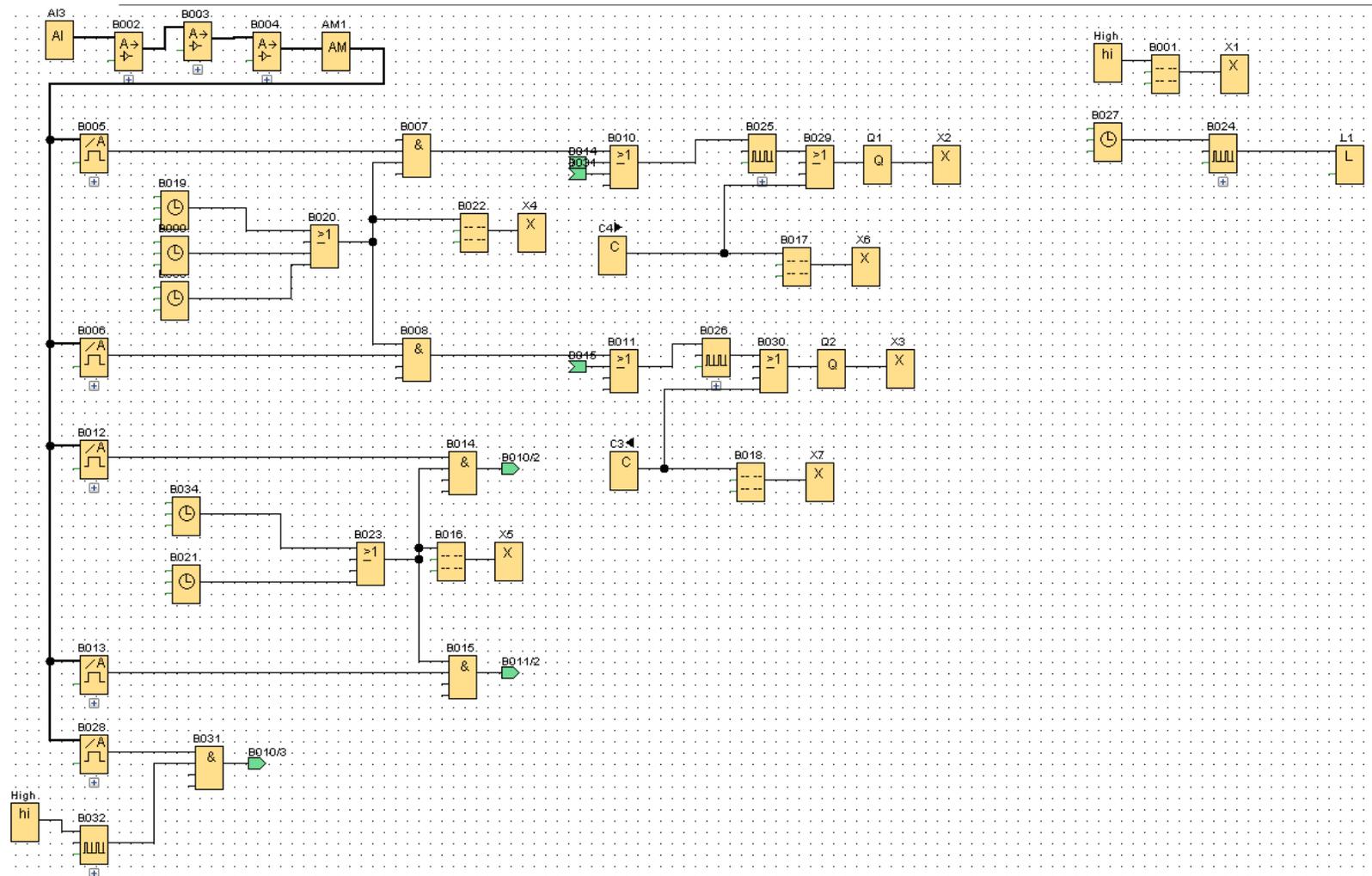
10.1 Plano del sistema de control

La Figura mostrada a continuación detalla las conexiones realizadas para el sistema de control



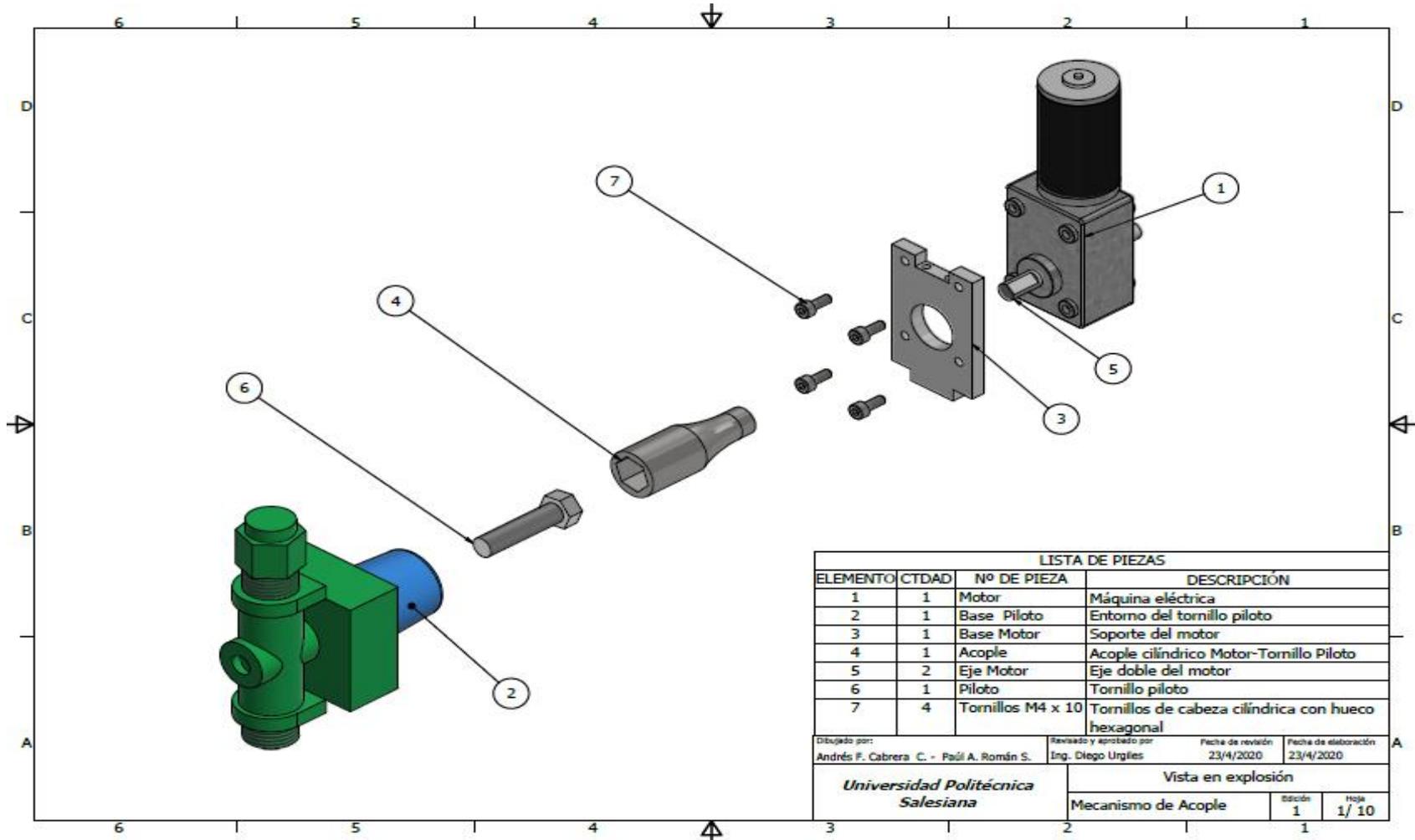
10.2 Programación de PLC

La siguiente figura muestra la programación realizada en el software LOGOSoft Comfort

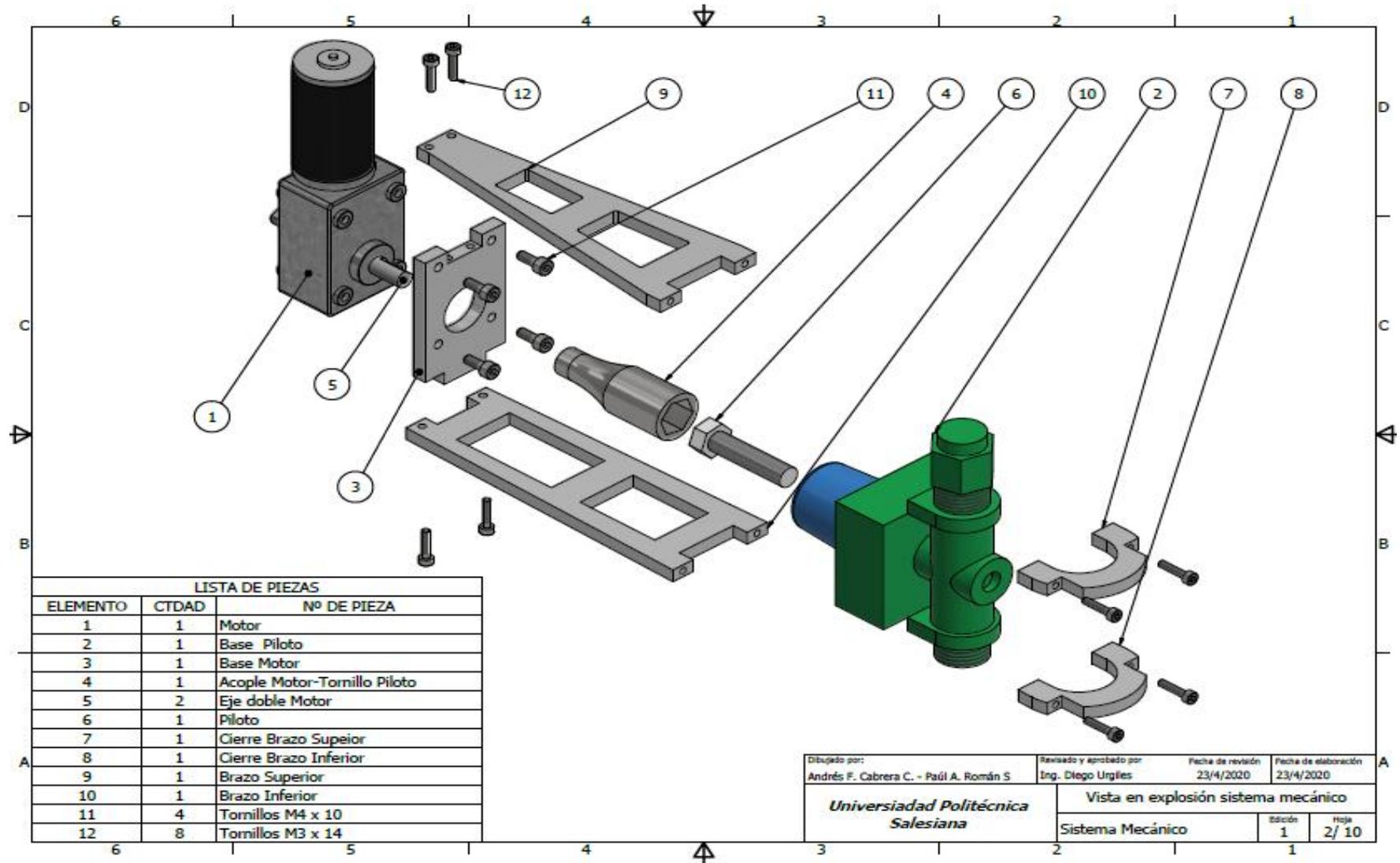


ANEXO III PLANOS MECÁNICOS

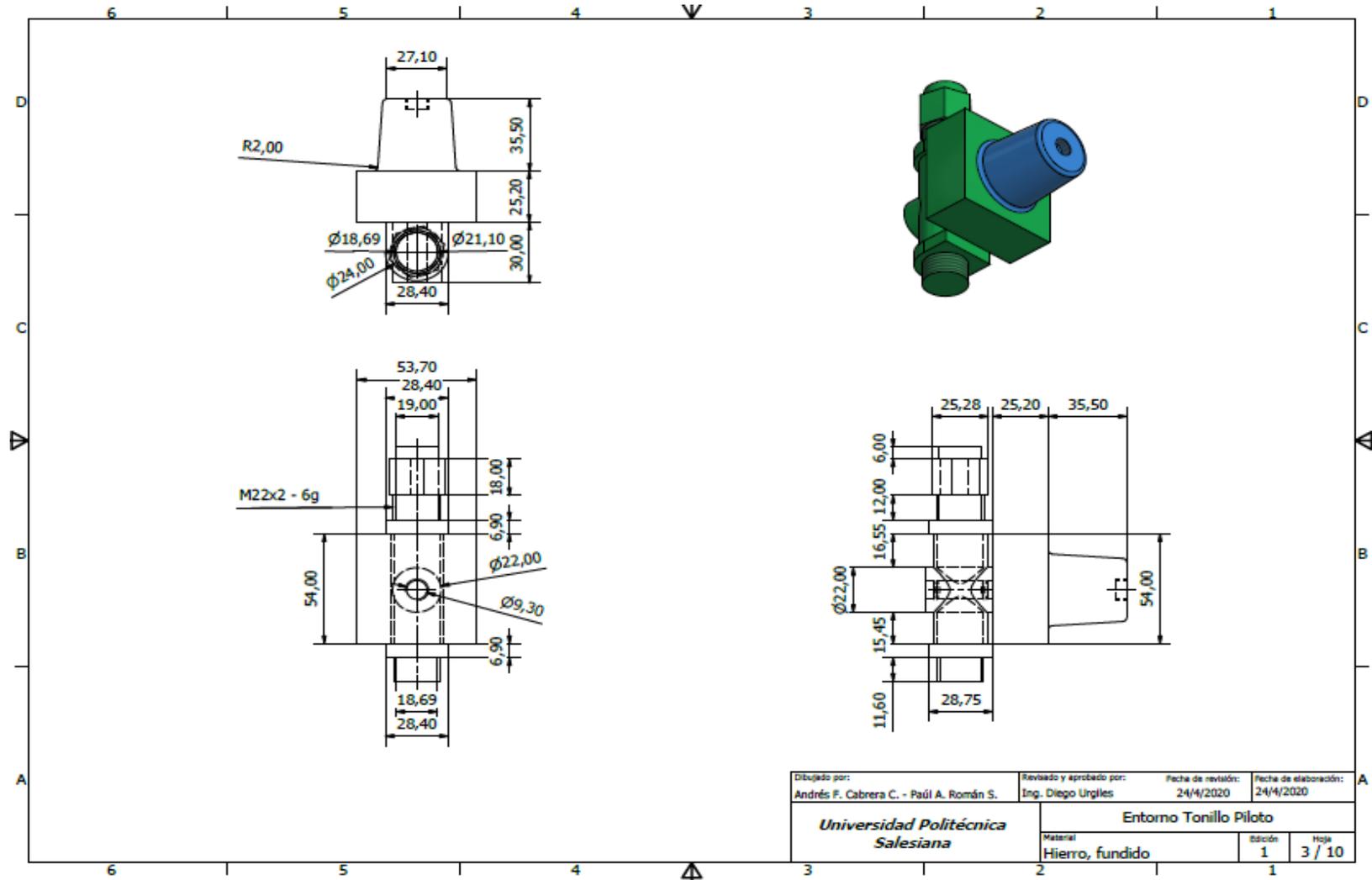
11.1 Vista explosionada sistema de acople



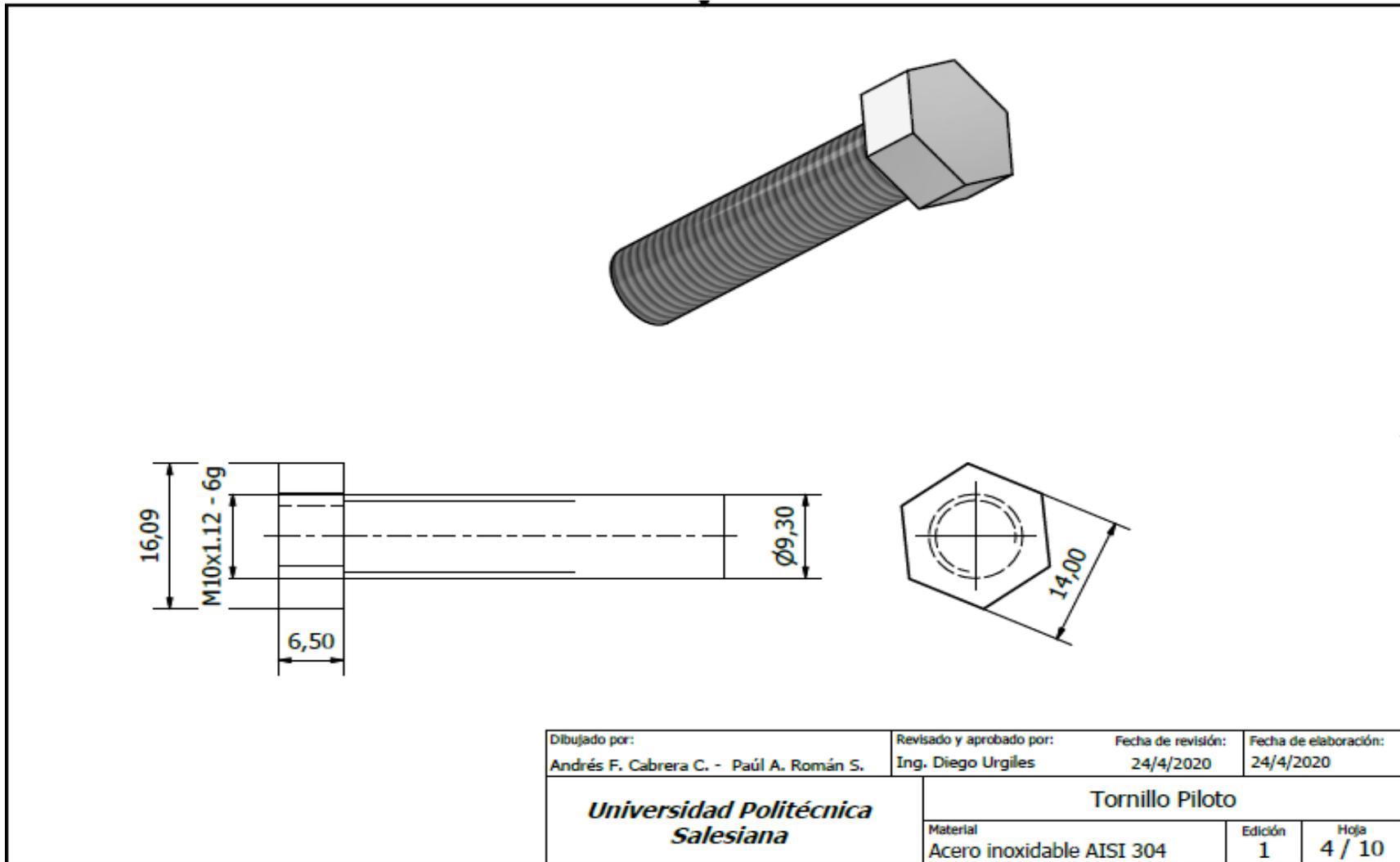
11.2 Vista explosionada sistema mecánico



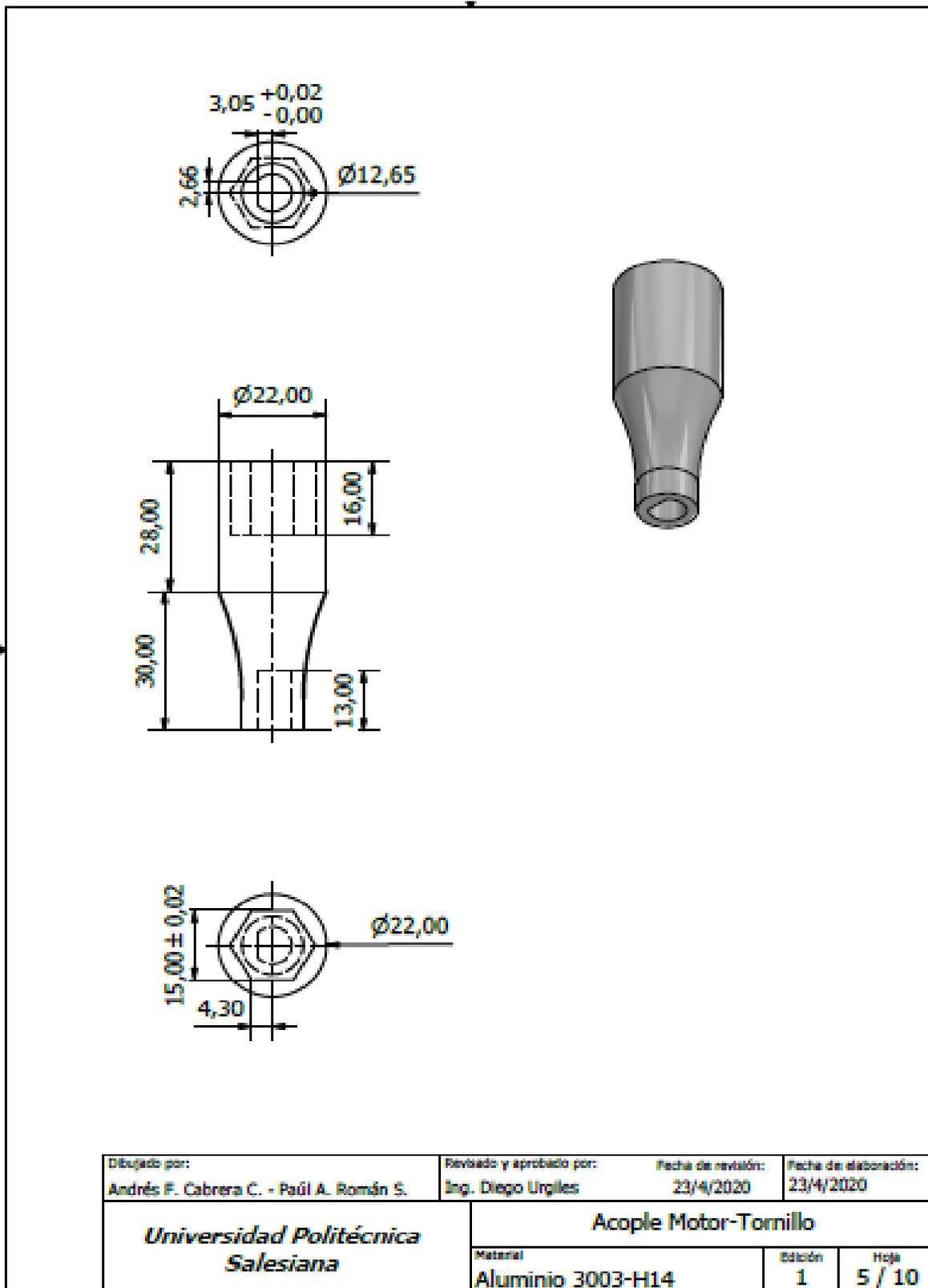
11.3 Entorno tornillo piloto



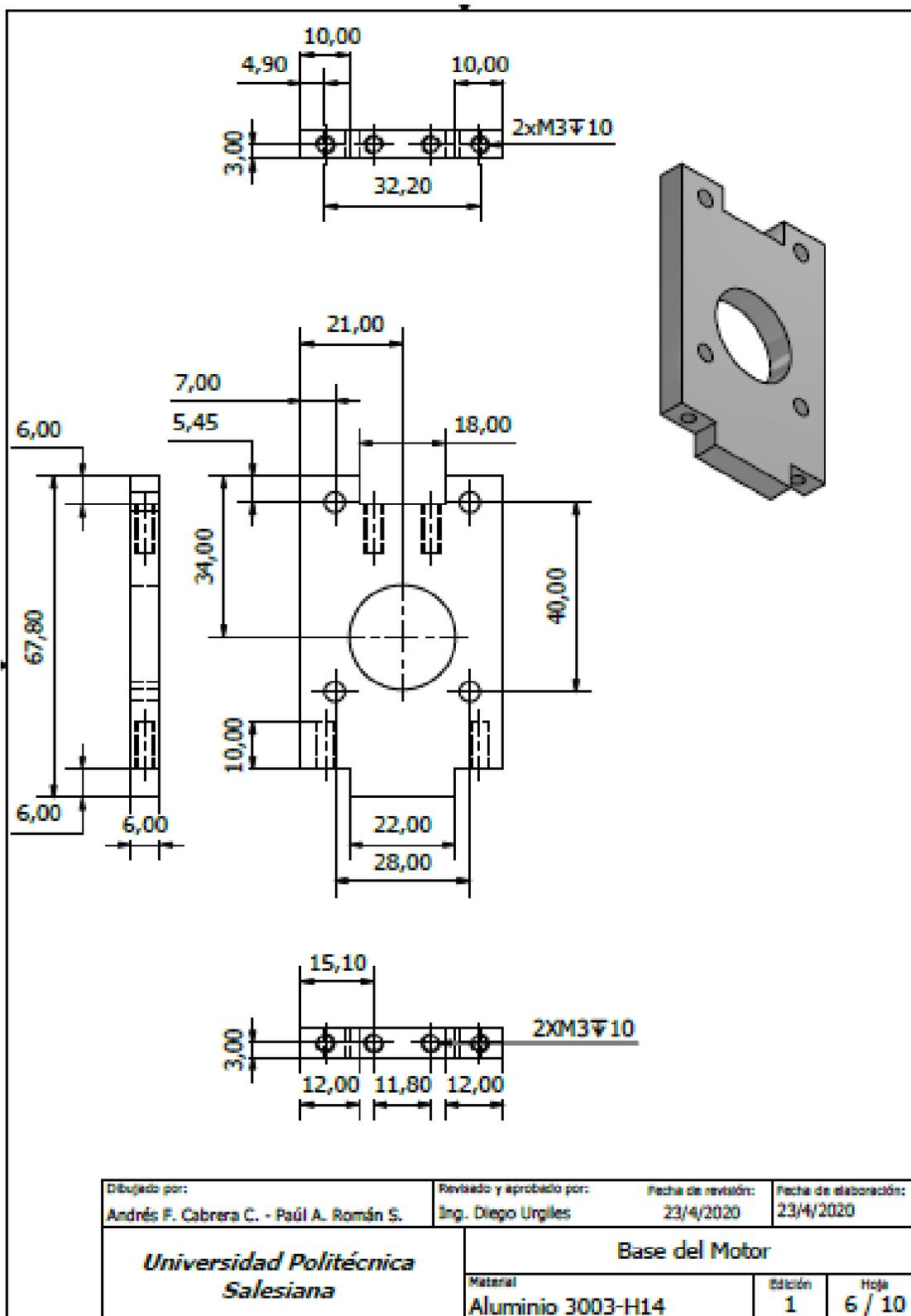
11.4 Tornillo piloto



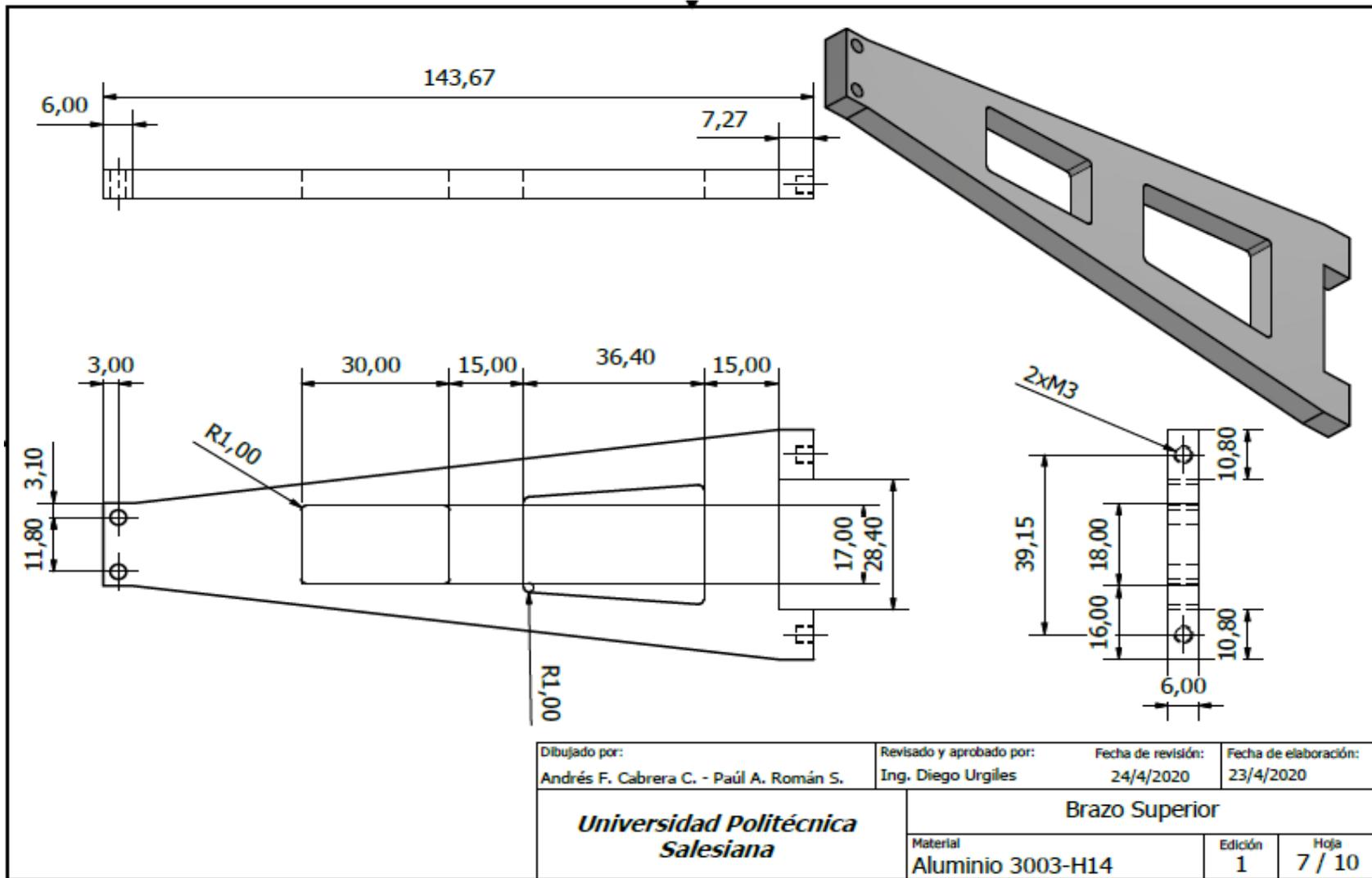
11.5 Acople tornillo piloto-motor



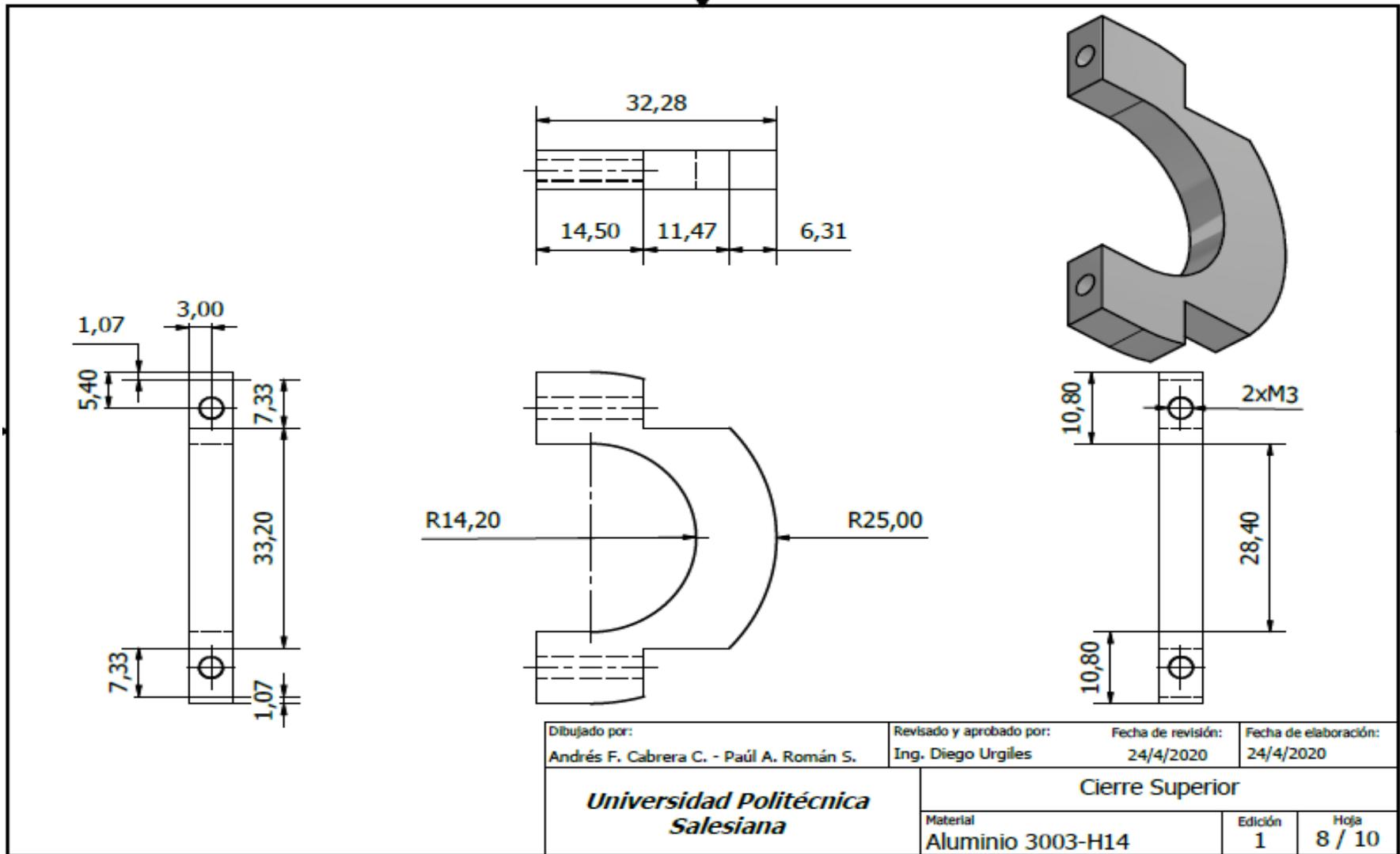
11.6 Base del motor



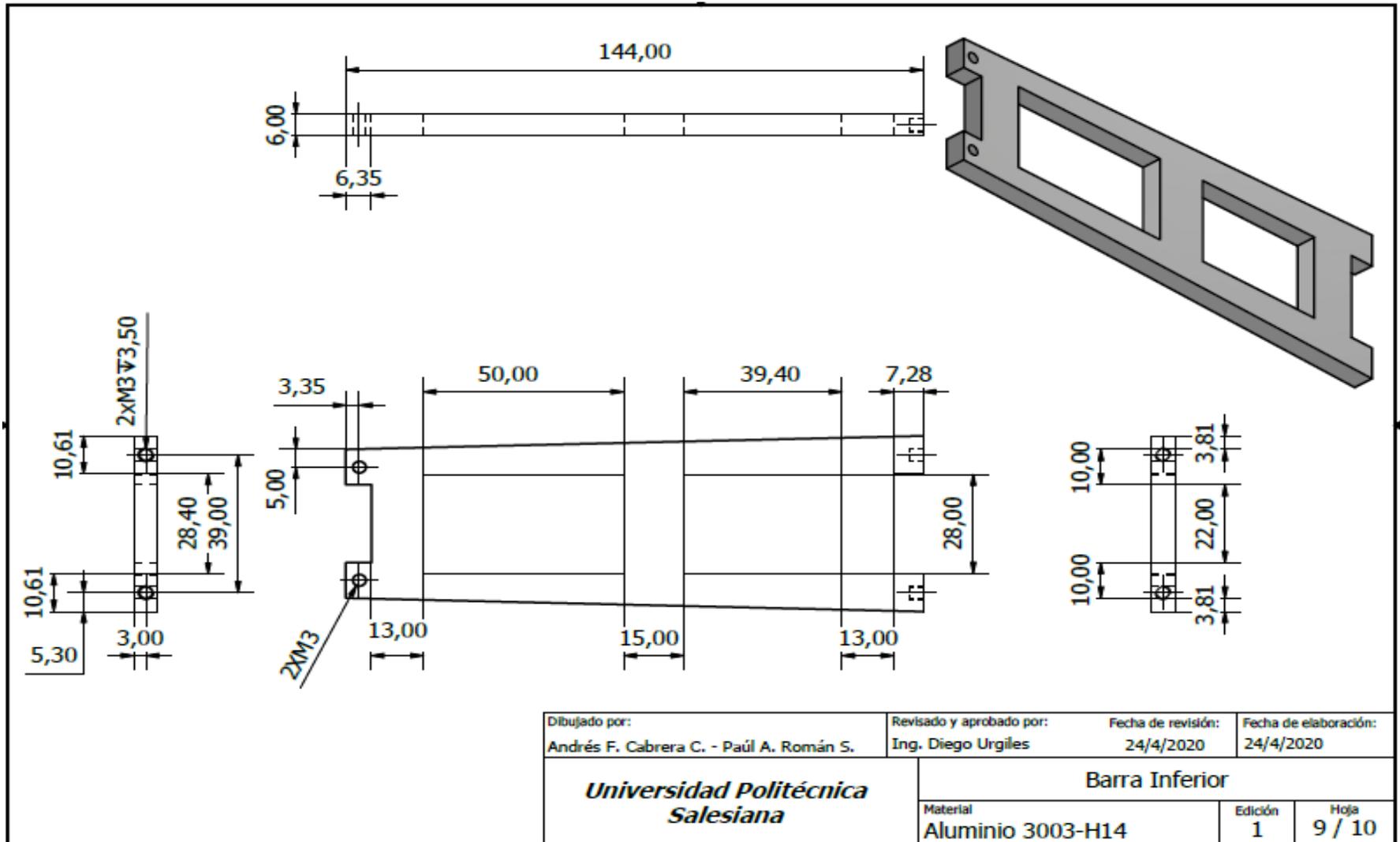
11.7 Barra superior (Brazo 1)



11.8 Cierre superior



11.9 Barra inferior (Brazo 2)



11.10 Cierre barra inferior

