



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

**CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN
SISTEMAS EMBEBIDOS**

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

**Automatización y Control de Redes de
Distribución de Agua**

Autor:

Luis Mariano Campos

Director:

Mg. Esp. Ing. Eric Pernia (UNQ/FIUBA)

Jurados:

Esp. Ing. Franco Bucafusco (FIUBA)

Mg. Ing. Leonardo Carducci (FIUBA)

Ing. Marcelo Romeo (UNSAM)

*Este trabajo fue realizado en la ciudad de Tucumán,
entre marzo de 2019 y Abril de 2021.*

Resumen

El presente documento trata el diseño y construcción de un prototipo a escala para el control automático del caudal de agua a canal abierto. El sistema desarrollado tiene como finalidad principal realizar una gestión eficiente de una red de canales. Esto permite resolver problemas de disponibilidad en regiones con cierto grado de sequía, así como mejorar el suministro a cada usuario y optimizar la gestión por parte del proveedor.

Se aplicó un algoritmo PID para la función de control. Se diseñó una válvula de control servoalimentada implementada con un motor paso a paso y se la utilizó como elemento actuador. La medición de la variable controlada, se realizó mediante un caudalímetro que fue diseñado e implementado mediante una placa de aforo triangular cuyas características dimensionales se determinaron en forma empírica. El componente principal de la etapa de control es un microcontrolador con arquitectura ARM Cortex-M4, en el que se implementó una aplicación que se ejecuta empleando un sistema operativo de tiempo real. Además se desarrollaron interfaces de programación de aplicaciones (API) necesarias para la modularización del software.

Agradecimientos

Esta sección es para agradecimientos personales y es totalmente **OPCIONAL**.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Descripción del estado actual sobre el manejo de agua en canales abiertos	1
1.2. Problemáticas actuales en la gestión del recurso hídrico y posible solución tecnológica	2
1.3. Motivación	4
1.4. Objetivos y alcances	6
2. Introducción específica	7
2.1. Estructura general del sistema	7
2.2. Compuertas Miller	8
2.3. Requerimiento a nivel de software y hardware	10
2.3.1. Requisitos específicos del software	10
2.3.2. Requisitos específicos del hardware	11
2.4. Características de hardware propias del equipo	11
2.4.1. Motor paso a paso y controlador	11
Configuraciones del conector P1	12
2.4.2. Sensor de presión	12
2.5. Planificación	14
3. Diseño e implementación	15
3.1. Hardware	15
3.1.1. Construcción de la válvula de control	15
3.1.2. Servomotor	16
Circuito interfaz del conector de señal de control P1	16
Funcionamiento del servomotor	18
3.1.3. Medidor de caudal	18
3.2. Software	21
3.2.1. Arquitectura de software	21
3.2.2. Componentes de software	22
Diseño detallado	23
3.2.3. Casos de uso	25
Caso de uso: detectar el nivel de agua del canal	25
Caso de uso: establecer un determinado valor de caudal.	25
3.2.4. Diagrama de clase del firmware	25
3.2.5. Protocolo de comunicación	29
3.2.6. Algoritmo PID	31
4. Ensayos y resultados	33
4.1. Ensayos de funcionamiento y calibración del sensor de presión	33
4.2. Calibración del sensor en el prototipo	34

5. Conclusiones	39
5.1. Resultados obtenidos	39
5.2. Próximos pasos	39

Índice de figuras

1.1. Sistema de distribución de agua de la provincia de Jujuy.	2
1.2. Diagrama general.	4
1.3. Celda primaria.	5
2.1. Ilustración de un vertedero triangular ubicado en determinado punto a medir caudal en el canal.	8
2.2. Diagrama en bloque de control - celda primaria.	8
2.3. Compuerta tipo Miller para toma-granja.	9
2.4. Conducto preparado para colocar compuerta tipo Miller.	9
2.5. Toma-granja tipo Miller de compuerta circular de 18" de diámetro.	10
2.6. Función de salida del sensor de presión MPX5010DP.	13
2.7. Disposición de pines del sensor de presión MPX5010DP.	13
3.1. Gráfica del caudal en función de la apertura de la válvula.	16
3.2. Circuito Interfaz - conexiones de señales a colector abierto.	17
3.3. Esquemático de Circuito Interfaz entre el microcontrolador y driver.	17
3.4. Diagrama en bloque de la celda primaria.	18
3.5. Placa de aforo: vista de frente.	19
3.6. Placa de aforo: vista lateral.	20
3.7. Placa de aforo: dimensiones.	20
3.8. Placa de aforo: dimensiones.	21
3.9. Arquitectura de sistema de control de caudal de agua en canal a cielo abierto.	22
3.10. Jerarquía de componentes de software.	23
3.11. Proceso monitor del sensor de presión.	23
3.12. Proceso de control del servomotor.	24
3.13. Proceso monitor válvula.	24
3.14. Proceso de envío y recepción de datos.	25
3.15. Proceso de Control PID.	26
3.16. Diagrama de clase.	29
4.1. Función patrón del sensor de presión calibrado: voltaje vs. altura.	35
4.2. Función polinómica de segundo grado: caudal vs voltios.	37

Índice de tablas

2.1. Desglose de tareas	14
3.1. Caso de uso: detectar el nivel de agua del canal.	27
3.2. Caso de uso: establecer un determinado valor de caudal.	28
4.1. Adquisición de datos para la calibración del sensor	34
4.2. Adquisición de datos del sistema I	35
4.3. Adquisición de datos del sistema II	36
4.4. Datos obtenidos para construir función polinómica de segundo grado.	36

Dedicado a... [OPCIONAL]

Capítulo 1

Introducción general

Este capítulo introduce al lector sobre la conformación de una red de canales de agua a cielo abierto, las dificultades que presentan actualmente, y la necesidad de desarrollar, como solución, un sistema tecnológico que permita gestionar el recurso hídrico de manera eficiente.

1.1. Descripción del estado actual sobre el manejo de agua en canales abiertos

Una red de canales de riego es preponderantemente una zona geográfica que puede definirse como un conjunto de canales de riego, una o más fuentes comunes de abastecimiento de agua y las áreas de cultivo, relativamente compactas, que cuenta con decreto de creación por parte del poder ejecutivo, con un título de concesión otorgado a los usuarios organizados en asociaciones civiles para uso de las aguas y la administración, operación y conservación de la infraestructura hidroagrícola. Puede concluirse que una red de canales de riego es mucho más que una colección de agua, infraestructura y superficie, ya que implica además aspectos legales, administrativos, socioeconómicos y productivos muy importantes e interdependientes entre sí. Para tener una idea más general sobre cómo esta constituido generalmente un conjunto de red de canales de riego, la figura 1.1, brinda mayores detalles.

Este sistema de distribución, que se puede apreciar en la figura 1.1, cuenta con 128 kilómetros de canales de tierra, 64 kilómetros de canales revestidos con hormigón y 400 kilómetros de acequias de tierra en general para caudales inferiores a los 150 l/seg. Estos diferentes puntos, son visitados a diario por los operarios que recorren desde pocos hasta varios kilómetros, algunos dos o más veces por día, para verificar, operar (aumentar o disminuir caudal), medir y/o aforar (medir nivel de agua) de forma manual. Luego, según los valores obtenidos en mediciones deben llevar a cabo cálculos precisos para fijar un determinado caudal. Algunos son de mayor o menor importancia, ya que corresponden a canales principales, secundarios, terciarios, cuaternarios o acequias que entregan agua a un grupo reducido de usuarios. Es interesante destacar que la operación de mover el agua hasta un usuario específico, en general depende de varios movimientos de compuertas en cadena.



FIGURA 1.1. Sistema de distribución de agua de la provincia de Jujuy.

Tradicionalmente, se ha denominado como “operación de canales de riego” o simplemente “operación”, al conjunto de actividades y aspectos realizados directamente en la infraestructura hidráulica con objeto de planear, programar, distribuir y entregar el agua de riego a los productores en forma eficiente y oportuna. Estas condiciones de eficiencia y oportunidad son fundamentales en la tarea de operación.

1.2. Problemáticas actuales en la gestión del recurso hídrico y posible solución tecnológica

La problemática del agua es central en el sostenimiento de los sistemas socio-productivos de distintas regiones de nuestro país. Las fuentes del vital recurso para la vida son escasas y en muchas circunstancias son aprovechadas de forma deficiente o bien el acceso a ellas se ve limitado por diversas causas. En este contexto, existen organismos tanto públicos como privados que dan diagnósticos y resaltan dicha problemática de escasez, baja calidad y formas precarias de aprovechamiento de agua, muchas veces sin poder resolverla por cuestiones referidas a la disponibilidad de tecnologías apropiadas, la organización de la demanda y la gestión.

De acuerdo a lo manifestado, se entiende que la gestión de canales y redes de distribución de agua en la mayoría de las regiones del país se basa en operaciones de control manual en la que los operarios supervisan el estado de cada elemento y actúan en función de protocolos establecidos.

Actualmente, estos procedimientos presentan una capacidad de reacción lenta ante la demanda variable de cada uno de los usuarios de agua, y esto representa un costo sumamente elevado mantener este servicio.

En estas circunstancias, es posible reconocer situaciones cuando el recurso es en abundancia se puede entregar caudales mayores a los solicitados. De esta forma, se garantiza el suministro a todos los usuarios, lo que permite identificar dos situaciones posibles, grandes disminuciones por derrames y baja eficiencia en la gestión del agua.

Es importante clasificar las pérdidas de agua en canales abiertos en intrínsecas y operacionales. Las primeras se refieren a las pérdidas por evaporación, infiltración y fugas. Es decir, aquellas que se deben a las condiciones climáticas, textura de suelos, longitud y estado de conservación de la red de canales, que son relativamente constantes para cada canal. Las segundas se generan por causas relacionadas, fundamentalmente, con el manejo del agua y que por lo general son función del caudal manejado, experiencia del personal y supervisión realizada.

Las pérdidas por infiltración se pueden disminuir con revestimientos, lo que significa grandes inversiones, o en menor medida, manejando los niveles de diseño, ya que estos corresponden a la máxima eficiencia y mínima filtración. En lo que respecta a las pérdidas por operación, se reconoce que dichas pérdidas son aceptables si son menores de 5 %. Se considera que un canal de agua de riego está bien operado si las pérdidas operacionales se mantienen entre 5 % y 10 %. Este tipo de pérdidas es mayor en prácticamente todos los casos a nivel país.

Con el propósito esencial de disminuir las pérdidas operacionales, en la figura 1.2 se muestra un esquema que realizaría una mejor gestión. Además, se puede apreciar que involucra la utilización de diferentes herramientas tecnológicas. El desarrollo comprende una segunda instancia al presente trabajo.

El esquema de la "figura 1.2", tiene por objetivo principal resolver los problemas de disponibilidad en regiones que presentan, entre otros factores, cierto grado de sequía. Además, no sólo busca maximizar la eficiencia en el abastecimiento a cada uno de los usuarios en tiempo y forma, sino también minimizar las pérdidas en las redes de canales, y así, poder brindar mayor seguridad en el suministro de agua para el riego a cada productor en sus predios. Con base en lo descrito, se puede también determinar que el principal beneficiario al optimizar la gestión del vital recurso hídrico es el proveedor de dicho recurso.

El esquema presentado, esta compuesto principalmente por la automatización de cada una de las compuertas que constituyen la red y un centro de monitoreo donde reside el sistema principal. La comunicación de las compuertas entre sí y el sistema principal se llevará a cabo mediante el empleo de la tecnología LoraWan. Esta red de baja potencia y de área amplia ofrece la posibilidad de comunicar puestos de trabajo o dispositivos cuyas distancias pueden circunscribirse desde unos pocos hasta varios kilómetros de separación. Algunos puntos se encuentran situados en zonas donde la cobertura telefónica, internet y energía eléctrica no tienen alcance. Para resolver la carencia de energía eléctrica, se utilizaría energía solar fotovoltaica. Además, se desarrollará una aplicación móvil para que el operario realice gestiones de forma remota.

En relación a la automatización de las compuertas es prácticamente idéntica en cada una de ellas. En la figura 1.2, podemos apreciar que es necesario la utilización de un motor, un microcontrolador como componente principal, un caudalímetro para monitorear el flujo de agua un determinado instante, un panel solar y un dispositivo perteneciente a la tecnología LoraWan que admite la comunicación entre los diversos puestos o puntos de trabajo.

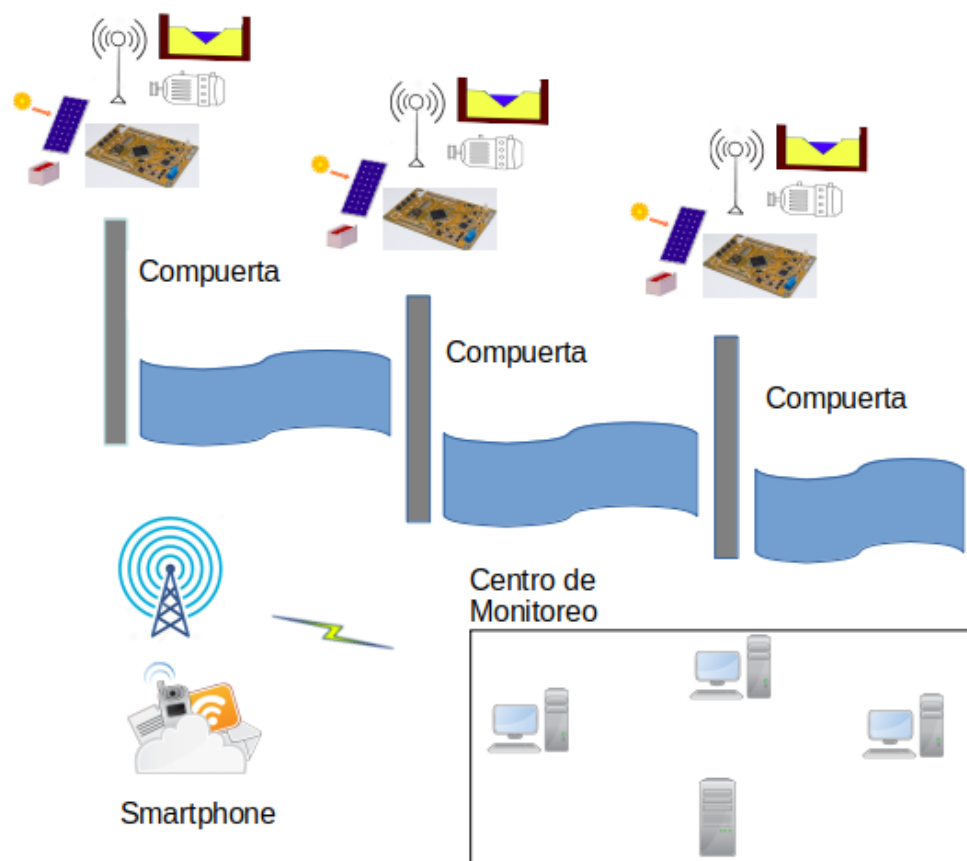


FIGURA 1.2. Diagrama general.

El funcionamiento a nivel sistema, será realizar los movimientos necesarios de compuertas para establecer la cantidad de agua en tiempo y forma. Esta maniobra será llevada a cabo por el operario desde el centro de monitoreo o bien se podrá definir una determinada maniobra preprogramada. De modo que el sistema trabaje de forma autónoma, por medio de comunicaciones entre las compuertas.

Se denominó celda primaria a una fracción pequeña del sistema global que en general es el más repetido con frecuencia, y que se encuentra dispuesto en cada una de las compuertas. Esta celda primaria, en términos generales, está constituida principalmente por un firmware que controla el movimiento de una compuerta por medio de un motor eléctrico y utilizando un caudalímetro, se regula el caudal de agua a un valor determinado definido por el usuario. A modo de inicio de este proyecto global, este documento describe de forma detallada la construcción de un prototipo a escala que permite ejecutar esta celda primaria perteneciente al sistema completo y que se puede apreciar en la "Figura 1.3".

1.3. Motivación

Actualmente en algunas provincias del país la situación hídrica, en las redes de canales, carece de mantenimiento y de control en el manejo de agua. Esto pone en evidencia las necesidades concretas que existen en diversas asociaciones que administran el recurso. En la provincia de Jujuy, más precisamente el Consorcio de Riego del Valle de Perico, si bien, en general, no presentan problemas por la

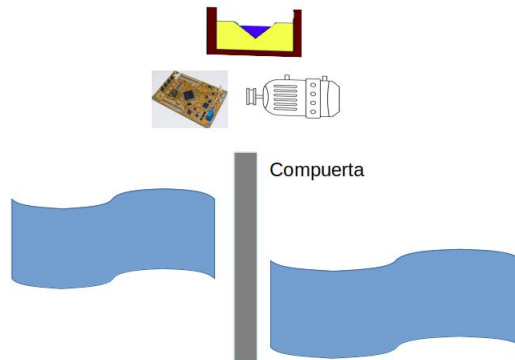


FIGURA 1.3. Celda primaria.

falta de agua, carecen de un control preciso en la cantidad de agua que se debe suministrar a cada uno de los usuarios empadronados. A lo largo del desarrollo de este proyecto los administradores brindaron información al respecto y también mencionaron las dificultades que resultan de realizar movimientos de compuertas que se encuentran realmente alejadas a varios kilómetros en diferentes puntos de la provincia y que en muchas circunstancias se deben visitar dos o más veces al día elevando los costos de traslados.

Por otro lado, en la provincia de La Rioja, el principal inconveniente que presentan los productores pequeños que subsisten del agua superficial, es la falta de agua. Hay una gran cantidad de superficie que ocupan estos productores con diversos cultivos. Por lo que hay una gran superficie ocupada y el agua que se les suministra a cada uno en los turnados no les alcanza a cubrir las necesidades hídricas del cultivo. Esta necesidad se intensifica principalmente en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Las principales causas de la falta de disponibilidad del recurso se debe a ineficientes tomas de agua que no captan la totalidad, deficiencia en el control de aperturas y cierres de compuertas, conducción y la falta de control de caudal, debido la inexistencia de instrumentos de medición en toda la red que registren las variaciones mensuales. Por la sencilla manipulación de las compuertas, existen casos de consumo ilegal por parte de usuarios con la intención de conducir el agua hacia sus cultivos.

Estas causas son las que motivaron llevar a cabo este proyecto.

En este punto es importante destacar que no existen soluciones nacionales, por lo tanto, el desafío es lograr ser competitivo en precio y prestaciones con respecto a productos importados que se encuentran en el mercado. Esto trae aparejado, desde el punto vista del cliente el beneficio de contar con soporte local y la posibilidad de modificar algún aspecto del sistema según las necesidades del cliente.

1.4. Objetivos y alcances

El objetivo general de este trabajo es aportar el diseño y elaboración de un sistema que mediante el empleo de un algoritmo de control PID permite regular el caudal de agua en canal abierto y con el uso de las tecnologías más actuales pueda ser empleado tanto en red de canales complejos hasta las redes más simples. A continuación se detallan los subobjetivos específicos que se tuvieron en cuenta :

- Diseño y construcción de un sistema de control que permita al usuario establecer un caudal de agua determinado de forma remota.
- Diseño y fabricación de un circuito de control de señales cuya finalidad es cumplir la función de interfaz entre la etapa de control y la de potencia correspondiente al driver del servomotor paso a paso.
- Incluir como parte del firmware un sistema de tiempo real.
- Para regular el caudal de agua, aplicar un algoritmo de control PID.
- Empleo de un sensor de presión para detectar el nivel de la superficie del agua.
- La apertura, control y cierre de las compuertas, se realizará mediante un sistema de servomotor, paso a paso, cuyo ángulo de actuación estará medido y controlado a través de un sensor potenciométrico resistivo.
- Proporcionar una gestión de agua de riego de forma eficiente.
- Desarrollar un firmware que sea escalable de tal modo que permita la comunicación con otros módulos patrón dispuestos en otras compuertas.

Capítulo 2

Introducción específica

En este capítulo se abordarán temas referentes al análisis de la estructura del sistema que se desarrolló, gestión, planificación del trabajo y técnicas relacionadas al sensor empleado.

2.1. Estructura general del sistema

Con el avance del diseño de un plano para la fabricación del prototipo para los diferentes ensayos, y con el método de aforo por compuerta a utilizar para la medición de caudal, ligeramente se identificó un inconveniente. Al emplear una compuerta se generarían filtraciones de agua en sus guías de desplazamiento. Como se trata de una maqueta a escala, las filtraciones producirían errores considerables al momento de realizar las mediciones relacionadas a la altura de la superficie de agua, y cálculos pertinentes para determinar el caudal. Por lo tanto, en el sistema no se obtendrían los resultados esperados. En este contexto, el caudal producido en la compuerta sería menor que en el caudalímetro, instrumento ubicado en un punto distante de la compuerta en el sentido que fluye el líquido. De esta forma, obtendríamos dos valores de caudales diferentes debido, entre otros factores, a las filtraciones. Esto motivo reemplazar, en el prototipo, la compuerta por una válvula y así eliminar los errores que introducen dichas filtraciones. Para el control de la válvula se elaboró un servomotor con el empleo de un motor paso a paso con su correspondiente controlador. En la figura 2.1, se puede apreciar un vertedero triangular en un canal abierto y una regla que mide el nivel de la superficie de agua.

Para medir el caudal, se fabricó un caudalímetro por placa de aforo triangular. Estos tipos de instrumentos, también denominados vertederos, representan un dique o pared que intercepta en un determinado punto una corriente de líquido, en este caso agua, con superficie libre, como se puede apreciar en la "Figura 2.1". En general, se utilizan para mantener un nivel de superficie de aguas arriba que no exceda de un valor límite, o bien para medir el caudal de agua circulante por un canal. Este instrumento resulta un medidor de caudal sencillo pero efectivo en canales abiertos.

El principio de funcionamiento de la celda primaria, en el prototipo a escala, consiste en el control del eje de un servomotor, que por medio de un mecanizado entre dicho servomotor y una válvula, domina el movimiento de esta última y así establece el caudal de agua en el valor que desea fijar el usuario.

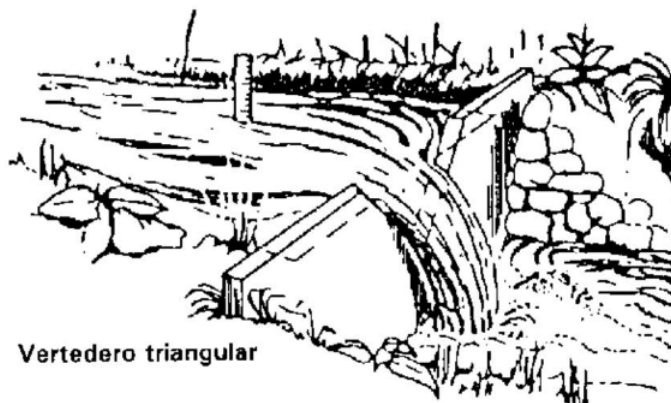


FIGURA 2.1. Ilustración de un vertedero triangular ubicado en determinado punto a medir caudal en el canal.

El diagrama de control correspondiente es el que se muestra en la "Figura 2.2". La salida del servomotor actúa directamente sobre la válvula, que en este caso es una llave esférica, pero podría ser sin ningún inconveniente un sistema de cremallera para abrir una compuerta vertical, como las que podemos encontrar con reiteración en los canales de agua a cielo abierto. La salida de la válvula es el flujo controlado de caudal al canal. En este punto se coloca un medidor de caudal. Luego su resultado se compara con el set point, valor de caudal fijado por el usuario. En el sumador, a partir de la diferencia que existe entre el set point y el valor de caudal medido se obtiene una señal de error, que seguidamente se procesa por un algoritmo de control PID para que sea igual a cero.

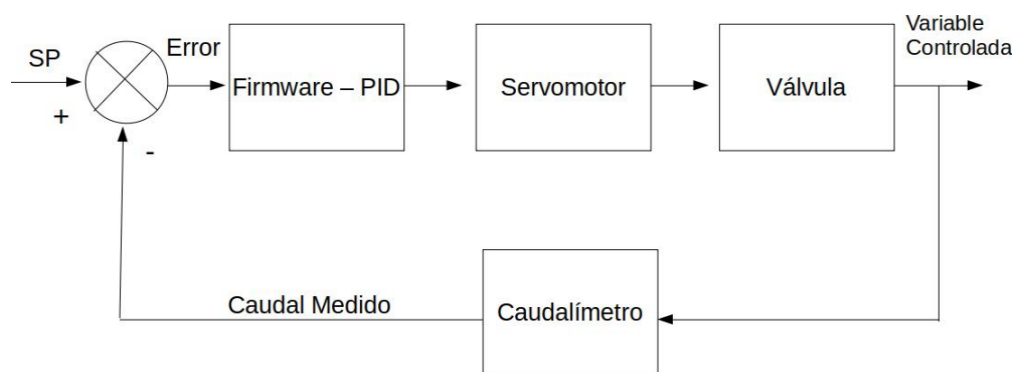


FIGURA 2.2. Diagrama en bloque de control - celda primaria.

2.2. Compuertas Miller

Las compuertas Miller es el mecanismo más utilizado en los canales de agua de riego para controlar la entrada de agua de los canales ramales y tomas directas a las parcelas. Están construidas de fierro fundido (vaciado o colado) por su resistencia a la oxidación. Sin embargo, son frágiles y poco maleables. La toma Miller, en esencia, es una compuerta circular que obtura la entrada a la tubería de salida, la que es izada por un mecanismo elevador compuesto de un vástago cilíndrico

con cuerda tipo tornillo (roscas), generalmente de 2" de diámetro y longitud variable, en función de la altura a colocar la toma y un volante. Las tomas-granja Miller se clasifican por el diámetro de la tubería a obturar, y son de 18" y 24" las más comunes para tomas-granjas, mientras que las de 30" y 36" son usadas para abastecer ramales y subramales. Las ventajas de este tipo de tomas es que son relativamente baratas, la mayoría de las fundidoras las pueden construir y son de fácil colocación. Como desventajas, destacan que pueden tener filtraciones de consideración al ser difícil un cierre hermético debido al metal de la tubería y de la compuerta (comal), especialmente si, durante su fundición, no hay cuidado de tener acabados completamente a nivel. La calibración de esta estructura es difícil, ya que al abrirse parcialmente la compuerta circular sobre la tubería circular, se forman secciones tipo "media luna" con área hidráulica variable, sin seguir un patrón de fácil cálculo. En las figuras 2.3, 2.4 y 2.4 se pueden apreciar como es la estructura de la compuerta, el conducto para la toma y su colocación.



FIGURA 2.3. Compuerta tipo Miller para toma-granja.



FIGURA 2.4. Conducto preparado para colocar compuerta tipo Miller.



FIGURA 2.5. Toma-granja tipo Miller de compuerta circular de 18" de diámetro.

Este mecanismo que se mostró y que se emplea en muchos países para el control de entrada de agua a los canales principales o bien a las parcelas, impulsó a utilizar, en el prototipo a escala, una válvula esférica simulando ser una compuerta Miller.

2.3. Requerimiento a nivel de software y hardware

En esta sección se presentan los requerimientos específicos de software y hardware del sistema. Estos se tuvieron en cuenta al momento de inicio del desarrollo de este proyecto, cuyo fin es, mediante el control de movimiento de una válvula regular el caudal de agua según las necesidades del usuario.

2.3.1. Requisitos específicos del software

Los requisitos específicos de software fueron:

1. El firmware deberá generar como señal, trenes de pulsos para controlar el movimiento del eje perteneciente al servomotor.
2. El firmware deberá determinar, mediante el sensor de presión en conjunto con la placa de aforo triangular, el caudal de agua que fluye a través de este instrumento de medición.
3. El firmware deberá incluir un algoritmo de control PID, que por medio de un lazo de retroalimentación permita regular la variable a controlar.
4. El firmware deberá ser capaz, a través de un pin configurado como salida, establecer el sentido de giro del eje del servomotor, horario - antihorario.
5. El firmware deberá ser capaz, a través de un pin configurado como salida, habilitar - deshabilitar el servomotor.

6. El firmware deberá interactuar, mediante el empleo del puerto serial, con otra aplicación.
7. Con un protocolo de comunicación definido entre la aplicación externa y el firmware, este último deberá ser capaz de recibir y enviar datos.
8. El firmware deberá enviar una notificación de correcta recepción de cualquier comando mediante el envío de un comando específico hacia la aplicación externa.
9. El firmware deberá reportar o notificar a la aplicación externa la recepción de un comando inválido mediante un comando específico.
10. En caso de recepción de comandos válidos, el firmware deberá informar internamente que hay datos a procesar.

2.3.2. Requisitos específicos del hardware

Los requisitos específicos principales de hardware fueron:

1. Se hará uso de la placa EDU-CIAA-NXP como computadora principal para el prototipo a escala.
2. Se construirá un mecanizado de válvula de control estándar mediante un servomotor energizado paso a paso y un elemento medidor de ángulo tipo potenciométrico resistivo.
3. Se construirá un medidor de caudal por canal de aforo utilizando para la medición de la altura de nivel de agua un sensor MPX5010DP.
4. Se diseñará y fabricará un circuito como interfaz que controlará las señales enviadas desde la placa EDU-CIAA-NXP al controlador del servomotor paso a paso.

2.4. Características de hardware propias del equipo

2.4.1. Motor paso a paso y controlador

Para la construcción de la válvula de control fue preciso emplear un motor que tenga la capacidad de mover una llave esférica. Para este proyecto, por cuestión de disponibilidad, se utilizó un motor paso a paso y un controlador cuyo modelos son 86HS85 y MA860H respectivamente. El motor paso a paso de 8 hilos posee un torque nominal de 8,5 Nm, suficiente como para realizar movimientos de apertura parcial o total y cierre total de la carrera de una válvula, según las necesidades requeridas de caudal. El driver MA860H es un controlador para motores paso a paso compatibles con motores 86HS85 con las siguientes características principales:

1. Permite ajustar la corriente que se dirige hacia el motor.
2. Posibilita controlar al motor hasta en 200 micropasos.
3. Frecuencia de entrada de tren de pulso hasta 300 khz.

4. Corriente de salida hasta 7.2A.
5. Entrada TTL compatible y ópticamente aislada.
6. Soporta modos PUL / DIR y CW / CCW.

El MA860H tiene dos conectores, el conector P1 para conexiones de señales de control y el conector P2 para conexiones de potencia y motor. Para el control de la válvula fue necesario un motor que pueda producir un momento de 1 Nm o más.

Configuraciones del conector P1

PUL+;PUL-: Señal de pulso: esta entrada representa la señal de pulso, activa en cada flanco ascendente o descendente (para este trabajo se encuentra activo en flanco ascendente); 4-5V equivale a un pulso alto y 0-0.5V a un pulso bajo. Para una respuesta confiable, el ancho de pulso debe ser superior a 1,5 uS. DIR+;DIR-: Señal DIR: esta señal tiene niveles de voltaje bajo / alto, que representan dos direcciones de rotación del motor. Para una respuesta de movimiento confiable, la señal DIR debe estar por delante de la señal PUL por lo menos 5 microsegundos. 4-5V cuando DIR-HIGH, 0-0.5V cuando DIR-LOW.

ENA+;ENA-: Señal de Habilitación: esta señal se utiliza para habilitar/deshabilitar el controlador. Nivel alto (la señal de control NPN, PNP y las señales de control diferencial son por el contrario, es decir, nivel bajo para habilitar) para habilitar al controlador y nivel bajo para inhabilitar al controlador.

2.4.2. Sensor de presión

Para monitorizar el nivel de la columna de agua, necesario para determinar el caudal en un determinado instante, se optó por su alta precisión un sensor de presión cuyo modelo es MPX5010DP. Este transductor piezo-resistivo, es un sensor de presión de silicio monolítico que puede ser utilizado en aplicaciones que disponen de un microcontrolador o microprocesador con entradas ADC. El MPX5010DP entrega a su salida un rango de voltaje entre 0V y 5V, mediante esta información y una fórmula que se expone en el siguiente párrafo se puede estimar la presión hasta un valor de 10 KPa, esto es, una columna de agua de hasta 100 cm de altura. El dispositivo proporciona una salida lineal como puede se observar en la "Figura 2.6", extraída de su hoja de datos.

Como se pudo observar la función de la "figura 2.6", la ecuación para obtener la presión del sensor viene dada por la ecuación 2.1:

$$P = \frac{V_{out} - 0,04 * V_s \pm Tol}{0,09 * V_s} \quad (2.1)$$

Donde:

- Vs: es el valor de voltaje de alimentación, Vs = 5V.
- Vout: es el valor de voltaje que entrega el sensor a su salida.

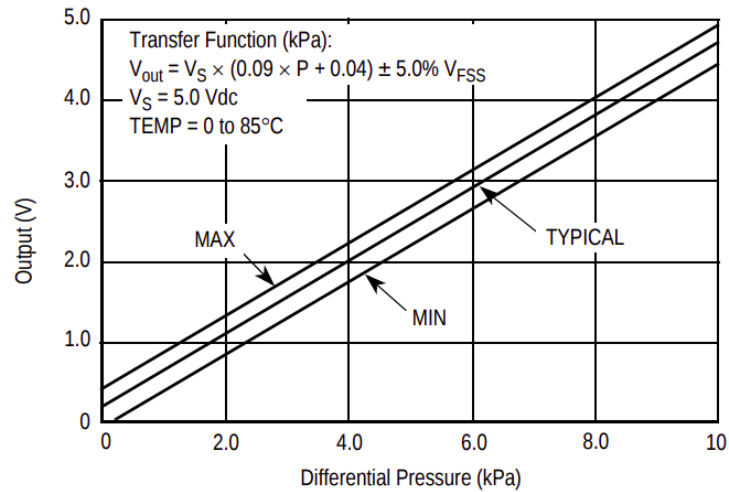


FIGURA 2.6. Función de salida del sensor de presión MPX5010DP.

- Tol: es la tolerancia, un ajuste que se debe aplicar al sensor para calibrar a medida.

Tomando como base la ecuación de presión diferencial que relaciona la altura se resuelve que (recordando que a la presión atmosférica normal es cero):

$$P = PH - PL = P = \rho gh = \frac{V_{out} - 0,04 * V_s \pm Tol}{0,09 * V_s} \quad (2.2)$$

Donde:

- P: es la presión.
- ρ : es la densidad del agua.
- g: es la gravedad.
- h: es el nivel de la columna líquida.

La disposición de los pines del dispositivo lo podemos advertir en la figura 2.7:

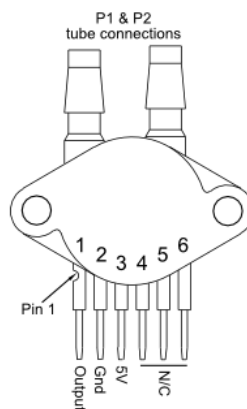


FIGURA 2.7. Disposición de pines del sensor de presión MPX5010DP.

Siendo:

- la densidad de agua $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$
- la gravedad $g=10 \text{ ms}^2$

la ecuación resultante para obtener h es:

$$h = \frac{P}{g * \rho} \quad (2.3)$$

2.5. Planificación

La planificación original presentada al iniciar el proyecto contemplaba un trabajo de 600 horas. Los atrasos relacionados con la problemática identificada y expuesta en la sección 2.1, significó repensar un nuevo prototipo con una válvula de control mecanizada. Esto, implicó recurrir a una empresa dedicada a la mecanización de piezas para adaptar el servomotor y una válvula esférica. Como consecuencia de esto, no se pudo contar en tiempo y forma con la pieza total, por lo que se tuvo que modificar la planificación inicial. En la tabla 2.1 se detalla el desglose de tareas pertinente a la planificación original.

TABLA 2.1. Desglose de tareas

WBS	Tareas	Tiempo[hs]
1.	Documentación y Análisis Preliminar	19
1.1	Planificación del proyecto	24
1.2	Análisis de bibliográfica específica	20
1.3	Definición de casos de pruebas	15
2.	Investigación, Diseño e Implementación	127
2.1	Inicialización del entorno de trabajo	34
2.2	Investigación y diseño del circuito controlador del motor	12
2.3	Investigación y diseño del circuito para el sensor lineal	31
2.4	Definición de la arquitectura del firmware	54
2.5	Definición de las interfaces y API's	32
2.6	Implementación de módulo controlador de motor	15
2.7	Implementación de módulos de adquisición de datos	12
2.8	Implementación de módulo de comunicación	16
2.9	Implementación de herramientas de testing	18
2.10	Integración de módulos	21
2.11	Investigación del sensor de presión diferencial	15
2.12	Calibración del sensor de presión diferencial y diseño del circuito	13
3.	Verificación y Validación	48
3.1	Pruebas unitarias en submódulos	24
3.2	Pruebas de integración	19
3.3	Pruebas de Sistema	23
4.	Cierre	36
4.1	Elaboración del Informe del proyecto	24
4.2	Elaboración de presentación final del proyecto	12

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se exponen las tomas decisiones relacionadas al diseño e implementación relacionada al hardware y firmware a lo largo del desarrollo del trabajo.

3.1. Hardware

3.1.1. Construcción de la válvula de control

Para la fabricación del prototipo fue preciso mecanizar una pieza la cual es una caja desmultiplicadora de fuerza que controla una válvula mediante la energización de un servomotor paso a paso. Al emplear una válvula de control fue importante estudiar sus características de funcionamiento. La válvula es un mecanismo que permite regular el flujo o caudal, en este caso de agua, entre dos partes del sistema. Básicamente, la válvula es un ensamblaje compuesto de un cuerpo con conexión a una tubería y de un obturador operado por accionamiento. Su función principal es variar el caudal del fluido que circula a través de ella, comportándose como un orificio cuya área está continuamente variando. Las válvulas son uno de los instrumentos de control esenciales en la industria. Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar un enorme flujo de líquidos y gases. El obturador determina la característica de caudal de la válvula. Es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso del fluido. El obturador de una válvula, conforme se va desplazando, produce un área de pasaje que posee una determinada relación característica entre la fracción de carrera de la válvula y el correspondiente caudal que escurre a través de la misma. A esa relación se le da el nombre de característica “inherente” de caudal de válvula. En este trabajo se utilizó una válvula cuya característica inherente es “Tipo de Apertura Rápida”. Se trata de una característica que produce una variación grande de caudal a través de la válvula con una carrera pequeña. Este tipo de válvula posibilita el pasaje de casi la totalidad del caudal nominal con apenas una abertura de 25 % de la carrera total. Produce una ganancia muy alta a bajas aperturas de carrera y una ganancia muy baja en aperturas por encima de 60 % de carrera total. La figura 3.1, muestra la curva típica de una válvula de apertura rápida.

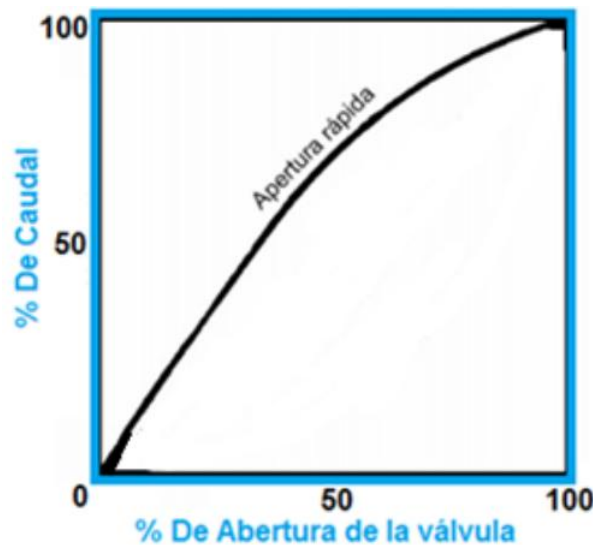


FIGURA 3.1. Gráfica del caudal en función de la apertura de la válvula.

3.1.2. Servomotor

Los componentes principales para la construcción del servomotor fueron un motor paso a paso, un controlador, un sensor resistivo de ángulo y una entrada ADC del microcontrolador.

Circuito interfaz del conector de señal de control P1

En cuanto a la conexión entre el microcontrolador y el controlador fue necesario la fabricación de un circuito de adaptación de niveles de señales. El MA860H puede aceptar entradas diferenciales y de un solo extremo (incluida la salida de colector abierto y PNP). Tiene 3 entradas lógicas aisladas ópticamente que están ubicadas en el conector P1 para aceptar señales de control del microcontrolador. Estas están aisladas para minimizar o eliminar los ruidos eléctricos acoplados a las señales de control del variador. La figura 3.2, ilustra las conexiones a colector abierto.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante relacionadas a la construcción del circuito interfaz entre el diver y el microcontrolador se diseñó y fabricó el circuito eléctrico que se muestra en la figura 3.3.

En el esquemático se observa dos etapas, la primera es un circuito negador y la segunda corresponde a un circuito de colector abierto NPN. Por lo tanto, se puede decir que la etapa de potencia está formada por el circuito interfaz, el controlador y el motor paso a paso.

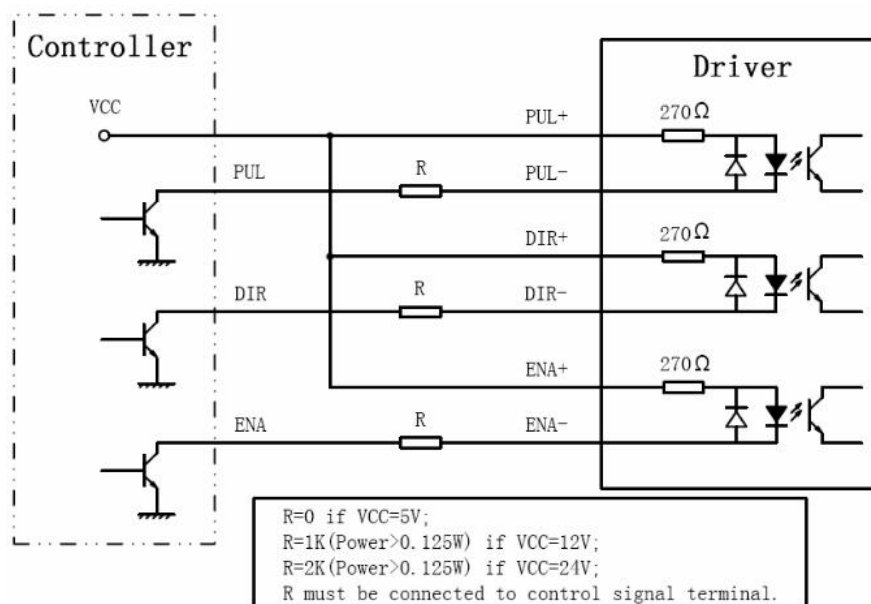


FIGURA 3.2. Circuito Interfaz - conexiones de señales a colector abierto.

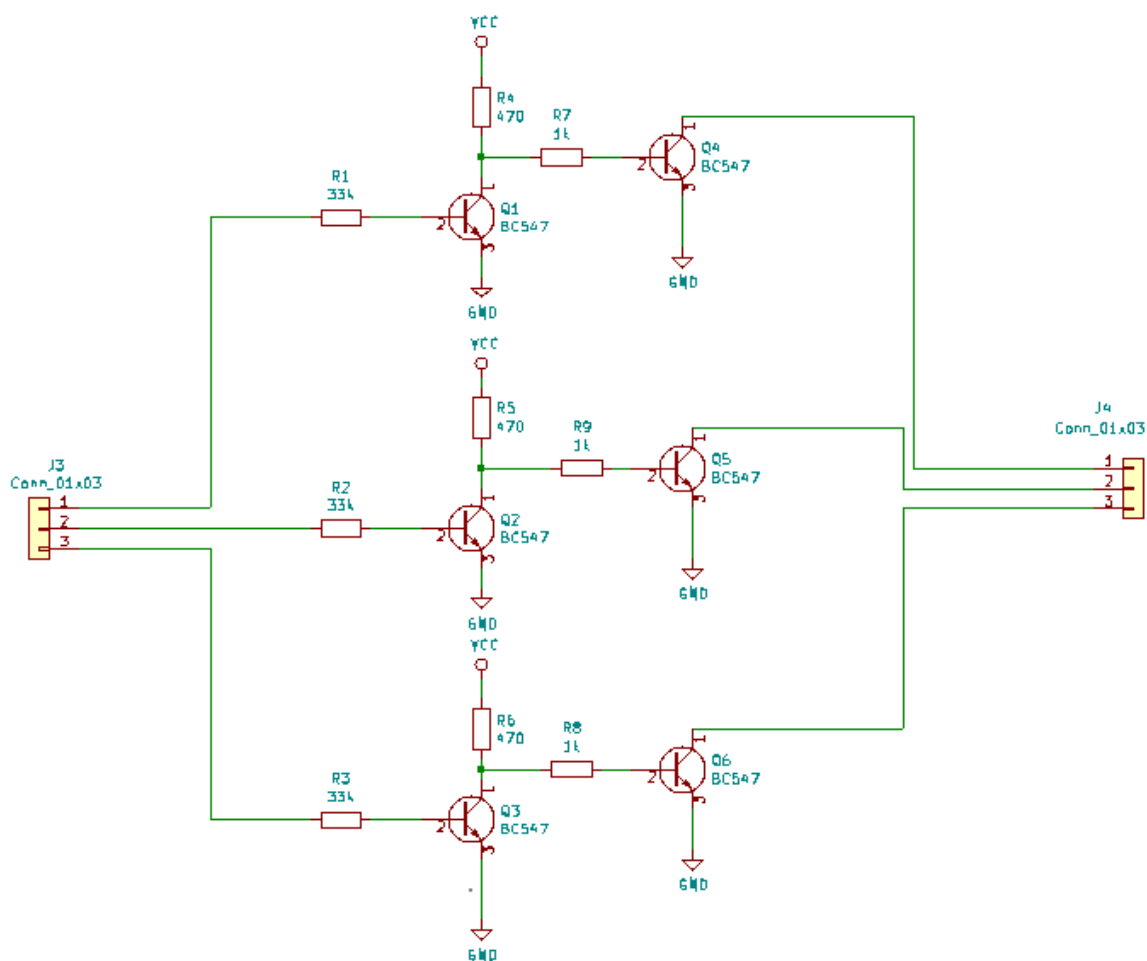


FIGURA 3.3. Esquemático de Circuito Interfaz entre el microcontrolador y driver.

Funcionamiento del servomotor

El servomotor esta compuesto también por una porción del firmware que comprende la parte inteligente del dispositivo fabricado. Asimismo, es el encargado de establecer al obturador de la válvula en una determinada posición y así proporcionar a su salida el caudal de agua requerido por el usuario. Para esto fue indispensable obtener una estimación del porcentaje de apertura de la válvula. Por ello, se empleo un sensor resistivo de ángulo cuya señal se inyecta de forma retroalimentada a una de las entradas ADC del microcontrolador para su procesamiento. Este dispositivo adosado al eje de la válvula es un potenciómetro de una vuelta de 50K ohm cuyo modelo es 91A-503, Bourns cermet. En la figura 3.4, se puede apreciar un diagrama en bloque general que indica entre otras partes del trabajo, cómo está constituido el servomotor. Cada componente se encuentra delimitado en líneas punteadas de forma tal, que se puede tener una idea qué partes pertenecen al servomotor y al microcontrolador.

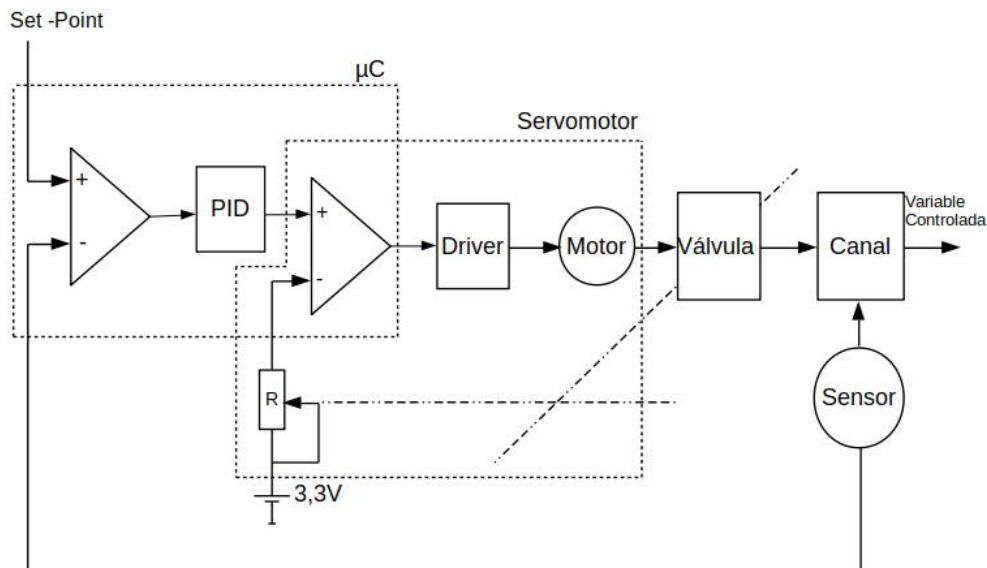


FIGURA 3.4. Diagrama en bloque de la celda primaria.

3.1.3. Medidor de caudal

La medición del agua es la cuantificación del caudal de agua que pasa por la sección transversal de un río, canal o tubería. También se le conoce como aforo. En la mayoría de los casos, la medición del agua resulta de la necesidad de brindar mayor control sobre su uso y distribución. Dicha medición se realiza a través de medidores de caudal. Estos son dispositivos que utilizan diferentes principios mecánicos o físicos para permitir que un flujo de agua pueda ser cuantificado. El medidor, que determina la cantidad de fluido que pasa por unidad de tiempo por una sección dada, utilizado en este trabajo para la verificación de caudal de agua proporcionado y además para generar la señal de realimentación correspondiente, es un “Medidor de caudal de Canal Abierto Tipo Aforo”. Existen varias formas de aforo en canales abiertos, dentro de las principales se encuentran:

1. Método volumétrico.

2. Vertederos.
3. Canal Parshall.
4. Método hidráulico.

Para efectuar el presente trabajo se utilizó el tipo de aforo con vertedero triangular con escotadura en V. La medición del caudal de las corrientes naturales nunca puede ser exacta debido a que el canal suele ser irregular y por lo tanto es irregular la relación entre nivel y caudal. Los canales de corrientes naturales están también sometidos a cambios debidos a erosión o depósitos. Se pueden obtener cálculos más confiables cuando el caudal pasa a través de una sección donde esos problemas se han limitado. Los vertederos pueden ser definidos como simples aberturas, sobre las cuales un líquido fluye. El término se aplica también a obstáculos en el paso de la corriente y a las excedencias de los embalses. Los vertederos son orificios sin el borde superior y ofrecen las siguientes ventajas en la medición del agua:

- Se logra con ellos precisión en los aforos
- La construcción de la estructura es sencilla
- No son obstruidos por materiales que flotan en el agua
- La duración del dispositivo es relativamente larga

Los vertederos son utilizados, intensiva y satisfactoriamente en la medición del caudal de pequeños cursos de agua y conductos libres, así como en el control del flujo en galerías y canales. Para la construcción del vertedero triangular empleado, se precisó de una chapa de hierro plana de 1 mm de espesor, a la que se le realizó una hendidura de sección triangular, cuyo valor de ángulo es de 18 grados. Esta chapa supera los límites del ancho del canal de forma que, ubicándola verticalmente y en forma transversal al canal, opera como un embalse que por su hendidura sale un flujo de agua. De esta forma se puede medir en distintos lugares del recorrido del canal, cuál es el caudal real que está pasando por ese punto en particular. La "Figura 3.5", muestra la vista de frente de una estructura de un vertedero con escotadura en V.

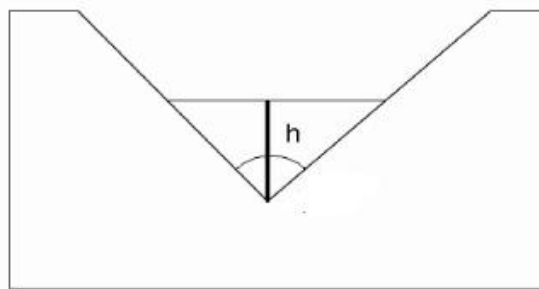


FIGURA 3.5. Placa de aforo: vista de frente.

La "Figura 3.6", ilustra la vista lateral del vertedero y cómo fluye el líquido por su abertura.

Entonces, para el calcular el caudal se debe tener en cuenta la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2gc} \tan \alpha H^{\frac{2}{5}} \quad (3.1)$$

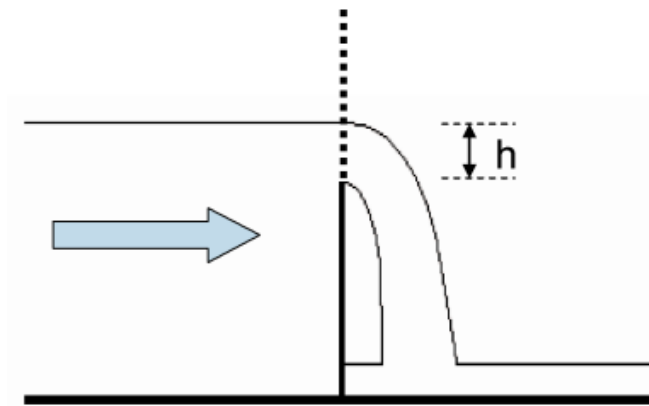


FIGURA 3.6. Placa de aforo: vista lateral.

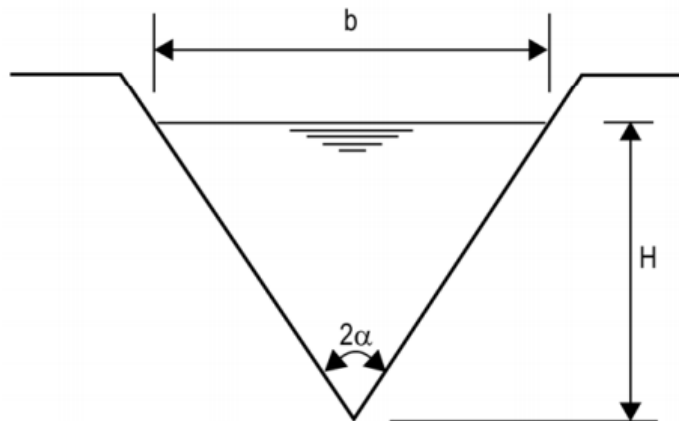


FIGURA 3.7. Placa de aforo: dimensiones.

Teniendo en cuenta la ecuación 3.1

- Q : es caudal en m^3/seg
- g : coeficiente de gravedad
- c : coeficiente de descarga
- α : ángulo del vertedero
- H : nivel de agua en metros

Los medidores de caudal con aforo triangular como el utilizado en el presente trabajo, responden a una ecuación del modelo que se expone arriba y la misma se obtuvo empíricamente. En el caso de este proyecto y por tratarse de un prototipo a escala, es un medidor que se usará por única vez, por lo tanto la tabla de calibración del caudalímetro fue obtenida experimentalmente. En la "Figura 3.8", se detalla la vista de frente del canal con el vertedero triangular y los diversos niveles de altura que se consideraron al momento de realizar las mediciones pertinentes.

A partir de la "Figura 3.8", se intenta especificar que existe una manguera, la cual uno de sus extremos se conecta a la base del canal y el otro a una de las dos espigas del sensor. Además, se puede advertir los niveles de altura que se deben tener en cuenta. H total corresponde a la altura entre el nivel de agua en un instante dado

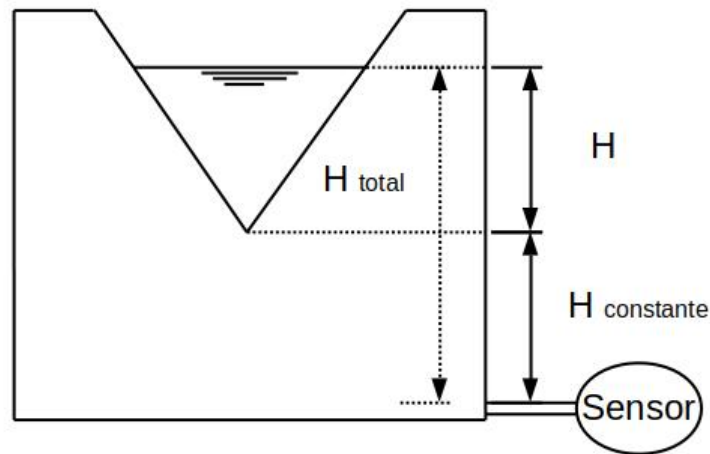


FIGURA 3.8. Placa de aforo: dimensiones.

y la manguera conectada al sensor, H constante se encuentra asociada al nivel de altura que está comprendido entre dicha manguera y el vértice del triángulo del vertedero, y finalmente H variable es la altura que está contenida entre el nivel de agua y el vértice del triángulo de dicho vertedero. Por lo tanto, este caudalímetro de canal abierto por sistema de aforo utiliza como medidor de nivel de columna de agua un sensor de presión cuyo modelo es MPX5010DP.

Esta señal proveniente del sensor en conjunto con un algoritmo de control PID, permite regular el caudal de agua en un determinado valor preestablecido.

Una vez construido el prototipo, se realizó una calibración de caudal obteniéndose una tabla Caudal vs H_{total} (altura). Por lo que, en el firmware esta tabla es utilizada para obtener el valor de caudal en lugar de la fórmula presentada.

3.2. Software

3.2.1. Arquitectura de software

Durante la definición de la arquitectura de software se seleccionaron dos arquitecturas de software y se integraron para confeccionar una arquitectura híbrida, de modo tal que se adapte a las necesidades concretas de este proyecto. Por un lado, se seleccionó una arquitectura en capas, la cual está conformada por tres capas claramente definidas. En la capa HAL se encuentran los drivers encargados de abstraer los detalles de acceso al hardware. De esta forma, facilitará la migración a otro microcontrolador en caso de que en el futuro hiciese falta. Adicionalmente, permite una mayor claridad en la implementación, separando los drivers de la lógica de la aplicación. Debido a que en producción se utilizará como hardware a la CIAA-NXP y durante el desarrollo la EDU-CIAA-NXP, se empleó el firmware de la CIAA versión 3.0 como capa de abstracción de hardware. En la capa de aplicación se encuentran todos los componentes que encapsulan la lógica de aplicación, y finalmente, la tercera corresponde al sistema operativo de tiempo real. En esta capa se empleó el sistema operativo FreeRTOS. El sistema incluye sensores que proveen información relacionada al ámbito a controlar y un actuador que cambian dicho ámbito. Por lo tanto, en respuesta a las alteraciones identificadas por

los sensores, se envían señales de control a los actuadores del sistema. Entonces, al identificar que dicho sistema debe poseer este tipo de comportamiento se definió emplear una arquitectura de tiempo real inherente al “Control Ambiental”, ya que este patrón de arquitectura de software brinda la posibilidad de recopilar datos del entorno por medio de sensores como así también el estado en el que se encuentran los actuadores conectados al sistema. Con base en datos reunidos de sensores y actuador, se envían señales de control hacia el actuador para producir cambios en dicho entorno controlado. En la figura 3.9, se puede ver el diagrama del patrón arquitectónico que es la base del diseño del sistema de control, y además utilizado en la capa aplicación.

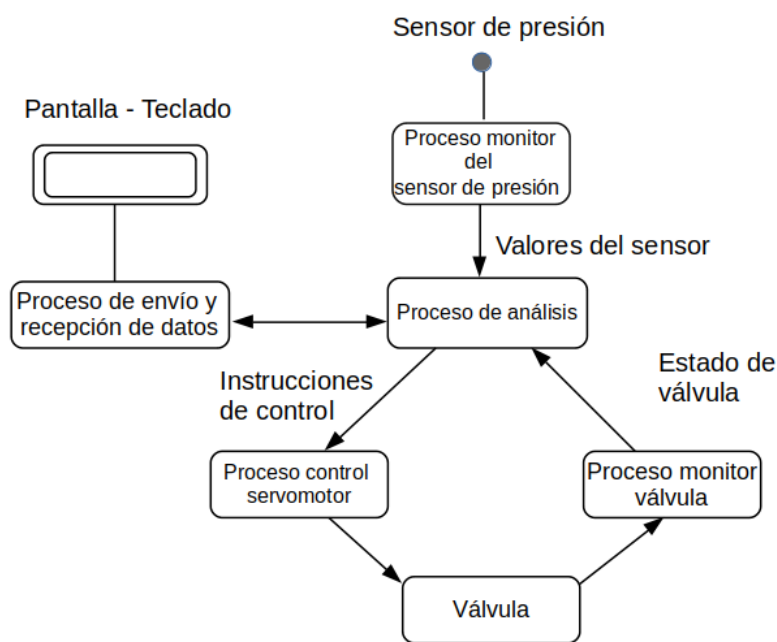


FIGURA 3.9. Arquitectura de sistema de control de caudal de agua en canal a cielo abierto.

Al aplicar ambos patrones se constituyó un patrón híbrido de dos capas. La capa inferior es la capa de abstracción de hardware. La capa superior, pertenece a la aplicación.

3.2.2. Componentes de software

Cada capa de software es considerada un componente de software. Con lo cual se poseen los siguientes componentes:

- HAL
- Sistema Operativo
- Aplicación

A su vez, la capa de aplicación está compuesta por los siguientes componentes de software:

- Monitor sensor de presión.
- Control servomotor.
- Monitor válvula.
- Control de recepción y envío de datos.

En la figura 3.10, se puede apreciar el nivel de jerarquía de cada una de las capas siendo la capa HAL la más baja:

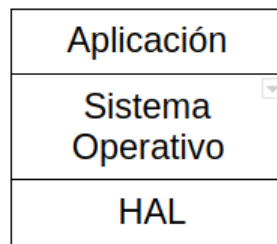


FIGURA 3.10. Jerarquía de componentes de software.

Diseño detallado

En esta subsección se incluye el diseño detallado de cada uno de los componentes de software presentados en la figura 3.9, cada uno con sus respectivos diagrama de actividades.

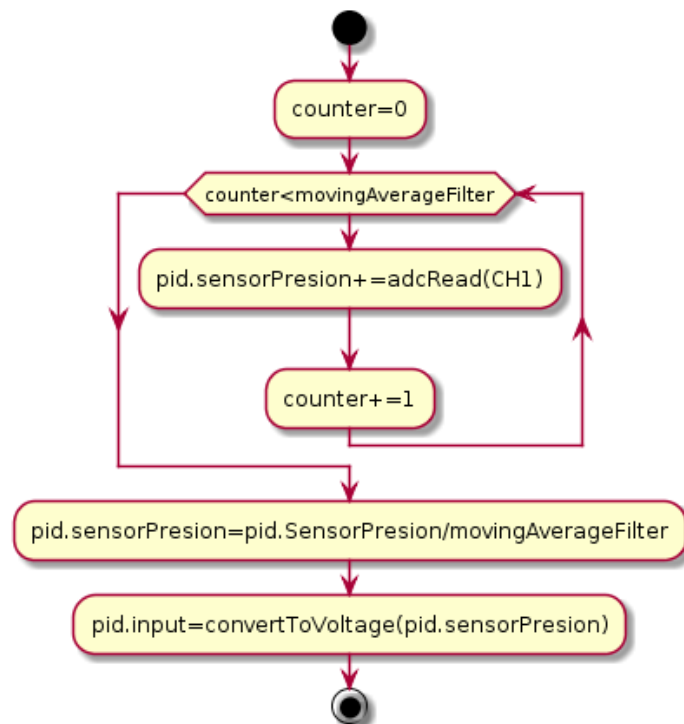


FIGURA 3.11. Proceso monitor del sensor de presión.

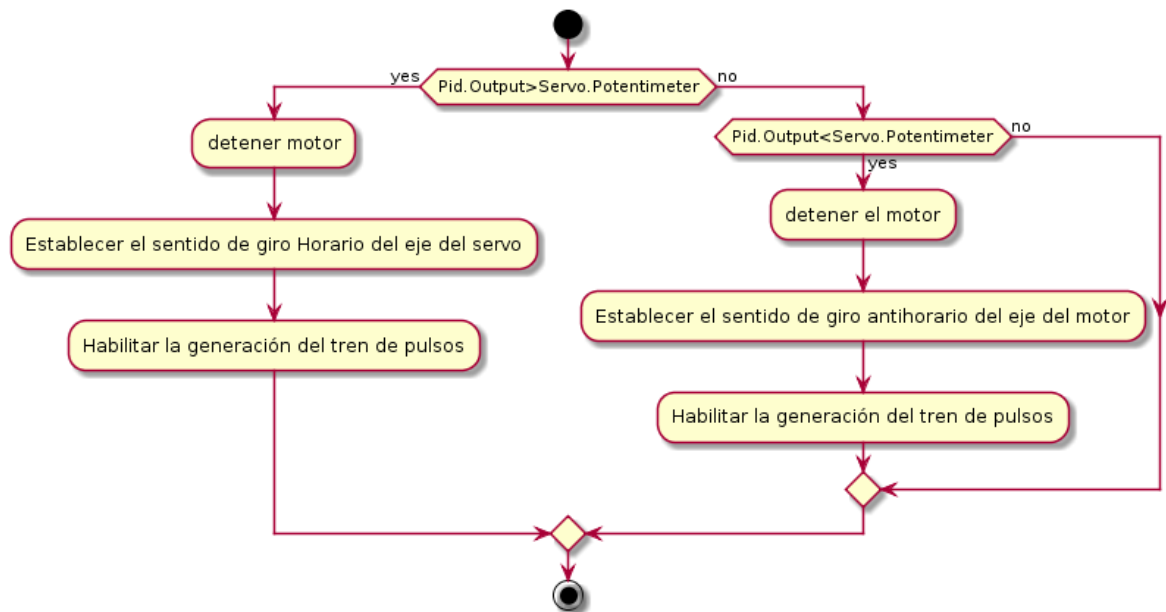


FIGURA 3.12. Proceso de control del servomotor.

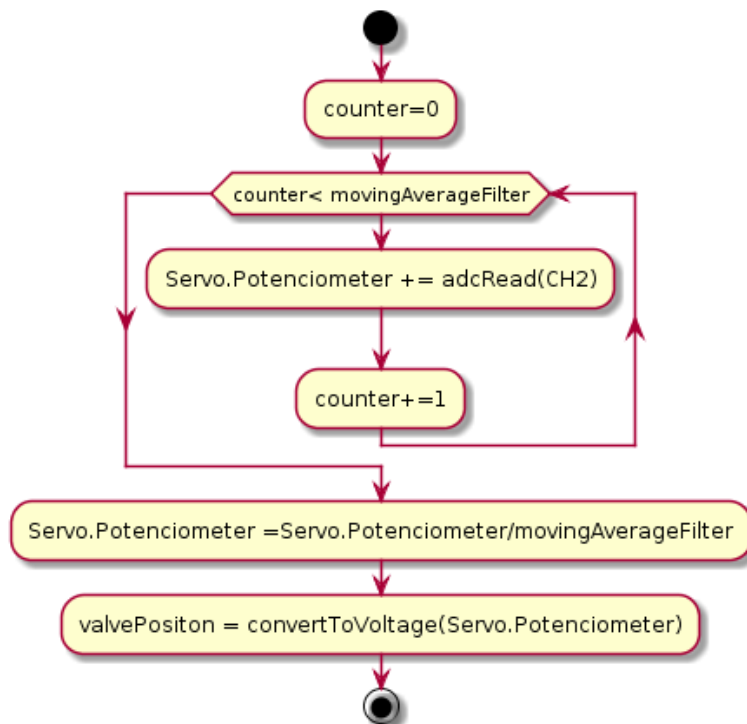


FIGURA 3.13. Proceso monitor válvula.

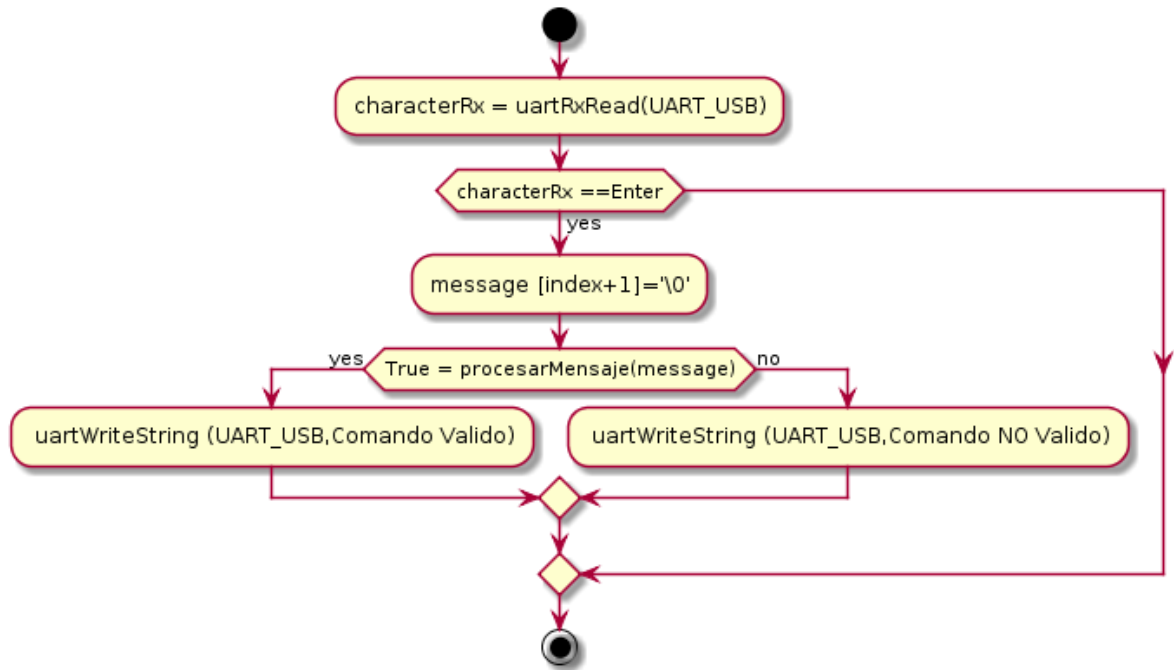


FIGURA 3.14. Proceso de envío y recepción de datos.

3.2.3. Casos de uso

Para la etapa de captura de requerimientos funcionales que el sistema debía satisfacer se emplearon casos de uso correspondientes al Lenguaje Unificado Modelado (UML) ya que es de mucha utilidad y permite especificar, visualizar, construir y documentar los requisitos del sistema especialmente en sistemas con un alto grado de interacción hombre/máquina. A continuación se presentan dos casos de uso considerados como principales.

Caso de uso: detectar el nivel de agua del canal

Caso de uso: establecer un determinado valor de caudal.

3.2.4. Diagrama de clase del firmware

Al momento de desarrollar el firmware, de forma previa se realizó un diagrama de clase, que se puede ver en la "Figura 3.16".

Uart: este módulo recibe y envía los comandos desde y hacia la aplicación de comunicación serial que se ejecuta en la PC.

Command Processing: acumulará y convertirá de carácter a decimal los comandos recibidos y los devuelve cuando sea solicitado

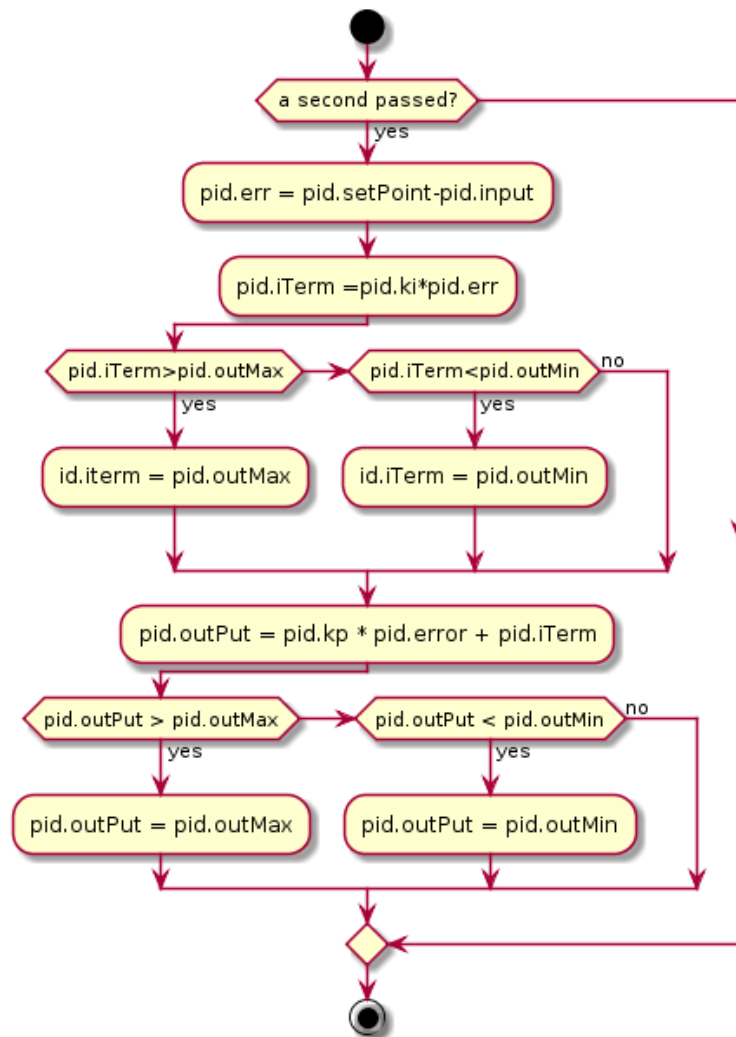


FIGURA 3.15. Proceso de Control PID.

TABLA 3.1. Caso de uso: detectar el nivel de agua del canal.

Nombre	Detectar el nivel de agua del canal
1.1 Breve descripción	El firmware debe detectar por medio del sensor de presión el nivel de agua existente en el canal.
1.2 Actor Principal	La aplicación móvil.
1.3 Disparadores	La recepción de un comando.
Flujo de Eventos	
2.1 Flujo básico	El firmware recibe el paquete desde un smartphone o desde una aplicación de comunicación serial desde una pc.
2.1.2 Flujo básico	El firmware deberá desencapsular el comando recibido y extraer los diferentes campos de información.
2.1.3 Flujo básico	El firmware deberá identificar el tipo de operación.
2.1.4 Flujo básico	El firmware deberá leer un pin configurado como adc asociado al sensor de presión un valor digital.
2.1.5 Flujo básico	Se repite el paso 2.1.4 hasta 5 veces, de forma que el firmware deberá realizar una acumulación de los valores obtenidos.
2.1.6 Flujo básico	El firmware con base al acumulador obtenido en el punto anterior deberá, realizar un filtro de promedio móvil.
2.1.7 Flujo básico	El firmware deberá convertir el valor digital promediado a tensión.
2.1.8 Flujo básico	El firmware deberá obtener el nivel de agua con el dato obtenido en el punto anterior empleando una tabla que se obtendrá experimentalmente.
2.1.9 Flujo básico	El firmware deberá controlar si el resultado se encuentra dentro de las dimensiones establecidas.
2.1.10 Flujo básico	El firmware deberá enviar por el puerto serial el valor de nivel de agua en cm.
2.2 Flujo alternativo	
2.2.1 Flujo alternativo	2.1.9 Si la distancia obtenida se encuentra fuera de rango se enviará por la UART "Distancia Fuera de Rango - Verificar el correcto Funcionamiento del sensor".
Requisitos Especiales	
Pre - condiciones	
4.1 Pre - condiciones	El firmware debe estar en estado de correcto funcionamiento.
4.2 Pre - condiciones	La comunicación serial se debe encontrar en condiciones óptimas para su funcionamiento correcto.
Post- Condiciones	El firmware deberá quedar operativo y en correcto funcionamiento y en condiciones para la recepción de futuros comandos.

TABLA 3.2. Caso de uso: establecer un determinado valor de caudal.

Nombre	Establecer un determinado de valor de caudal.
1.1 Breve descripción	El firmware debe establecer un caudal mediante la manipulación de la posición de la válvula de control.
1.2 Actor Principal	La aplicación móvil.
1.3 Disparadores	La recepción de un comando
Flujo de Eventos	
2.1 Flujo básico	El firmware recibe el paquete desde un smartphone o desde una aplicación de comunicación serial desde una pc.
2.1.2 Flujo básico	El firmware deberá desencapsular el comando recibido y extraer los diferentes campos de información.
2.1.3 Flujo básico	El firmware deberá identificar el tipo de operación.
2.1.4 Flujo básico	El firmware deberá leer un pin configurado como adc asociado al sensor de presión un valor digital.
2.1.5 Flujo básico	Se repite el paso 2.1.4 hasta 5 veces, de forma que el firmware deberá realizar una acumulación de los valores obtenidos.
2.1.6 Flujo básico	El firmware con base al acumulador obtenido en el punto anterior deberá, realizar un filtro de promedio móvil.
2.1.7 Flujo básico	El firmware deberá convertir el valor digital promediado a tensión.
2.1.8 Flujo básico	El firmware deberá obtener el caudal con el dato obtenido en el punto anterior empleando una tabla que se obtendrá experimentalmente.
2.1.9 Flujo básico	El firmware deberá comparar este resultado de caudal obtenido con el set point.
2.1.10 Flujo básico	En caso de ser valores diferentes, el firmware deberá generar un tren de pulsos hasta posicionar la válvula de control.
2.1.11 Flujo básico	Se repite desde 2.1.4 hasta que el caudal obtenido a través del sensor y el set point sean iguales.
2.2 Flujo alternativo	
2.2.1 Flujo alternativo	2.1.10 Si los valores son iguales el firmware deberá detener la generación del tren de pulsos.
Requisitos Especiales	
Pre - condiciones	
4.1 Pre - condiciones	El firmware debe estar en estado de correcto funcionamiento.
4.2 Pre - condiciones	La comunicación serial se debe encontrar en condiciones óptimas para su funcionamiento correcto.
Post- Condiciones	El firmware deberá quedar operativo y en correcto funcionamiento y en condiciones para la recepción de futuros comandos.

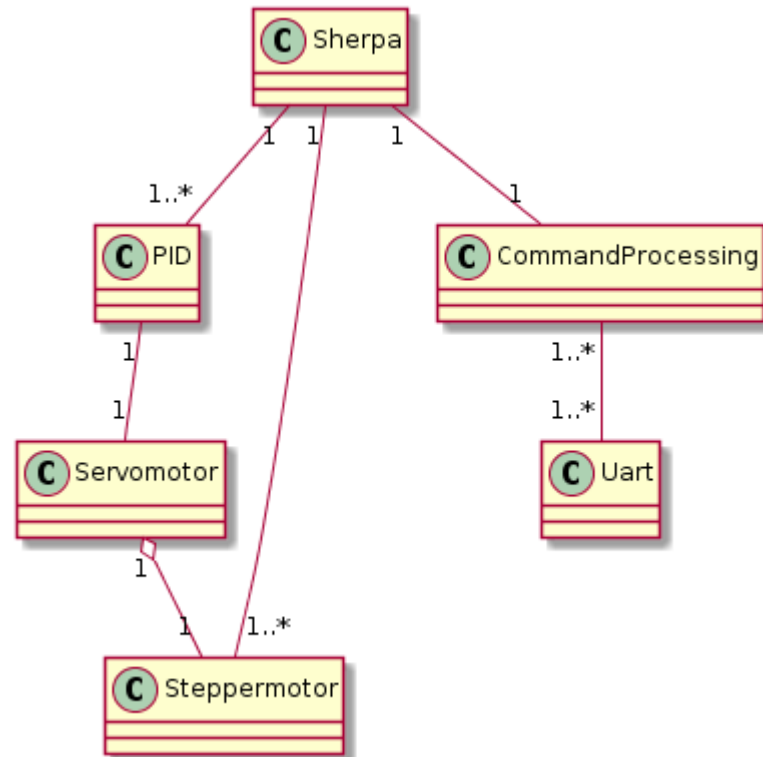


FIGURA 3.16. Diagrama de clase.

Stepper Motor: este módulo posee todas las funciones inherentes al control del motor paso a paso. Interactúa con el módulo Servomotor para integrar las características de un servomotor convencional.

Servomotor: el propósito de Servomotor es establecer la posición de la válvula realizando una comparación entre el resultado que se va obteniendo del algoritmo de control PID, output y la posición actual de dicha válvula.

PID: este módulo implementa un algoritmo de control PID. El mismo es ejecutado cada un segundo para cuantificar el error o desviación que existe entre el valor de caudal medido a través del sensor de presión y el valor deseado. Este valor es solicitado por el módulo Servomotor.

3.2.5. Protocolo de comunicación

Se definió un paquete de datos para que el usuario pueda testear todos los comandos que involucre el servomotor y verificar su correcto funcionamiento. A continuación se detalla lo siguiente:

1. Habilitar o deshabilitar el motor.
2. Establecer los micro pasos (MicroStep).
3. Establecer el sentido de giro(Horario/Antihorario).
4. Cantidad de pasos a realizar.
5. El ángulo a girar.

6. Cantidad de vueltas a girar.

Un vez validado el funcionamiento del servomotor se procedió de estructurar los comandos validos del sistema.

- Habilitar el motor: ME
M: Motor
E: Habilitar
- Deshabilitar el motor: MD
M: Motor
D: Deshabilitar
- Establecer los micropasos: MMSF, MMSH, MMS04, MMS08, MMS16, MMS32
M: Motor
MS: MicroSteps
F: Full step
H: Half step
04: 1/4 step
08: 1/8 step
16: 1/16 step
32: 1/32 step
- Establecer el sentido de giro del eje del motor: MTH, MTA.
M: Motor.
T: Turn (giro)
H: Horario.
A: Antihorario

'0' lógico antihorario
'1' lógico horario
- Establecer la cantidad de pasos: MS1201.
M: Motor
S: Step
1201: 4 dígitos para el número de pasos
- Establece el ángulo de giro del eje del motor: MA0360.
M: Motor
A: Ángulo
0360: 4 dígitos para especificar el valor del ángulo
- Establece la cantidad de vueltas que deberá girar el eje del motor: MFT003.
M: Motor
FT: Full Turns(vueltas completadas)
003: 3 dígitos para especificar el valor de las vueltas completas
- Establecer el Set Point del control PID: SP075.
SP: Set Point
075: Porcentaje correspondiente al máximo del caudal
- Detectar el nivel de agua: NA(nivel de agua).

Al final de cada una de las tramas, se incorpora el carácter de salto de línea que indica el límite final del comando. Una vez recibido el mismo, este pasa a ser procesado por una función, de forma que si presenta un error, el firmware envía

por el mismo medio una cadena “comando invalido”, caso contrario “comando válido”.

3.2.6. Algoritmo PID

Durante el diseño del proyecto se identificó la posibilidad de implementar un control de proceso con realimentación. La tarea particular del sistema de control, es la de determinar y actualizar la posición de la válvula a medida que cambian las condiciones de carga hasta que la variable controlada, -caudal- alcance el valor deseado, y permanecer allí indefinidamente aún produciéndose perturbaciones externas. Con base en las necesidades expuestas se definió incorporar al firmware un algoritmo de control PID como una herramienta tecnológica que permite cuantificar el error o desviación que existe entre un valor medido y un valor deseado de caudal.

$$Salida = \frac{100}{BP} \left[e_0 + \frac{1}{I_t} \int e_0 dt - D_t \frac{dm}{dt} \right] \quad (3.2)$$

Donde:

100/BP = ganancia del sistema (porcentaje)

e = error o diferencia entre el set point y el valor medido

1/I_t = tiempo de integración

D_t = tiempo de derivación

El mismo está basado en el algoritmo publicado por Brett Beauregard y se modificó para satisfacer las necesidades concretas del presente proyecto. Es útil destacar que se seleccionó un modo de control que consiste en una combinación de la acción integral con la acción proporcional eliminando la acción derivativa. Por lo que la 3.2 queda de la siguiente forma:

$$Salida = \frac{100}{BP} \left[e_0 + \frac{1}{I_t} \int e_0 dt \right] \quad (3.3)$$

Cuando el control es una válvula, la acción derivativa no se utiliza porque tiene justamente la propiedad de actuar en un porcentaje muy elevado de la salida ante variaciones muy pequeñas o rápidas del error, es decir la entrada. Es la parte del algoritmo que en el desarrollo teórico, se añadió al final de todo, para acelerar la acción de control. Por la naturaleza matemática del algoritmo, la acción de control de la parte derivativa es muy elevada en porcentaje, cuando la velocidad del error es elevada, aunque en magnitud sea pequeño. Ante una rápida variación (por ejemplo ruido electromagnético) se establece un porcentaje de salida muy grande. Esto hace que ante cualquier variación rápida del error, la válvula reaccione fuertemente, abriéndose o cerrándose. Estos movimientos repetitivos y violentos, lógicamente pueden terminar rompiendo la válvula. Es por esto que la acción derivativa no se utiliza cuando el actuador del sistema de control es una válvula.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

En este capítulo se detallan las pruebas realizadas durante el desarrollo del trabajo y finalmente se analizan los resultados obtenidos.

4.1. Ensayos de funcionamiento y calibración del sensor de presión

Se llevó a cabo pruebas acerca del correcto funcionamiento y calibración del sensor de presión MPX5010DP. Para esto, como primera instancia se utilizó un osciloscopio como instrumento de medición de la señal derivada del sensor, una fuente de alimentación de 5 voltios para la energización del dispositivo y finalmente una manguera flexible de cristal cuyo diámetro externo es de 5 mm y 3 mm de diámetro interno y 300 mm de largo. Un extremo de esta última se conecta a una de las espigas del sensor y el otro extremo se utiliza para introducir y evacuar agua mediante el uso de una jeringa. El propósito de este ensayo fue la adquisición de datos para reconocer que el sensor presente un comportamiento lineal, Voltaje vs. Presión [KPa], como lo especifica su respectiva hoja de datos. Para eso, a medida que varía la altura de la columna de agua de la manguera se obtiene a la salida del sensor su correspondiente valor de voltaje. De esta forma, se logró generar una tabla con valores de Voltaje vs. Altura. En la "Tabla 4.1", se puede apreciar que para cada valor de altura de columna de agua tiene asociado un valor de voltaje.

A partir de los resultados conseguidos como se puede ver en la "Tabla 4.1", se pudo proyectar una gráfica que responde a una función lineal como se puede apreciar en la Figura 4.1". Es importante notar en la gráfica de la "Figura 4.1", se encuentra presente un desplazamiento hacia arriba de la función de 0.250V respecto del eje de las abscisa, tal como lo especifica en la hoja de datos del sensor. Entonces para una altura de columna de agua de 0 cm el sensor está entregando a su salida 0.250V. Por lo tanto, luego de esta comprobación se concluyó que el sensor presentó un correcto desempeño.

TABLA 4.1. Adquisición de datos para la calibración del sensor.

Número	Altura[cm]	Voltios[V]
1	29,1	1.52 V
2	28,1	1,48 V
3	25,25	1,4 V
4	23,6	1,34 V
5	21,9	1,26 V
6	20,1	1,18 V
7	17,82	1,06 V
8	16,5	1,03 V
9	15,4	0,96 V
10	14,6	0,9 V
11	12,7	0,84 V
12	10,7	0,72 V
13	8,3	0,66 V
14	5,55	0,51 V
15	3,5	0,46 V
16	1,1	0,36 V
17	0,7	0,3 V
18	0,65	0,26 V
19	0 cm	0,25 V

4.2. Calibración del sensor en el prototipo

Una vez concluida la prueba de correcto funcionamiento del sensor y construido el prototipo se realizó un ensayo que consiste en la adquisición de datos del sistema completo mediante el empleo del firmware. Los datos proporcionados por dicho firmware fueron valores de presión, de voltaje y de altura del nivel de agua. Además, utilizando una regla estándar como instrumento de medición, se obtuvo el nivel de agua real en el prototipo. Así, de esta forma se logró realizar un ajuste, para la necesidad del trabajo en altura correspondiente a la columna de agua, utilizando una regresión lineal. A continuación, la "Tabla 4.2, muestra valores obtenidos en el ensayo realizado. Los mismos corresponden a un rango de altura comprendido entre el suelo del canal y el vértice del caudalímetro.

A partir de los valores expuestos en la "Tabla 4.2", podemos reconocer que la altura entre el suelo del canal y el vértice del caudalímetro es de 12,5 cm. Entonces, si el nivel de altura de agua es menor o igual que dicho valor el caudal de agua es equivalente a cero, ya que no supera la altura del vértice de dicho caudalímetro. En la "Tabla 4.3", se aprecia que para una altura superior a los 12,5 cm, hay presencia de agua que fluye por la hendidura de la placa de aforo, por lo que se puede obtener valores de caudal de agua, litros/minuto vs altura h de columna de agua.

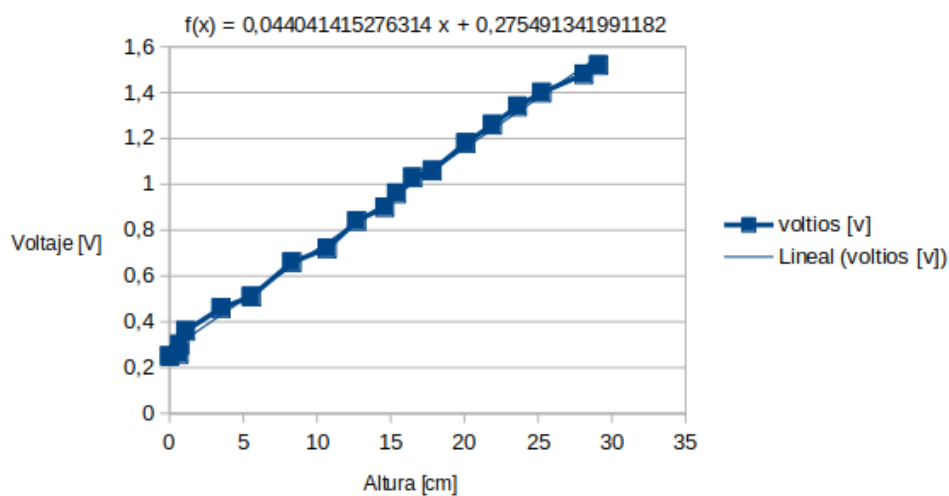


FIGURA 4.1. Función patrón del sensor de presión calibrado: voltaje vs. altura.

TABLA 4.2. Adquisición de datos del sistema I.

Número	Presión[Pa]	Voltios[V]	Altura- Sistema [cm]	Altura- Real [cm]
1	0,065	0,229	0,66	1
2	0,1	0,245	1,03	1,5
3	0,136	0,261	1,39	2
4	0,179	0,281	1,83	2,6
5	0,229	0,303	2,35	3
6	0,272	0,323	2,79	3,5
7	0,315	0,342	3,23	4,1
8	0,351	0,358	3,6	4,5
9	0,401	0,381	4,11	5,1
10	0,444	0,4	4,55	5,5
11	0,487	0,419	4,99	6,1
12	0,523	0,435	5,36	6,5
13	0,566	0,455	5,8	7
14	0,616	0,477	6,31	7,5
15	0,667	0,5	6,82	8
16	0,703	0,516	7,19	8,5
17	0,753	0,539	7,7	9,05
18	0,81	0,565	8,29	9,55
19	0,846	0,581	8,66	10
20	0,896	0,603	9,17	10,5
21	0,939	0,623	9,61	11
22	0,996	0,648	10,2	11,5
23	1,039	0,668	10,64	12
24	1,09	0,69	11,15	12,5

TABLA 4.3. Adquisición de datos del sistema II.

Número	Presión[Pa]	Voltios[V]	Altura-Sistema [cm]	Altura-Real [cm]	Caudal[l/m]
25	1	0,706	11,52	13	0,1
26	1,19	0,735	12,18	13,6	0,3
27	1,269	0,771	12,91	14,4	1
28	1,348	0,806	13,79	15,4	2,25
29	1,419	0,839	14,53	16,1	3,74
30	1,455	0,855	14,89	16,5	4,25
31	1,47	0,861	15,04	16,6	4,75
32	1,491	0,871	15,26	17,1	5,375

De la "Tabla 4.3", se puede deducir que el valor máximo y mínimo de caudal obtenido es de 5,375 y 0,1 l/m respectivamente. De la información obtenida a través de las mediciones que componen la "Tabla 4.3", se extrajeron los valores correspondientes a las variables caudal y voltaje para construir la "Tabla 4.4".

TABLA 4.4. Datos obtenidos para construir función polinómica de segundo grado.

Número	Voltios[V]	Caudal[l/m]
1	0,706	0,1
2	0,771	1
3	0,806	2,25
4	0,839	3,74
5	0,855	4,25
6	0,861	4,75
7	0,871	5,375

Estos datos se utilizaron para esbozar una gráfica y comprobar que responde a una función polinómica como la ecuación del modelo que se expone en la sección 3.1.3 medidor de caudal. Seguidamente, en la "Figura 4.2", se expone la gráfica obtenida y en la que se puede apreciar que manifiesta comportamientos de una función polinómica de segundo grado que involucra la variable caudal en función del voltaje.

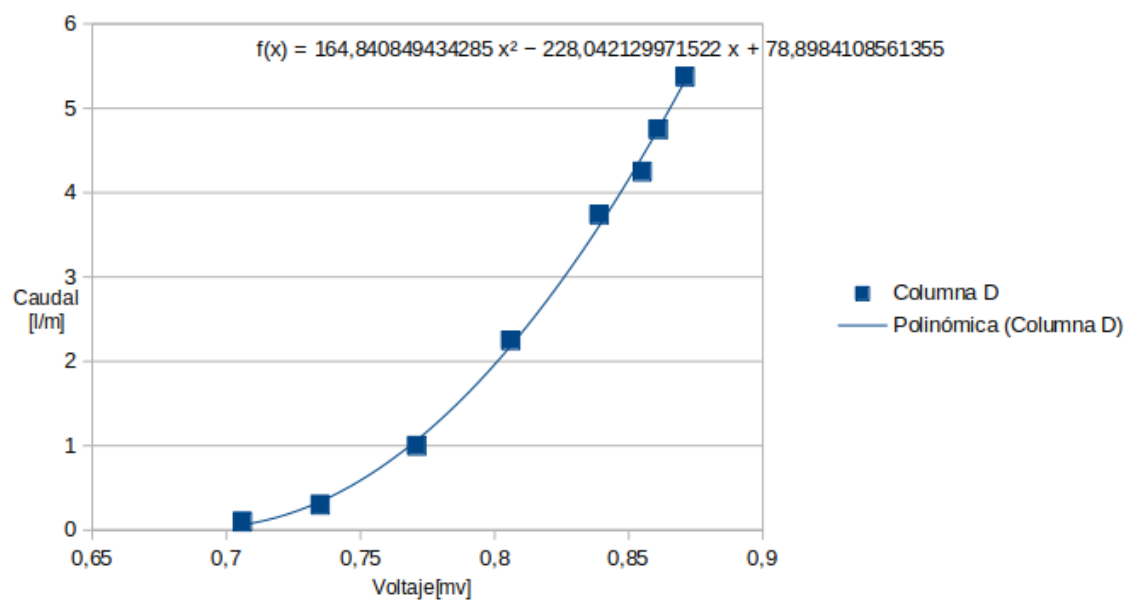


FIGURA 4.2. Función polinómica de segundo grado: caudal vs voltios.

Capítulo 5

Conclusiones

En este último capítulo se presentan las conclusiones generales acerca de la respuesta proporcionada por el sistema completo. Además se indica las posibles mejoras y los trabajos pendientes a realizar.

5.1. Resultados obtenidos

5.2. Próximos pasos

A continuación se detallan los trabajos futuros que se deben tener en cuenta para desarrollar y lograr un sistema global que pueda controlar el caudal en gran cantidad de compuertas que conforman una red de canal, de modo tal que se pueda desempeñar de forma autónoma y eficiente. Como se trata de un prototipo, es imprescindible como primera medida adaptar este sistema a una compuerta real perteneciente a una red de canal de agua y luego someter a este equipo a pruebas de campo para validar su correcto funcionamiento. El trabajo a efectuar posterior a las pruebas de campo, es desarrollar un sistema de software principal con características de escalabilidad, de modo tal que permita añadir o integrar una gran cantidad de “celdas primarias”, ya que la mayoría de las redes de canales de distribución de agua están conformada por un gran número de compuertas. Adicionalmente, este sistema deberá poseer la capacidad de gestionar la comunicación entre diferentes celdas primarias, instaladas en cada una de las compuertas de una red, mediante el empleo de la tecnología lorawan para que el sistema mismo trabaje de forma independiente. También será necesario desarrollar una aplicación móvil que permita gestionar a través del sistema principal la conducción de flujo de agua hacia un determinado canal de agua para abastecerse de dicho recurso y así cumplir con la dotación de riego de canal establecido previamente.