



**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 diciembre de 2020.*



## *Resumen*

El presente trabajo trata el diseño y construcción de un prototipo a escala, de un sistema de control de caudal de agua con salida a canal abierto. Como herramientas de trabajo, se aplicaron para la función de control, un algoritmo PID, como elemento actuador, se construyó una válvula de control servoalimentada, energizada por un motor paso a paso, y para la medición de la variable controlada, en este caso caudal, se fabricó un caudalímetro por placa de aforo triangular, cuyas características dimensionales se determinaron en forma empírica. La etapa de control cuyo componente principal es un microcontrolador con una arquitectura ARM - Cortex M4 cuenta con un sistema operativo de tiempo real, para aprovechar las características relevantes del determinismo y la comunicación entre tareas, además sobre el mismo 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

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción general</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción general . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Objetivos y alcances . . . . .	2
<b>2. Introducción específica</b>	<b>5</b>
2.1. Estructura general del sistema . . . . .	5
2.1.1. Este es el título de una subsección . . . . .	6
2.1.2. Figuras . . . . .	7
2.1.3. Tablas . . . . .	8
2.1.4. Ecuaciones . . . . .	9
<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>11</b>
3.1. Análisis del software . . . . .	11
<b>4. Ensayos y Resultados</b>	<b>13</b>
4.1. Pruebas funcionales del hardware . . . . .	13
<b>5. Conclusiones</b>	<b>15</b>
5.1. Conclusiones generales . . . . .	15
5.2. Próximos pasos . . . . .	15





# Índice de figuras

2.1. Ilustración de un vertedero triangular ubicado en determinado punto a medir caudal del canal. . . . .	5
2.2. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo. . . . .	7
2.3. Imagen tomada de la página oficial del procesador <sup>1</sup> . . . . .	7
2.4. ¿Por qué de pronto aparece esta figura? . . . . .	8
2.5. Tres gráficos simples . . . . .	8



# Índice de tablas

2.1. caption corto . . . . .	9
------------------------------	---



*Dedicado a... [OPCIONAL]*



# Capítulo 1

## Introducción general

Este capítulo introduce al lector sobre la necesidad de desarrollar un sistema que permita gestionar el recurso hídrico de manera eficiente en redes de canales.

### 1.1. Descripción general

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 que tienen que ver con la disponibilidad de tecnologías apropiadas, la organización de la demanda y la gestión.

En estas circunstancias, es posible reconocer situaciones cuando el recurso de agua es en abundancia, se puede entregar caudales mayores a los solicitados, asegurando agua a todos los usuarios, por lo que se puede identificar dos situaciones posibles, grandes pérdidas por derrames y baja eficiencia en la gestión del agua.

Actualmente son los operarios quienes recorren desde pocos hasta varios kilómetros y manualmente realizan las mediciones de los valores de parámetros necesarios con los que luego proceden a realizar el cálculo correspondiente y establecer a la compuerta en una determinada posición y de esta manera fijar el caudal de agua deseado.

Ante esta problemática, el propósito del presente proyecto es el diseño y construcción de un prototipo a escala de un sistema cuyo objetivo principal es suministrar una entrega eficiente de agua mediante la regulación de su caudal.

Como herramientas de trabajo, se aplicaron para la función de control, un algoritmo PID, como elemento actuador, se construyó una válvula de control servoalimentada, energizada por un motor paso a paso, y para la medición de la variable controlada, en este caso caudal, se construyó un caudalímetro por placa de aforo triangular, cuyas características dimensionales se determinaron en forma empírica.

## 1.2. Motivación

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.

Hoy por hoy, estos procedimientos presentan una capacidad de reacción lenta ante la demanda variable de cada uno de los usuarios de agua, ya que los operarios, en ocasiones deben recorrer varios kilómetros por lo que esto, representa un costo sumamente elevado mantener este servicio.

Este proyecto, además de regular el caudal de agua en canal abierto podrá resolver los problemas referentes a la disponibilidad de agua en regiones que presentan escasez por diferentes factores, no solo por sequías. Asimismo, no sólo busca maximizar la eficiencia en el abastecimiento de agua a cada uno de los usuarios en tiempo y forma, sino también minimizar la pérdida de la misma en la red de canales, y así, de esta manera, poder brindar mayor seguridad en el suministro de agua para el riego a cada productor en sus predios.

De este modo, se podrá obtener mejoras en la calidad de sus productos y por sobre todo, mayores rendimientos en su producción. El riego es la labor cultural que mayor impacto tiene sobre el rendimiento y la calidad en los productos.

A fin de minimizar errores que introduce al trabajar con un prototipo formado por una compuerta esta fue reemplazada por una válvula, ya que de esta forma permite trabajar sin filtraciones de agua y mayor precisión en la medición. Es importante aclarar que una red o las redes de canales se encuentran separadas por compuertas. En el prototipo la válvula simula ser una compuerta.

Uno de los objetivos planteados para una segunda fase de desarrollo es instanciar, este sistema desarrollado en el presente informe, en varias compuertas que constituye una red de canal de modo tal, que las mismas se comuniquen entre sí utilizando tecnología LoraWan y lograr como sistema general se ejecute de forma autónoma.

Con el presente sistema de control también se busca promover la recuperación del potencial productivo de los suelos agropecuarios que se han degradado por diferentes factores, entre ellos la escasez de agua.

Es de destacar que no existen soluciones nacionales, por lo tanto, el desafío es lograr ser competitivo en precio y prestaciones con 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 algo del sistema según las necesidades del cliente.

## 1.3. 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 del mismo es cumplir la función de interfaz entre la etapa de control y la de potencia correspondiente al driver del motor paso a paso.
- El firmware incluye un sistema de tiempo real.
- Para regular el caudal de agua, aplicar un algoritmo de control PID.
- Empleo de un sensor de presión que posea una precisión de 1 mm para detectar el nivel de la superficie del agua.
- Utilización de un potenciómetro de manera tal que conjuntamente a un motor paso a paso conformen un servo motor y posicionar a la válvula en un determinado ángulo.
- Proporcionar una gestión de agua de riego de forma eficiente.
- Desarrollar un firmware escalable de tal modo que permita la comunicación con otros firmware's instanciados en otras compuerta.



## Capítulo 2

# Introducción específica

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

### 2.1. Estructura general del sistema

Con el avance en el diseño de un plano para la fabricación del prototipo para los diferentes ensayos a realizar, ligeramente se identificó que emplear una compuerta se generarían filtraciones de agua en sus guías de desplazamiento que, en una maqueta, a escala producirían errores considerables al momento de realizar las mediciones relacionadas al nivel de agua, y cálculos pertinentes al caudal, por lo que en el sistema no se obtendrían los resultados esperados. En este entorno, el flujo de agua que fluya por debajo de la compuerta sería menor que en el caudalímetro, instrumento ubicado en un punto distante de la compuerta en el sentido que fluye el recurso hídrico. De esta forma obtendríamos dos valores de caudales diferentes debido, entre otros factores, a las filtraciones. Esto motivó el reemplazo de la compuerta por una válvula para eliminar los errores que introducen dichas filtraciones.

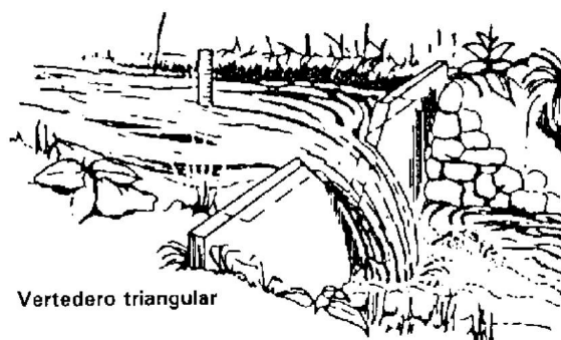


FIGURA 2.1. Ilustración de un vertedero triangular ubicado en determinado punto a medir caudal del canal.

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.

Cuando se quiere poner una lista tabulada, se hace así:

- Este es el primer elemento de la lista.
- Este es el segundo elemento de la lista.

Notar el uso de las mayúsculas y el punto al final de cada elemento.

Si se desea poner una lista numerada el formato es este:

1. Este es el primer elemento de la lista.
2. Este es el segundo elemento de la lista.

Notar el uso de las mayúsculas y el punto al final de cada elemento.

### 2.1.1. Este es el título de una subsección

Se recomienda no utilizar **texto en negritas** en ningún párrafo, ni tampoco texto subrayado. En cambio sí se debe utilizar *texto en itálicas* para palabras en un idioma extranjero, al menos la primera vez que aparecen en el texto. En el caso de palabras que estamos inventando se deben utilizar “comillas”, así como también para citas textuales. Por ejemplo, un *digital filter* es una especie de “selector” que permite separar ciertos componentes armónicos en particular.

La escritura debe ser impersonal. Por ejemplo, no utilizar “el diseño del firmware lo hice de acuerdo con tal principio”, sino “el firmware fue diseñado utilizando tal principio”.

El trabajo es algo que al momento de escribir la memoria se supone que ya está concluido, entonces todo lo que se refiera a hacer el trabajo se narra en tiempo pasado, porque es algo que ya ocurrió. Por ejemplo, “se diseñó el firmware empleando la técnica de test driven development”.

En cambio, la memoria es algo que está vivo cada vez que el lector la lee. Por eso transcurre siempre en tiempo presente, como por ejemplo:

“En el presente capítulo se da una visión global sobre las distintas pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Se explica el modo en que fueron llevados a cabo los test unitarios y las pruebas del sistema”.

Se recomienda no utilizar una sección de glosario sino colocar la descripción de las abreviaturas como parte del mismo cuerpo del texto. Por ejemplo, RTOS (*Real Time Operating System*, Sistema Operativo de Tiempo Real) o en caso de considerarlo apropiado mediante notas a pie de página.

Si se desea indicar alguna página web utilizar el siguiente formato de referencias bibliográficas, dónde las referencias se detallan en la sección de bibliografía de la memoria, utilizando el formato establecido por IEEE en [IEEE:citation]. Por ejemplo, “el presente trabajo se basa en la plataforma EDU-CIAA-NXP [CIAA], la cual...”.

### 2.1.2. Figuras

Al insertar figuras en la memoria se deben considerar determinadas pautas. Para empezar, usar siempre tipografía claramente legible. Luego, tener claro que **es incorrecto** escribir por ejemplo esto: “El diseño elegido es un cuadrado, como se ve en la siguiente figura:”



La forma correcta de utilizar una figura es con referencias cruzadas, por ejemplo: “Se eligió utilizar un cuadrado azul para el logo, como puede observarse en la figura 2.2”.



FIGURA 2.2. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo.

El texto de las figuras debe estar siempre en español, excepto que se decida reproducir una figura original tomada de alguna referencia. En ese caso la referencia de la cual se tomó la figura debe ser indicada en el epígrafe de la figura e incluida como una nota al pie, como se ilustra en la figura 2.3.



FIGURA 2.3. Imagen tomada de la página oficial del procesador<sup>1</sup>.

La figura y el epígrafe deben conformar una unidad cuyo significado principal pueda ser comprendido por el lector sin necesidad de leer el cuerpo central de la memoria. Para eso es necesario que el epígrafe sea todo lo detallado que corresponda y si en la figura se utilizan abreviaturas entonces aclarar su significado en el epígrafe o en la misma figura.

Nunca colocar una figura en el documento antes de hacer la primera referencia a ella, como se ilustra con la figura 2.4, porque sino el lector no comprenderá por qué de pronto aparece la figura en el documento, lo que distraerá su atención.

<sup>1</sup>Imagen tomada de <https://goo.gl/images/i7C70w>



FIGURA 2.4. ¿Por qué de pronto aparece esta figura?

Otra posibilidad es utilizar el entorno *subfigure* para incluir más de una figura, como se puede ver en la figura 2.5. Notar que se pueden referenciar también las figuras internas individualmente de esta manera: 2.5a, 2.5b y 2.5c.



(A) Un caption.



(B) Otro.



(C) Y otro más.

FIGURA 2.5. Tres gráficos simples

El código para generar las imágenes se encuentra disponible para su reutilización en el archivo **Chapter2.tex**.

### 2.1.3. Tablas

Para las tablas utilizar el mismo formato que para las figuras, sólo que el epígrafe se debe colocar arriba de la tabla, como se ilustra en la tabla 2.1. Observar que sólo algunas filas van con líneas visibles y notar el uso de las negritas para los encabezados. La referencia se logra utilizando el comando `\ref{<label>}` donde `label` debe estar definida dentro del entorno de la tabla.

```
\begin{table}[h]
\centering
\caption[caption corto]{caption largo más descriptivo}
\begin{tabular}{l c c}
\toprule
\textbf{Especie} & \textbf{Tamaño} & \textbf{Valor}\\
\midrule
Amhiprion Ocellaris & 10 cm & \$ 6.000 \\
Hepatus Blue Tang & 15 cm & \$ 7.000 \\
Zebrasoma Xanthurus & 12 cm & \$ 6.800 \\
\bottomrule
\hline
\end{tabular}
\label{tab:peces}
\end{table}
```

TABLA 2.1. caption largo más descriptivo

Especie	Tamaño	Valor
Amphiprion Ocellaris	10 cm	\$ 6.000
Hepatus Blue Tang	15 cm	\$ 7.000
Zebrasoma Xanthurus	12 cm	\$ 6.800

En cada capítulo se debe reiniciar el número de conteo de las figuras y las tablas, por ejemplo, figura 2.1 o tabla 2.1, pero no se debe reiniciar el conteo en cada sección. Por suerte la plantilla se encarga de esto por nosotros.

#### 2.1.4. Ecuaciones

Al insertar ecuaciones en la memoria dentro de un entorno *equation*, éstas se numeran en forma automática y se pueden referir al igual que como se hace con las figuras y tablas, por ejemplo ver la ecuación 2.1.

$$ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2] \right) \quad (2.1)$$

Es importante tener presente que si bien las ecuaciones pueden ser referidas por su número, también es correcto utilizar los dos puntos, como por ejemplo “la expresión matemática que describe este comportamiento es la siguiente:”

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r}) \Psi = -i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2.2)$$

Para generar la ecuación 2.1 se utilizó el siguiente código:

```
\begin{equation}
\label{eq:metric}
ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1-k\sigma^2} +
\sigma^2 \left[ d\theta^2 +
\sin^2 \theta d\phi^2 \right] \right)
\end{equation}
```

Y para la ecuación 2.2:

```
\begin{equation}
\label{eq:schrodinger}
\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r}) \Psi =
-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}
\end{equation}
```





## Capítulo 3

# Diseño e implementación

### 3.1. Análisis del software

La idea de esta sección es resaltar los problemas encontrados, los criterios utilizados y la justificación de las decisiones que se hayan tomado.

Se puede agregar código o pseudocódigo dentro de un entorno `lstlisting` con el siguiente código:

```
\begin{lstlisting}[caption= "un epígrafe descriptivo"]
las líneas de código irían aquí...
\end{lstlisting}
```

A modo de ejemplo:

```
1 #define MAX_SENSOR_NUMBER 3
2 #define MAX_ALARM_NUMBER 6
3 #define MAX_ACTUATOR_NUMBER 6
4
5 uint32_t sensorValue[MAX_SENSOR_NUMBER];
6 FunctionalState alarmControl[MAX_ALARM_NUMBER]; //ENABLE or DISABLE
7 state_t alarmState[MAX_ALARM_NUMBER]; //ON or OFF
8 state_t actuatorState[MAX_ACTUATOR_NUMBER]; //ON or OFF
9
10 void vControl() {
11
12     initGlobalVariables();
13
14     period = 500 ms;
15
16     while(1) {
17
18         ticks = xTaskGetTickCount();
19
20         updateSensors();
21
22         updateAlarms();
23
24         controlActuators();
25
26         vTaskDelayUntil(&ticks, period);
27     }
28 }
```

CÓDIGO 3.1. Pseudocódigo del lazo principal de control.



## Capítulo 4

# Ensayos y Resultados

### 4.1. Pruebas funcionales del hardware

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.



## Capítulo 5

# Conclusiones

### 5.1. Conclusiones generales

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

Algunas preguntas que pueden servir para completar este capítulo:

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

### 5.2. Próximos pasos

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.