

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE MONITOREO Y  
CONTROL DE HUMEDAD Y PH DEL REGADÍO SOBRE UNA PILA  
MINERAL PARA EXTRAER ORO POR LIXIVIACIÓN**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta:

**Jean Pierre Saravia Conislla**

ASESOR: MEng. Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda

**Lima, junio del 2020**

## Resumen

La extracción de recursos minerales por parte de las empresas mineras conlleva una inversión de recursos económicos elevados por lo que el control óptimo de dicho proceso se convierte en una necesidad primaria para la empresa puesto que permite que los recursos invertidos sean utilizados eficientemente en el desarrollo de dicho proceso a fin de obtener los mejores beneficios para la empresa.

El siguiente trabajo de investigación y desarrollo tiene como desafío reducir el consumo de material lixivante utilizado para el regadío sobre la pila de lixiviación. Se toma de muestra una hectárea, 10000m<sup>2</sup>, para realizar el trabajo de investigación.

La solución propuesta se basa en el diseño de un sistema automatizado para riego por goteo controlado desarrollado en base a la plataforma de desarrollo libre Arduino Uno. El mineral que se desea extraer de la pila es el oro, se escogió este metal puesto que, conjuntamente con el cobre, son los minerales de mayor valor económico para el Perú.

El objetivo principal del sistema es medir la humedad y el pH en la pila, estas variables serán las que representen a las variables del proceso. Estas emiten señales eléctricas las cuales serán procesadas para ser interpretadas por el controlador. Tanto el nivel de humedad, así como el nivel de pH son comparados con niveles de referencia, de esta manera el controlador tomará una decisión acerca del funcionamiento del actuador las cuales estarán representadas por válvulas solenoides. La operación de estas válvulas es de apertura y cierre de la misma, con la finalidad de limitar el flujo de material lixivante que será goteada hacia la pila mineral.

Además, se desarrollará un software de monitoreo basado en el programa LabView, la cual permite visualizar las variables involucradas en el proceso en una interfaz gráfica. De esta manera, el usuario puede llevar un seguimiento del proceso de riego, así como conocer el estado actual de la humedad y el pH en la pila.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1:</b>	
<b>Problemática de extracción de minerales a través de un sistema de lixiviación en pilas</b> .....	2
1.1 Conceptos generales.....	2
1.1. La minería.....	2
1.1.2. Ley del mineral.....	3
1.2. Aspectos físicos de la pila.....	3
1.3. Solución lixivante.....	5
1.4. Impacto social y ambiental.....	6
1.5. Minerales extraídos por lixiviación.....	7
1.6. Declaración del marco problemático.....	8
<b>CAPÍTULO 2:</b>	
<b>Tecnología de lixiviación en pilas</b> .....	10
2.1. Síntesis del objeto de estudio.....	10
2.2. Objetivos.....	10
2.2.1. Objetivos generales.....	10
2.2.2. Objetivos específicos.....	11
2.3. Comparación de lixiviación entre aspersores y goteros.....	11
2.3.1. Capital y costos de instalación.....	11
2.3.2. Mantenimiento.....	12
2.3.3. Cubrimiento de la superficie.....	13
2.3.4. Permeabilidad de la pila.....	14
2.4. Tecnologías usadas en lixiviación en pilas.....	14
2.4.1. Distribución general.....	14
2.4.2. Tuberías y emisores.....	14
2.4.3. Sensores.....	15
2.4.4. Actuadores.....	18
2.5. Diagrama de funciones.....	20
2.6. Concepto de solución óptima.....	20
2.6.1. Software de control.....	20

2.6.2. Algoritmo de control.....	21
2.6.3. Actuador.....	21
2.6.4. Arquitectura de control de riego.....	21
2.6.5. Sensor de humedad.....	21
2.6.6. Interfaz gráfica.....	22
2.6.7. Alimentación.....	22

### **CAPITULO 3:**

<b>Diseño de control y monitoreo del sistema.....</b>	<b>23</b>
3.1. Descripción general del prototipo.....	23
3.1.1. Requerimientos principales.....	23
3.1.2. Diagrama de bloques general.....	23
3.2. Descripción del proceso de riego por goteo automático.....	24
3.3. Descripción general de la simulación.....	26
3.4. Diseño del hardware del sistema.....	26
3.4.1. Sensor de pH.....	26
3.4.2. Sensor de humedad.....	28
3.4.3. Actuadores del sistema.....	32
3.4.4. Circuito de mando y potencia.....	35
3.4.5. Goteros.....	39
3.4.6. Alimentación.....	40
3.5. Diseño del software del sistema.....	42
3.5.1. Controlador.....	42
3.5.2. Conversor análogo digital(ADC).....	44
3.5.3. Lógica de control.....	45
3.5.4. Descripción de programa de control de riego automatizado.....	49
3.5.5. Interfaz gráfica para el usuario.....	51

### **CAPITULO 4:**

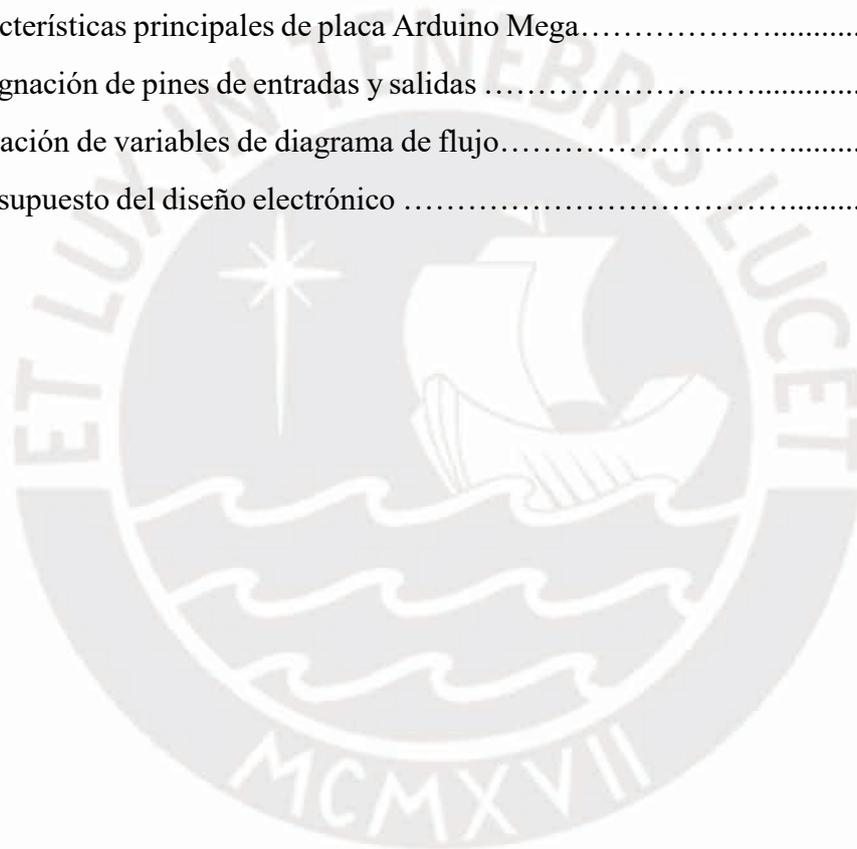
<b>Simulación, pruebas y resultados obtenidos.....</b>	<b>54</b>
4.1. Simulación y pruebas de diseño.....	54
4.2. Sistema de riego integrado a la interfaz gráfica de monitoreo.....	59
4.3. Presupuesto del diseño electrónico.....	63
Conclusiones.....	64

Recomendaciones.....66  
Bibliografía.....67



## Índice de tablas

Tabla 1. Costo de inversión para sistema de goteo.....	11
Tabla 2. Costo de inversión para sistema de aspersores.....	12
Tabla 3. Bloques funcionales del sistema.....	26
Tabla 4. Relación de conversión de corriente a voltaje.....	32
Tabla 5. Características de entrada y salida de acoplador óptico 4N35.....	36
Tabla 6. Características del MOSFET IRF640 .....	38
Tabla 7. Consumo de los componentes del sistema .....	41
Tabla 8. Características principales de placa Arduino Mega.....	43
Tabla 9. Designación de pines de entradas y salidas .....	43
Tabla 10. Relación de variables de diagrama de flujo.....	49
Tabla 11. Presupuesto del diseño electrónico .....	63



## Índice de imágenes

Figura 1. Lixiviación en pilas en Ortiz Gold mine .....	4
Figura 2. Arreglo de tuberías sobre una pila .....	15
Figura 3. Componentes de dispositivo TDR .....	16
Figura 4. Electrodo sensor FDR .....	17
Figura 5. Componentes internos de electrodo de pH .....	18
Figura 6. Grafico interno de válvula de bola .....	19
Figura 7. Partes de una válvula tipo globo .....	19
Figura 8. Diagrama de funciones de sistema de riego .....	20
Figura 9. Diagrama de bloques general de sistema .....	23
Figura 10. Esbozo general de planta de lixiviación .....	25
Figura 11. Partes internas y externas del electrodo .....	27
Figura 12. Módulo acondicionador de señal de pH .....	28
Figura 13. Electrodo MAS-1 FDR .....	29
Figura 14. Relación entre VWC y corriente directa(mA) .....	30
Figura 15. Conexión de sensor con etapa de acondicionamiento .....	31
Figura 16. Válvula DANFOSS EV250B .....	33
Figura 17. Válvula DANFOSS EV220B .....	34
Figura 18. Bobina DANFOSS 12 V dc .....	34
Figura 19. Circuito de potencia de válvula solenoide .....	35
Figura 20. Goteros auto compensados 10LPH .....	40
Figura 21. Fuente de poder tipo switching .....	42
Figura 22. Diagrama de flujo del programa principal.....	46
Figura 23. Continuación de figura 23.....	47
Figura 24. Continuación de figura 24.....	48
Figura 25. Diagrama de flujo de servicio de interrupción .....	48
Figura 26. Pantalla principal de la interfaz gráfica.....	51
Figura 27. Interfaz gráfica en funcionamiento de la primera etapa.....	52
Figura 28. Interfaz gráfica en funcionamiento de la segunda etapa.....	52
Figura 29. Programación principal de interfaz gráfica .....	53

Figura 30. Prueba de modulo ADC .....	55
Figura 31. Circuito de prueba de sistema .....	56
Figura 32. Desarrollo de primera etapa de riego.....	57
Figura 33. Desarrollo de segunda etapa de riego .....	58
Figura 34. Encendido de sistema de monitoreo .....	60
Figura 35. Proceso de riego en la zona 4 .....	60
Figura 36. Proceso de riego en la zona 4 .....	61
Figura 37. Proceso de riego culminado en la zona 4 .....	62



## INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años la minería se ha establecido como uno de los sectores económicos más influyentes en el desarrollo económico-social que atraviesa el estado peruano. Es así que en la actualidad el sector minero representa más del 50% de las divisas, el 20% de la recaudación fiscal y el 11% del Producto Bruto Interno además de generar alrededor de 200 000 puestos de trabajo de manera directa y más de 1 800 000 puestos de trabajo de manera indirecta [1].

La minería no es una actividad novedosa, en el Perú se viene desarrollando desde la época colonial, sin embargo, esta actividad se ha visto en la necesidad de mejorar, desarrollar y optimizar métodos, sistemas y procesos involucrados para que la extracción del mineral sea de manera eficiente sin afectar el medio ambiente que bordea el yacimiento minero.

Actualmente, el Perú es considerado uno de los principales exportadores de minerales de alto valor comercial a nivel mundial, la cual nos conduce a suponer la magnitud de complejidad que debe haber en su proceso de producción para que alcance los estándares de calidad establecidos por el mercado mundial actual.

En esta tesis se llevará a cabo el desarrollo del proceso de lixiviación en pilas, la cual tiene como finalidad obtener un prototipo automatizado del proceso obteniendo como resultado final la optimización y monitoreo general de la planta que maneja dicho proceso.

## CAPÍTULO 1

### Problemática de extracción de minerales a través de un sistema de lixiviación en pilas

#### 1.1 Conceptos Generales

##### 1.1.1 La minería

La minería es una actividad económica del sector primario representada por la explotación de los minerales que se han acumulado en el suelo y subsuelo en forma de yacimientos [1].

Entre los tipos de minería se destaca:

- **Minería a cielo abierto:** Actividades y operación mineras desarrolladas en superficie.
- **Minería subterránea:** Actividades y operaciones mineras llevadas a cabo bajo tierra.

Para obtener el mineral procesado, se ha establecido un conjunto de etapas que se detallan a continuación [2]:

- **Minería y transporte:** Etapa del proceso en la cual se procede a la voladura del suelo para extraer el mineral del subsuelo, una vez que el mineral es fragmentado por el minado se procede al transporte del mineral hacia la siguiente etapa del proceso.
- **Chancado de mineral:** El mineral proveniente de la voladura pasará a ser reducida de tamaño a través de plantas chancadoras primarias y secundarias.
- **Lixiviación:** El mineral ya chancado es juntado en montículos o pilas en la cual se aplica el método de lixiviación la cual consiste en la extracción de la materia soluble de una mezcla mediante la acción de un disolvente líquido.

- **Refinería y fundición:** finalmente se procesará el mineral obtenido por el proceso de lixiviación a través del secado en hornos a temperaturas mayores a 650°C, luego este será fundido en hornos de arco eléctrico a 1200°C.

### 1.1.2 Ley del mineral

La ley del mineral es una condición muy importante en la explotación del mineral puesto que hace referencia al grado de concentración de recursos naturales valiosos que se encuentran dentro de un material mineralizado, este valor de ley determinará la viabilidad económica de un proyecto de extracción minera, mientras mayor sea la ley del mineral, mayor será su valor económico [2].

Dentro de este criterio se reconocen 2 tipos de materiales mineralizados dentro del yacimiento explotado:

- **Mena:** Es un material enriquecido en minerales que se pueden aprovechar y extraer de la misma. Es así que mediante un proceso químico (lixiviación) se puede extraer el mineral contenido en la mena.
- **Ganga:** Material pobre de mineral que es descartado al extraer la mena de un yacimiento minero, esto debido a que carece de valor económico o de ser demasiado costoso su aprovechamiento. La ganga reduce la ley del mineral por lo cual es muy necesario separarlo de la mena.

## 1.2 Aspectos físicos de la pila

La pila de lixiviación es una estructura a manera de pirámide escalonada donde se acumula el mineral extraído. La altura de la pila usualmente supera los 7 metros con áreas superficiales que van desde 0.1 a 1 km<sup>2</sup>. La base de la pila está recubierta por una geo membrana, que es un material plástico de alta resistencia la cual impide la filtración de los químicos usados en el suelo, evitando así la contaminación del suelo y del agua de la zona.

Se instala en la parte baja de la pila un sistema de recepción de soluciones, tal como lo muestra la figura 1, la cual concentrará el material rico en mineral para luego ser transportado a la siguiente etapa de producción [3].



Figura 1: Lixiviación en pilas en Ortiz Gold mine [3]

Asimismo, se debe tener en cuenta ciertas características físicas internas que deben mantener para asegurar una correcta lixiviación.

- **Porosidad:** Relación entre volumen de huecos en un material y el volumen total, se debe tener una pila con el menor número de huecos para lograr una correcta lixiviación.
- **Permeabilidad:** Conductividad de un cuerpo poroso a los fluidos para desplazarse en el cuerpo de la pila. Una buena permeabilidad asegura un flujo constante de solución lixivante en la pila.
- **Aglomeración:** Proceso de asociación de partículas finas a las gruesas, esto queda determinado por la humedad de la pila, la cual al estar humedecida generará una tensión superficial suficiente para que, al colisionar las partículas

entre sí, las partículas finas se adhieran al tamaño de los gruesos y mejorar la calidad de lixiviación [3].

### 1.3 Solución Lixivante

La solución lixivante corresponde al compuesto químico que será mezclado conjuntamente con el mineral contenido en la pila para lograr obtener la solución rica en mineral. Entre las soluciones utilizadas se puede enunciar las siguientes:

- **Cianuro:** Este químico es usado para separar el oro de la mena. En su forma pura el cianuro es incoloro, aunque dispensa un olor a almendras amargas. Este olor desaparece por lo general después de la mezcla con los minerales de la mena [3].

El cianuro es un componente mortal para el ser humano si se es ingerido en la más mínima proporción, asimismo, la exposición a dosis bajas por un largo periodo puede causar bocio, la cual puede empeorar si la alimentación del individuo no es la adecuada. Por lo general, el cianuro es regado sobre la pila durante la explotación de oro, sin embargo, se tiene especial cuidado puesto que el contacto con el suelo afectará directamente a la misma y las lagunas aledañas. Actualmente el uso de cianuro está regulado por el estado, incluso existen países que prohíben su uso por el grado de peligrosidad que representa [3].

- **Ácido sulfúrico:** Este químico es usado para la extracción de cobre, así como otros sub-productos extraídos en minería. Este químico es mezclado con agua y metales pesados para que cumpla la función de solución lixivante. El lixivante  $H_2SO_4$  es aplicado sobre la superficie de la pila, donde este filtrará la pila lixiviando minerales de cobre, para producir una solución enriquecida de cobre, la cual es colectada sobre la base de la pila. Al igual que el cianuro, el ácido sulfúrico es altamente peligroso, la cual al contacto con la misma puede causar quemaduras, ceguera y muerte. Es por ello

que el gobierno ejecuta un estricto papel en la regulación del uso de este químico para procesos productivos que involucren un peligro latente para el medio ambiente [3].

#### **1.4 Impacto social y ambiental**

Los ingresos económicos generados por la explotación minera se ven opacados por los riesgos que implica el desarrollo de dicha actividad para las comunidades aledañas. El problema radica en la contaminación que se genera al desarrollar una actividad minera, esto genera una fuerte oposición social en las comunidades aledañas a los yacimientos, las cuales reclaman que la explotación minera genera serios daños a la ecología, a la salud y al agua. El agua adquiere valor significativo para las comunidades aledañas puesto que generalmente estas comunidades se dedican a la agricultura y ganadería donde el agua es primordial. Asimismo, las personas que viven por la zona se ven afectados directamente por los químicos utilizados por la minería. Estos elementos tóxicos pueden afectar la vía respiratoria o digestiva a través del aire, agua y alimentos contaminados, causando cáncer en la mayoría de sus afectados. Estos hechos han exacerbado a la población la cual hace frente a la explotación minera en dichas localidades. Debido a esto, las empresas están enfocándose en un desarrollo social entre la empresa y las comunidades, parte de este entendimiento conlleva a que las empresas mejoren sus procesos de producción de tal forma que la contaminación sea la mínima posible. En tal circunstancia, la lixiviación es un proceso altamente contaminante, la cual, si no es ejecutada correctamente será perjudicial para la salud ambiental. El control sobre cada proceso ejecutado durante el proceso de extracción de mineral será vital para mantener un desarrollo sostenible. Actualmente las empresas han creado áreas específicamente para mantener una comunicación entre la empresa y los lugareños, con la finalidad de asegurar un bienestar para ambos. Esta estrategia ha resultado favorable para ambas partes implicadas, esto se ve reflejado en la cantidad de obras sociales que realiza la empresa en la zona, los puestos de trabajo ofrecidos a los lugareños, la disminución progresiva de contaminación a través de la mejora de sus

procesos y la ausencia de quejas contra el desarrollo de este nuevo planteamiento para la extracción de mineral de los yacimientos [4].

### 1.5 Minerales extraídos por lixiviación

- **Oro:** metal amarillo utilizado principalmente en joyería y como activo de inversión. Se encuentra en la naturaleza, especialmente en la corteza terrestre combinado con otros metales, fundamentalmente con la plata. La principal empresa dedicada a la extracción de oro es la minera Yanacocha, la cual está ubicada en la provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca a 800 kilómetros al noreste de la ciudad de Lima. La producción peruana de oro anual es de 180 Toneladas métricas en promedio, con picos de hasta 208 toneladas métricas en el año 2005. Esto sitúa al Perú como el sexto productor de oro del mundo por detrás de países como China, Australia, Rusia, Estados Unidos y Canadá. Entre los principales consumidores de este mineral se encuentran las industrias dedicadas a la joyería, así como productores de lingotes y monedas y desarrolladores electrónicos [5].
- **Plata:** Metal color blanco brillante que usualmente se encuentra en la corteza terrestre junto a otros minerales. Su brillo y ductilidad lo hacen ideal para las joyerías y artesanías. La principal empresa dedicada a la extracción de plata es Antamina, la cual está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huaraz en la región Áncash a 200 kilómetros de la ciudad de Huaraz. La producción de plata en el Perú ha ido en aumento desde el año 2000 en la cual la producción era de 2438 Toneladas métricas, hasta llegar a 4375 toneladas métricas en el año 2016. Esto sitúa al Perú como el segundo productor de plata en el mundo por detrás de México. Entre los principales consumidores de este mineral se encuentran las industrias dedicadas a la producción de productos eléctricos, electrónicos, productores de lingotes y monedas y productores de joyería [6].

- **Cobre:** Metal color rojizo que tiene la capacidad de transportar calor y electricidad. Se encuentra en la naturaleza combinado con otros metales como el oro, la plata y el plomo. La principal empresa dedicada a la extracción de cobre es Cerro Verde, la cual está ubicada en el distrito de Uchumayo, en la provincia de Arequipa, departamento de Arequipa. La producción de cobre ha ido en aumento desde el año 2000, en la cual había una producción de 554 toneladas métricas, hasta el año 2016 en la cual logró la producción de hasta 2354 toneladas métricas. Esto sitúa al Perú como el segundo productor de este mineral en el mundo por detrás de Chile. Los principales consumidores son los sectores de industriales de electricidad y construcción de infraestructuras [7].

## 1.6 Declaración del marco problemático

El proceso de lixiviación no es un sistema novedoso, por lo que la tecnología utilizada en este proceso ha ido evolucionando favorablemente. Sin embargo, aún existen falencias que pueden conllevar a una mala ejecución de este proceso que a su vez puede afectar de manera directa la economía de la empresa y el medio ambiental que lo rodea.

La distribución y uniformidad del fluido sobre las pilas de lixiviación determina el grado de eficacia del proceso de lixiviación, por lo cual se plantea controlar estos procesos a través de la realización de un sistema que comprenda el monitoreo, mantenimiento y control de riego sobre las pilas de lixiviación. Esto se aplica sobre una red de riego que incluye tuberías de distribución, así como válvulas de distribución.

Lo que se desea es mantener una tasa de riego constante medida en l/h por cada m<sup>2</sup>, teniendo control de que la pila no colapse por exceso de flujo. Para eso se realiza un riego homogéneo sobre toda la pila durante todo el tiempo que dure la lixiviación.

El sistema de monitoreo estará diseñado para obtener información en tiempo real de las distintas variables importantes en el proceso de lixiviación de minerales. Con la

información brindada es posible realizar un modelo de riego específica para la pila, para lograr metas objetivas de desarrollo económico y prevención de contaminación ambiental latente.



## **CAPÍTULO 2**

### **Tecnología de lixiviación en pilas**

#### **2.1 Síntesis del objeto de estudio**

A lo largo de todo el documento se ha expuesto sobre el proceso de lixiviación, así como la importancia de obtener un control total del proceso, debido a que una mala ejecución de este proceso podría afectar directamente el capital de inversión en extracción, así como el ambiente donde se desarrolla dicho proceso. Por ello para controlar y reducir el impacto negativo producido por el proceso se han formulado normativas y leyes por parte del estado que exigen que estos procesos altamente contaminantes estén correctamente regulados para que cumplan con los estándares establecidos. En el presente capítulo se analizarán las posibles tecnologías a utilizar para realizar la automatización del proceso. La finalidad es obtener un sistema automatizado de riego, teniendo como prioridad principal regular la tasa de riego sobre la pila; esto es posible con el control de apertura y cierre de las válvulas en función a los datos proporcionados por los sensores de humedad y pH ubicados dentro de la pila.

Además, se plantea el diseño de una interfaz gráfica amigable en la cual el usuario pueda observar las variables que intervienen en el proceso de lixiviación. Estos parámetros serán leídos directamente de la pila por sensores en tiempo real. Esto permitirá al usuario llevar un monitoreo general del proceso, así como intervenir en caso se detecte alguna anomalía en el proceso.

#### **2.2 Objetivos**

##### **2.2.1 Objetivo general**

Diseño de un sistema automatizado de monitoreo y control para el proceso de lixiviación sobre pilas.

### 2.2.2 Objetivos específicos

1. Diseñar un esquema general del funcionamiento y distribución de una planta de extracción de mineral a través de la lixiviación sobre una pila mineral.
2. Seleccionar los sensores adecuados para cada parámetro a medir que sea relevante en el proceso.
3. Generar señales de control que puedan ser interpretadas por los actuadores que intervienen de manera directa en el proceso.
4. Implementar una interfaz gráfica amigable que permita la visualización de los datos obtenidos a través de los sensores.
5. Evaluar el correcto funcionamiento del sistema, realizando pruebas de lectura de sensores y respuesta de salida hacia los actuadores.
6. Prueba de concepto entre controlador, sensor y actuador.

### 2.3 Comparación de lixiviación entre aspersores y goteros

#### 2.3.1 Capital y costos de instalación

Para conocer el coste de inversión para la instalación de los sistemas de riego se realizó un análisis de costo de los materiales a usar en una pila con un área aproximada de 90 000 pies<sup>2</sup>, con una altura de 20 pies de altura. Es así que la tabla 1 muestra un análisis de costo si se usa el riego con goteras y la tabla 2 muestra un análisis de costo si se usa el riego con aspersores.

Tabla 1: Costo de inversión para sistema de goteo [8]

Ítem	Costo (dólares)	Cantidad	Costo Total (dólares)
Tubo de acople y spline de 2"	7.59	300	2277
Terminal de 6"	26.56	1	26.56
Válvula de 6"	290	1	290
Tubo de goteo	1.42	3000	4620
Terminal de tubo de goteo	0.15	200	30
Adaptador de 0.5"	0.30	200	60
<b>Total</b>			<b>7303.56</b>

Tabla 2: Costo de inversión para sistema de aspersores [8]

Ítem	Costo (dólares)	Cantidad	Costo Total (dólares)
Tubo de acople y spline de 2"	7.59	600	4554
Tubo de acople y spline de 6"	7.59	300	2277
Tubo tipo T de 6" x 6" x 2"	125.3	10	1253
Terminal de 6"	26.56	1	26.56
Terminal de 2"	8.64	10	86.4
Aspersor	3.64	100	364
Regulador de presión	4.48	100	448
Válvula de 6"	290	1	290
Válvula de 2"	57.42	10	574.20
<b>Total</b>			<b>9873.16</b>

Se puede apreciar la ventaja que posee el sistema de goteo sobre el sistema de aspersores en cuanto a coste de instalación.

### 2.3.2 Mantenimiento

Los aspersores arrojan la solución al aire, la cual puede producir la evaporación de la solución. Asimismo, al momento que las gotas impactan sobre la superficie, tuberías y rociadores, se forman precipitaciones por la evaporación, así como la formación de costras de la solución. Todos estos detalles de la forma de trabajo de los aspersores producen un trabajo irregular puesto que los aspersores suelen pegarse haciendo que la solución sea rociada en una sola dirección, esto forma aniegos, así como una mala distribución de la solución de lixiviación lo cual conlleva a una lixiviación no uniforme dentro de la pila. Los aspersores requieren ser lavados con ácidos o en peor caso ser reemplazados para quitar las costras formadas sobre estos. Para el reemplazo de los aspersores se requiere del cierre de la línea de transmisión de solución, así como el uso de ropa de aislamiento total del operador para evitar todo tipo de contacto con la solución química, además de un monitoreo constante para minimizar el número de aspersores pegados [8].

El sistema por goteo también se ve afectado por la evaporación, la cual genera costras alrededor de los goteros. En primera instancia para la limpieza de estas costras se utiliza una tenaza al final de la línea de transmisión; si el tamaño de las costras es muy grande que no se puede remover con la tenaza, los operarios se encargan de la limpieza utilizando únicamente guantes de protección. El efecto de las costras formadas no afecta ni la porosidad, erosión, empozamientos ni derrumbes, es así que los requerimientos de monitoreo sobre los goteros son mínimos [9].

### **2.3.3 Cubrimiento de la superficie**

Se puede cubrir el 100% del área superficial de la pila con un sistema de aspersores, aunque debe haber superposición de zonas de riego para obtener una aplicación uniforme de la solución en la superficie de la pila. Parece lógico que, si se riega de manera uniforme la superficie, el movimiento vertical de la solución debería ser uniforme, sin embargo, en la realidad no se aprecia esta suposición, puesto que el mineral no es homogéneo. Se conoce que, si existe una buena mezcla de tamaños de partículas en la superficie, es decir, que los macro poros estén bien distribuidos, la solución se infiltra y viaja a través del mineral por pequeños poros capilares la cual forman capas continuas alrededor de las partículas de mineral logrando que la solución se mueva en todas las direcciones, desde las altas tensiones hacia las bajas tensiones, despreciando el efecto de la gravedad. Si bien en concentraciones de partículas muy finas el movimiento de la solución es lenta, se distribuye de manera uniforme. Se define entonces que la importancia de recubrir toda la superficie de solución no es completamente necesario si se tiene una superficie con buena mezcla de tamaño de materiales por lo que el sistema de goteo sería lo más óptimo en cuanto a consumo de solución [9].

### **2.3.4 Permeabilidad de la pila**

La permeabilidad es el factor más importante durante el proceso de recuperación de mineral. Se debe tener especial cuidado en la elección del sistema de riego puesto que este puede influenciar significativamente la porosidad cerca de la superficie. Para el caso del sistema de aspersión, las gotas que rocían son grandes, estos reducen los efectos nocivos del viento y la evaporación, sin embargo, al momento de que las gotas golpean la superficie de la pila, lavan las partículas finas dentro de los poros reduciendo la velocidad de infiltración a valores menores a los que inicialmente poseía la pila. Las costras de carbonato de calcio que se forman reducen la permeabilidad de la pila. Bajo el sistema de goteo, la solución se mueve desde el punto de impacto en donde existe baja tensión hasta llegar a los valores de alta tensión. Con este proceso de caída vertical se logra mantener la permeabilidad original durante el ciclo de irrigación. Si bien aún se forman costras en la superficie, estas son de menor dimensión, logrando que su efecto sea mínimo sobre las características de permeabilidad y porosidad de la pila [10].

## **2.4 Tecnologías usadas en lixiviación en pilas**

### **2.4.1 Distribución general**

La solución lixivante necesaria para el regadío estará conservada en un reservorio, dicha solución debe ser distribuida a lo largo de toda la pila mineral. Para proporcionar un adecuado riego sobre todos los sectores de la pila se debe proporcionar a una presión adecuada a la solución. Dicha presión puede ser obtenida a través del método de bombeo (uso de motor y bomba) o por acción de la gravedad.

### **2.4.2 Tuberías y emisores**

Las tuberías serán las encargadas de distribuir la solución por toda la pila. Para seleccionar la tubería a usar se debe tener en cuenta el caudal y la presión que requiere la solución. Se pueden

encontrar diámetros que van desde  $\frac{1}{2}$ " hasta mayores a 4". Asimismo, se debe tener en cuenta el material que será transportado por las tuberías, de esto depende el material de construcción de tubería a utilizar. De igual forma, los emisores son el elemento final del sistema, estos emisores pueden ser aspersores, micro aspersores, goteros, goteros auto compensados, etc. En la figura 2 se puede apreciar un tendido de mangueras con emisores tipo goteras instaladas sobre la pila.



Figura 2: Arreglo de tuberías sobre una pila [10]

### 2.4.3 Sensores

#### 1. Sensor de humedad

- **Reflectometría de Dominios de tiempo (TDR)**

El principio de funcionamiento se basa en la medida del eco producido por una señal eléctrica que es enviada a través de un material húmedo. Esta señal enviada genera una reflexión cada vez que se encuentre con un cambio de medio de propagación. La medición proporcionada por este método es de carácter proporcional, por lo cual, si la humedad es mayor, mayor será el tiempo que le tome al pulso recorrer el medio, asimismo, si el material es seco, el tiempo será menor. Este método es de alta precisión, sin embargo, el costo de implementación y el

tiempo de respuesta son elevados. En la figura 3 se describe los principales componentes que conforman los sensores TDR.

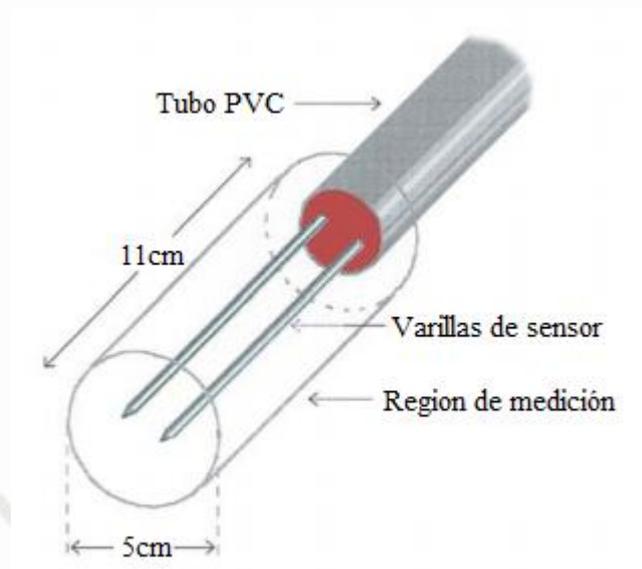


Figura 3: Componentes de dispositivo TDR [11]

- **Reflectometría de Dominios de Frecuencia (FDR)**

También llamado sensor de capacitancia, basa su funcionamiento en electrodos enterrados en el suelo, estos electrodos y el suelo adyacente forman un condensador cuya capacidad está en función de la constante dieléctrica del suelo, la cual está relacionada con el contenido de humedad del suelo. Este sensor es resistente y no requiere de un mantenimiento exhaustivo. El sensor FDR tiene la ventaja de no verse afectados por la profundidad donde se instala. Posee un tiempo de respuesta rápido y alta precisión. En la figura 4 se puede apreciar la estructura física de un sensor FDR (electrodos y condensador).



Figura 4: electrodo sensor FDR [11]

## 2. Sensor de pH

Este sensor mide la alcalinidad de un elemento, la cual es medido en una escala de 0 a 14. Como se aprecia en la figura 5, el sistema de medición está conformado por tres partes: Un electrodo de medición de pH, un electrodo de referencia y un medidor de alta impedancia de entrada. El electrodo de pH se puede considerar como si fuera una batería puesto que la tensión que varía en el electrodo corresponde a la variación de pH medida. Este electrodo es un bulbo de vidrio sensible a iones de hidrógeno, la cual tiene una salida en mili voltios que varía conforme las alteraciones en la concentración de los iones de hidrógeno dentro y fuera del bulbo. Para el electrodo de referencia, su salida no varía con la actividad de los iones de hidrógeno. La elección de los electrodos de pH es el factor más importante para la medición de pH puesto que de acuerdo a la tecnología de fabricación utilizada será la precisión de medición.

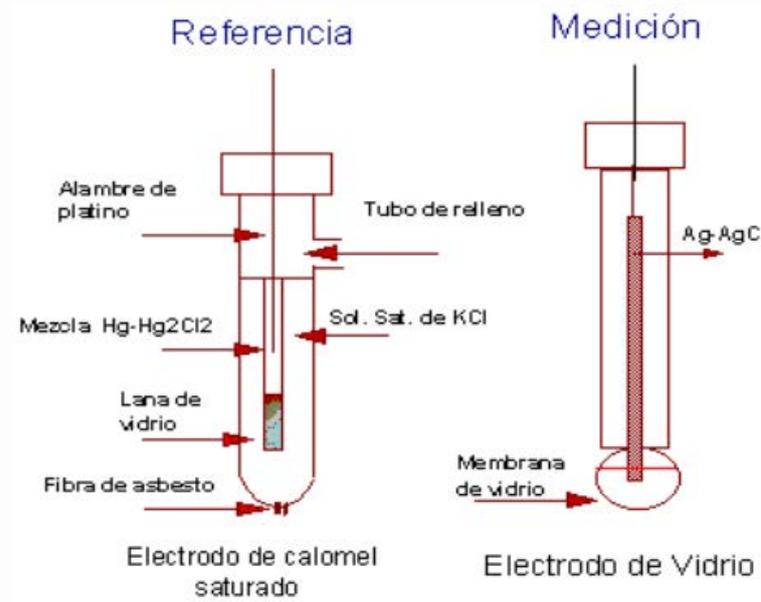


Figura 5: Componentes internos de electrodo de pH [12]

#### 2.4.4 Actuadores

- Válvula de bola:** Válvulas utilizadas para el control ON/OFF con muy buena capacidad de cierre y apertura. Se pueden fabricar de paso completo, es decir, que la válvula es diseñada del mismo tamaño de interior de las tuberías generando una caída de presión mínima. Se sabe que esta válvula funciona únicamente completamente abierta o completamente cerrada, lo que nos indica que no es adecuada para el control de caudal. Es de apertura rápida y necesita poco mantenimiento, sin embargo, es propensa a la cavitación. En la figura 6 se muestra la estructura interna de las válvulas de bola.

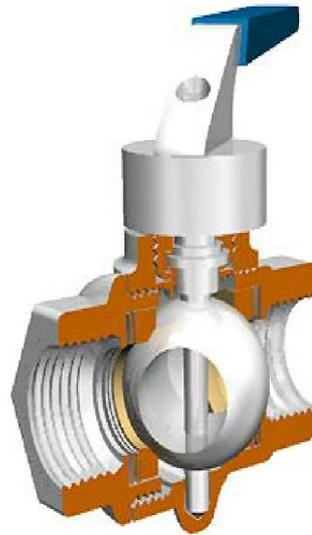


Figura 6: Gráfico interno de válvula de bola [13]

- **Válvula de globo:** básicamente funciona a través de un tapón que se desplazará de manera perpendicular hacia un asiento en donde este desplazamiento puede ser parcial o total, lo que permite un control tanto ON/OFF, así como un control de variable de caudal, sin embargo, este actuador produce una gran caída de presión. La figura 7 muestra una breve descripción de las partes de una válvula tipo globo.

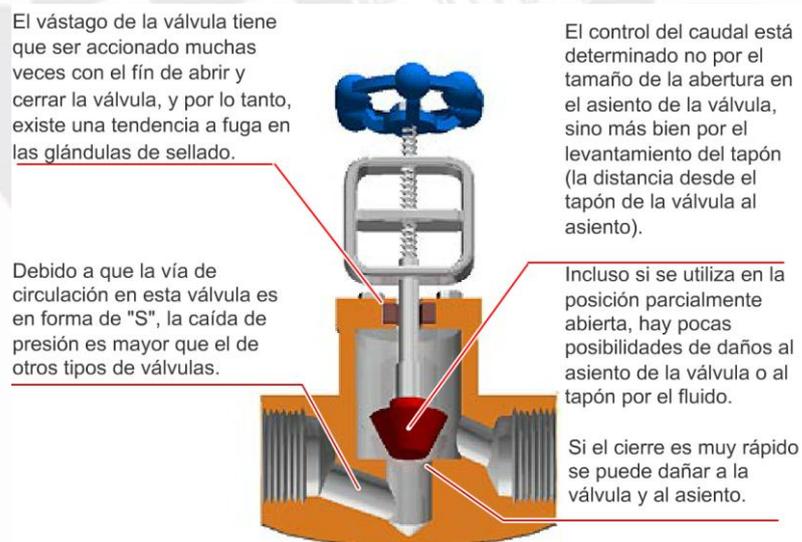


Figura 7: Partes de una válvula tipo globo [13]

## 2.5 Diagrama de funciones

En la figura 8 se muestra el diagrama de funciones que desarrolla el sistema de control.

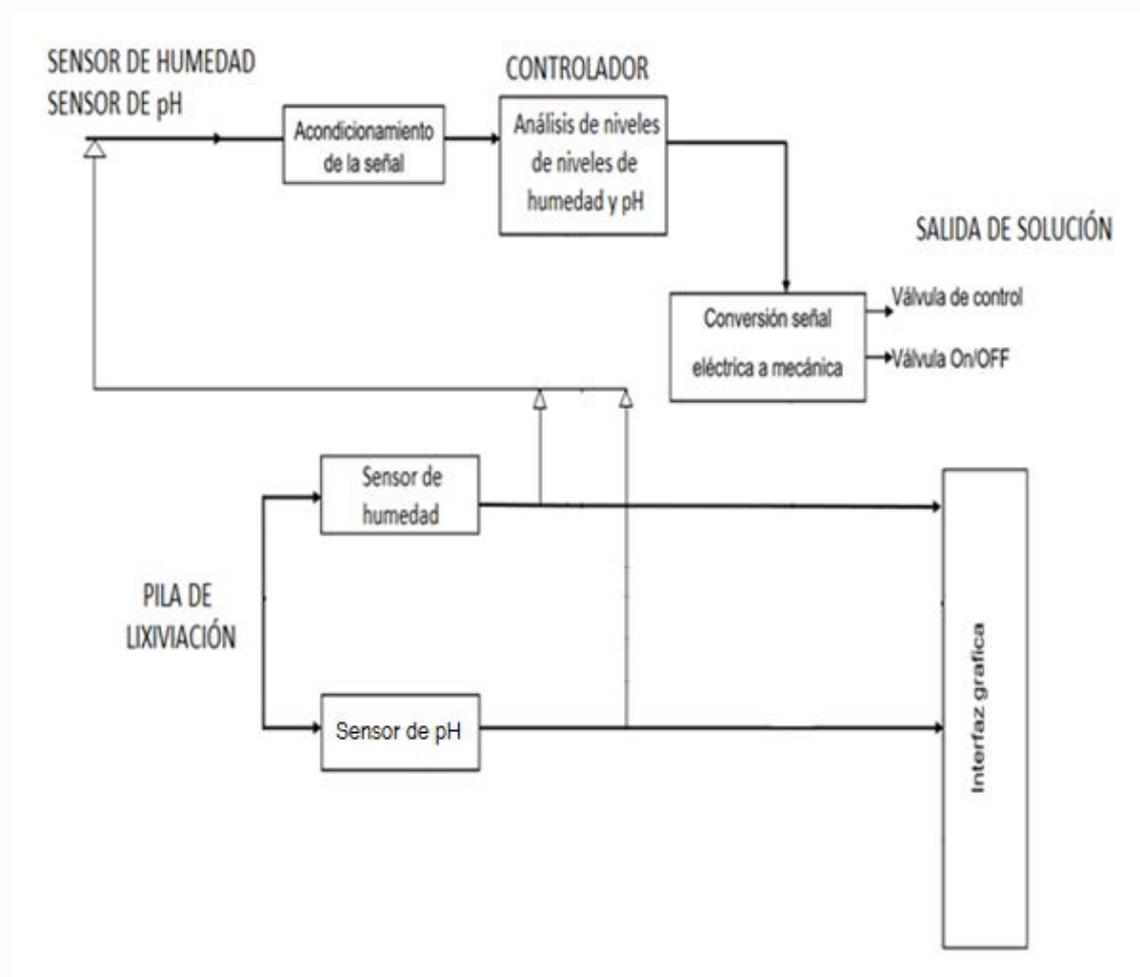


Figura 8: Diagrama de funciones de sistema de riego [Elaboración Propia]

## 2.6 Concepto de solución óptima

### 2.6.1 Software de control

El software de control será ejecutado en una placa Arduino que contiene un microcontrolador integrado. Esta placa contiene los puertos necesarios para el uso de sensores y actuadores, además de ser amigable con el entorno de trabajo en el cual se ejecutará el algoritmo de control.

### **2.6.2 Algoritmo de control**

El método de control a utilizar es la lógica On/OFF. Se eligió este modelo de control debido a que se considera el más práctico para apertura/cierre de las válvulas del proceso. Asimismo, este método es ampliamente usado en sistemas de control industrial, por lo que se posee una amplia información acerca de este método.

### **2.6.3 Actuador**

Las válvulas utilizadas serán de tipo ON/OFF puesto que para nuestro sistema se necesitará abrir completamente o cerrar completamente el paso de solución lixiviante y cal. Este tipo de válvulas se rigen por los niveles de tensión que reciben entre sus terminales, los cuales serán comandadas por el controlador del sistema.

### **2.6.4 Arquitectura de control de riego**

En este caso se usarán goteros auto compensados, las cuales estarán ordenados en filas paralelas sobre la superficie de la pila. Estos formarán un arreglo cuadrangular de manera que el material lixiviante discurra de manera uniforme sobre toda la pila. Para el caso de las tuberías, se utilizará polietileno de alta densidad(HDPE) por su alta resistencia al transporte de fluidos mineros, flexibilidad y menor coste de instalación y mantención.

### **2.6.5 Sensor de humedad**

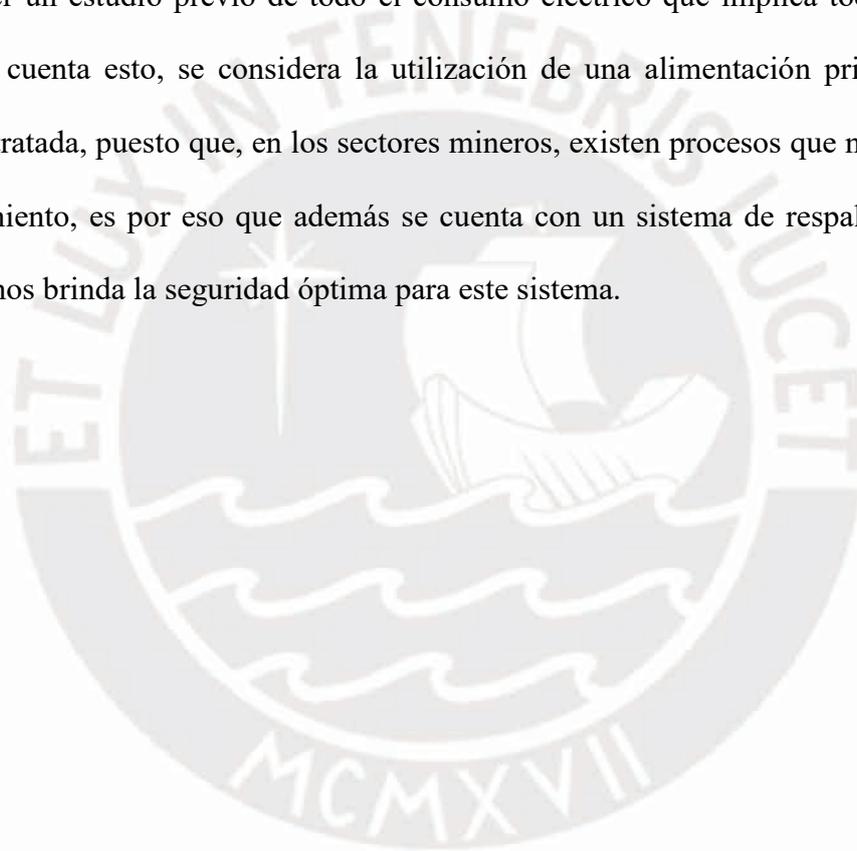
El tipo de sensor a utilizar será de tipo FDR, este sensor tiene la característica de ser bastante robusto, condición necesaria debido a la zona de trabajo donde se desempeña. Asimismo, es sencillo de instalar y poner en funcionamiento. Posee un tiempo de respuesta rápido y alta precisión.

### **2.6.6 Interfaz gráfica**

La interfaz gráfica a utilizar será el programa de National Instrument LabView. En esta interfaz se representará los distintos valores leídos de la pila, tales como pH y humedad. Asimismo, se logrará apreciar y manipular el funcionamiento de las válvulas que regulan el flujo de solución sobre la pila.

### **2.6.7 Alimentación**

Se debe hacer un estudio previo de todo el consumo eléctrico que implica todo el sistema. Teniendo en cuenta esto, se considera la utilización de una alimentación principal de red eléctrica contratada, puesto que, en los sectores mineros, existen procesos que no deben parar su funcionamiento, es por eso que además se cuenta con un sistema de respaldo basado en baterías que nos brinda la seguridad óptima para este sistema.



## CAPÍTULO 3

### Diseño de control y monitoreo del sistema

#### 3.1 Descripción general del prototipo

##### 3.1.1 Requerimientos principales.

El diseño propuesto debe cumplir con los requerimientos que exige las funciones realizadas en el riego de las pilas de lixiviación:

- Monitoreo en tiempo real de nivel de pH y humedad en la pila.
- Control de riego automatizado sobre la pila a través de un sistema de goteo auto compensado.
- Control de nivel de pH en la pila en un rango de 9 a 11.

##### 3.1.2 Diagrama de bloques general

El siguiente diagrama representa el sistema de control que se va a seguir para el prototipo, se diseña para un sistema de control en lazo cerrado con un diagrama de bloques que se muestra en la figura 9.

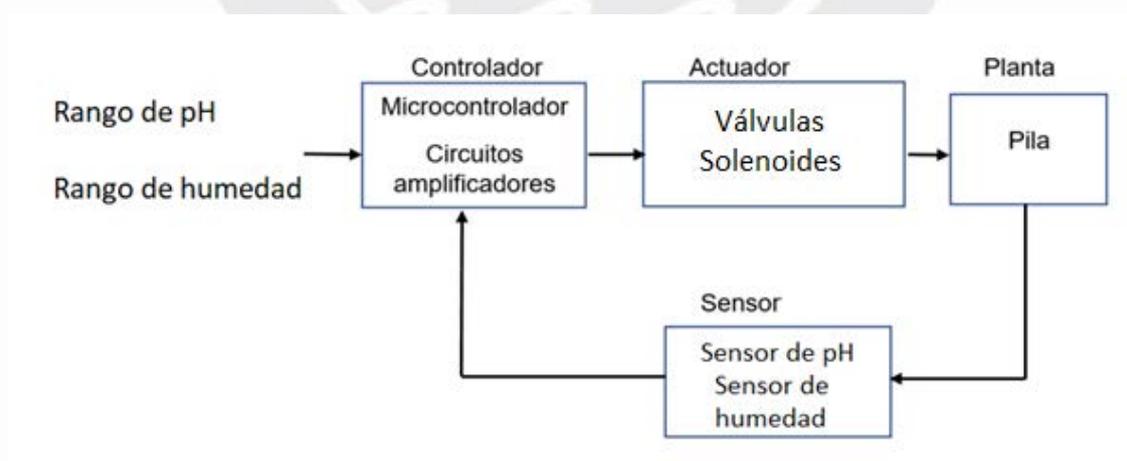


Figura 9: Diagrama de bloques general de sistema [Elaboración Propia]

### 3.2 Descripción del proceso de riego por goteo automático

El proceso se da inicio con la medición de las variables de interés, para este caso la humedad y el pH. Estas variables representan a las variables del proceso cuyas lecturas serán evaluadas por el controlador la cual determinará el funcionamiento de los actuadores, en este caso, las válvulas solenoides. Estas válvulas disponen de 2 estados de operación, abierta o cerrada completamente, la acción dependerá del controlador. Con la apertura o cierre de las válvulas se modifica el valor de la variable manipulada. Esta variable está representada por el flujo de solución lixivante y flujo de lechada de cal.

El área de la pila es de una hectárea por lo que se ha dispuesto a dividir en 8 áreas iguales con dimensión de 25 x 50 metros (1250m<sup>2</sup>). La finalidad de dividir el terreno es lograr una técnica de riego adecuada tal como se muestra en la figura 10. El proceso se realiza encendiendo de manera secuencial las válvulas que discurren la solución lixivante hasta tener todas las válvulas abiertas regando sobre todo el terreno hasta alcanzar el nivel de humedad requerido. Cuando se sobrepasa los niveles de humedad en algún área del terreno se cierra la válvula de dicha área hasta que la humedad disminuya a los límites establecidos. Asimismo, se cuenta con una válvula de control de pH por cada área la cual se apertura cuando el nivel leído de la pila disminuye a menos de 9 y será apagada cuando alcance un nivel de 11. El tiempo de riego por sector es de 30 días, luego de estas, las válvulas serán apagadas y la lixiviación habrá sido completada.

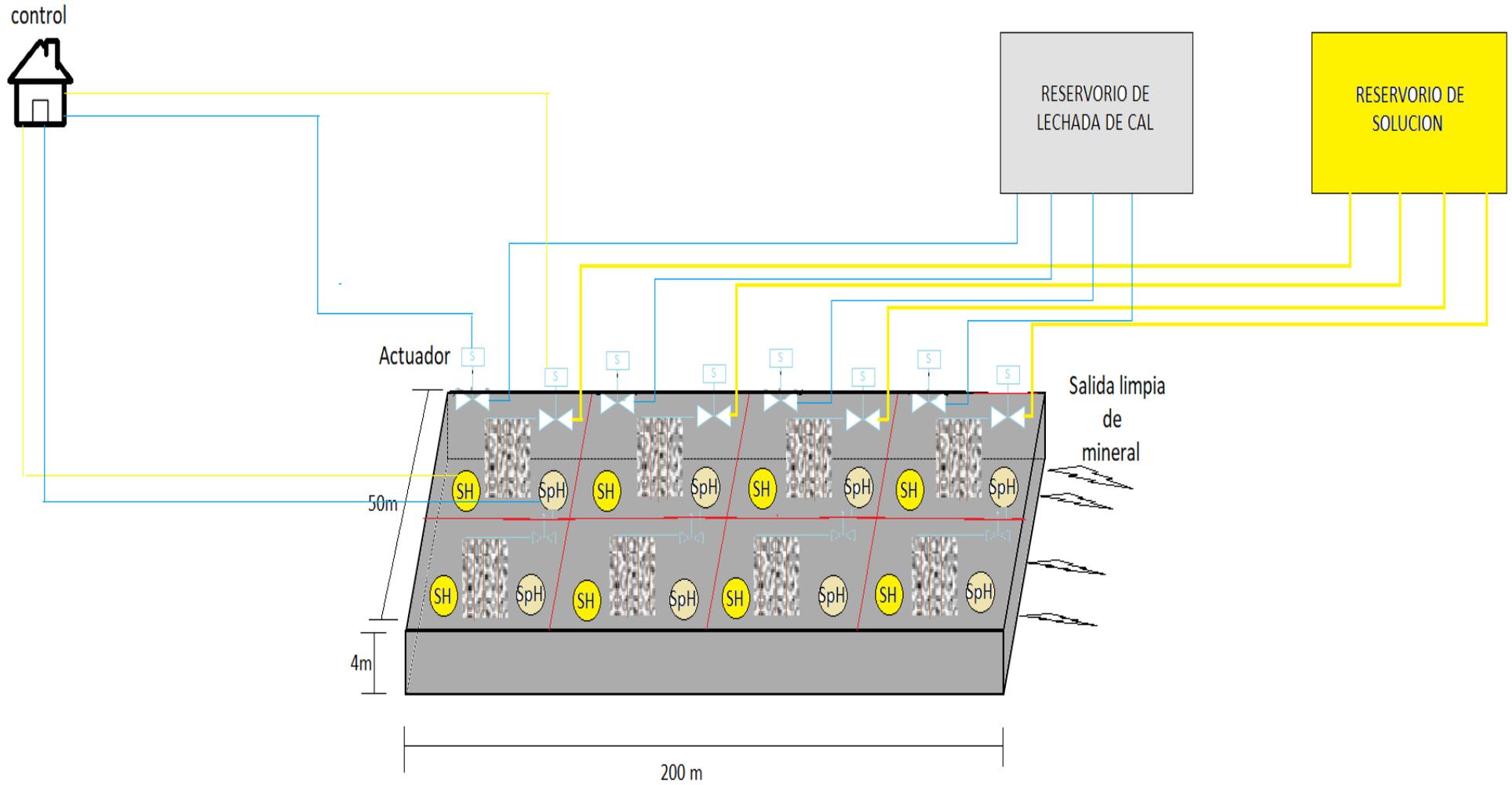


Figura 10: Esbozo general de planta de lixiviación [Elaboración Propia]

### 3.3 Descripción general de la simulación

La simulación del sistema será realizada en la plataforma LabView. A través de esta herramienta computacional se podrá simular la pila y sus conexiones a través de la interfaz gráfica que posee. Este programa posee una programación visual de elementos de control, la cual nos permitirá observar el funcionamiento del sistema. La tabla 3 presenta una descripción de cómo se abordará el sistema para una simulación en LabVIEW.

Tabla 3: Bloques funcionales del sistema [Elaboración Propia]

Descripción de bloques funcionales del sistema	
Bloque general	Bloque específico
Controlador	Lógica de control
Actuador	Válvula de control humedad
	Válvula de control pH
Planta	Nivel de humedad
	Nivel de pH
Sensores	Sensor de humedad
	Sensor de pH

### 3.4 Diseño del hardware del sistema

#### 3.4.1 Sensor de pH

El sensor elegido es el Orbipore CPS91, ilustrado en la figura 11, la cual cuenta con un electrodo de pH con conector BNC de la empresa EH, el material usado en la fabricación del producto permite que este pueda trabajar en medios muy sucios o contaminados. El electrodo brinda un nivel de voltaje según el nivel de pH que detecta en el medio [17].

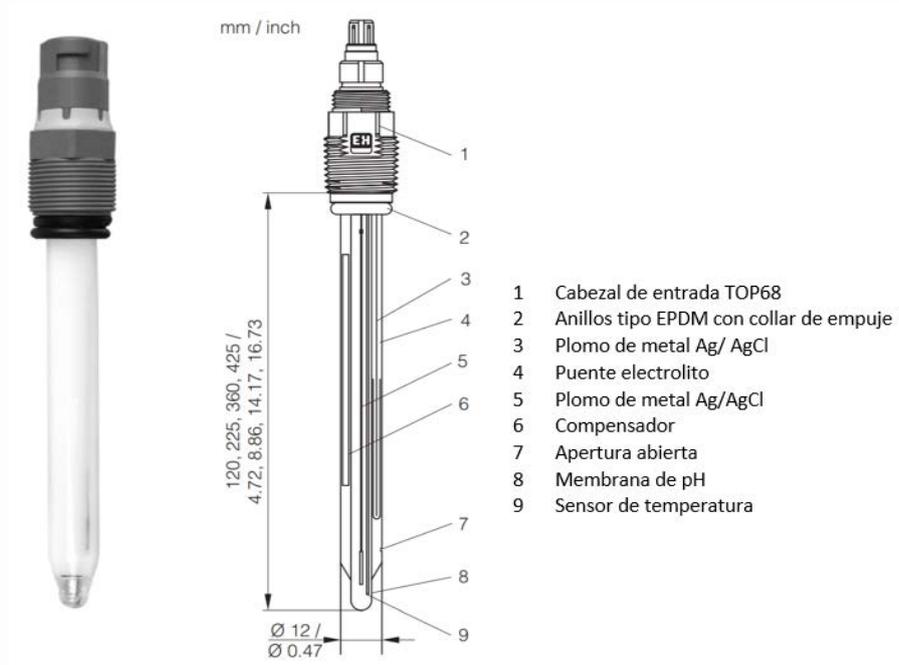


Figura 11: Partes internas y externas del electrodo [14]

Entre las principales características de este sensor se destaca:

- Rango de medición de 0 a 14 pH
- Precisión mayor o igual a 0.02 pH
- Temperatura de operación que va desde 0°C a 110°C
- Tensión de salida que va desde -300mV a +300mV

Como se puede apreciar, los niveles de tensión emitidos por el electrodo son débiles, por lo que es necesario la implementación de una etapa de acondicionamiento de dicha señal con la finalidad de obtener una señal fiable y detectable por el controlador, además de atenuar los posibles efectos producidos por el ruido de medición. Para dicha etapa de acondicionamiento se utilizará la placa pH meter V2.0 de la empresa DFROBOT, ilustrada en la figura 12.

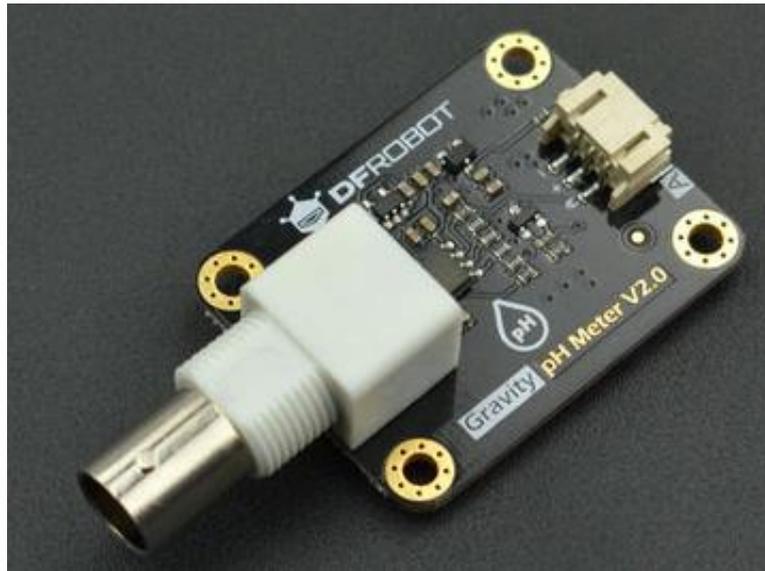


Figura 12: Módulo acondicionador de señal de pH [15]

Entre sus principales características se destaca [15]:

- Conector de prueba tipo BNC
- Tensión de alimentación de 3.3V a 5.5V
- Salida analógica de 0V a 3V
- Precisión de medición de  $\pm 0.1 @ 25^{\circ}\text{C}$  [15]
- Rango de medición de 0 a 14 pH

### 3.4.2 Sensor de humedad

El sensor MAS-1 es el sensor de humedad elegido que se usará para la medición de contenido volumétrico de agua (VWC) en el suelo. Este sensor construido por la empresa DECAGON DEVICES, mostrado en la figura 13, ha sido elegido por su facilidad para trabajar en terrenos de gran expansión y una fácil instalación en el campo de trabajo.



Figura 13: Electrodo MAS-1 FDR [16]

Las características principales de este sensor se detallan a continuación:

- Rango de medición de 0-60% VWC.
- Precisión de  $\pm 6\%$  con calibración simple.
- Tensión de alimentación de 12 a 32 V dc.
- Rango de salida de sensor de 4-20 mA.
- Toma de medidas cada 1 s.

La alta robustez que posee este sensor permite que la lectura de datos sea confiable a pesar de que se encuentre instalado en ambientes hostiles como es el caso del sector minero. Este sensor ha sido diseñado para trabajar sobre grandes extensiones de terreno, tal es el caso de la pila mineral. Asimismo, es de fácil y rápida instalación. La señal que contiene la información se encuentra normalizada para ser utilizada fácilmente por diversos controladores del mercado [16].

Según la hoja de datos, la siguiente ecuación representa la linealidad que existe entre la entrada y la salida del sensor, es decir la relación entre la humedad leída y la corriente entregada.

$$WVC\% = 4.79I(mA) - 39.2$$

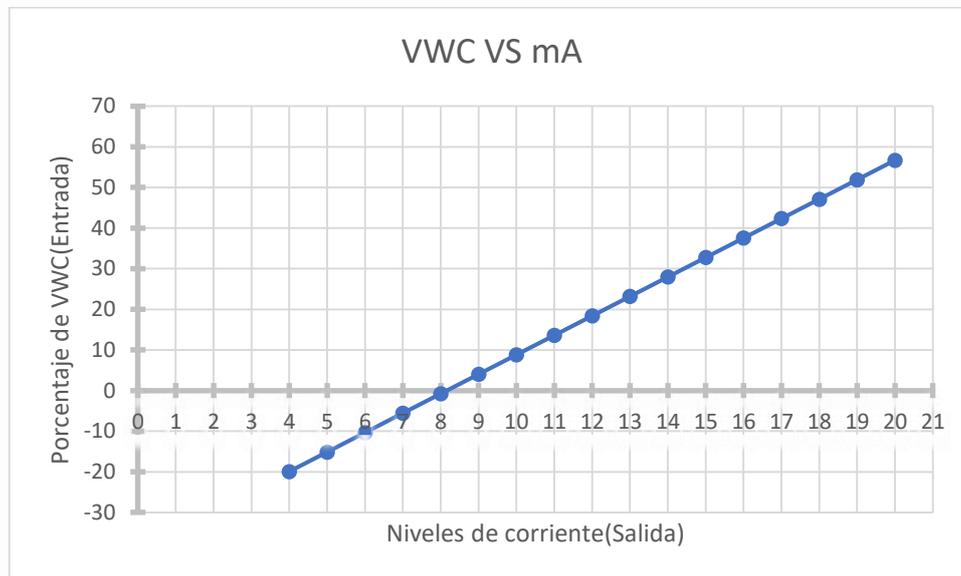


Figura 14: Relación entre VWC y corriente directa(mA) [Elaboración Propia]

En el gráfico anterior, figura 14, se aprecia los valores de corriente en relación al nivel de humedad en el suelo, estos valores solo serán usados por el controlador en un rango de medición entre 4 y 20 mA, valores donde se encuentra el rango adecuado de humedad para la pila.

Se establece como nivel de humedad máximo al 50% VWC [21], esto permitirá obtener una reacción rápida y estable de mineral con el material lixiviante. Además, trabajando a este rango de nivel se prevendrá posibles derrumbes y aniegos en la pila [5].

Debido a que la lectura del controlador se hace a través de niveles de voltaje y la salida del sensor se encuentra en niveles de corriente, es necesario el acondicionamiento de dicha señal para que pueda ser leída correctamente por el controlador. A continuación, se muestra el diseño de esta etapa de acondicionamiento de señal.

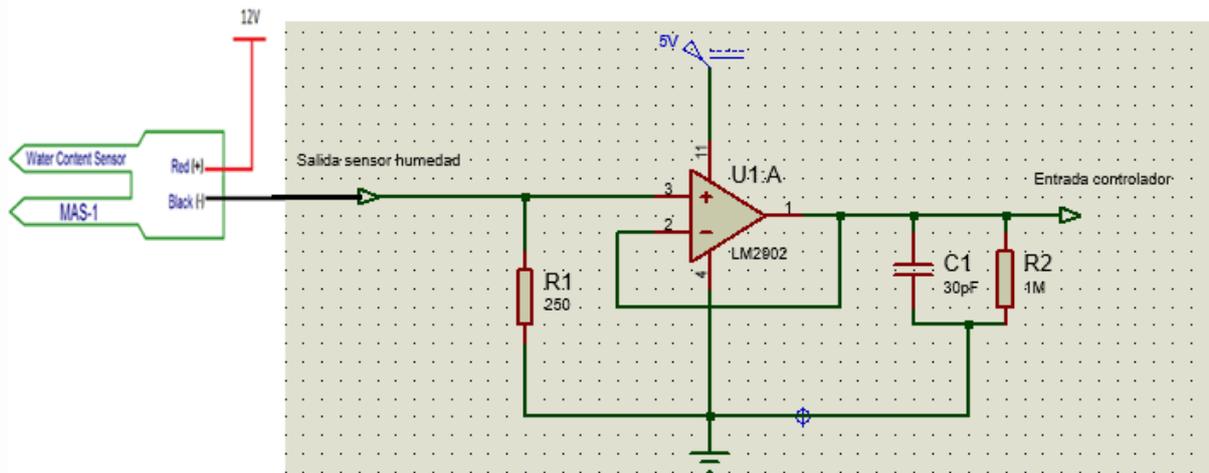


Figura 15: Conexión de sensor con etapa de acondicionamiento [Elaboración Propia]

En la figura 15 se muestra el diagrama de conexiones que se debe seguir desde el sensor hasta el controlador. En ese camino, existe una etapa de acondicionamiento de la señal proveniente del sensor puesto que dicha señal es de corriente, y el controlador maneja señales de voltaje. Es así que se procede a diseñar un circuito conversor básico de corriente a voltaje. Para este circuito se utilizará un OPamp LM2902, amplificador operacional de ganancia unitaria que hará la función de buffer o seguidor de señal. El OPamp será alimentado con 5V y a la salida de la misma se conectará un condensador y una resistencia en paralelo con los valores recomendados por el fabricante. La resistencia a utilizar en la entrada no inversora es de  $250 \pm 1\% \Omega$  en la entrada. Esta hará la función de conversión de corriente a voltaje.

En la tabla 4 se muestra la relación aproximada de conversión de corriente a voltaje que se obtiene de la etapa de acondicionamiento.

Tabla 4: Relación de conversión de corriente a voltaje [Elaboración Propia]

I(mA)	V(voltios)
4	1
6	1.5
8	2
10	2.5
12	3
14	3.5
16	4
18	4.5
20	5

### 3.4.3 Actuadores del sistema

#### 3.4.3.1 Válvula de control de humedad

La válvula seleccionada para regular la humedad de suelo al nivel requerido es de tipo solenoide con elevación asistida, la cual es posible controlar a través de un micro-controlador.



Figura 16: Válvula DANFOSS EV250B [17]

La válvula escogida es de la marca DANFOSS tipo EV250B. Entre sus principales características tenemos:

- Aplicación a nivel industrial.
- Apertura y cierre completo.
- Material metálico.
- Se emplea para aguas y aceites.
- Normalmente cerrada.
- Sistema diseñado para vaciado de tanques por gravedad.
- Temperatura de trabajo de hasta 90°C.

#### **3.4.3.2 Válvula de control de pH.**

Para el control de pH se usará una válvula solenoide servo-accionada directamente. Al igual que la válvula de humedad, esta podrá ser manejado a través de un micro-controlador.



Figura 17: Válvula DANFOSS EV220B [18]

La válvula escogida es de la marca DANFOSS tipo EV220B. Entre sus principales características tenemos:

- Aplicación a nivel industrial.
- Apertura y cierre completo.
- Material metálico.
- Válvula normalmente cerrada.
- Utilizado para materiales viscosos (< 50cST).

#### 3.4.4.3 Bobina

Para ambas válvulas mencionadas anteriormente se utilizará el mismo tipo de bobina, el modelo elegido es el tipo EV210A FL de la marca DANFOSS. Esta bobina se conectará a las válvulas para su funcionamiento eléctrico de apertura y cierre.



Figura 18: Bobina DANFOSS 12 V dc [18]

La bobina es de la empresa DANFOSS, entre sus principales características se destaca [22]:

- Tensión de alimentación de 12 V dc.
- Protección de bobina tipo IP 67.
- Máximo consumo de potencia de 3 W.
- Montaje sin necesidad de herramientas.

### 3.4.4 Circuito de mando y potencia

Esta etapa está diseñada para el control de la válvula solenoide en donde la entrada del circuito sería la salida del microcontrolador con la señal de apertura o cierre de la válvula. Debido a que ambas válvulas usadas en este diseño son de similares características, se procederá a usar la misma configuración de control para ambas válvulas.

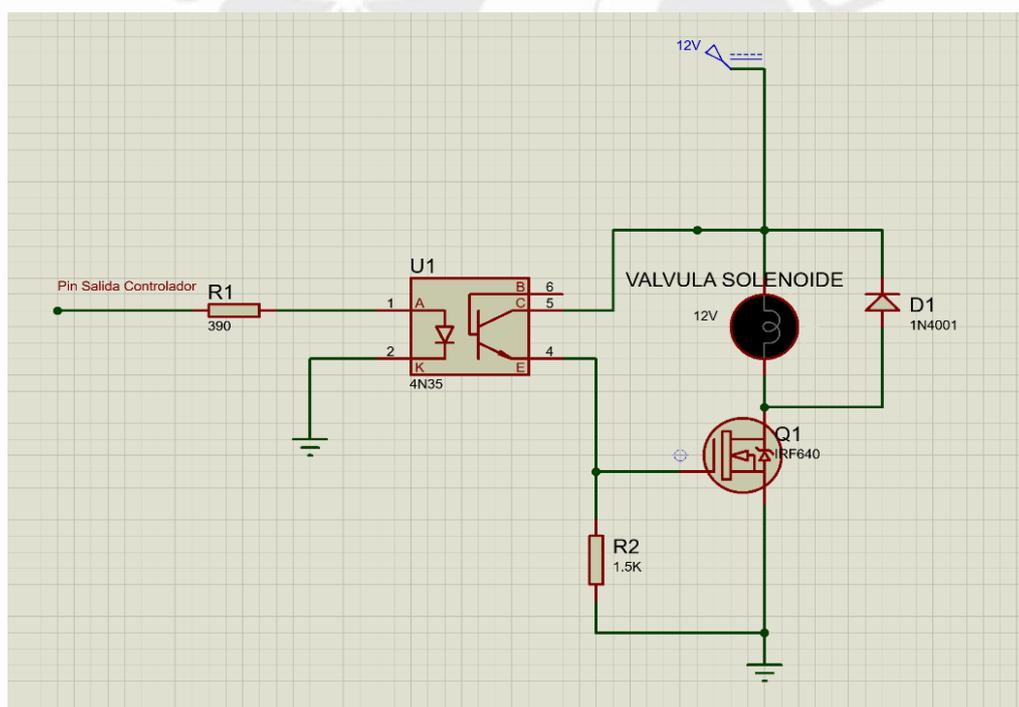


Figura 19: Circuito de potencia de válvula solenoide [Elaboración Propia]

En este circuito se puede apreciar como la etapa de potencia es aislada de la etapa de control a través del acoplador óptico 4N35 la cual posee las siguientes características:

Tabla 5: Características de entrada y salida de acoplador óptico 4N35 [25]

Entrada			Salida	
Característica	Valor típico	Valor máximo	Característica	Valor máximo
Corriente directa( $I_f$ )	10mA	50mA	Voltaje de ruptura colector emisor	70 V
Voltaje directa( $V_f$ )	1.3V Para $I_f=10mA$	1.5V Para $I_f=10mA$	Corriente de colector	50mA
Voltaje en inversa		6V	Corriente de fuga de colector emisor( $I_{CEO}$ )	50 nA
			Relación de transferencia de corriente	100%

Para la elección de los valores de los componentes en el circuito se opta por definir la corriente  $I_f=10$  mA, esta corriente corresponde a un voltaje directo  $V_f=1.3V$ , según hoja de datos. Para el cálculo de R1 se utilizará la siguiente formula:

(2)

$$R1 = \frac{V_{pin} - V_f}{I_f}$$

Reemplazando los valores se obtiene:

(3)

$$R1 = \frac{5V - 1.3V}{10mA}$$

El resultado obtenido para R1 es de 370Ω por lo que se escoge como valor de resistencia R1 igual a 390 Ω que es un valor comercial. Con este valor definido en la entrada del optoacoplador se cumple con los valores de corriente y voltaje directo. Al encender el led, el optotransistor se satura, lo que conlleva a que se produzca una diferencia de potencial entre el colector y el emisor del optotransistor  $V_{CE} = 0.4V$ . Además, según hoja de datos, para una corriente  $I_f = 10 \text{ mA}$  se obtiene un CTR de 75%. Con este dato es posible calcular la corriente que fluye de colector a emisor.

(4)

$$CTR = \frac{I_C}{I_f}$$

Con esta relación se determina que la corriente de colector  $I_c$  es igual a 7.5 mA. Con este valor es posible estimar el valor de la resistencia R2 a través de la siguiente relación:

(5)

$$R2 = \frac{VDD - V_{CE}}{I_C}$$

Se define VDD a 12V

(6)

$$R2 = \frac{12V - 0.4V}{7.5mA}$$

El resultado obtenido para R2 es de 1546  $\Omega$  aproximadamente por lo que se elige el valor comercial de 1.5k $\Omega$ . El diodo elegido es colocado a manera de protección del MOSFET puesto que después de accionar el MOSFET y desactivarlo la bobina de la válvula habrá almacenado energía en forma de campo magnético, lo cual genera un potencial suficiente para continuar con el flujo de corriente en el MOSFET. El diodo será el camino de descarga de ese flujo de corriente remanente.

La etapa de potencia es realizada por el MOSFET IRF640 la cual conmuta entre los estados de corte y óhmica. Entre sus principales características de funcionamiento se destaca las mostradas en la tabla 6.

Tabla 6: Características del MOSFET IRF640 [26]

Características	Valor máximo
Voltaje drenador surtidor( $V_{DS}$ )	200V
Voltaje compuerta surtidor( $V_{GS}$ )	20V
Corriente continua drenador( $I_D$ )	18A
Voltaje umbral( $V_{GS(th)}$ )	4V
Resistencia estática de encendido( $R_{DS(on)}$ )	0.18 $\Omega$
Temperatura en juntura( $T_{jmax}$ )	150°C
Resistencia térmica juntura a envoltura( $R_{thJ-c}$ )	1.0 °C/W
Resistencia térmica juntura a ambiente( $R_{thJ-a}$ )	62 °C/W

Para que el MOSFET alcance el grado requerido para cambiar de estado en la región óhmica deberá cumplir con dos requisitos indispensables:

(7)

$$V_{GS} > V_{GS(th)}$$

(8)

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)}$$

Se sabe por la figura 19 que el valor de  $V_S=0V$  y que el valor de  $V_G=12 - V_{CE}$ , teniendo como valor de  $V_{CE}=0.4V$ , esto da como resultado un valor de  $V_{GS}=11.6$ , la cual nos permite cumplir con los requerimientos planteados en las ecuaciones (7) y (8).

Por último, se estima si se necesitará un disipador para este MOSFET, esto se puede calcular aplicando la siguiente relación:

(9)

$$I_{Dm\acute{a}x} = \sqrt{\frac{T_{Jm\acute{a}x} - T_{amb}}{(R_{thJ-a}) \times R_{DS(on)}}} = 1.48 \text{ A}$$

Teniendo en cuenta una relación de valor entre  $T_{Jm\acute{a}x} - T_{amb}$  menor a  $25^{\circ}C$  se llega a un valor de  $I_{Dm\acute{a}x}$  igual a 1.48A. Para este caso, la válvula consume como máximo 0.4A de  $I_D$  por lo que no será necesario utilizar un disipador adicional para el MOSFET.

### 3.4.5 Goteros

Los goteros seleccionados son los auto-compensados con caudal de 10LPH marca HUNTER, presentado en la figura 20.



Figura 20: Goteros auto compensados 10LPH [4]

Se conoce que la ratio de riego es de  $10\text{L}/\text{H m}^2$ , el tiempo de riego es de 30 días continuos y el espacio de riego es de 1 hectárea es posible calcular el consumo total de solución lixiviante.

(10)

$$\text{Consumo total} = 10\text{L}/\text{H m}^2 * 720\text{H} * 10000\text{m}^2 = 72 \text{ millones litros}$$

### 3.4.6 Alimentación

Para seleccionar la fuente de alimentación a usarse en el sistema se debe realizar el cálculo de consumo los componentes electrónicos utilizados para este prototipo. En primer lugar, el Arduino Mega alimentará tanto al módulo pHmeter v2.0, así como al OPamp 2902; ambos se alimentan con una tensión de alimentación de 5V. Para el pHmeter se tiene un consumo de corriente de 10mA aproximadamente [15] y para el OPamp se tiene un consumo de 1.2mA según hoja de datos. Teniendo en cuenta que se utilizaran 8 módulos pHmeter y 2 OPamp LM2902, el consumo promedio del arreglo de sensores será de 82.4 mA. En segundo lugar, el consumo de cada una de las válvulas solenoides de humedad y pH es de 150 mA en promedio según hoja de datos [22], para nuestro caso se tiene 16 válvulas solenoides los que hace un total de 2400 mA. Por último, se considera el consumo del controlador Arduino Mega, la cual tiene un consumo en vacío de 100 mA aproximadamente [23], a este valor se le adiciona el consumo de las salidas del controlador que irán conectadas a la entrada del opto acoplador, cada salida

proporciona un valor de 10mA, con lo que el consumo total de las salidas será de 160mA. A continuación, se presenta un cuadro resumen del consumo total del sistema.

Tabla 7: Consumo de los componentes del sistema [23] [24] [25]

Componente	Voltaje	Corriente	Cantidad	Total de consumo
Válvula Humedad	12Vdc	150mA	8	1200mA
Válvula pH	12Vdc	150mA	8	1200mA
Arduino	12Vdc	100mA	1	100mA
Opta Acoplador 4N35	-	10mA	16	160mA
pHmeter V2.0	5Vdc	10mA	8	80mA
OPamp LM2902	5Vdc	1.2	2	2.4mA
Consumo total				2742.4mA

#### 3.4.6.1 Selección de fuente de alimentación

Para cumplir con los requerimientos eléctricos del sistema se ha seleccionado una fuente de poder tipo switching de 220V AC a 12V dc de la marca DMU ENERGY. A continuación, se muestra la estructura física de la fuente.



Figura 21: Fuente de poder tipo switching [24]

Entre sus principales características se destaca [24]:

- Voltaje de entrada 110/220 Vac.
- Voltaje de salida 12 Vdc.
- Capacidad de 5 A / 60 W.

### 3.5 Diseño del software del sistema

#### 3.5.1 Controlador

El controlador elegido para este prototipo será el Arduino MEGA 2560 la cual cuenta con un microcontrolador ATmega 2650. Este dispositivo cuenta con 54 pines de conexión entre entradas y salidas, de las cuales 15 son capaces de proporcionar señales PWM, que pueden simular salidas analógicas, así como 16 entradas analógicas. Esta placa contiene un puerto USB que permite una fácil comunicación con el ordenador que contiene el software de control. El controlador se encuentra ubicado en la sala de control a 50 metros de la pila de lixiviación. Las señales de comunicación entre la pila y el controlador se dan a través de cables de cobre recubiertas de polietileno con una longitud de cable que van desde los 50 metros, el más

cercano, hasta los 250 metros el más alejado. La tabla 8 describe las principales características del controlador utilizado.

Tabla 8: Características principales de placa Arduino Mega [23]

Característica	Valor
Voltaje de funcionamiento	5V
Alimentación	7-12V
Voltaje máximo de entrada	20V
Corriente DC por I/O pin	40 mA
Corriente DC para el pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Resolución	10 bits

La tabla 9 detalla los pines de conexión que se usarán para el prototipo planteado.

Tabla 9: Designación de pines de entradas y salidas [23]

Bloque	Tipo	Numero de pines
Sensor de humedad	Entrada analógica	8
Sensor de pH	Entrada analógica	8
Válvula control humedad	Salida digital	8
Válvula control pH	Salida digital	8

### 3.5.2 Conversor análogo digital(ADC)

Un conversor análogo digital es un dispositivo que procesa una señal de voltaje analógica en una señal de tensión digital la cual es representada en un computador a través de código binario. Para nuestro sistema se utilizará el ADC que posee nuestro controlador Arduino Mega, la cual cuenta con una resolución de 10 bits.

Se tienen seleccionado los 16 canales analógicos del controlador Arduino mega, todos estos tienen la capacidad de transformar la señal analógica en señal digital, sin embargo, por el método de riego se usará la conversión de carrera única, es decir, se convertirá un canal a la vez.

Para este trabajo se ha elegido como tensión de referencia a 5 voltios, con esto es posible calcular el valor de 1 LSB la cual representa la resolución de 10bits. Para calcular este valor se utiliza la siguiente formula:

$$1 \text{ LSB} = \frac{V_{ref}}{2^{\#bits}} = \frac{5V}{1024} = 0.00488 \text{ voltios} \quad (11)$$

Se puede calcular el valor digital que se obtendrá en función de la tensión de entrada de la siguiente manera:

$$ADC = V_{in} * \frac{2^n}{V_{ref}} \quad (12)$$

Para este caso, el  $V_{in}$  será la tensión de entrada en el pin analógico.

Para lograr un valor digital convertido se realizará un promedio de las lecturas de los sensores con la finalidad de obtener un valor estable y con alta inmunidad al ruido. Para este fin se realizará un promedio de 10 muestras para garantizar la fiabilidad de la información.

### **3.5.3 Lógica de control**

El proceso de riego se divide en dos etapas. En la primera etapa inicia con la configuración inicial de variables y la calibración de sensores de humedad y pH. Luego, se abre la válvula de humedad y pH de la zona 1 de riego, cuando la zona 1 de riego supera el 10% de VWC se procede a abrir la válvula de humedad y pH de la zona 2, cuando esta zona alcance el 10% de VWC se abrirá la válvula de humedad y pH de la siguiente zona, y así sucesivamente hasta llegar a abrir todas las válvulas de humedad y pH. Una vez abiertas las 8 válvulas de humedad y pH, se da inicio a la segunda etapa de riego en la cual a través de la lectura de los sensores de humedad y pH se abrirán o cerrarán las válvulas correspondientes. Se considera mantener un valor de humedad entre 40 y 50% de VWC, así como un valor de pH entre 9 y 11. Cada zona finaliza su riego al transcurrir 30 minutos de riego constante. Finalmente, cuando las 8 zonas hayan regado 30 minutos constantes, se cerrarán todas las válvulas y se dará fin al proceso de riego. A continuación, se presenta el diagrama de flujo del sistema que será utilizado para desarrollar el programa de control de riego automatizado.

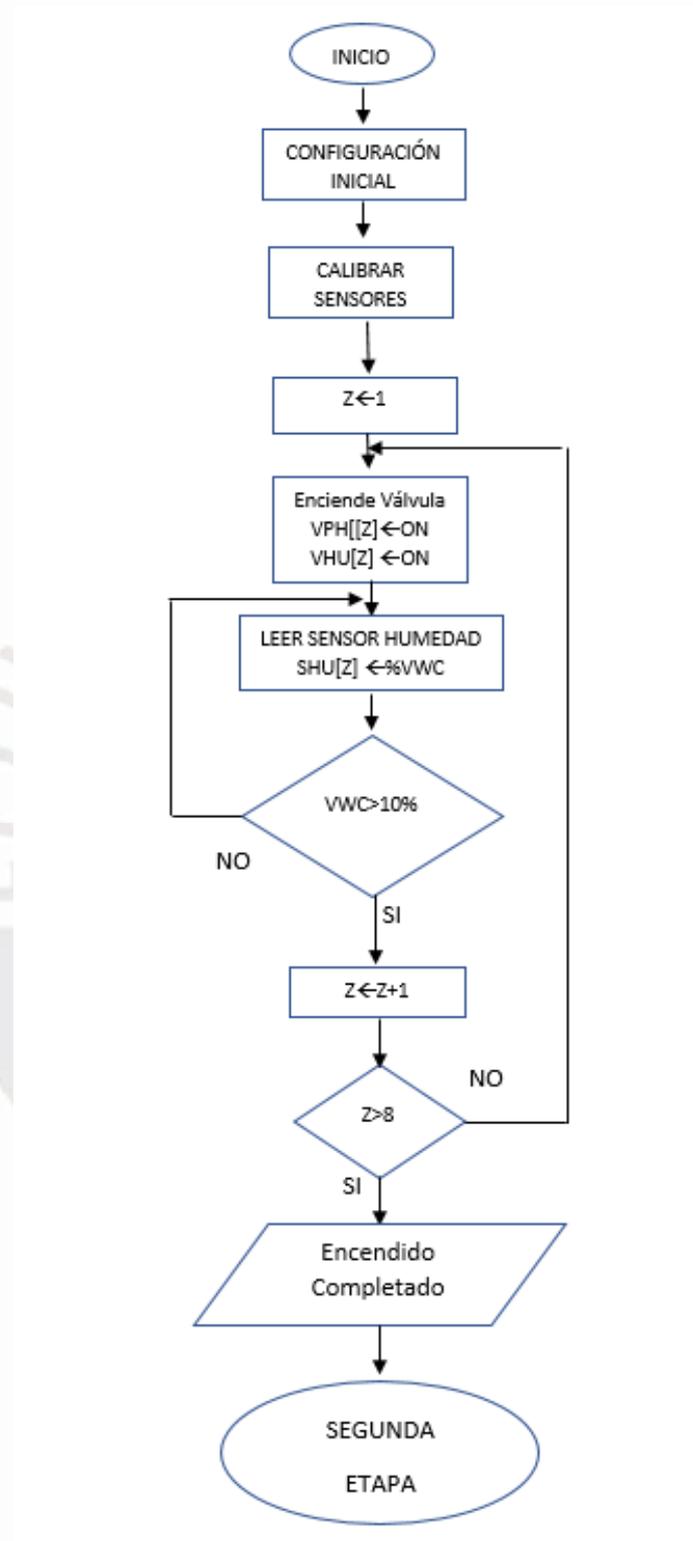


Figura 22: Diagrama de flujo del programa principal [Elaboración Propia]

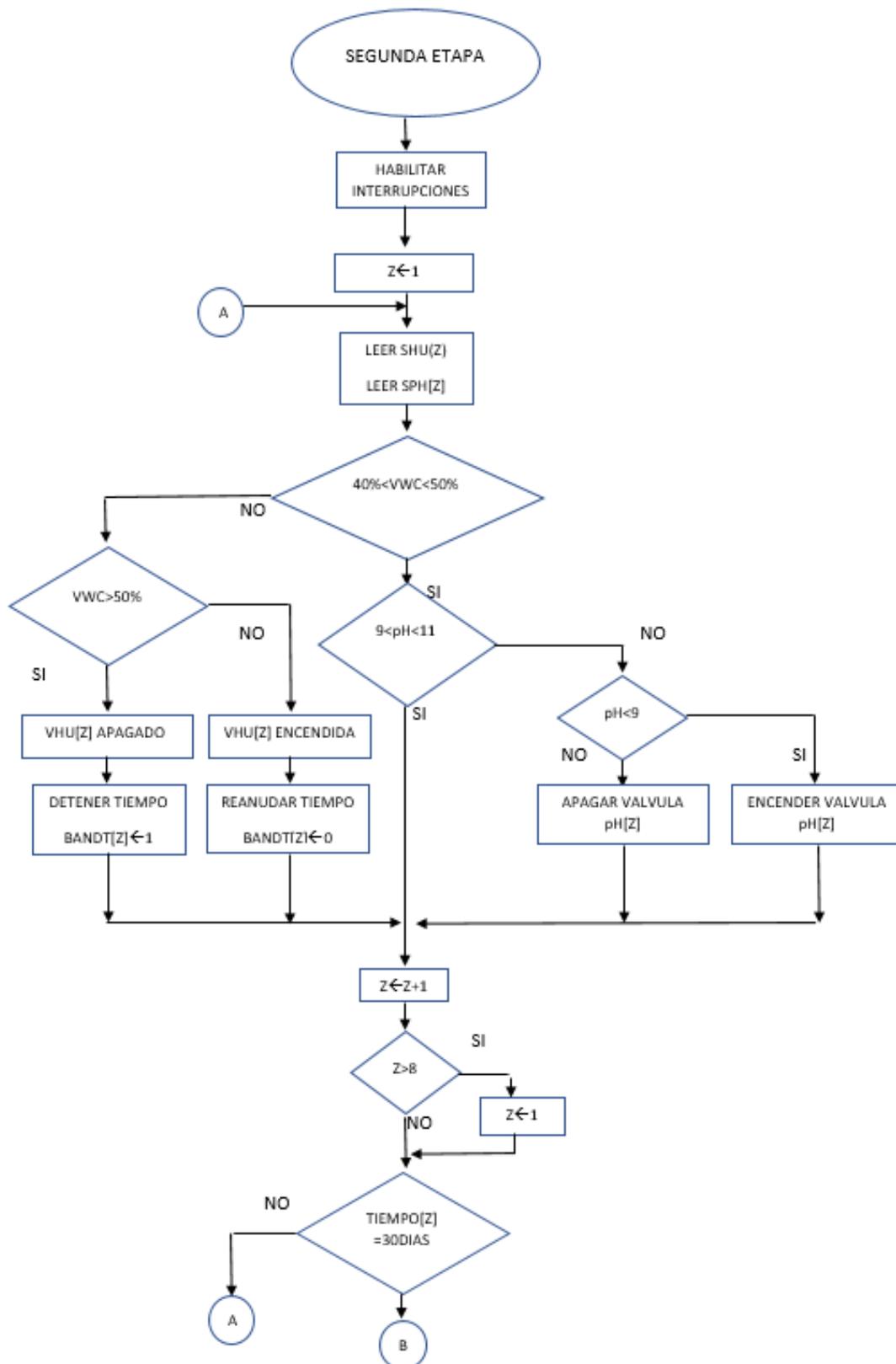


Figura 23: Continuación de la figura 22 [Elaboración Propia]

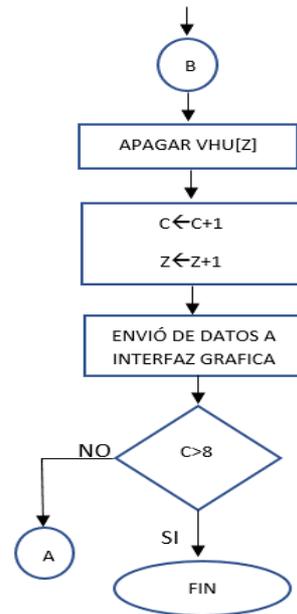


Figura 24: Continuación de la figura 23 [Elaboración Propia]

Asimismo, en la figura 25 se muestra el diagrama de flujo del servicio de interrupción que utilizará este controlador para manejar el temporizador. Este servicio contará el tiempo en la cual las válvulas de humedad han estado encendidas. Cuando todas las válvulas hayan estado abiertas por 30 minutos, el programa finalizará la lixiviación.

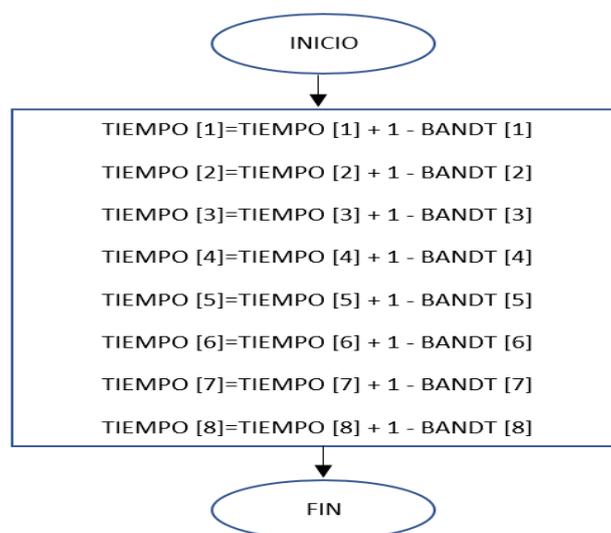


Figura 25: Diagrama de flujo de servicio de interrupción [Elaboración Propia]

En los diagramas de flujo mostrados anteriormente se han utilizado variables auxiliares las cuales se detallan en la tabla 10.

Tabla 10: Relación de variables de diagrama de flujo [Elaboración propia]

Relación de variables	
Variable	Descripción
Z	Zona de riego
C	Contador de zona de riego totalmente lixiviada
VHU	Válvula de control de humedad
VPH	Válvula de control de pH
SHU	Sensor de humedad
SPH	Sensor de pH
BANDT[X]	Arreglo de banderas de pausado de tiempo de riego zonal
TIEMPO[X]	Arreglo de tiempos que lleva la zona en riego

### 3.5.4 Descripción de programa de control de riego automatizado

El programa principal da inicio con las configuraciones iniciales de todo el sistema. Esta primera parte comprende la configuración de puertos como entradas y salidas, configuración de temporizadores, configuración del conversor análogo digital(ADC) y la configuración de comunicación serial. Además, se asigna los valores iniciales que serán asignados a las variables involucradas en el proceso.

Luego de la configuración inicial, se procede a calibrar los sensores, esta calibración es recomendada por los fabricantes para terrenos no homogéneos por lo que se necesita una etapa donde se familiarice el terreno con los instrumentos de medición. Por tal razón, se tomará muestras previas en el terreno durante un corto periodo de tiempo, con esto se obtiene un

registro previo del comportamiento del suelo, así se tendrá una mejor lectura de los sensores. Se tomará muestras cada 5 segundos por un tiempo de 5 minutos, lo que nos da un total de 60 muestras por cada sensor.

Una vez terminado la configuración inicial y la calibración de sensores se inicia el proceso de regado sobre la pila. Como se detalló anteriormente, el proceso comienza encendiendo las válvulas de humedad y pH una a una hasta alcanzar el nivel de humedad requerido, es decir un valor mayor a 10% de VWC. Esta etapa inicial finaliza al abrir la última válvula, logrando regar la solución lixiviante hacia la pila hasta llegar a un nivel de equilibrio de humedad en todas las zonas de riego. Para la segunda etapa, la cual se encargará del funcionamiento del sistema de riego hasta el final del proceso, inicia con la habilitación de los interruptores, es decir, es el momento en el cual se inicia el periodo de riego. Se empezará a recolectar la lectura de los sensores instalados en las zonas de riego correspondientes, estas lecturas comandarán la apertura o cierre de las válvulas de humedad y pH. Para el caso de válvula de humedad, esta se encenderá si el rango de VWC detectado por el sensor de humedad este fuera del rango entre 40% y 50% de VWC y para el caso de la válvula de pH, esta se encenderá cuando el sensor de pH detecte que el valor de pH en la pila este fuera del rango entre 9 y 11. Las válvulas de humedad deben tener un periodo de apertura de 30 días antes que se cierre completamente la válvula y se dé por finalizado el proceso de riego en esa zona. Para que el sistema finalice, las 8 válvulas de humedad deben terminar el periodo de encendido de 30 días.

Por último, se debe generar un conjunto de caracteres que contengan la información necesaria la cual será enviada al computador que genera la interfaz gráfica. Con esta información codificada se podrá simular el funcionamiento del sistema, mostrando información de sensores, actuadores y planta.

### 3.5.5 Interfaz gráfica para el usuario

El sistema automático cuenta con una interfaz gráfica desarrollada para el usuario en la cual se podrá observar el comportamiento de las variables de proceso como lo son la humedad y el pH. Esta interfaz fue desarrollada en base al software LabView 2017 de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS. Dicho programa nos permite visualizar en tiempo real la lectura de los sensores, así como el estado de las válvulas de humedad y pH a través de leds que representan si están encendidas o apagadas dichas válvulas.

La interfaz cuenta con 9 secciones, la pantalla principal en la cual se encuentra la configuración inicial del sistema además de los botones de encendido y apagado, por otra parte, se tiene 8 pantallas secundarias en donde se muestra los valores adquiridos por los sensores y el estado de las válvulas de humedad y pH.

Esta interfaz se encuentra instalada en una computadora dentro de la sala de control, la cual recibe los datos provenientes del controlador a través de una comunicación serial tipo USB por medio del puerto COM3, la cual es utilizada por el controlador Arduino mega para enviar la información ya procesada previamente para su ejecución directa en la interfaz gráfica.



Figura 26: Pantalla principal de la interfaz gráfica [Elaboración Propia]

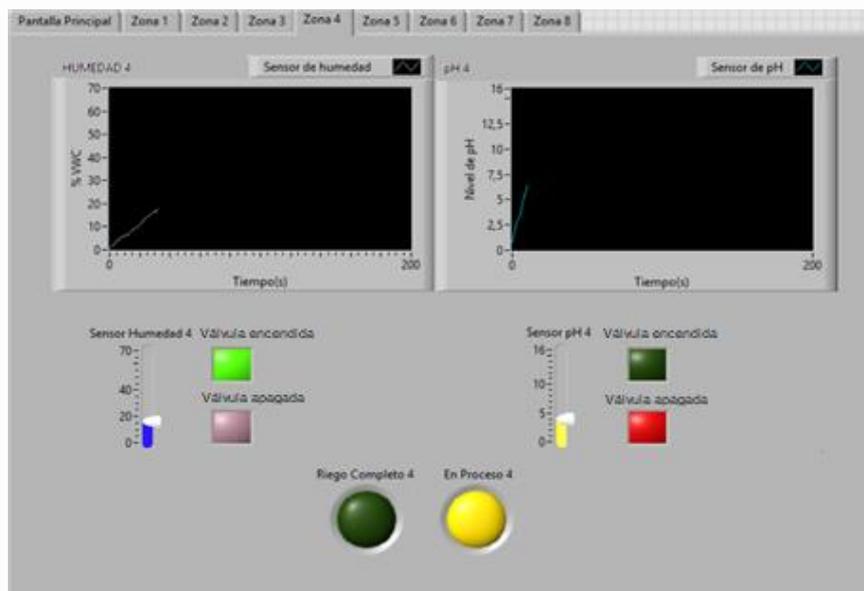


Figura 27: Interfaz gráfica en funcionamiento de la primera etapa [Elaboración Propia]

En la figura 27 se muestra la interfaz gráfica de la zona 4 en la primera etapa de riego. En esta grafica se puede observar como la válvula que controla la humedad está encendida, mientras que la válvula que controla el pH se encuentra apagada.

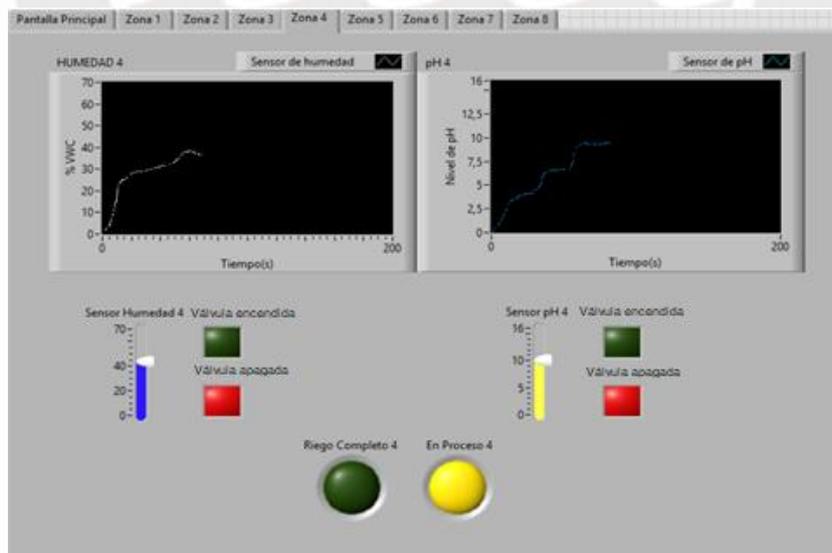


Figura 28: Interfaz gráfica en funcionamiento de la segunda etapa [Elaboración Propia]

La figura 28 muestra la zona 4 de riego con ambas válvulas apagadas, esto se rige de acuerdo a la información entregada por los sensores de humedad y pH hacia el controlador.

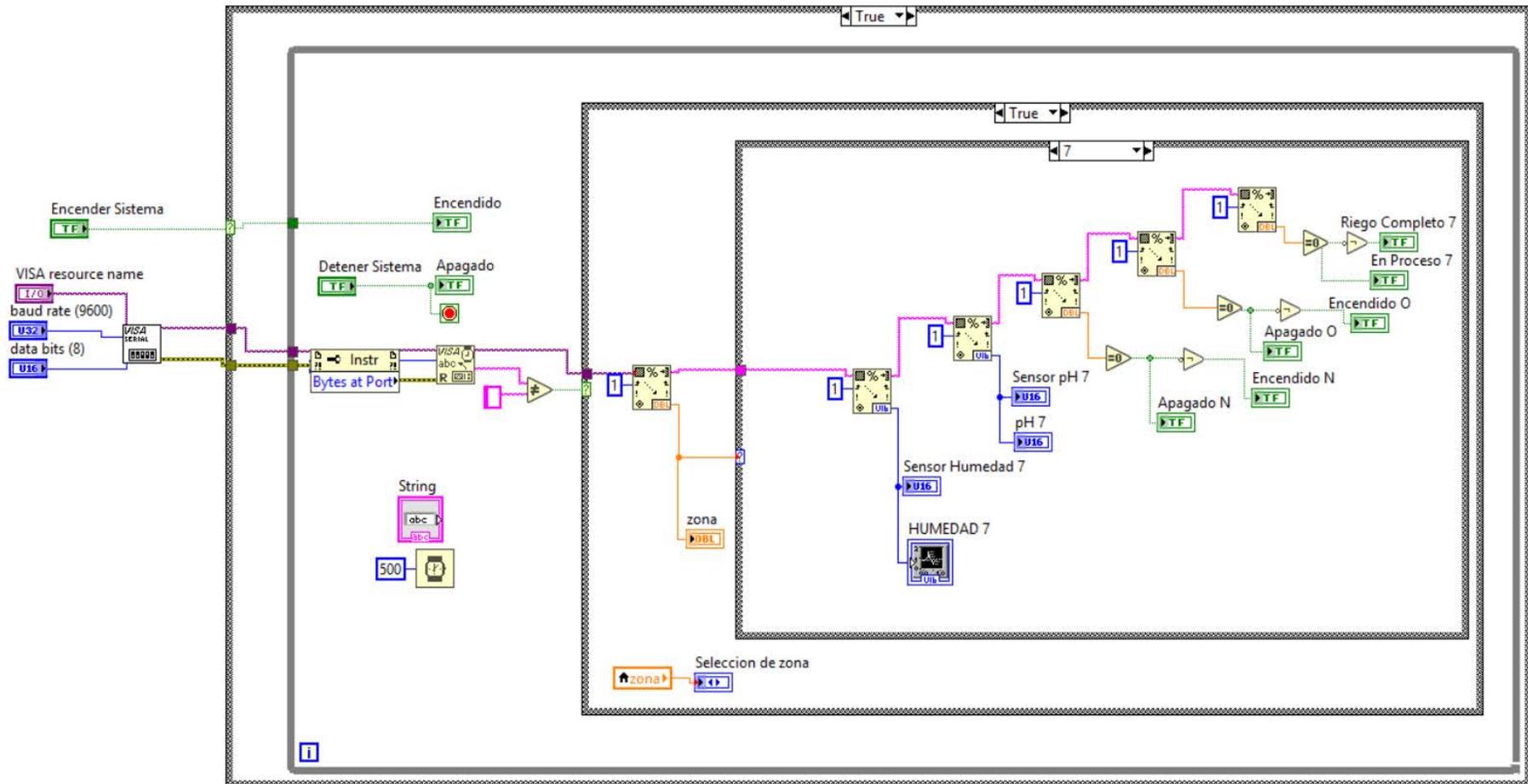


Figura 29: Programación principal de interfaz gráfica [Elaboración Propia]

## CAPÍTULO 4

### **Simulación, pruebas y resultados obtenidos.**

Con la finalidad de validar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo planteado en el presente trabajo de tesis se realiza simulaciones que permitan emular el funcionamiento real del sistema planteado. Para esto se ha realizado un circuito que opera de forma similar al sistema de riego, no se han tomado los sensores y actuadores reales debido al alto costo de estos. A continuación, se detalla los componentes a usar para las simulaciones.

- Para reemplazar los sensores de humedad y pH se utilizan potenciómetros de alta precisión con un rango de salida valores que va de 1V a 5V.
- Para el caso de los actuadores se simulará su funcionamiento a través de diodos LEDs, en donde los leds rojos están relacionados a las válvulas de pH y los LEDs verdes están relacionados a las válvulas de humedad.

#### **4.1 Simulación y pruebas de diseño**

Para empezar la simulación, se debe obtener los valores de los potenciómetros que serán enviados hacia al Arduino mega. Debido a que la salida de los potenciómetros son valores analógicos, se hará uso del módulo ADC para digitalizar dichos valores y sea posible realizar la lógica de control sobre las válvulas solenoides conjuntamente con el circuito de mando y potencia planteado en el capítulo anterior. Se realiza mediciones para diferentes valores de entradas analógicas y su correspondiente valor digital. Para esto se desarrolló un programa que nos muestre el valor digital correspondiente a una entrada analógica.

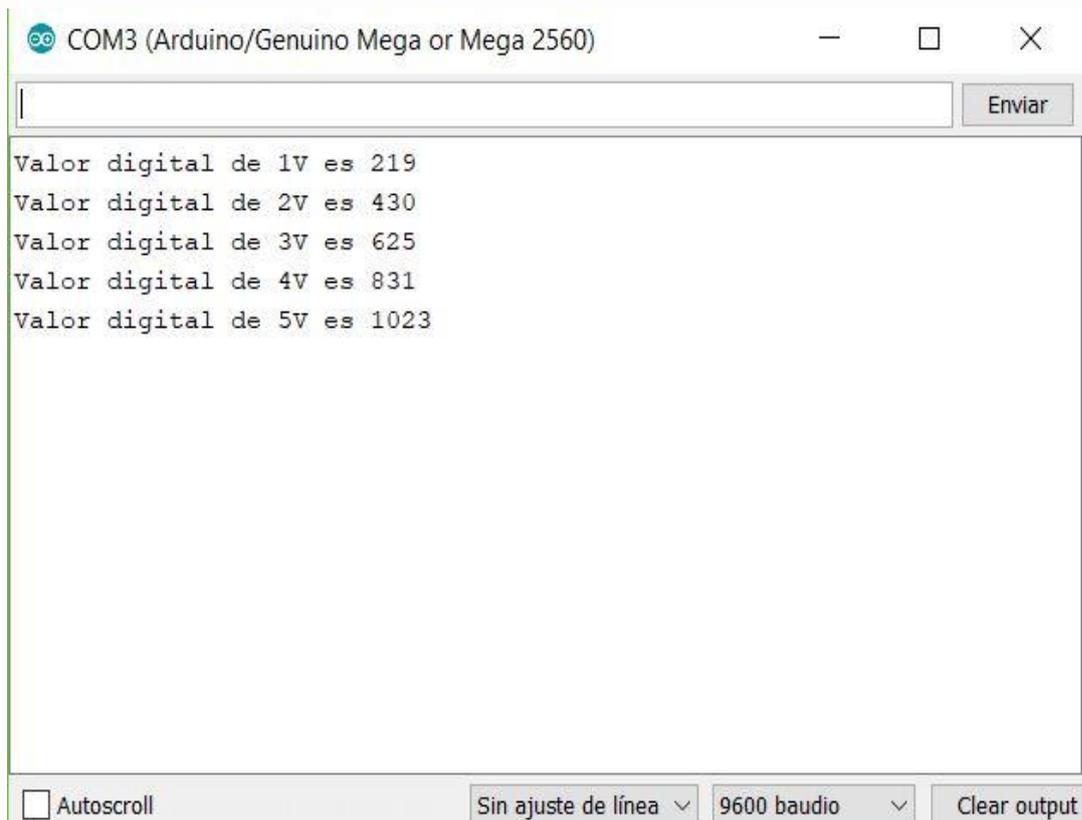


Figura 30: Prueba de modulo ADC [Elaboración Propia]

Una vez que se obtiene los valores digitales de los sensores por medio de la conversion ADC, se procede a simular el circuito descrito posteriormente. En el siguiente circuito se puede apreciar las 8 zonas de riego, ademas de las conexiones de los componentes que representan a los sensores y actuadores del sistema .

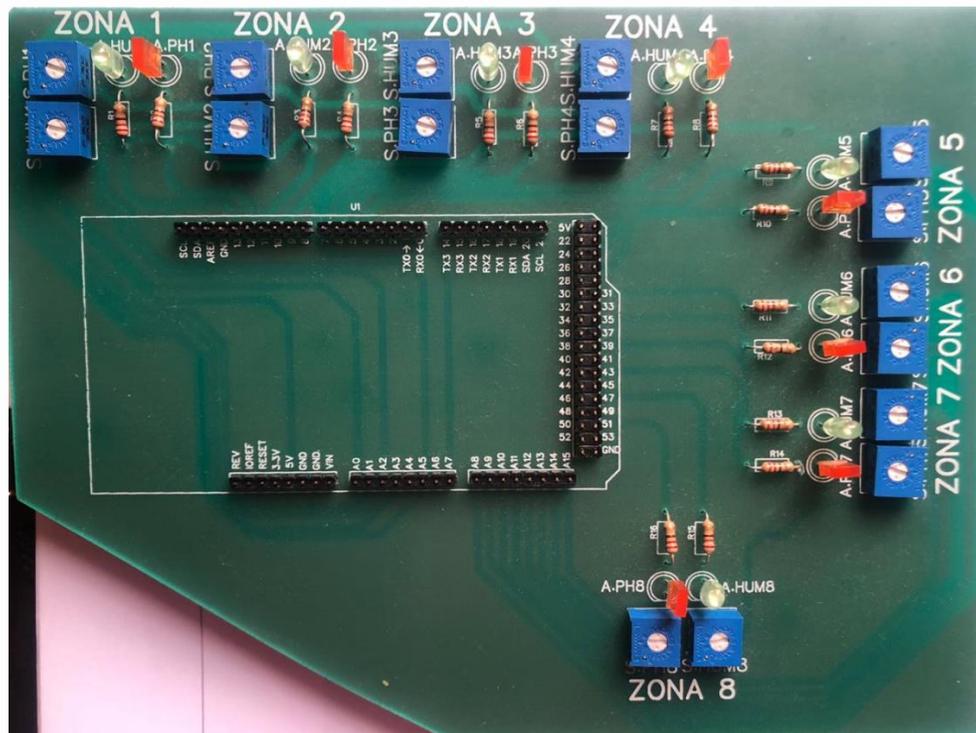


Figura 31: Circuito de prueba de sistema [Elaboración Propia]

Como se puede apreciar en la imagen anterior, por cada sector se cuenta con dos potenciómetros de precisión que representan a los sensores y dos diodos led, el diodo led verde representa a la válvula de humedad y el diodo led rojo representa a la válvula de pH. El funcionamiento del sistema está dividido en dos etapas, la primera etapa consiste en el encendido una a una de todas las válvulas de humedad. Para esto, inicialmente, se enciende la válvula de la zona 1 y se deja discurrir la solución lixiviante hasta que dicha zona alcance un nivel de humedad de 10%, en ese momento se procede a encender la válvula de la zona 2 hasta que alcance el nivel de humedad de 10% y así sucesivamente hasta encender las 8 válvulas de la humedad. Luego, una vez abierta todas las válvulas de humedad, empieza la segunda etapa en la cual se mide el nivel de humedad y pH de las zonas. En esta etapa se acondiciona para que la válvula de humedad permanezca abierta hasta alcanzar un nivel de humedad de 50%, luego se cerrará hasta que el nivel de humedad caiga por debajo del 40% en ese momento se volverá a abrir la válvula logrando así mantener la zona de riego con un nivel de VWC entre

40 y 50%; para las válvulas de pH, permanecerá abierta la válvula hasta alcanzar un nivel de 11 de pH, luego se cerrará hasta que el nivel de pH caiga por debajo de 9, en ese momento volverá a abrir la válvula, así se mantendrá un nivel de pH entre 9 y 11 en la zona de riego. El sistema de riego real finaliza después de 30 días de riego consecutivo, sin embargo, para que la simulación sea más dinámica, se considera un tiempo de 10 minutos como final del riego sobre la pila.

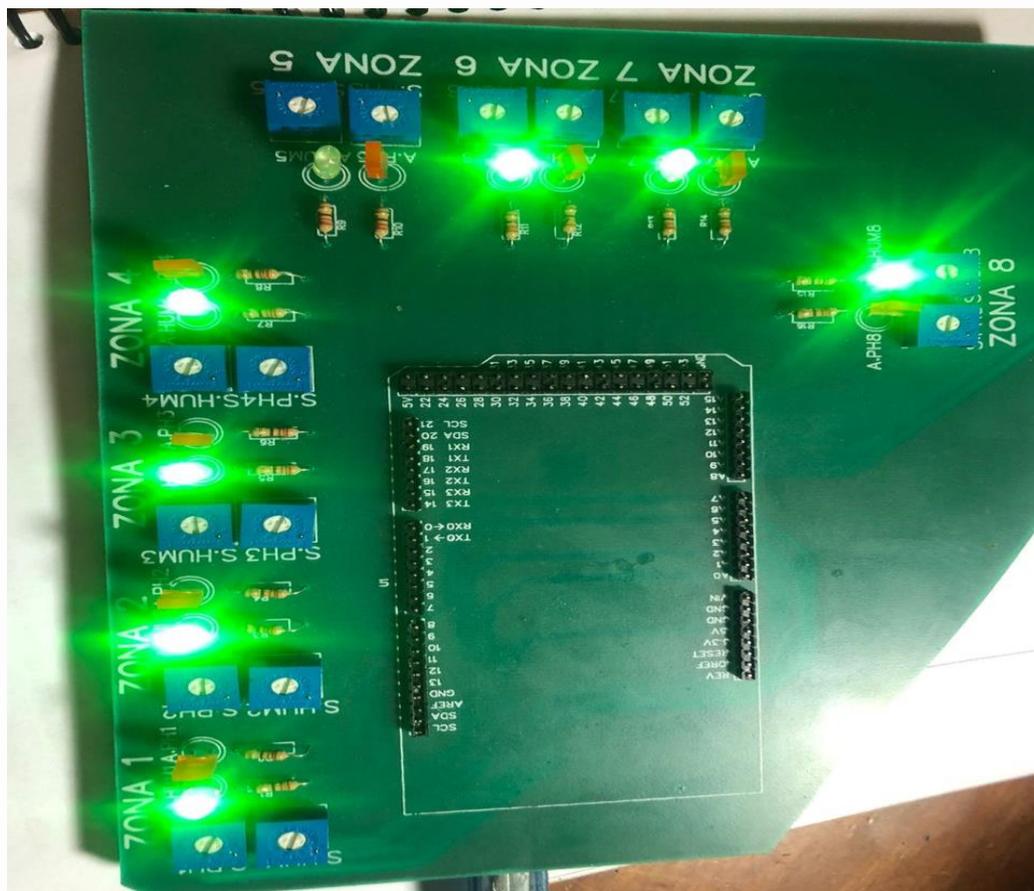


Figura 32: Desarrollo de primera etapa de riego [Elaboración Propia]

Como se aprecia en la gráfica 32, los diodos leds verdes se encienden uno a uno, esto representa la apertura de las válvulas de humedad, cuando la válvula de humedad de la zona 8 se encienda se dará inicio a la segunda etapa del funcionamiento del sistema. Se debe tener en cuenta que antes de empezar la primera etapa todas las válvulas de humedad se encuentran apagadas.

COM3 (Arduino/Genuino Mega or Mega 2560)

Enviar

```

Zona de riego: 1
Nivel de sensor de humedad: 32%
Nivel de sensor de ph: 7.4
Valvula de humedad: Encendido
valvula de ph: Encendido
1,32,7.4,1,1
Zona de riego: 1
Nivel de sensor de humedad: 38%
Nivel de sensor de ph: 9.4
Valvula de humedad: Encendido
valvula de ph: Apagado
1,38,9.4,1,0
Zona de riego: 2
Nivel de sensor de humedad: 45%
Nivel de sensor de ph: 12.6
Valvula de humedad: Apagado
valvula de ph: Apagado
2,45,12.6,0,0

```

Autoscroll    Sin ajuste de línea    9600 baudio    Clear output

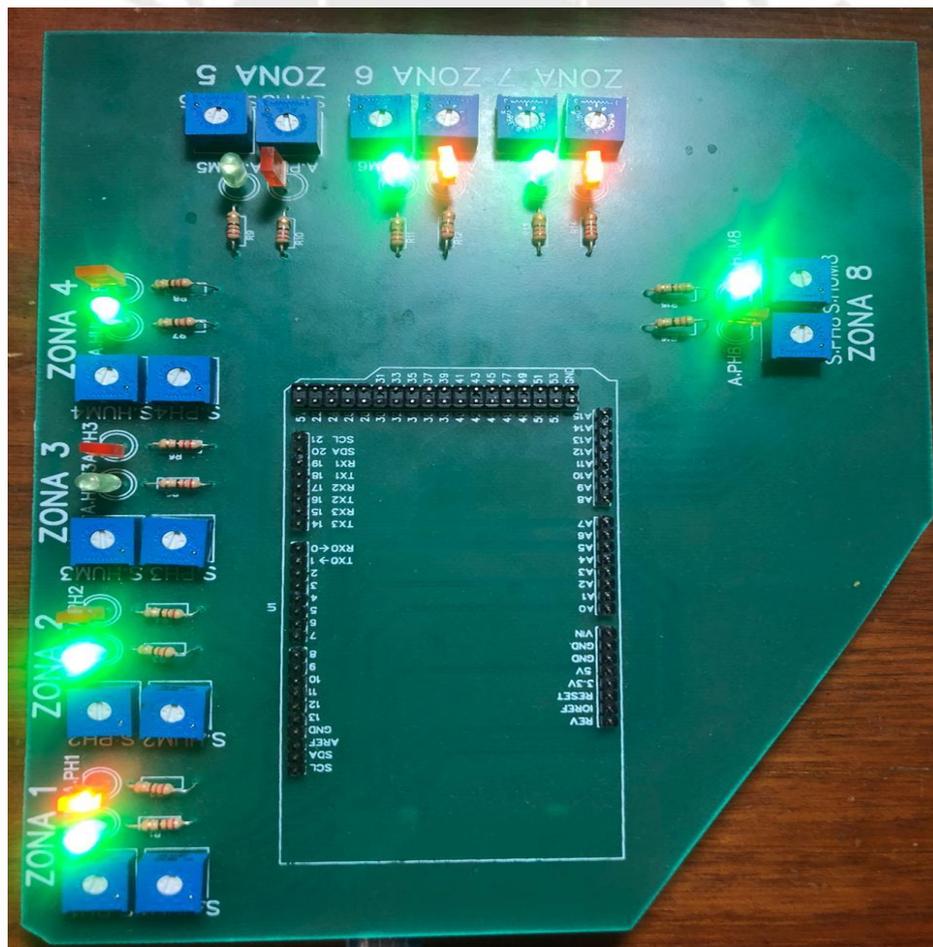


Figura 33: Desarrollo de segunda etapa de riego [Elaboración Propia]

Como se puede apreciar en la imagen anterior se aprecia la información obtenida de los sensores, así como el estado de cada una de las válvulas de humedad y pH de cada una de las zonas de riego. Es así que, cuando la válvula no se encuentre dentro del rango definido en el controlador esta será encendida para regular los niveles establecidos en el controlador. El proceso llega a su fin cuando todas las zonas hayan tenido encendido por 10 minutos la válvula de humedad.

A medida que se va ejecutando el programa, se utiliza la comunicación serial para enviar la información recogida por la tarjeta controladora hacia la interfaz gráfica con el objetivo de poner en marcha el funcionamiento de la simulación del sistema de riego automático en su totalidad.

#### **4.2 Sistema de riego integrado a la interfaz gráfica de monitoreo**

Para lograr integrar el sistema se recurre a la comunicación en serie entre Arduino y la interfaz gráfica, es así que a través del controlador Arduino se envía una cadena de caracteres con la información de los sensores y estado de las válvulas a través del puerto COM3. Una vez adquirido los valores por parte de la interfaz se procede a dar inicio al sistema de monitoreo.

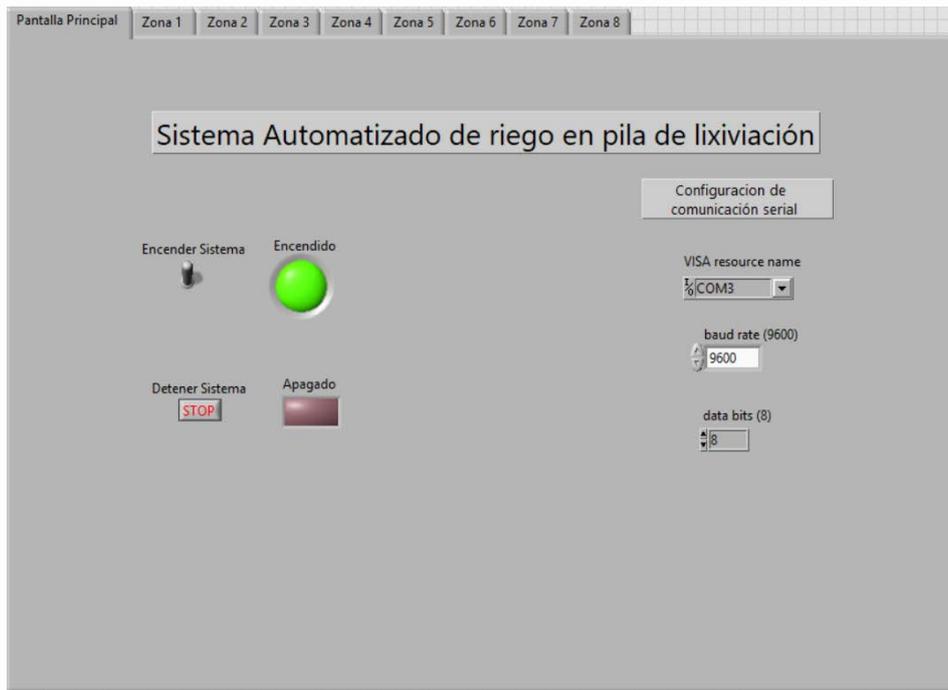


Figura 34: Encendido de sistema de monitoreo [Elaboración Propia]

En la figura 34 se aprecia la pantalla principal del sistema en modo encendido, indicado por el led verde, es decir, que el proceso de riego sobre la pila está en ejecución. La configuración serial está dada por el usuario a una velocidad de 9600 baudios a través del puerto COM3, la cual comparte con la tarjeta Arduino.

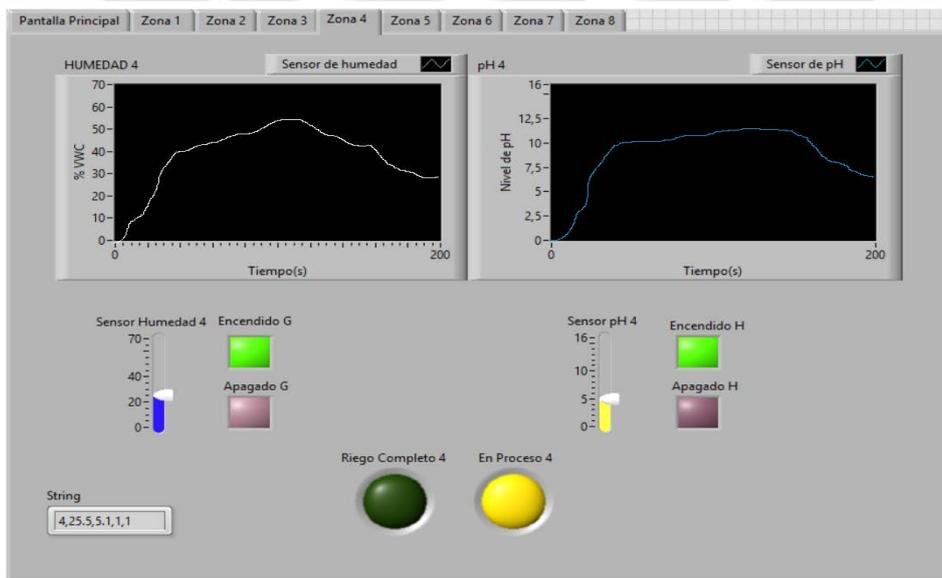


Figura 35: Proceso de riego en la zona 4 [Elaboración Propia]

En la figura 35 se muestra el proceso de riego de la zona 4, en esta se aprecia el nivel de humedad que mantiene la pila, así como el nivel de pH en la misma. Se aprecia que tanto la válvula de humedad como la válvula de pH se encuentran encendidas, esto debido a que la pila no ha alcanzado los niveles establecidos en el controlador.

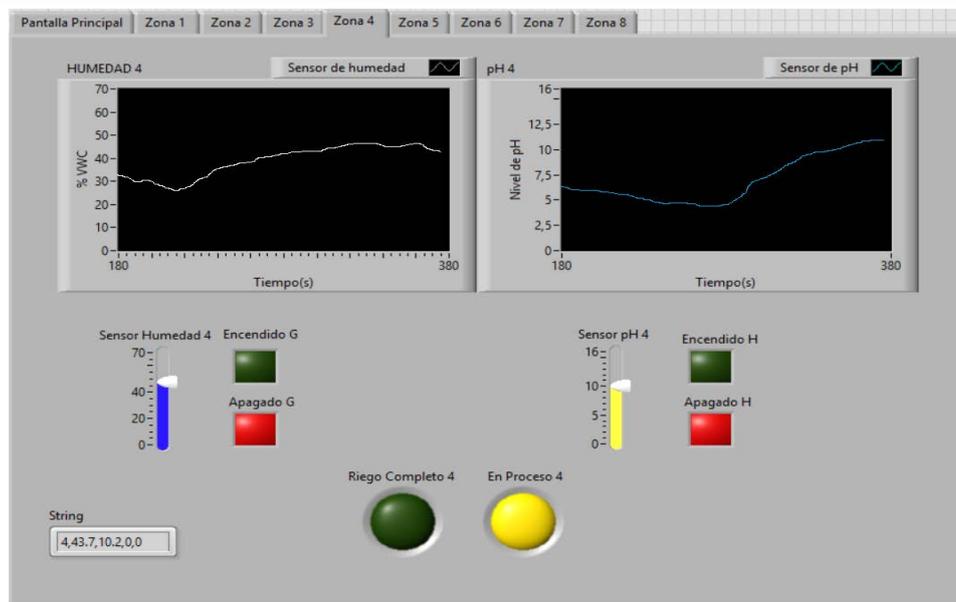


Figura 36: Proceso de riego en la zona 4 [Elaboración Propia]

En la figura 36 se aprecia a las válvulas de humedad y pH apagadas, esto debido a que se ha alcanzado los niveles requeridos por la pila en cuanto a humedad y pH, sin embargo, el proceso de riego aún no termina, esto es indicado a través del led amarillo la cual representa que la zona de riego 4 aún está en proceso.

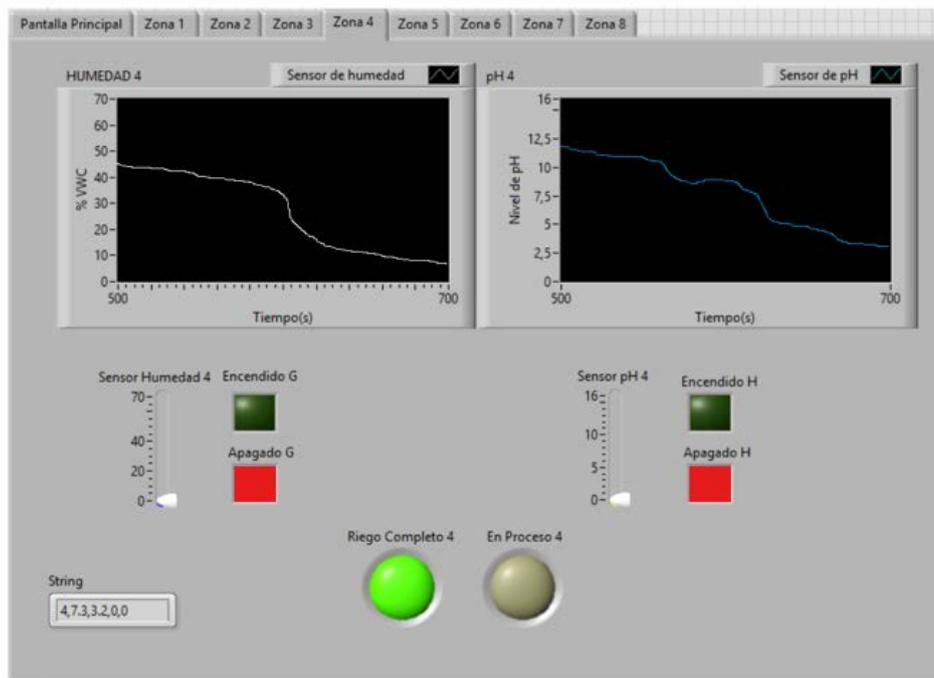


Figura 37: Proceso de riego culminado en la zona 4 [Elaboración Propia]

En la figura 37 se aprecia la etapa de la zona 4 de riego finalizado, esto ocurre al terminar el tiempo de riego establecido en el controlador. El indicador verde se enciende luego de terminado el riego en dicha zona.

### 4.3. Presupuesto del diseño electrónico

Tabla 11: Presupuesto del diseño electrónico [Elaboración Propia]

N°	ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO(S/.)	CANTIDAD	PRECIO TOTAL(S/.)
1	Sensor de humedad	EC-5 Decagon Devices	450	16	7200
2	Sensor de pH	Sensor pH METER V1.1	300	16	4800
3	Actuadores electrónicos	Válvulas solenoides DANFOSS EV250B-EV220B	400	16	6400
4	Circuito acondicionador de señal	Convertor I/V 4-20mA a 1-5 Vdc	10	8	80
5	Tarjeta controladora	Arduino MEGA	190	1	190
6	Software LabView	Licencia 2018 edición completa	1450	1	1450
7	Mando y potencia	Transformadores y circuitos de potencia	100	16	1600
9	Línea de riego en campo	Tuberías principales y secundarias	20	100	2000
10	Regulador de flujo en campo	Goteros auto compensados de 10LPH	1	1000	1000
				<b>TOTAL</b>	<b>24720.00</b>

## Conclusiones

Tras el desarrollo del presente trabajo de tesis se puede inferir las siguientes conclusiones:

- Se logra realizar un monitoreo del proceso minero de lixiviación a través de un sistema de riego por goteo, en la cual se muestra el proceso de riego en tiempo real por pantalla de computadora.
- A lo largo del proceso de lixiviación se obtiene información actualizada de los parámetros de riego como la humedad y pH, dichos valores determinan la apertura o cierre de las válvulas de humedad y pH respectivamente.
- Se logra implementar un sistema de alimentación personalizado para el proceso de lixiviación; se parte de una alimentación de 220 VAC para luego ser acondicionada a niveles de tensión de 12V DC y 5V DC.
- Se logra implementar una prueba de concepto del sistema, en donde a través de las simulaciones se valida el funcionamiento del sistema.
- Se logra realizar una conexión entre sensores, actuadores y controlador a través de la comunicación serial, la cual se toma a una velocidad de transmisión de 9600 baudios.
- Se logra desarrollar un programa de lectura y control en lenguaje C, utilizando el programa Arduino, asimismo, se logra su implementación en la tarjeta de desarrollo del mismo fabricante.

- Los valores obtenidos han sido digitalizados y enviados hacia el computador para que el software diseñado interprete y muestre a través de una interfaz gráfica el comportamiento de todo el sistema de riego.



## Recomendaciones

- Proteger con material resistente a corrosiones los sensores instalados dentro de la pila puesto que, al estar expuestos a material altamente contaminantes.
- Utilizar software libre de licencia para reducir costos de implementación como es el caso del software LabView.
- Analizar un nuevo método de comunicación que permita acceder a los datos obtenidos por el sistema de manera remota.
- Analizar el uso de sensores inalámbricos siguiendo con la tendencia tecnológica actual. Además, si esta tecnología es aplicada a nuestro sistema será posible acceder a los datos del sistema a través de una aplicación móvil.
- Implementar un sistema de registro de datos con la finalidad de analizar dichos datos a posterioridad a fin de mejorar el rendimiento del sistema.

## Bibliografía

[1] HIDROMETALURGIA DEL COBRE

21 de abril (online) disponible:

<https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/2015/04/21/hidrometalurgia-del-cobre/>

[2] BECKEL JORGE, “El proceso hidrometalurgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile”, Red de Reestructuración y Competitividad de División de Desarrollo Productivo y Empresarial, Santiago de Chile, Chile, 2000

[3] Cáceres Arenas German, *Hidrometalurgia y Electrometalurgia*.  
Santiago de Chile: Universidad de Atacama, 2007

[4] Belen María, Guajardo Carlos, Díaz Mauricio, Cárdenas Fabian, “Lixiviación de minerales mediante pilas y bateas”, Departamento de Ingeniería de minas, Universidad de Chile, Chile, 2009

[5] Fundación Tecnológica, “Los atractivos de la lixiviación in situ”, pp.27-29,

[6] SANCHEZ. LUIS, “Manejo de residuos sólidos en minería”, departamento de ingeniería de minas, escuela politécnica de Sao paulo, Sao paulo, Brasil, 2012

[7] 911 Metallurgist, “EL problema de la lixiviación en cobre”

Noviembre 2016 (online) disponible:

<https://www.911metallurgist.com/metalurgia/lixiviacion-cobre-tanques/>

[8] Avilés García Gustavo, Paredes Ponce Randall, *Procesos de desarrollo de una mina*  
Arequipa: Universidad de la Unas, 2008

[9] Ministerio de energía y minas, *glosario técnico minero*, República de Colombia, 2003

[10] Empresa multinacional Yanacocha, “Operaciones y Procesos productivos de  
extracción,” agosto 1993 (online) disponible:

<http://www.yanacocha.com/proceso-de-produccion/>

[11] Gonzales Juan, A.(2017).*Análisis y Modelado de Sensores de Reflectometria en  
frecuencia para medida de agua en el suelo(Magister)*. Universidad Politécnica de  
Cartagena. Cartagena

[12] Ciganda,L. (2004). *Electrodos para medir pH*. Montevideo. Facultad de medicina e  
ingeniería

[13] Valvulas y medidores de flujo (2017) recuperado de

<http://www.valvulasymedidores.com/>

[14] Technical Information Orbipore CPS91D and CPS91.(2006).segunda edición[ebook]

p.12. disponible en

[https://portal.endress.com/wa001/dla/5000557/6797/000/02/TI00375CEN\\_1415.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000557/6797/000/02/TI00375CEN_1415.pdf)

[15] PH meter V2.0 sku: SEN0161(2012) recuperado de

[https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_Analog\\_pH\\_Sensor\\_Meter\\_Kit\\_V2\\_SKU\\_SEN0161-V2](https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2)

[16] Decagon Devices, Inc. *MAS-1 4-20mA Soil Moisture Sensor*[Archivo PDF]. New york DC. Decagon recuperado de

[http://manuals.decagon.com/Manuals/13678\\_MAS-1\\_Web.pdf](http://manuals.decagon.com/Manuals/13678_MAS-1_Web.pdf)

[17] DANFOSS. Especificaciones de producto válvula EV220B

[http://www.danfoss.com/Latin\\_America\\_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/](http://www.danfoss.com/Latin_America_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/)

[Products/Detail/IA/Solenoid-valves/EV220B-6-22-series-Servo-operated-22-waysolenoid-valves/032U7518/3f6f39ba-5ea2-48b1-92b7-7aea893a8383/fee6df20-](http://www.danfoss.com/Latin_America_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/Products/Detail/IA/Solenoid-valves/EV220B-6-22-series-Servo-operated-22-waysolenoid-valves/032U7518/3f6f39ba-5ea2-48b1-92b7-7aea893a8383/fee6df20-3087-4406-9db2-1e9cb1819ef5.html)

[3087-4406-9db2-1e9cb1819ef5.html](http://www.danfoss.com/Latin_America_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/Products/Detail/IA/Solenoid-valves/EV220B-6-22-series-Servo-operated-22-waysolenoid-valves/032U7518/3f6f39ba-5ea2-48b1-92b7-7aea893a8383/fee6df20-3087-4406-9db2-1e9cb1819ef5.html)

[18] DANFOSS. Especificaciones de producto válvula EV225B.

<http://files.danfoss.com/TechnicalInfo/Dila/04/IC.PD.300.E2.05>

[19] Miningsystems S.A. *Sistema de control y monitoreo de riego en pilas de lixiviación.*

Riesco Jose Antonio Larrain.2009-08-05 PCT/CL2009/000007. 6 de junio del 2008.

[20] Revista Rumbo minero(2014). Automatizacion: Minería del futuro. Lima, Peru

<http://www.rumbominero.com/revista/informes/automatizacion-mineria-del-futuro/>

[21] Avendaño, Carlos (2013). Técnica mejorada de lixiviación de minerales de cobre en

pilas. <http://www.terral.cl/wp->

[content/uploads/Tecnicas\\_Lixiviaci%C3%B3n\\_en\\_Pilas\\_HIDROPROCESS.2013.pdf](http://www.terral.cl/wp-content/uploads/Tecnicas_Lixiviaci%C3%B3n_en_Pilas_HIDROPROCESS.2013.pdf)

[22] Danfoss (2000). Válvulas de accionamiento directo de 2/2 vías. Recuperado de [http://www.terral.cl/wp-content/uploads/Tecnicas\\_Lixiviaci%C3%B3n\\_en\\_Pilas\\_HIDROPROCESS.2013.pdf](http://www.terral.cl/wp-content/uploads/Tecnicas_Lixiviaci%C3%B3n_en_Pilas_HIDROPROCESS.2013.pdf)

[23] Arduino Mega 2560 rev3. Recuperado de <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>

[24] Fuente de alimentación tipo stiwching. Recuperado de <http://dmu.cl/fuente-poder-switching-220vac-12vdc-5a>

[25] Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection. Recuperado de <https://www.vishay.com/docs/81181/4n35.pdf>

[26] Power Mosfet. Recuperado de <https://www.vishay.com/docs/91036/sihf640.pdf>



## Código de programación principal

```
//libreria de temporización e interrupción
#include <TimerOne.h>

int x=0;

int g=0;

int aux;

int aux1;

int i=0;

int N=2;

int pin;

int pin2;

int c=0;

int vhu[]={2,3,4,5,6,7,8,9};

int vph[]={22,23,24,25,26,27,28,29};

int tiempo[]={0,0,0,0,0,0,0,0};

int f[]={0,0,0,0,0,0,0,0};

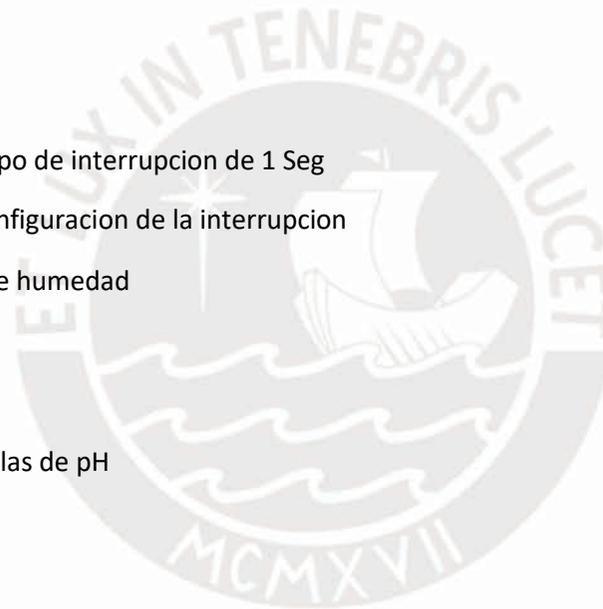
int bandt[]={0,0,0,0,0,0,0,0};

int band[]={3,5,4,8,13,23,35,67,87}; //VALORES ALEATORIOS

float shu[16];
```



```
float sph[16];
int ts= LOW;
int dato;
float corriente,M,O;
float vwc,voltaje,pH;
String comando="";
void setup() {
Timer1.initialize(1000000); // Configuracion de tiempo de interrupcion de 1 Seg
Timer1.attachInterrupt(ISR_Blink); //Activacion y configuracion de la interrupcion
for(int pin = 2; pin<10; pin++){ //Salida de valvulas de humedad
pinMode(pin,OUTPUT);
}
for(int pin2 = 22; pin2<30; pin2++){ //Salida de valvulas de pH
pinMode(pin2,OUTPUT);
}
Serial.begin(9600);
}
void ISR_Blink(){
tiempo[0]=(tiempo[0]+1)-bandt[0];
```



```
tiempo[1]=(tiempo[1]+1)-bandt[1];
tiempo[2]=(tiempo[2]+1)-bandt[2];
tiempo[3]=(tiempo[3]+1)-bandt[3];
tiempo[4]=(tiempo[4]+1)-bandt[4];
tiempo[5]=(tiempo[5]+1)-bandt[5];
tiempo[6]=(tiempo[6]+1)-bandt[6];
tiempo[7]=(tiempo[7]+1)-bandt[7];
}
float CalculaVWC(int valor_digital){
corriente=valor_digital*0.01953125;
vwc=4.79*corriente-39.2;
return vwc;
}
float CalculaPH(int valor_digital){
voltaje=valor_digital*0.0048875855;
pH=21.34-4.70*voltaje;
return pH;
}
void loop() {
```



```
//Primera etapa de programa
//Encendido de valvulas. Inicio de sistema
for(int j=0; j<100;j++){
for(int k=0; k<15;k++){
g=analogRead(k);
delay(5);
}
delay(20);
}
do{
digitalWrite(vhu[x],HIGH);
delay(1000);
//Serial.print("Zona ");
//Serial.print(x+1);
//Serial.print("\n");
do{
shu[N]=CalculaVWC(analogRead(N));
}while(shu[N]<10); //Valor digital correspondiente al 10%VWC
//Serial.print("Valvula de Humedad ");
```



```
//Serial.print(x+1);  
//Serial.print(" encendido");  
//Serial.print("\n");  
x++;  
N=N+2;  
}while(x<8);  
// Segunda etapa de riego  
//noInterrupts();  
interrupts();  
N=0;  
x=0;  
do{  
if(band[x]==x){  
x++;  
N=N+2;  
}  
if(N%2==0){  
shu[N]=CalculaVWC(analogRead(N));  
delay(200);
```



```
if(shu[N]<30 || shu[N]>40){
if(shu[N]>40){
digitalWrite(vhu[x],LOW);
aux=0;
bandt[x]=1;
}else{
digitalWrite(vhu[x],HIGH);
aux=1;
bandt[x]=0;
}
}
}else{
sph[N]=CalculapH(analogRead(N));
delay(200);
if(sph[N]<9 || sph[N]>11){
if(sph[N]<9){
digitalWrite(vph[x],HIGH);
aux1=1;
}else{
```



```
digitalWrite(vph[x],LOW);
aux1=0;
}
}
}
if(N%2!=0){
/*Serial.print("zona de riego: ");
Serial.print(x+1);
Serial.print("\n");
Serial.print("Nivel del sensor de humedad: ");
Serial.print(shu[N-1]);
Serial.print("% \n");
Serial.print("Nivel del sensor de pH: ");
Serial.print(sph[N]);
Serial.print("\n");
if(aux==1){
Serial.print("Valvula de humedad: Encendido");
Serial.print("\n");
}else{
```



```
Serial.print("Valvula de humedad: Apagado");
Serial.print("\n");
}
if(aux1==1){
Serial.print("Valvula de pH: Encendido");
Serial.print("\n");
}else{
Serial.print("Valvula de pH: Apagado");
Serial.print("\n");
}*/
comando = "";
comando += "Z";
comando += x+1;
comando += "-";
comando += shu[N-1];
comando += "-";
comando += sph[N];
comando += "-";
comando += aux;
```



```
comando += "-";  
comando += aux1;  
comando += "-";  
comando += f[x-1];  
Serial.println(comando);  
delay(500);  
}  
N++;  
if(N>=16){  
N=0;  
}  
if(N%2==0){  
x++;  
}  
if(x>=8){  
x=0;  
}  
if(tiempo[x]>50){  
digitalWrite(vhu[x],LOW);
```



```
digitalWrite(vph[x],LOW);  
f[x]=1;  
band[x]=x;  
c++;  
x++;  
}  
}while(c<8);  
}
```



# Programa principal LabVIEW

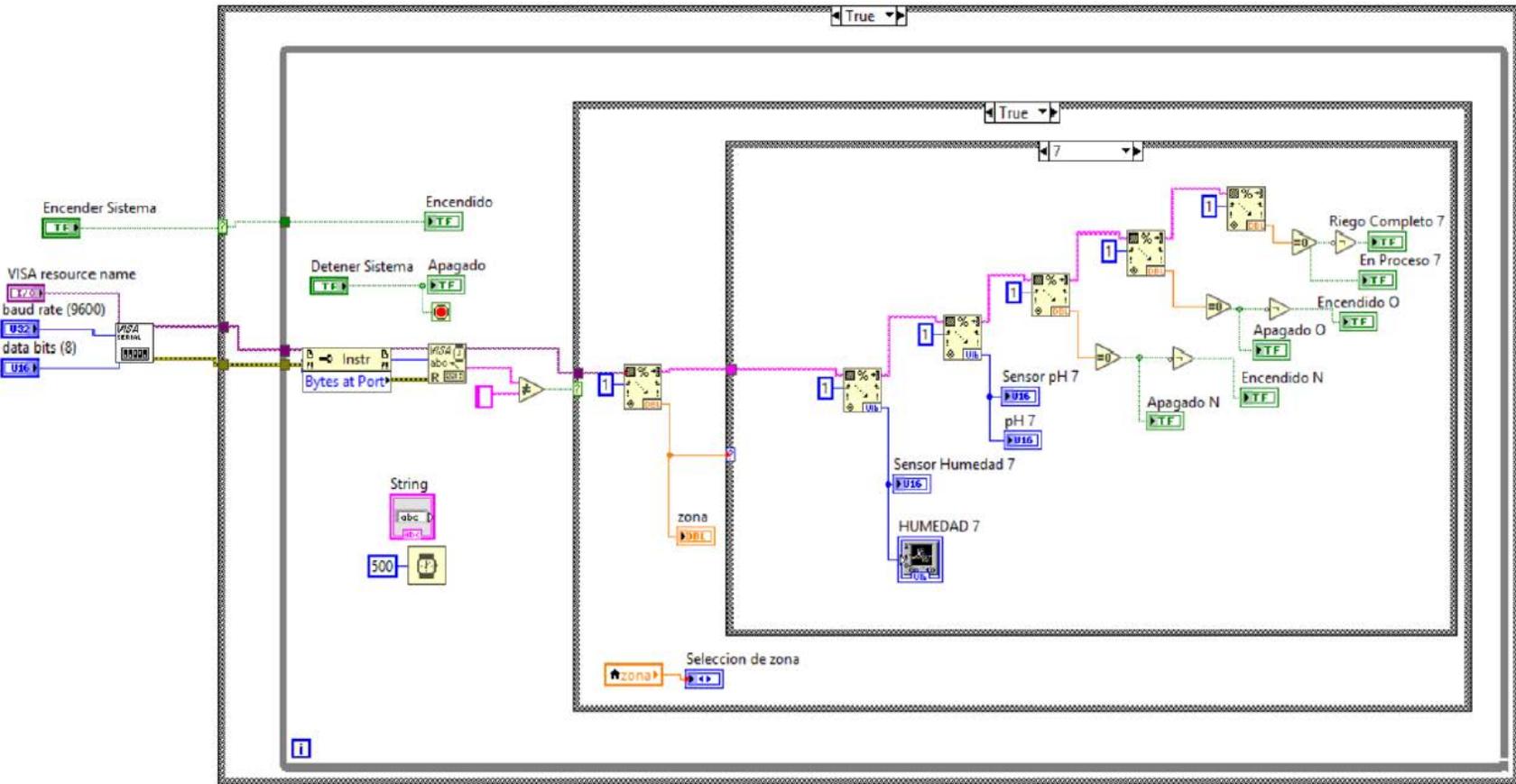


Diagrama esquemático de conexiones

