



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**TEMA:**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICADO A UN  
SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL PARA UNA  
PLANTACIÓN DE MAÍZ**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Electrónico

**AUTORES:**

**JAIME ENRIQUE SAHING ASPIAZU  
GEOVANNY DANIEL JARAMILLO BARREIRO**

**TUTOR:**

**ING. NINO TELLO VEGA URETA MSC.**

Guayaquil - Ecuador  
2021

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jaime Enrique Sauhing Aspiazu con documento de identificación N° 1206270488 y Geovanny Daniel Jaramillo Barreiro con documento de identificación N° 0930108386; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 26 de Febrero de 2022

Atentamente,



Jaime Enrique SauHing Aspiazu  
1206270488



Geovanny Daniel Jaramillo Barreiro  
0930108386

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN  
A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Jaime Enrique Sauhing Aspiazu con documento de identificación N° 1206270488 y Geovanny Daniel Jaramillo Barreiro con documento de identificación N° 0930108386, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Desarrollo de un sistema de control aplicado a un sistema de riego por goteo superficial para una plantación de maíz”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de Febrero de 2022

Atentamente,



Jaime Enrique SauHing Aspiazu  
1206270488



Geovanny Daniel Jaramillo Barreiro  
0930108386

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Nino Tello Vega Ureta con documento de identificación N° 0801602160, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICADO A UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL PARA UNA PLANTACIÓN DE MAÍZ, realizado por Jaime Enrique Sauhing Aspiazu con documento de identificación N° 1206270488 y por Geovanny Daniel Jaramillo Barreiro con documento de identificación N° 0930108386, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de Febrero de 2022

Atentamente,



Ing. Nino Tello Vega Ureta, MSc.

0801602160

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a todos aquellos que sueñan con cambiar el entorno que los rodea, para hacer de la vida una mera alegría.

Jaime Enrique

## Agradecimientos

A Ireneo, que me ayudó a recordar mi camino, al regresar a Ecuador desde Fray Bentos. A aquel pasajero del Zeus, que me mostró el descanso de Cartaphilus en esa isla olvidada. A usted maestro, a usted Jorge Luis, que me permitió usar aquel objeto secreto y conjetural, y pude encontrar a aquella mujer que en mi memoria se había perdido, y vi el lugar donde nos conocimos, vi sus ojos y su sonrisa por separado, vi la escalera que ascendía a su departamento, vi los pasos, vi el color de la miel, vi una cama y encima de ella las cartas que escribí y que no volverán a ser leídas, vi su rostro, al fin, vi los de alguien más, vi una vida que llegaba, vi una despedida, vi que era hoy y que daba las gracias.

*(...) y era rojo, y olía a fierros podridos, dicen. Era grande, no tenía nombre, pero se sabía un sentimiento de culpa. Era un cementerio, era todo lo que no debía ser. (J.E., 2017)*

Jaime Enrique

## Resumen

Las precipitaciones no satisfacen las demandas biológicas en los cultivos, provocando estrés hídrico en las plantas, y finalmente acabando plantaciones enteras por la falta del líquido vital. El desconocimiento de los agricultores sobre los manejos de los sistemas de riego, implican un mal uso del recurso hídrico. El objetivo de este proyecto, fue diseñar un sistema de riego por goteo inteligente para una plantación de maíz, para los residentes de la finca "San Benito". El área que se llevó a cabo el trabajo, tiene 26 metros de largo, por 17 metros de ancho, por lo que se dimensionó un circuito hidráulico con laterales de riego, del ancho del terreno, a 0.80m de distancia por hilera, con emisores de 3L/h y 10 mca. Los resultados del laboratorio del suelo, determinaron que el terreno, es de textura franco arcilloso con una capacidad de campo (CC) de 28.7 % y un punto de marchitez permanente (PMP) de 15.92 %, como fuente de agua se tuvo un tanque de 2000L, que recoge el fluido desde un único pozo, que sirve para llevar el líquido a las residencias de la finca. El caudal requerido por el cultivo es de 37.54 GPM. El programa del sistema se lo hizo en un PLC LOGO! con módulos analógicos, para leer los sensores de humedad y de presión, para obtener los coeficientes del regulador proporcional integral, se identificó el modelo matemático del sistema de riego, con MATLAB Simulink. El costo del sistema de riego propuesto, es de \$4,459.50. Los indicadores dieron los valores de VAN \$7,420.18 y una TIR de 64.03 %.

**Palabras claves:** Riego / Goteo / Maíz / Control PI / PLC / Automatización.

## Abstract

Precipitation does not satisfy the biological demands of the crops, causing water stress in the plants, and finally ending entire plantations due to the lack of vital liquid. The lack of knowledge of farmers about the management of irrigation systems, imply a misuse of water resources. The objective of this project was to design an intelligent drip irrigation system for a corn plantation, for the residents of the "San Benito's farm". The area where the work was carried out is 26 meters long and 17 meters wide, so a hydraulic circuit with lateral irrigation was dimensioned, the width of the land, at a distance of 0.80m per row, with emitters of 3L/h and 10 mca. The results of the soil laboratory determined that the terrain has a clay loam texture with a field capacity (FC) of 28.7 % and a permanent wilting point (PMP) of 15.92 %, as a water source there was a 2000L tank, which collects the fluid from a single well, which is used to take the liquid to the residences of the farm. The flow rate required for the crop is 37.54 GPM. The system program was made with PLC LOGO! with analog modules, to read the soil moisture and pressure sensors, to obtain the coefficients of the integral proportional regulator, the mathematical model of the irrigation system was identified, with MATLAB Simulink. The cost of the proposed irrigation system is \$4,459.50. The indicators gave the values of NPV \$7,420.18 and IRR of 64.03 %.

**Keywords:** Irrigation / Drip / Corn / PI Control / PLC / Automation.

## Índice General

Portada . . . . .	I
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA . . . . .	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN . . . . .	IV
Dedicatoria . . . . .	V
Agradecimientos . . . . .	VI
Resumen . . . . .	VII
Abstract . . . . .	VIII
Índice General . . . . .	IX
Índice de Figuras . . . . .	XIII
Índice de Tablas . . . . .	XVI
Introducción . . . . .	1
<b>1 El Problema</b>	<b>2</b>
1.1 Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2 Importancia y Alcance . . . . .	2
1.3 Delimitación . . . . .	2
1.3.1 Temporal . . . . .	2
1.3.2 Espacial . . . . .	3
1.3.3 Académica . . . . .	3
1.4 Objetivos . . . . .	4
1.4.1 Objetivo General . . . . .	4
1.4.2 Objetivos Específicos . . . . .	4
<b>2 Fundamentos Teóricos</b>	<b>5</b>
2.1 El Suelo . . . . .	5
2.1.1 Características del Suelo . . . . .	5

2.1.2	Tipos de Suelo . . . . .	5
2.1.3	Disponibilidad Hídrica de los Suelos . . . . .	7
2.2	El Maíz . . . . .	8
2.2.1	Necesidades Hídricas del Maíz . . . . .	9
2.2.2	Densidad de siembra del Maíz . . . . .	9
2.3	Sistemas Hidráulicos en la Agricultura . . . . .	10
2.3.1	Fuentes de Agua . . . . .	10
2.3.2	Capacidades de los Pozos de Agua . . . . .	11
2.3.3	Bombeo y Distribución del Agua . . . . .	12
2.4	Riego Agrícola . . . . .	13
2.4.1	Características del Riego Agrícola . . . . .	13
2.4.2	Riego por Goteo . . . . .	14
2.4.3	Componentes del Riego por Goteo . . . . .	14
2.5	Control PI . . . . .	16
2.5.1	Características Generales del Control PI . . . . .	17
2.6	Controlador Lógico Programable (PLC) . . . . .	17
2.6.1	Características Generales de un PLC . . . . .	17
2.6.2	Módulos de Expansión . . . . .	18
2.7	Convertidores de Frecuencia . . . . .	18
2.7.1	Características Generales de un Convertidor de Frecuencia . . . . .	18
2.8	Electroválvula . . . . .	19
2.8.1	Tipos de Electroválvulas . . . . .	19
2.9	Sensor de Humedad . . . . .	20
2.10	Sensor de Presión . . . . .	21
2.10.1	Sensor de Presión absoluta . . . . .	21
2.11	Bomba Eléctrica . . . . .	22
2.11.1	Bomba Centrífuga . . . . .	22
2.11.2	Curvas Características de las Bombas . . . . .	23
2.11.3	Cavitación . . . . .	23
2.11.4	Características Eléctricas de las Bombas . . . . .	24

<b>3 Marco Metodológico</b>	<b>25</b>
3.1 Descripción del Sistema . . . . .	25
3.2 Estudio del Suelo . . . . .	26
3.3 Preparación del Área del Terreno . . . . .	27
3.4 Diseño del Sistema Hidráulico . . . . .	28
3.4.1 Medición del Área . . . . .	28
3.4.2 Selección y Distribución de Laterales de Riego . . . . .	28
3.4.3 Dimensionamiento de Tuberías . . . . .	30
3.4.4 Implementación de los Laterales de Riego . . . . .	31
3.5 Selección de la Bomba . . . . .	33
3.6 Implementación del Cabezal de Riego . . . . .	34
3.7 Diseño y Construcción del Tablero de Control de la Bomba . . . . .	35
3.7.1 Componentes del Tablero de Control . . . . .	36
3.7.2 Caseta del Tablero de Control . . . . .	37
3.8 Selección del Dispositivo Programador Lógico Programable . . . . .	39
3.8.1 Fuente AC/DC . . . . .	39
3.8.2 Módulo de Entradas Analógicas . . . . .	40
3.8.3 Módulo de Salidas Analógicas . . . . .	40
3.9 Selección del Variador de Frecuencia . . . . .	41
3.10 Selección de Instrumentos y Actuadores . . . . .	42
3.10.1 Electroválvula . . . . .	42
3.10.2 Sensor de Presión . . . . .	42
3.10.3 Sensor de Humedad . . . . .	43
3.10.4 Sensor de Nivel . . . . .	43
3.11 Desarrollo del Programa del Sistema . . . . .	44
3.11.1 Escalamiento del Sensor de Humedad . . . . .	45
3.11.2 Escalamiento del Sensor de Presión . . . . .	45
3.12 Cálculos de parámetros del suelo . . . . .	46
3.12.1 Cálculo del Volumen de Agua en Suelo . . . . .	46
3.13 Cantidad de Agua a Regar . . . . .	48
3.13.1 Tiempo de Riego . . . . .	48

3.14	Identificación del modelo matemático del sistema de riego . . . . .	48
3.15	Simulación de la Planta . . . . .	51
3.16	Simulación del Controlador PI . . . . .	52
3.16.1	Consideraciones del Control . . . . .	52
3.16.2	Coeficientes Kc y Ti en el PLC . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Resultados y Comparaciones</b>	<b>55</b>
4.1	Evaluación del Sistema Hidráulico Implementado . . . . .	55
4.2	Evaluación del Sistema de Control del Riego . . . . .	57
4.2.1	Pantalla del Controlador . . . . .	57
4.2.2	Control de la Presión de la Bomba . . . . .	58
4.2.3	Control de la Humedad . . . . .	59
4.2.4	Ciclos del Riego . . . . .	60
4.3	Comparación de Eficiencia y Rentabilidad . . . . .	60
4.3.1	Eficiencia del Riego Propuesto . . . . .	60
4.3.2	Análisis de la Rentabilidad con VAN y TIR . . . . .	63
	<b>Conclusiones</b>	<b>64</b>
	<b>Recomendaciones</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>66</b>
	<b>Anexos</b>	<b>69</b>
	Pruebas del Suelo . . . . .	69
	Construcción de la caseta . . . . .	70
	Instalación del circuito hidráulico . . . . .	71
	Construcción del tablero de control . . . . .	72
	Programa de identificación de la planta . . . . .	73
	Programa del control de riego . . . . .	76
	Desarrollo del cultivo de maíz . . . . .	79

## Índice de Figuras

Fig.1	Vista del área de la Finca. . . . .	3
Fig.2	Características de los suelos [1]. . . . .	5
Fig.3	Triangulo guía para la descripción de suelos [2]. . . . .	6
Fig.4	Capacidad de humedad en los suelos del mundo [2]. . . . .	7
Fig.5	Retención de humedad en el suelo [2]. . . . .	8
Fig.6	Etapas de crecimiento del maíz [3]. . . . .	9
Fig.7	Guía de sembrado de semillas de maíz. Autores. . . . .	10
Fig.8	Mecánica de un pozo [7]. . . . .	11
Fig.9	Sistema de bombeo [9]. . . . .	12
Fig.10	Coeficientes de fricción [9]. . . . .	13
Fig.11	Manómetro [10]. . . . .	14
Fig.12	Filtro de arenas [10]. . . . .	15
Fig.13	Esquema de un sistema de riego por goteo [10]. . . . .	15
Fig.14	Tubería secundaria [10]. . . . .	15
Fig.15	Cintas de goteo [10]. . . . .	16
Fig.16	Controlador PI [13]. . . . .	16
Fig.17	Compensación del controlador PI [13]. . . . .	17
Fig.18	Electroválvula dos vías [18]. . . . .	20
Fig.19	Sensor de humedad instalado en el suelo. Autores. . . . .	20
Fig.20	Sensor de presión absoluta, montado en un collarín. Autores. . . . .	21
Fig.21	Bomba eléctrica. Autores. . . . .	22
Fig.22	Partes de una bomba centrífuga [21]. . . . .	22
Fig.23	Curvas características de una bomba centrífuga [22]. . . . .	23
Fig.24	Curvas de cavitación de una bomba trifásica [22]. . . . .	24
Fig.25	Placa técnica de una bomba trifásica. Autores. . . . .	24
Fig.26	Esquema del Proyecto. Autores. . . . .	25

Fig.27	Área seleccionada. Autores. . . . .	26
Fig.28	Excavaciones para muestras de suelo. Autores. . . . .	27
Fig.29	Arado de terreno. Autores. . . . .	28
Fig.30	Diseño de riego. Autores. . . . .	29
Fig.31	Cinta de goteo $3L/h$ . Autores. . . . .	30
Fig.32	Manguerilla de laterales. Autores. . . . .	32
Fig.33	Laterales de riego. Autores. . . . .	32
Fig.34	Bomba eléctrica. Autores. . . . .	33
Fig.35	Punto de operación de la bomba. Autores. . . . .	33
Fig.36	Cabezal de riego. Autores. . . . .	34
Fig.37	Diagrama esquemático de fuerza del tablero. Autores. . . . .	35
Fig.38	Organización de componentes del tablero. Autores. . . . .	37
Fig.39	Caseta de tablero de control. Autores. . . . .	38
Fig.40	PLC LOGO!8 [24]. . . . .	39
Fig.41	Fuente de poder [24]. . . . .	39
Fig.42	Módulo de entradas analógicas [24]. . . . .	40
Fig.43	Módulo de salidas analógicas [24]. . . . .	40
Fig.44	Placa de la bomba eléctrica. Autores. . . . .	41
Fig.45	Ingreso de datos de placa al variador. Autores. . . . .	41
Fig.46	Electroválvula. Autores. . . . .	42
Fig.47	Sensor de presión [24]. . . . .	42
Fig.48	Sensor de humedad. Autores. . . . .	43
Fig.49	Sensor de Nivel [25]. . . . .	43
Fig.50	Esquema del Programa. Autores. . . . .	44
Fig.51	Escalamiento de Humedad. Autores. . . . .	45
Fig.52	Escalamiento de Presión. Autores. . . . .	45
Fig.53	Zona radicular de una planta de maíz. Autores. . . . .	47
Fig.54	Ingreso de los datos de volumen de agua. Autores. . . . .	47
Fig.55	Presión de trabajo a lazo abierto. Autores. . . . .	49
Fig.56	Frecuencia de trabajo a lazo abierto. Autores. . . . .	49
Fig.57	Observación de las frecuencias. Autores. . . . .	50

Fig.58	Curvas del sistema en lazo abierto. Autores. . . . .	50
Fig.59	Simulación del modelo utilizando Ident. Autores. . . . .	51
Fig.60	Planta del modelo obtenida utilizando Ident. Autores. . . . .	51
Fig.61	Simulación de la Función de Transferencia en lazo abierto. Autores. . . . .	52
Fig.62	Diagrama de la planta en lazo cerrado. Autores. . . . .	52
Fig.63	Sintonizador de coeficientes del controlador PI. Autores. . . . .	53
Fig.64	Parámetros de los coeficientes $k_p$ y $k_i$ . Autores. . . . .	53
Fig.65	Simulación del Sistema en lazo cerrado. Autores. . . . .	53
Fig.66	Configuración de los coeficientes $K_c$ y $T_i$ en bloque PI. Autores. . . . .	54
Fig.67	Funcionamiento del circuito hidráulico implementado. Autores. . . . .	55
Fig.68	Medición de la cantidad de agua regada. Autores. . . . .	56
Fig.69	Funcionamiento de la pantalla del LOGO!. Autores. . . . .	57
Fig.70	Respuestas del sistema en el llenado del circuito. Autores. . . . .	58
Fig.71	Respuestas del sistema cuando las tuberías están llenas. Autores. . . . .	59
Fig.72	Registros de humedad del suelo. Autores. . . . .	59
Fig.73	Registro de los ciclos de riego. Autores. . . . .	60
Fig.74	Riego en la zona radicular de las plantas. Autores. . . . .	61
Fig.75	Riego por cañón [26]. . . . .	61
Fig.76	Análisis textural del suelo. Autores. . . . .	69
Fig.77	Construcción de la caseta. Autores. . . . .	70
Fig.78	Instalación del circuito hidráulico. Autores. . . . .	71
Fig.79	Construcción del tablero de control. Autores. . . . .	72
Fig.80	Programa de identificación de la planta. Parte 1. Autores. . . . .	73
Fig.81	Programa de identificación de la planta. Parte 2. Autores. . . . .	74
Fig.82	Programa de identificación de la planta. Parte 3. Autores. . . . .	75
Fig.83	Programa del control de riego. Parte 1. Autores. . . . .	76
Fig.84	Programa del control de riego. Parte 2. Autores. . . . .	77
Fig.85	Programa del control de riego. Parte 3. Autores. . . . .	78
Fig.86	Desarrollo del cultivo de maíz. Autores. . . . .	79
Fig.87	Cosecha de choclo. Autores. . . . .	80

## Índice de Tablas

TABLA I	DISTRIBUCIÓN DE SEMILLAS [4]. . . . .	10
TABLA II	CAUDAL DEL CULTIVO. Autores. . . . .	29
TABLA III	CÁLCULOS DE LAS PÉRDIDAS EN LAS TUBERÍAS. Autores. . . . .	31
TABLA IV	MATERIALES DEL TABLERO. Autores. . . . .	36
TABLA V	ANÁLISIS DE UNIFORMIDAD. Autores. . . . .	56
TABLA VI	COMPARACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL POR HECTÁ- REA. Autores. . . . .	62
TABLA VII	COMPARACIÓN DE SOSTENIBILIDAD. Autores. . . . .	62
TABLA VIII	ANÁLISIS DEL VAN Y TIR. Autores. . . . .	63

## Introducción

El agua, un líquido vital, la tierra, es donde descansa. Dos elementos indispensables para que la agricultura sea posible, solo el 10 % de los cultivos del Ecuador han sido de alguna manera tecnificados, o poseen sistemas que aparenten serlo, como lo es el riego por inundación, que más que una solución a un problema, es un serio impacto al medio ambiente y a la sostenibilidad del uso de recursos limitados como lo es el agua [28].

El presente proyecto consiste en la implementación de un riego por goteo inteligente, aplicado a una plantación de maíz, para los residentes de la finca "San Benito", que está ubicada en la vía Mocache, una zona rural del cantón Vinces, Los Ríos. Los residentes de la finca hacen esfuerzos para producir sus tierras, sin tener éxito, causas de la sequía y malos manejos del agua, aparecen como los primeros causantes de que los cultivos no prosperen. El riego propuesto, suministrará agua al cultivo, controlando la humedad del suelo, el agua es bombeada a una presión monitoreada, para que se pueda regar una cantidad precisa, por un tiempo en específico. Se utiliza un PLC para llevar a cabo todas las tareas de control y monitoreo, al que a través de su pantalla integrada, se pueden ingresar los parámetros del riego, para que las rutinas de programación puedan calcular los tiempos de riego, presión de bombeo y porcentajes piso y techo de la humedad del suelo que se va a cultivar.

El trabajo realizado se compone de cuatro capítulos, el primero; detalla un estudio del problema que dieron motivación al proyecto, así como los tiempos, alcances, limitaciones y los objetivos a emprender. El segundo, sin pretender hondar en los temas de estudio, se presenta una información básica, pero lo suficientemente clara para sacar adelante el proyecto. El tercer capítulo, contiene la metodología empleada para desarrollar el proyecto, con sus respectivos diseños y planos propuestos, así como tablas de cálculos y criterios del uso de herramientas como Simulink y cómo se identificó la planta del sistema. El cuarto y último, muestra los resultados obtenidos del sistema implementado, tablas comparativas de sostenibilidad respecto a otros riegos comunes que se usan en la zona, y un análisis financiero utilizando los indicadores VAN y TIR, que determinarán la rentabilidad y viabilidad del riego propuesto.

## **Capítulo 1**

### **El Problema**

#### **1.1. Planteamiento del problema**

Los residentes de la Finca "San Benito", han intentado reactivar económicamente y producir sus tierras sin tener éxito, debido a los suelos extremadamente secos de la zona, por lo que requieren un sistema de riego para sus cultivos de maíz, que pueda mantener húmeda el área del cultivo sin utilizar grandes cantidades de agua ya que solo disponen de un (1) pozo, que suministra el líquido a las viviendas. Los riegos comunes de la zona se caracterizan por consumir grandes cantidades de recursos hídricos y de combustibles fósiles, además que demandan mucha mano de obra y los gastos de mantenimiento son altos. Se propone un proyecto que solucione la falta de humedad en el cultivo y disminuir considerablemente las cantidades de agua, considerando que su operación sea fácil para sus usuarios.

#### **1.2. Importancia y Alcance**

Este proyecto contribuye al ahorro energético y a prácticas sostenibles, en el manejo del agua como recurso vital y limitado. Dotará a la finca de un sistema moderno capaz de controlar la humedad del cultivo, utilizando la menor cantidad de agua posible, lo que se traduce directamente en un ahorro significativo de costos en el mantenimiento, así como la reducción de las horas de trabajo. La invención de este tipo de proyectos busca crear conciencia entre la comunidad científica, en hacer uso de sus conocimientos en pro de la economía integral del país.

#### **1.3. Delimitación**

##### **1.3.1. Temporal**

El proyecto se realizó durante el periodo académico 58 y 59 del año 2021.

### 1.3.2. Espacial

Se desarrolló para el uso y beneficio de los residentes de la finca "San Benito", que está ubicada en la vía Mocache, una zona rural del cantón Vines, Los Ríos. Como se puede apreciar en la **Fig. 1**.



**Fig. 1** Vista del área de la Finca.

### 1.3.3. Académica

El desarrollo del proyecto conlleva; poner en práctica los criterios técnicos adquiridos en instalaciones industriales, electrónica, electrónica de potencia, control automático, CAD y conceptos de programación como LOGO SoftComfort y MATLAB, así como de conciencia adquirida en disciplinas como ética y pensamiento social. El trabajo implica a la investigación de otras áreas del conocimiento técnico, como la hidráulica y la agronomía.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Desarrollar un sistema de control aplicado a un sistema de riego por goteo superficial para una plantación de maíz.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Dimensionar el sistema hidráulico de tuberías y mangas de riego del cultivo, para el área efectiva de plantación.
- Determinar los instrumentos adecuados a utilizarse para las mediciones de los tiempos óptimos de riego y las horas necesarias de bombeo de agua.
- Desarrollar el programa en el PLC integrando los instrumentos, actuadores y equipos complementarios para el control del proceso.
- Evaluar el sistema implementado para comparar la rentabilidad respecto a los otros métodos.

## Capítulo 2

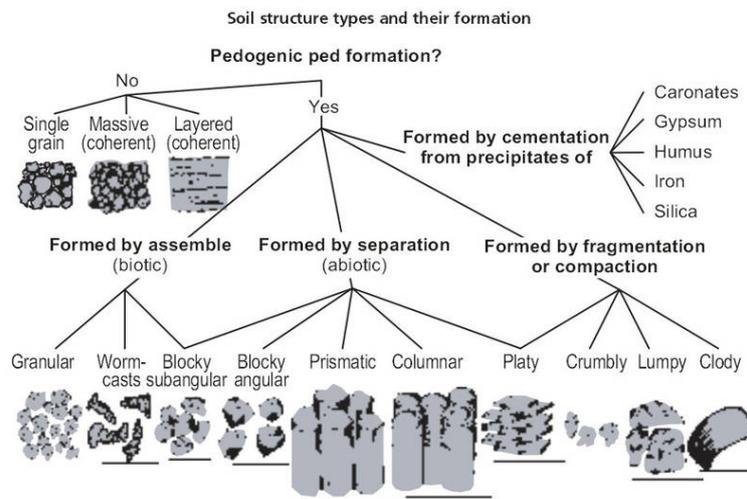
### Fundamentos Teóricos

#### 2.1. El Suelo

En la agricultura se entiende por suelo, como el medio para que las plantas puedan crecer naturalmente, una materia que de forma natural se compone de varias capas llamadas horizontes, las que son ricas en minerales, por lo que también se encuentra; materia orgánica, moléculas de aire y agua [1].

##### 2.1.1. Características del Suelo

El suelo se puede distinguir por su color, textura, estructura, propiedades físicas, químicas y biológicas. En la **Fig. 2** se pueden observar las características mencionadas.



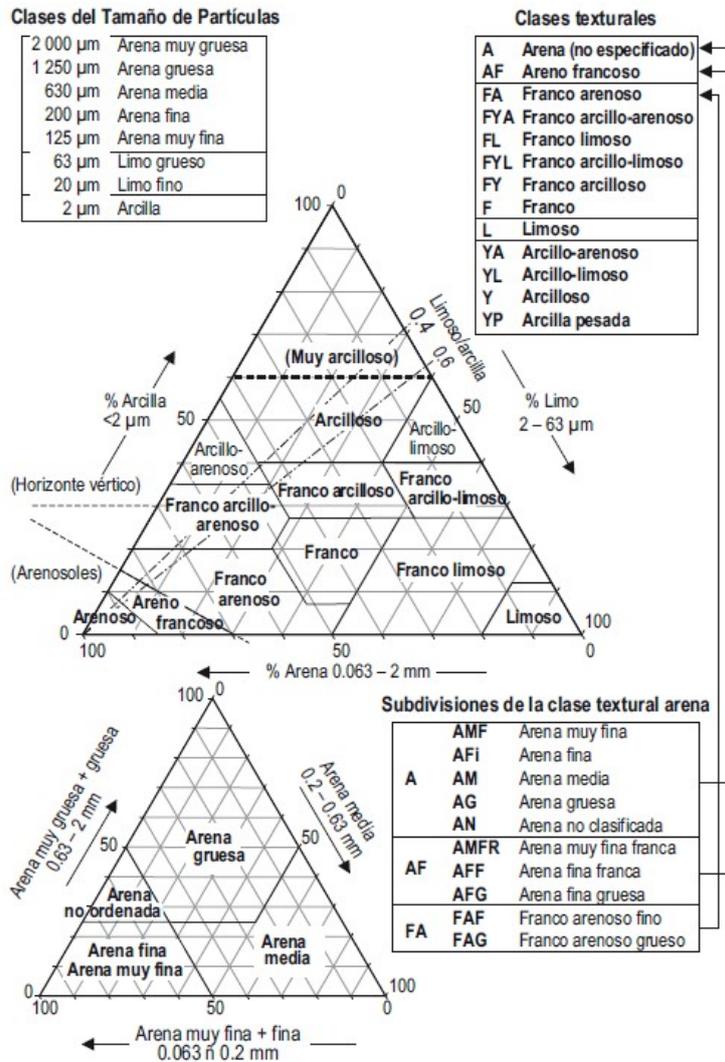
**Fig. 2** Características de los suelos [1].

##### 2.1.2. Tipos de Suelo

Desde la granulometría se puede discriminar los tipos o variedades de suelo que se tiene en un determinado terreno.

De acuerdo con la FAO [2] se ha concluido que, la proporción de arcilla, arena y limo que for-

ma un suelo, se logra identificar el tipo. Como lo muestra la **Fig. 3** todo se basa en estos tres componentes inorgánicos.

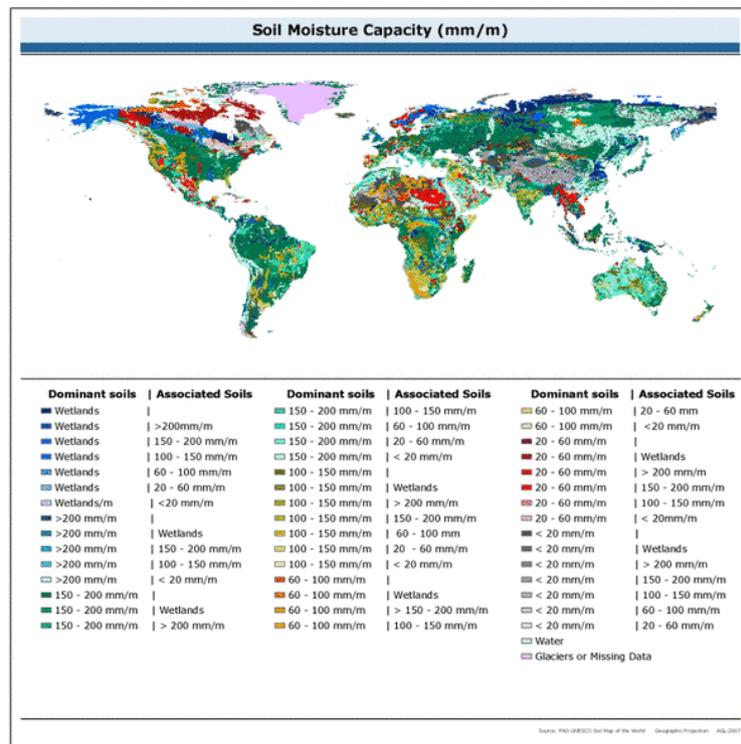


**Fig. 3** Triángulo guía para la descripción de suelos [2].

La porosidad del suelo definirá la resistencia del suelo, es decir, su capacidad de mantener su forma. La consistencia en suelos de alto grado de arcilla en ambientes secos, serán duros. La densidad juega un papel importante en la determinación de la porosidad por lo que en cuanto a tipos habrán dos: real y aparente. La real cambia de acuerdo a los componentes del suelo que por lo general se tiene 2,65. Mientras que por aparente si se tiene alto grado, disminuye gradualmente un ambiente saludable para el desarrollo de las planta [1, 2].

### 2.1.3. Disponibilidad Hídrica de los Suelos

El agua que se encuentra almacenada en el suelo, influye directamente en su estructura, por lo que se tiene que una moderada cantidad de humedad en el suelo podrá satisfacer sin problemas las necesidades hídricas de las plantas. Una de las unidades de medida que se utilizan para determinar la humedad en el suelo son los *mm*, la siguiente **Fig. 4** muestra los países que cuentan con los suelos mas húmedos, y los más secos [1, 2].



**Fig. 4** Capacidad de humedad en los suelos del mundo [2].

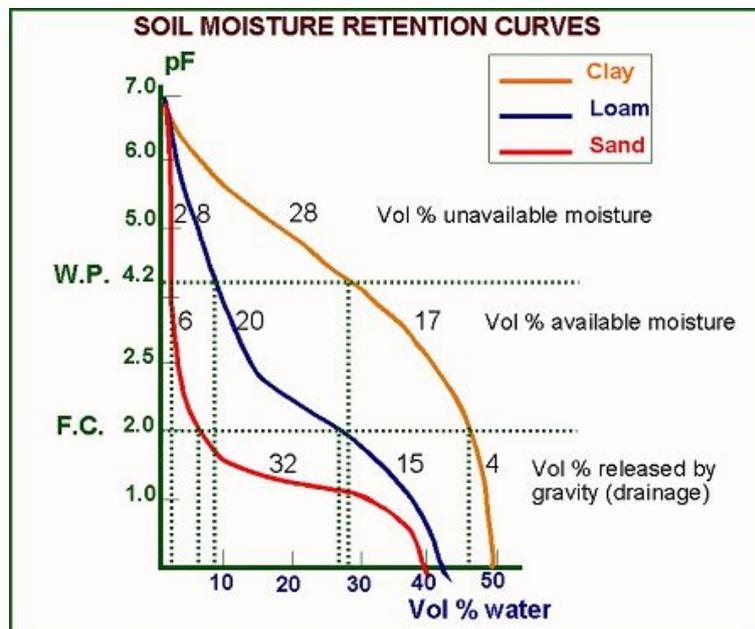
A continuación se denotan algunos conceptos necesarios para abordar el tema de agua en el suelo:

- Capacidad de Campo (CC).
- Punto de Marchitez Permanente (PMP).

Se conoce como Capacidad de Campo (CC), a una determinada cantidad de agua que puede almacenar el suelo una vez se haya regado o que por efecto de la lluvia logre alcanzar la saturación, es decir, se encharque. Si luego de unas 24 o 48 horas se ha estabilizado el nivel

de humedad del suelo, entonces se concluye que se encuentra en Capacidad de Campo. Se llama Punto de Marchitez Permanente (PMP), al grado más bajo de humedad que un suelo debe evitar tener. En ese punto las plantas pierden la capacidad de succionar el agua, pues se requiere unos 15 bares aproximadamente.

La **Fig. 5** muestra las curvas de retención de humedad de acuerdo al tipo de suelo, en la que también se podrá apreciar que hay una brecha entre el CC y PMP, lo que se conoce como la zona de Agua Disponible (AD) [1, 2].



**Fig. 5** Retención de humedad en el suelo [2].

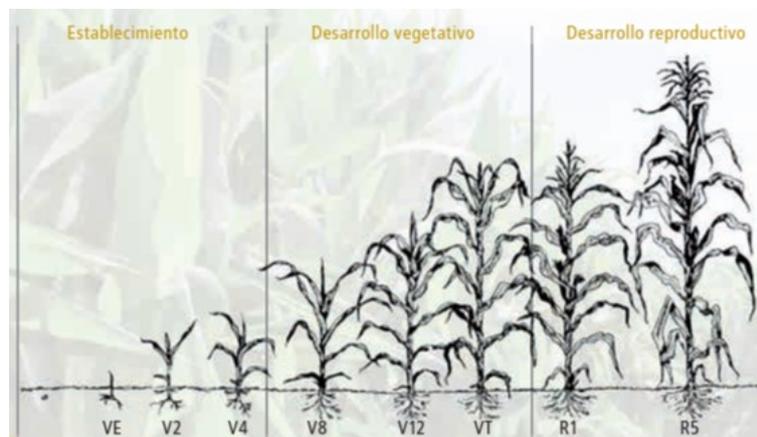
## 2.2. El Maíz

El maíz, *Zea mays*, es uno de los granos más antiguos que se tienen registro. Tiene una gran importancia económica, siendo hoy el tercer cultivo del mundo por su producción. Es aprovechado en múltiples y variados usos, ya que puede ser consumido como alimento en distintas etapas del desarrollo, temprano es maíz dulce, choclillo y luego al término como cereal produciendo harinas y demás alimentos balanceados, así también como combustible [3].

### 2.2.1. Necesidades Hídricas del Maíz

El maíz además de requerir suelos ricos en materia orgánica y biológicos, su capacidad para adaptarse en gran medida depende de la humedad del suelo. El maíz requiere entre 500 a 700 *mm* de agua, distribuida de manera tal que responda a las necesidades hídricas en las distintas etapas del crecimiento, promediando se tiene que el maíz necesitará 5 *mm* de agua al día. Sin embargo para las etapas de engrosamiento y maduración se debe disminuir la dosis aplicada [3, 4].

Las etapas fenológicas se pueden observar en la siguiente **Fig. 6**.



**Fig. 6** Etapas de crecimiento del maíz [3].

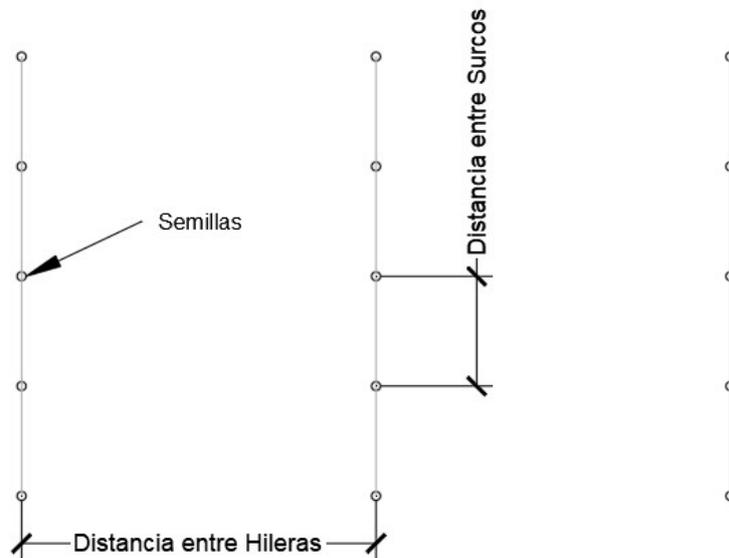
### 2.2.2. Densidad de siembra del Maíz

Las recomendaciones de siembra van de la mano con la temporada en que se desee sembrar y cuántas semillas por sitio se pretendan, es decir, se podrá sembrar una (1) semilla por surco o dos semillas por surco [5]. La **TABLA I** detalla las distancias que deben considerarse al momento de la siembra de las semillas de maíz en la época que se encuentre.

**TABLA I**  
DISTRIBUCIÓN DE SEMILLAS [4].

Clima	Distancia entre hileras [m]	Distancia entre surcos [m]
Invierno	0.80	0.18
Verano	0.80	0.20

En la siguiente **Fig. 7** detalla cómo debe ser empleada la tabla.



**Fig. 7** Guía de sembrado de semillas de maíz.  
Autores.

### 2.3. Sistemas Hidráulicos en la Agricultura

La tecnificación de la agricultura ha dado nuevos campos de estudio en áreas de la hidráulica, como temas principales: la optimización de los cauces de agua, explotación eficiente de las fuentes de agua, distribución de aguas, embalses de agua, entre otros. Hablar de hidráulica en la agricultura, es casi inevitable hablar de riego, pero esos temas se abarcarán más adelante [6, 7].

#### 2.3.1. Fuentes de Agua

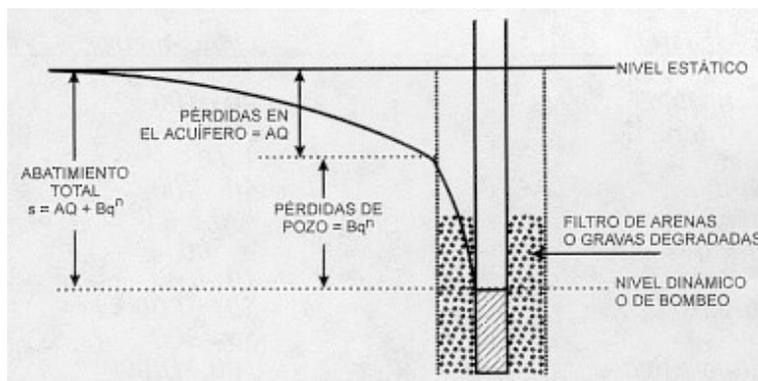
Las fuentes de agua identificadas en la agricultura son:

- Aguas lluvias.
- Aguas de los ríos.
- Aguas de lagunas o humedales.
- Aguas subterráneas o pozos de agua.

### 2.3.2. Capacidades de los Pozos de Agua

Los pozos de agua son una alternativa viable en lugares que frecuentemente no cuentan con las antes mencionadas fuentes de agua. Dentro de cualquier explotación de un pozo, implica un sistema de tuberías, y que cuyo diámetro está íntimamente ligado a la cantidad de agua que se requiera extraer. La capacidad de los pozos de agua, también conocidos como pozos de bombeo, se la estima en *GPM* o *Gal/min*, y en  $m^3/h$ , es decir, su eficacia en suplir una demanda.

Las capacidades típicas de los pozos de agua en fincas pequeñas de *5ha* van desde los 100 a 200*GPM*, mientras que para áreas de *30ha* fácilmente pueden ser de 700*GPM* o mayor. Otro factor que determina, cuanta capacidad de un pozo se requiere a la hora de construirlo, es el tipo de cultivo que se va a realizar [7, 8]. En la siguiente **Fig. 8** se puede observar la mecánica de un pozo.



**Fig. 8** Mecánica de un pozo [7].



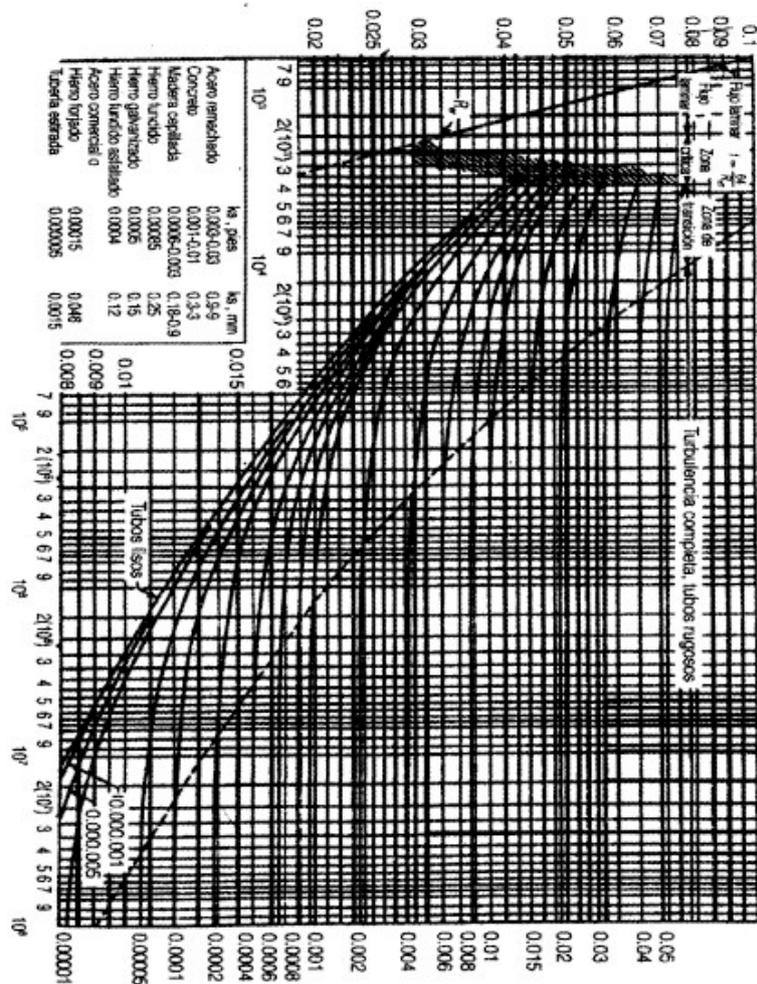


Fig. 10 Coeficientes de fricción [9].

## 2.4. Riego Agrícola

El riego agrícola es el agua que se requiere aplicar a una determinada zona, así condiciona un desarrollo correcto del cultivo. Se tiene además que, un riego compromete técnicas para una gestión del terreno cultivable [10].

### 2.4.1. Características del Riego Agrícola

Los riegos en la agricultura se distinguen por tener como principal y único objetivo, el de satisfacer las necesidades hídricas a un cultivo en específico durante periodos cortos y largos, esto es, cultivos de larga duración, permanentes y ciclos cortos; como el maíz [10, 11].

### 2.4.2. Riego por Goteo

El riego por goteo es aquel que provee agua a una zona preferencial de la planta, como es el área radicular. Se caracteriza por requerir una baja presión, ronda desde los 0.5 a 4.0 *Bar*, lo que hace que éste sistema pueda funcionar con bombas de baja presión [10, 11].

### 2.4.3. Componentes del Riego por Goteo

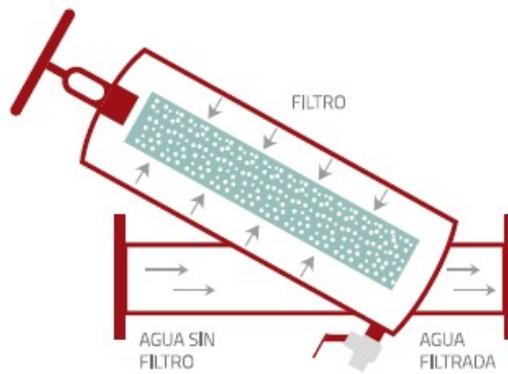
Un sistema de riego por goteo básicamente se compone de:

- Fuente de agua.
- Cabezal de bombeo.
- Tuberías primarias.
- Seccionadores o Válvulas.
- Tuberías secundarias.
- Cintas y laterales de riego con emisores.

Las fuentes para estos sistemas pueden ser, desde un río hasta un tanque de agua. El cabezal del bombeo esta compuesto por la válvula check, tubería de succión, bomba de agua, tubería de descarga, instrumentos de presión como el manómetro en la **Fig. 11**, válvula, filtro de arenas como muestra la **Fig. 12**.

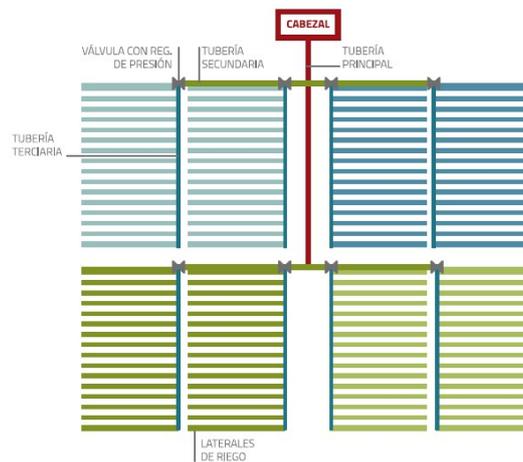


**Fig. 11** Manómetro [10].



**Fig. 12** Filtro de arenas [10].

Las tuberías primarias son las que se encargarán de hacer stock de agua antes que se distribuya a las tuberías secundarias, como se aprecia en la **Fig. 13**.



**Fig. 13** Esquema de un sistema de riego por goteo [10].

La tubería secundaria llevara los laterales que finalmente se unirán con las cintas de riego, en la **Fig. 14**.



**Fig. 14** Tubería secundaria [10].

Las cintas de riego son las que trasladaran el liquido hasta la zona de la raíz de la planta, a través de sus micro-goteros que de acuerdo a su diámetro, drenara una determinada cantidad de agua. En la **Fig. 15** se aprecia las cintas de riego en distintas capacidades de riego.

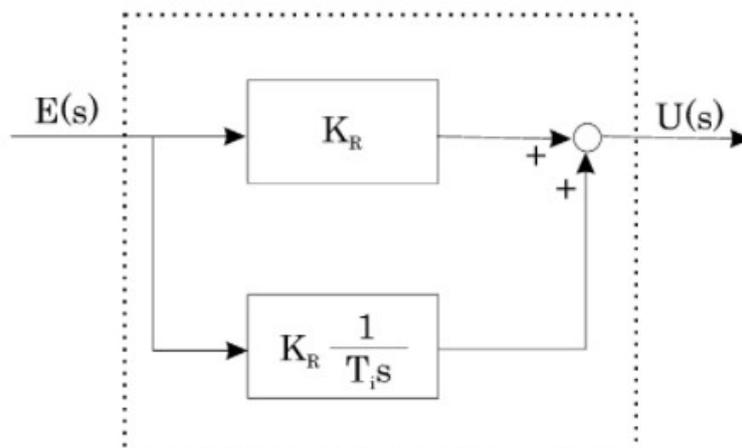


**Fig. 15** Cintas de goteo [10].

## 2.5. Control PI

Un controlador *PI* combina las acciones Proporcional *P* e Integral *I*. Es decir, el efecto proporcional logra una acción rápida pero no precisa, mientras que el lado integral consigue una precision moderada pero con costo de tiempo alto. Es así, que un controlador PI combina ambas acciones para un mismo regulador [12, 13]. El controlador PI es de la siguiente manera y el esquema como la **Fig. 16**.

$$G_s = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1)$$



**Fig. 16** Controlador PI [13].



Los PLCs se pueden programar con distintos tipos de lenguaje, estos son:

- Diagrama de escalera o Ladder.
- Estructura de texto.
- Bloque de funciones.
- Lista de instrucciones.
- Lenguaje ST.

### **2.6.2. Módulos de Expansión**

Algunas arquitecturas de PLCs permiten la opción de expandir sus entradas o salidas, sean estas digitales o analógicas. Los valores de tensión que estos módulos ofrecen o requieren son necesariamente la misma de alimentación del PLC de alimentación DC, esto es 24VDC. Las señales que los módulos de expansión son estandarizadas, es decir, 4 a 20mA o de 0 a 10V [14].

## **2.7. Convertidores de Frecuencia**

Es un equipo que modifica la frecuencia, en donde su principal aplicación es la velocidad de los motores de corriente alterna, si se observa la siguiente ecuación;  $N = \frac{60 \cdot f}{p} r.p.m.$ , donde  $N$  = velocidad de giro del motor,  $f$  = frecuencia,  $p$  = número de pares de polos y  $r.p.m.$  = revoluciones por minuto.

Se puede observar que modificar el número de polos del motor es inviable, mientras que la frecuencia es la opción ideal [15].

### **2.7.1. Características Generales de un Convertidor de Frecuencia**

Los convertidores de frecuencia permiten que el motor gire con más o menos velocidad, sin importar el nivel de frecuencia que tenga la red eléctrica que alimenta el convertidor. Cuentan con borneras en la que se pueden configurar distintos modos de control y también parametrizar los niveles de tensión, corriente, velocidad, rampas de arranque y frenado, frecuencia base y tope [15].

## 2.8. Electroválvula

Una electroválvula está conformada por dos partes, la electromagnética que es un solenoide con un núcleo móvil, y la mecánica o cuerpo de la válvula, que es la que contiene las cavidades [16]. Es operada eléctricamente y utilizada para permitir o impedir el flujo de un fluido que esté ingresando por los orificios de la válvula [17, 18].

### 2.8.1. Tipos de Electroválvulas

Dentro de las múltiples electroválvulas, una manera de identificarlas es agrupándolas de acuerdo a su aplicación, forma y construcción [18].

- Aplicación
  1. Acción directa.
  2. Operadas por piloto.
- Construcción
  1. Normalmente cerradas.
  2. Normalmente abiertas.
  3. Múltiple.
- Forma.
  1. Dos vías.
  2. Tres vías.
  3. Cuatro vías o reversibles.

En la **Fig. 18** se muestra una válvula de dos vías.



**Fig. 18** Electroválvula dos vías [18].

## 2.9. Sensor de Humedad

El sensor de humedad no solo detecta un estado de humedad, sino que precisa una cantidad. Generalmente estos sensores se componen de electrodos, oscilador o circuito excitador y un receptor de las señales. En la **Fig. 19** se puede apreciar un sensor de humedad en la aplicación. Los sensores de humedad miden la señal eléctrica a través de sus electrodos que son los que están posicionados en el suelo. Los datos que se recogen indican volumen de agua. Las senales de salida son valores típicos  $0-10V$  o  $0/4-20mA$ , la alimentacion va desde los  $12 - 44VDC$ . Los sensores generalmente son instalados en profundidades que van desde  $0$  a  $30cm$ , aunque esta decisión depende del tamaño de los electrodos y estos del tipo del cultivo  $\%Vol$  [19].



**Fig. 19** Sensor de humedad instalado en el suelo.  
Autores.

## 2.10. Sensor de Presión

Un sensor de presión es un transductor que convierte valores de presión a señales eléctricas, en rangos de voltaje o corriente. Las señales típicas son  $0-10V$  y  $0/4-20mA$ . La alimentación de los sensores de presión van desde los  $12-44VDC$  [7, 20]. Se tiene varios tipos de sensores, de acuerdo a los valores que se desean medir, estos son:

- Presión absoluta.
- Presión relativa.
- Presión diferencial.

### 2.10.1. Sensor de Presión absoluta

Son aquellos que miden la presión teniendo como referencia el vacío [20]. La siguiente **Fig. 20** muestra un sensor de presión absoluta.



**Fig. 20** Sensor de presión absoluta, montado en un collarín.  
Autores.

## 2.11. Bomba Eléctrica

Ciertamente la bomba eléctrica se compone de una parte mecánica, propiamente llamada bomba o turbina, y la parte eléctrica, que básicamente es un motor con un arreglo en los ejes para hacer girar una turbina. Las bombas están pensadas para impulsar fluidos en gran cantidad y a una gran fuerza, es decir llevar los fluidos a grandes distancias [21]. La siguiente **Fig. 21** muestra una bomba eléctrica.

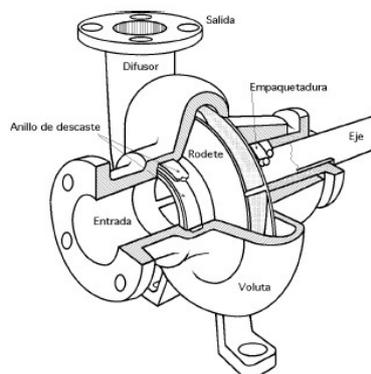


**Fig. 21** Bomba eléctrica.  
Autores.

### 2.11.1. Bomba Centrífuga

Las bombas centrífugas también conocidas como bombas radiales, la estructura de las bombas centrífugas son muy similares a las de turbinas hidráulicas; en las turbinas aprovechan altura para generar velocidad de rotación [21, 22].

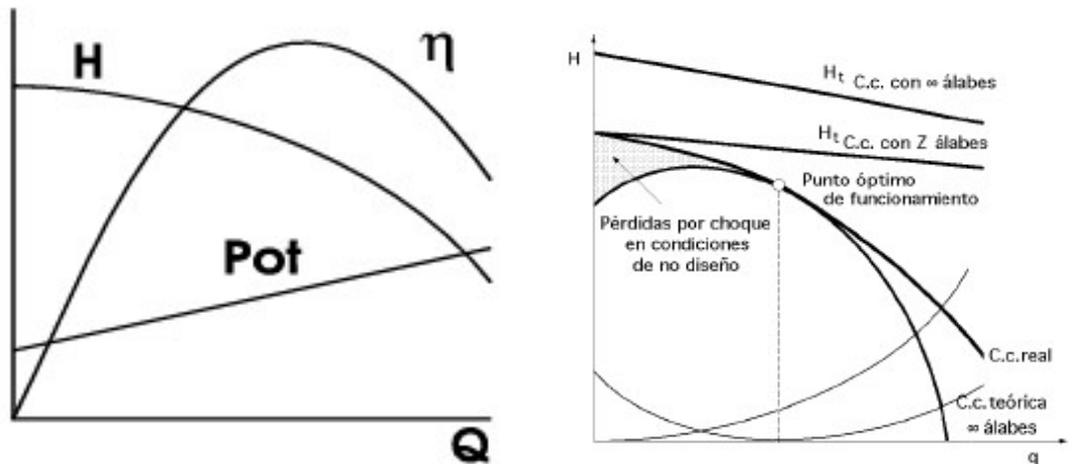
En la **Fig. 22** se puede apreciar las partes de una bomba centrífuga.



**Fig. 22** Partes de una bomba centrífuga [21].

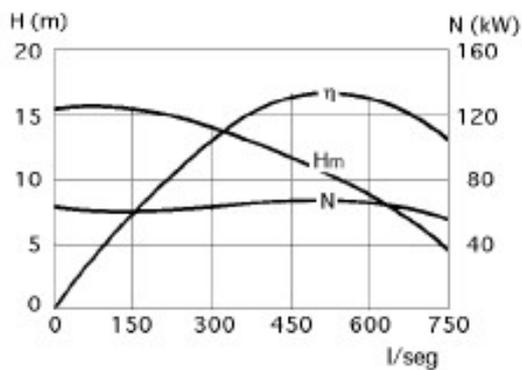
### 2.11.2. Curvas Características de las Bombas

Las curvas de rendimiento de las bombas, sirven para seleccionar el punto de operación en las que estas pueden trabajar, la siguiente **Fig. 23** muestra algunas curvas características de bombas centrífugas.

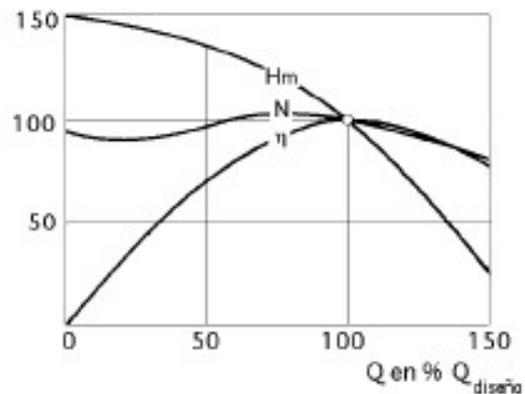


(a) Esquema básico.

(b) Punto de operación.



(c) Curvas típicas de una bomba.



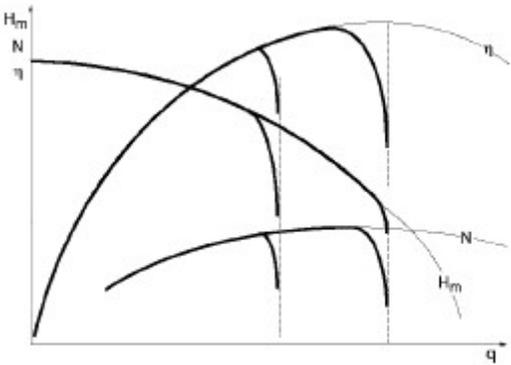
(d) Curvas típicas de una bomba.

**Fig. 23** Curvas características de una bomba centrífuga [22].

### 2.11.3. Cavitación

Se refiere cuando un fluido se desplaza por una región donde la presión se reduce a su presión de vapor, es decir, el líquido ebulle y se forman burbujas de vapor. Las burbujas se mueven hasta llegar a la zona de alta presión y es allí donde colapsan con las paredes de la turbina. Este fenómeno está acompañado por ruidos y vibraciones, provocando el deterioro de

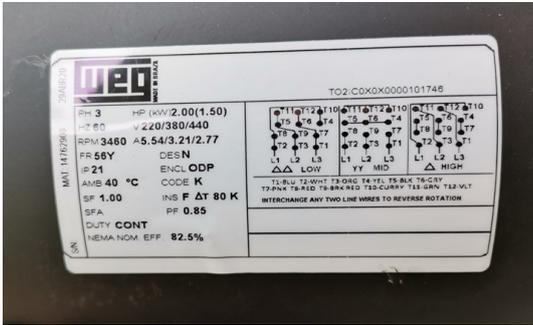
las aspas de la turbina [23]. En la siguiente **Fig. 24** se puede apreciar las curvas de cavitación en las bombas.



**Fig. 24** Curvas de cavitación de una bomba trifásica [22].

**2.11.4. Características Eléctricas de las Bombas**

Las bombas eléctricas funcionan con sistemas monofásicos y trifásicos. Las potencias de las bombas se las puede encontrar en *KW* y también en *HP*. Para las bombas monofásicas generalmente son utilizadas en aplicaciones que requieren menor potencia, la alimentación eléctrica va de 120 a 240V, sus sistemas de arranque están conformados por capacitores de mantenimiento y arranque. Los niveles típicos de tensión en las bombas trifásicas van acorde a los arreglos de las bobinas, es decir, conexión estrella o conexión delta, en la **Fig. 25** se puede apreciar una placa de una bomba eléctrica trifásica.

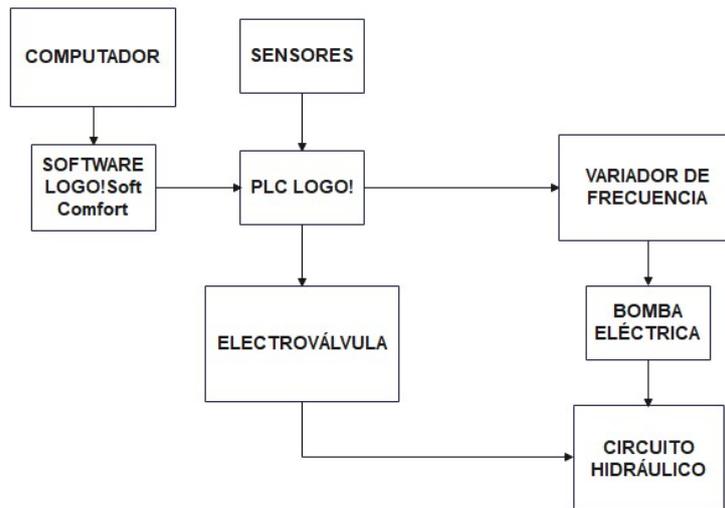


**Fig. 25** Placa técnica de una bomba trifásica. Autores.

## Capítulo 3

### Marco Metodológico

Para contextualizar cómo se llevó la tarea del desarrollo del proyecto, a continuación en la **Fig. 26** presentamos un diagrama que resume las etapas que lo componen.



**Fig. 26** Esquema del Proyecto.  
Autores.

### 3.1. Descripción del Sistema

El proyecto se compone de dos partes, el sistema de control y el circuito hidráulico. Para el sistema de control control se cuenta con un PLC, sensor de presión, sensor de humedad, sensor de nivel, dispositivos de maniobra, protecciones, variador de frecuencia y bomba eléctrica. El PLC con la ayuda de los bloques de programación de operaciones matemáticas se ingresan los datos característicos del suelo para determinar el tiempo que va a regar el cultivo, o sea el tiempo en que estará encendida la bomba. Se tiene un bloque controlador PI (proporcional, integral), que permite la conexión del sensor de presión y así cierra el lazo de control para lograr mantener la presión deseada de la bomba, cuyo dato, también es ingresado al PLC. El arranque de la bomba esta dado por el variador de frecuencia, que de acuerdo con la presión

que se tenga, este fijara una frecuencia de trabajo a la bomba.

El circuito hidráulico empieza desde el cabezal de riego conformado por manómetro, filtro de arenas y válvulas de aire, en su bajante tiene la electroválvula controlada por el PLC que permite o no, el paso del agua a las tuberías primarias, secundarias y laterales o cintas de riego, que tienen los goteros para llevar el agua necesaria a la zona radicular de las plantas. El sistema para su manejo dispone de selectores y pulsadores, y para visualizar encendidos se tiene luces piloto. El selector de modo: manual y automático; el operador en modo manual, podrá controlar por medio de pulsadores marcha y el paro de la bomba, el control PI funciona tanto para modo manual como automático, por la sencilla razón que la presión responde a las especificaciones de las cintas de riego instaladas en el circuito hidráulico. El modo automático, que es el modo principal del riego, permite al operador ejecutar otras tareas mientras el sistema riega automáticamente las veces y la cantidad necesaria de agua, de acuerdo a las condiciones de la humedad del suelo y horas habilitadas de funcionamiento.

### 3.2. Estudio del Suelo

Una vez seleccionada el área en donde se iba a implementar el proyecto **Fig. 27**, se inicio con la excavación de algunos agujeros en el área de interés para lograr obtener varias muestras del suelo como lo muestra en la **Fig. 28** y tener información de las características del suelo.



**Fig. 27** Área seleccionada.  
Autores.



(a) Muestra 1.



(b) Muestra 2.



(c) Muestra 3.



(d) Muestra 4.

**Fig. 28** Excavaciones para muestras de suelo.  
Autores.

Los ensayos del laboratorio determinaron que el tipo de suelo es Franco Arcilloso, lo que verificando la tabla de texturas de suelo se tiene con una Capacidad de campo de 28.27 % y de 15.92 % para el Punto de Marchites Permanente.

### 3.3. Preparación del Área del Terreno

Para adecuar el área que se eligió para el proyecto y esté en condiciones para el cultivo se empleo uso de maquinaria para arar (ver **Fig. 29**) el terreno ya que inicialmente se encontró un suelo duro.



**Fig. 29** Arado de terreno.  
Autores.

### **3.4. Diseño del Sistema Hidráulico**

Para el diseño hidráulico una vez revisado los fundamentos teóricos, analizamos los criterios de diseño a usar, entre uno de los principales fue el de dibujar en el ambiente CAD para desde allí tomar las decisiones.

#### **3.4.1. Medición del Área**

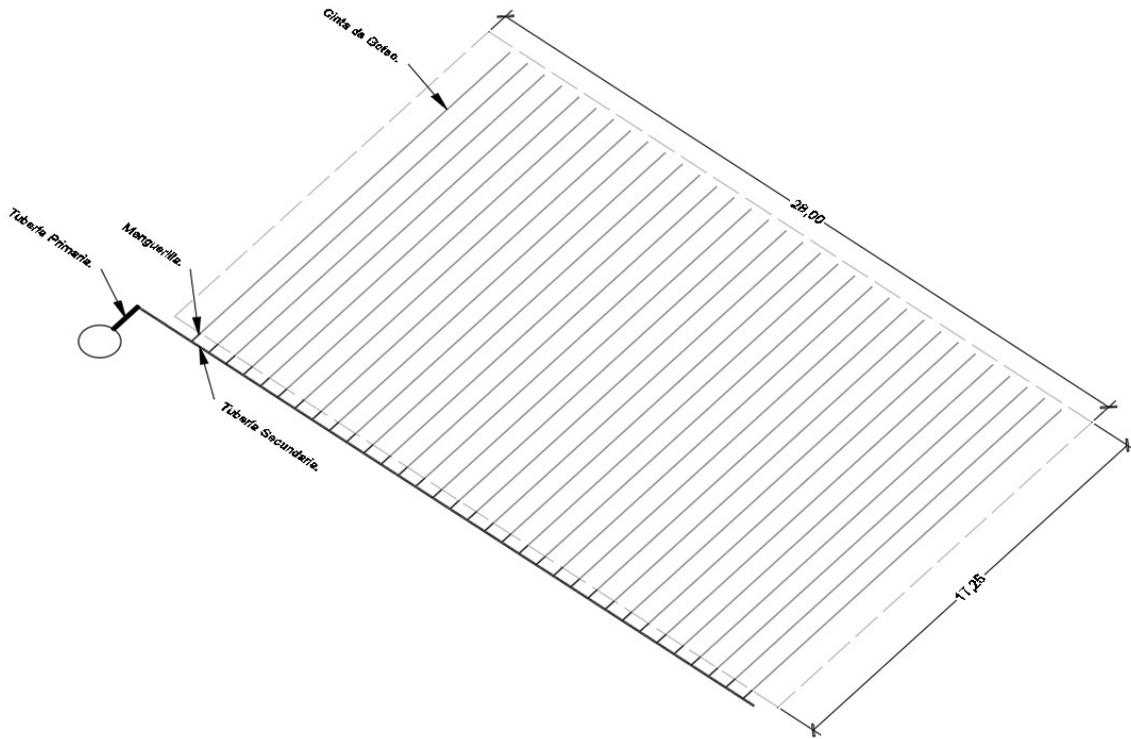
Para las tareas de diseño hidráulico se procedió a tomar las medidas de la zona de interés, teniendo 26 metros de largo y 17 metros de ancho para luego llevarlas al entorno CAD.

#### **3.4.2. Selección y Distribución de Laterales de Riego**

Retomando los criterios obtenidos en el Capítulo 2, sobre guía de sembrado de hidráulica en la agricultura, primero diseñamos el layout del circuito hidráulico **Fig. 30**, para poder tener un mejor procedimiento de cálculo. La cantidad de cintas de riego sale de una división simple:

$$C_g = \frac{a}{b} + 1. \quad (2)$$

donde  $C_g$ ,  $a$  y  $b$  representan el número de cintas de goteo, el ancho del área del terreno y distancia entre hileras del cultivo, respectivamente.



**Fig. 30** Diseño de riego.  
Autores.

Se inició observando la presión que requiere el gotero más lejano de la bomba, es decir, el que más trabajo debe hacer para entregar el agua a la zona radicular de la planta. Al tener el valor de la presión del gotero más lejano, se procedió a realizar la **TABLA II** para calcular el caudal que se tendría con cada una de las cintas y así poder seleccionarla.

**TABLA II**  
CAUDAL DEL CULTIVO.  
Autores.

Caudal del Gotero [L/h]	Número de Goteros	Número de Cintas	Caudal [L/h]
3	86	33	8514
2	86	33	5676

Se transformaron las unidades de  $L/h$  a  $Gal/min$ , con la siguiente operación:

$$GPM = \frac{L}{h} \times \frac{1h}{60min} \times \frac{Gal}{3,75L} \quad (3)$$

con esto, las cantidades serán expresadas en unidades que manejan los sistemas de bom-

beo. Siendo la demanda de agua del sistema  $37.54\text{GPM}$ . La cinta de goteo seleccionada en la **Fig. 31** es de  $3\text{L}/\text{h}$ , con  $20\text{cm}$  de distancia entre goteros, de  $16\text{mm}$  de diámetro y cuya presión de operación es de  $10\text{mca}$ .



**Fig. 31** Cinta de goteo  $3\text{L}/\text{h}$ .  
Autores.

### 3.4.3. Dimensionamiento de Tuberías

Se utilizó la ecuación de pérdida por fricción:

$$hf = K \cdot \frac{Q^m}{D^n} \cdot L \quad (4)$$

donde,  $hf$  es la pérdida por fricción,  $K$  una constante,  $Q$  caudal que circula,  $D$  es el diámetro,  $L$  longitud,  $m$  y  $n$  son constantes respectivamente. Como punto de partida en la dimension de las tuberías propusimos como tubería primaria de  $63\text{mm}$  de diámetro y secundaria de  $50\text{mm}$  de diámetro. En la siguiente **TABLA III** podemos observar los resultados que se tienen para las tuberías:

**TABLA III**  
**CÁLCULOS DE LAS PÉRDIDAS EN LAS TUBERÍAS.**  
 Autores.

	<b>Tubería Primaria [PVC]</b>	<b>Tubería Secundaria [PVC]</b>	<b>Cinta de Goteo [PE]</b>
K	0.000833782	0.000833782	0.00065879
F	1	0.38	0.369
L	5	26	17.00
D	0.063	0.0508	0.016
m	5.333333333	5.333333333	5.333333333
Q	0.0025025	0.0025025	7.583333E-05
n	0.009	0.009	0.008
hf	0.066113105	0.411734847	0.089943462

Una vez que obtuvimos las pérdidas en cada sección de tuberías, lo que prosiguió fue sumar el resto de las perdidas, como la presión de operación de la cinta  $hf$  de  $10mca$  y las alturas del terreno  $hf$  de  $2.85mca$ , luego transformar las unidades de las pérdidas totales de  $hf$  que se expresa en  $mca$  y llevarlas a  $PSI$  una unidad que es más utilizada en las bombas.

$$hfT = hfPrimaria + hfSecundaria + hfCinta + 10mca + 2,85mca \quad (5)$$

$$hfT = 13,42mca \times 1,422 = 20,79PSI \quad (6)$$

#### **3.4.4. Implementación de los Laterales de Riego**

La tubería secundaria seleccionada de  $50mm$  a través de las manguerillas (ver la **Fig. 32**), se conectan las cintas de goteo, como se muestra en la **Fig. 33**.



**Fig. 32** Manguerilla de laterales.  
Autores.

Las manguerillas tienen  $16\text{mm}$  de diámetro y son las que estarán enterradas junto a la tubería secundaria, para el diseño se usó  $50\text{cm}$  de longitud y es la distancia entre el tubo secundario y la cinta de goteo.



**Fig. 33** Laterales de riego.  
Autores.

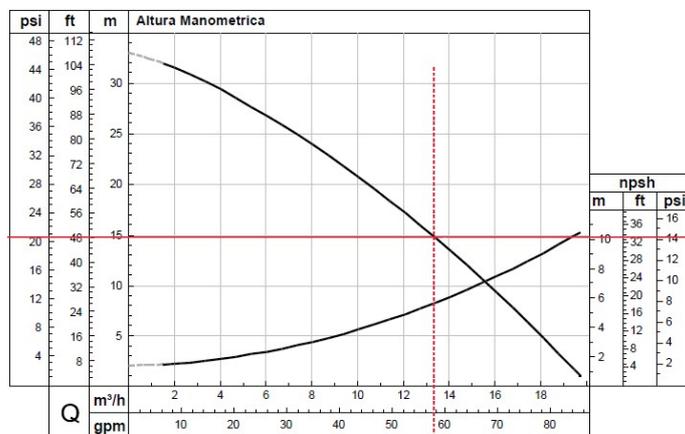
### 3.5. Selección de la Bomba

Con el caudal necesario del cultivo (ver **TABLA II**) y presión requerida del circuito (ver ecuación **6**), así como los niveles de tensión eléctrica de la finca. La bomba eléctrica utilizada es la FSG-S 2,0cv/1/142mm/3500rpm que se muestra en la **Fig. 34**. La bomba es trifásica y gira a 3500RPM con diámetros de 1 1/2" para succión y descarga, la hace ideal para bombear grandes caudales. La potencia eléctrica es de 2hp.



**Fig. 34** Bomba eléctrica.  
Autores.

En la siguiente **Fig. 35** se muestra el punto de operación de la bomba utilizando la hoja de curvas características de la bomba.



**Fig. 35** Punto de operación de la bomba.  
Autores.

### 3.6. Implementación del Cabezal de Riego

Se utilizó como tubería principal un tubo de 63mm por su baja pérdida de presión según los cálculos obtenidos, esta tubería es la que saldrá de la descarga de la bomba y tendrá a lo largo de su sección, instalado instrumentos y dispositivos principalmente de sensado de presión y filtrado de arenas para asegurar que los goteros de las cintas de riego, no pierdan su capacidad de riego, como también una válvula manual. En la siguiente **Fig. 36** se muestra la ubicación de cada uno de estos componentes. La válvula manual a mas de abrir o cerrar el paso del agua, permite hacer mantenimientos al filtro de arena.



(a) Manómetro.



(b) Filtro de arena.

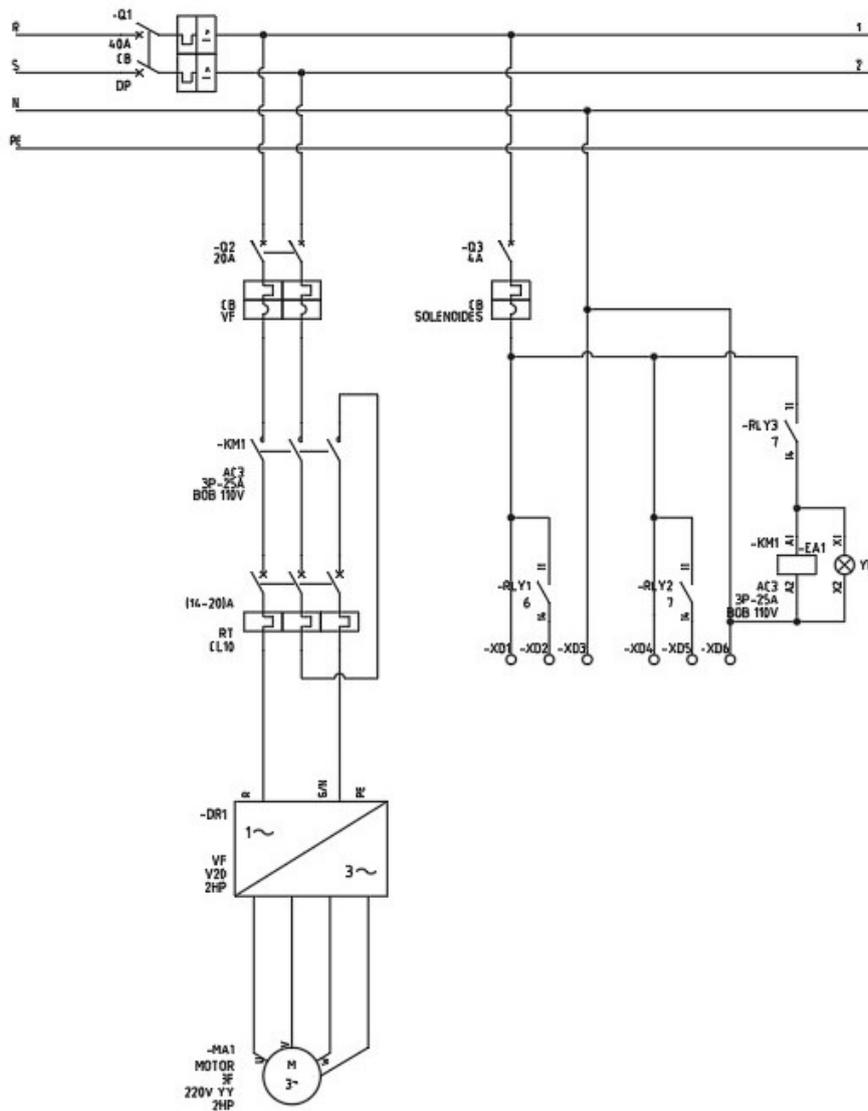


(c) Árbol.

**Fig. 36** Cabezal de riego.  
Autores.

### 3.7. Diseño y Construcción del Tablero de Control de la Bomba

Para el diseño del tablero de control, se empezó con el diagrama esquemático y una vez se conozcan las conexiones entre los componentes, se procedió a la realización del tablero, donde se organizaron los dispositivos eléctricos y electrónicos que lo componen. A continuación en la siguiente **Fig. 37** se aprecia el diagrama de fuerza del tablero dibujado en CAD.



**Fig. 37** Diagrama esquemático de fuerza del tablero.  
Autores.

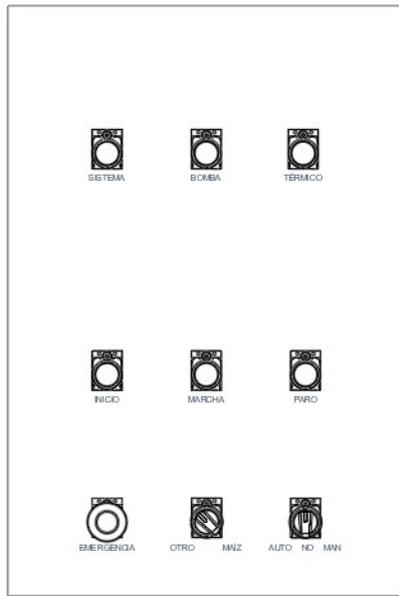
### 3.7.1. Componentes del Tablero de Control

Para el tablero de control se realizó una lista ordenada, de los materiales que se utilizaron, tanto dispositivos eléctricos y electrónicos como los accesorios de sujeción del cableado, se muestra en la **TABLA IV**.

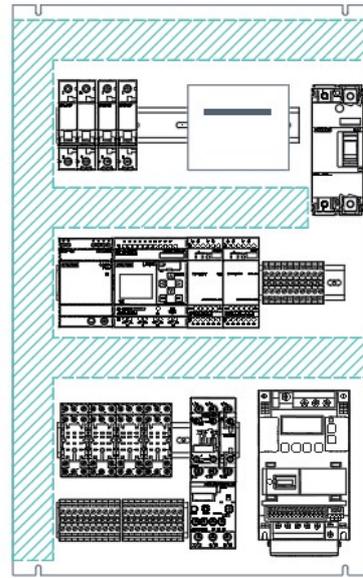
**TABLA IV**  
MATERIALES DEL TABLERO.  
Autores.

Materiales #1	Materiales #2
Tablero pesado 60x40x20 cm	Bornera tope 8wa1011-1dg11 22-12 AWG
Riel din	Bornera 8wa1011-1dg11 22-12 AWG
Canaleta ranurada 40x40 mm	Bornera 8wa1011-1pf00 22-12 AWG
Cinta espiral 3/8"	Relay 24VDC lzx:pt370024 + base 11 pines
Amarra plástica 25 cm	Pulsador tipo hongo 1NC
Base adhesiva	Pulsador rojo 1NC
Terminal pin #22-18 AWG	Pulsador verde 1NO
Terminal u #22-18 AWG	Luz piloto roja 220V
Terminal u #12-10 AWG	Luz piloto verde 220V
Repartidor de carga 4P-120A	Luz piloto amarilla 220V
Breaker cm 2P-40A	Contactador 3P-25A S0 BOB120V
Breaker 5sl4 1P-2A	Relé térmico 3P-(20-25)A S0 CL10
Breaker 5sl4 1P-4A	VF 1F- 110/220V - 3F 220V 2hp
Breaker 5sl4 2P-20A	Cable #10 AWG THHN BK
PLC LOGO! 8 12/24RC	Cable #12 AWGTHHN WH
Fuente de poder LOGO!	Cable #14 AWG THHN GN
Módulo LOGO! AM2	Cable #18 AWG TFF BK
Módulo LOGO! AM2 AQ	Cable #18 AWG TFF WH

A continuación en la **Fig. 38** se muestra el layout del tablero de control tanto frontal como interno.



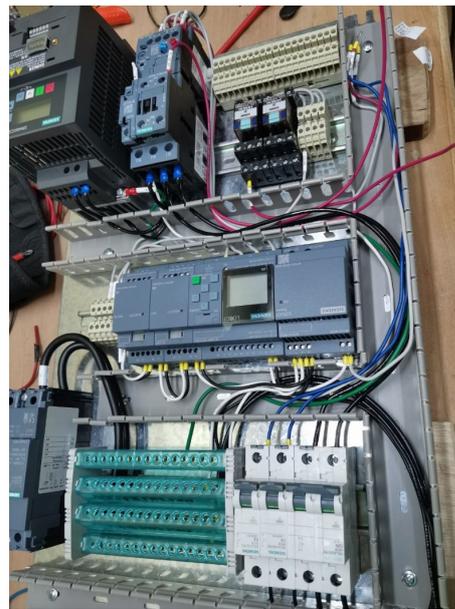
(a) Vista exterior.



(b) Vista interior.



(c) Etiquetado de leyendas.



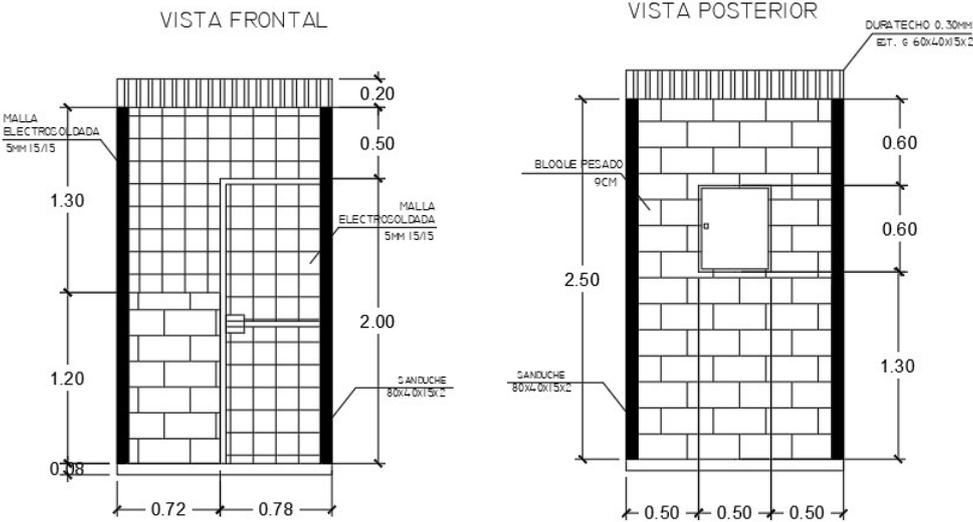
(d) Cableado de componentes del tablero.

**Fig. 38** Organización de componentes del tablero.  
Autores.

### 3.7.2. Caseta del Tablero de Control

Se construyó la caseta para el tablero de control, en la **Fig. 39** se puede observar los planos. La caseta podrá albergar no solo el tablero de control sino también otros tableros y cajas, como es la del Panel de Distribución Principal, que va a alimentar al tablero de control de la

bomba del cultivo, como el circuito interno de iluminación y toma-corriente de la caseta para que el operador pueda conectar una computadora al momento de descargar datos del PLC, además la pared frente al tablero guarda un espacio para que en el futuro se puedan instalar otros paneles de control.



(a) Corte A.

(b) Corte B.



(c) Espacio para tablero de control.



(d) Tablero instalado.

**Fig. 39** Caseta de tablero de control.  
Autores.

### 3.8. Selección del Dispositivo Programador Lógico Programable

Se utilizó el PLC LOGO! 8 12/24RC, por la facilidad que tiene en adaptarse a su programación y su fácil conexión de dispositivos tanto salidas como entradas. El bloque de registro de datos que tiene hace posible la tarea de tomar lecturas de la humedad por tiempos extendidos para entender los comportamientos del suelo. En la **Fig. 40** se muestra el PLC en la aplicación.



**Fig. 40** PLC LOGO!8 [24].

#### 3.8.1. Fuente AC/DC

La fuente LOGO! Power 24 V, 2.5 A (ver **Fig. 41**) fue la seleccionada debido a que pertenece a misma marca y por suplir los requerimientos de energía, es compatible con el resto de módulos y con las bobinas de los relays de control.



**Fig. 41** Fuente de poder [24].

### 3.8.2. Módulo de Entradas Analógicas

Para las entradas analógicas utilizamos el módulo de expansión LOGO! AM2, que cuenta con dos entradas analógicas de 0-10V o si se prefiere 0/4-20mA. En la programación deben ser configuradas como entradas A3 y A4. En la siguiente **Fig. 42** se puede apreciar cómo luce el dispositivo.



**Fig. 42** Módulo de entradas analógicas [24].

### 3.8.3. Módulo de Salidas Analógicas

Se utilizó el módulo de salidas análogas LOGO! AM2 AQ que cuenta con niveles de voltaje y corriente y fácil polarización 0-10V y de 0/4-20mA, y no es necesario el uso de resistencia, debido a que el modulo tiene en sus borneras las opciones para voltaje y corriente, como se muestra en la **Fig. 43**.



**Fig. 43** Módulo de salidas analógicas [24].

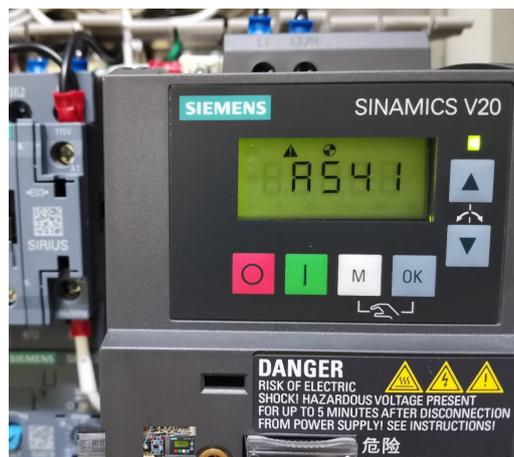
### 3.9. Selección del Variador de Frecuencia

Para tener una mejor compatibilidad entre los equipos optamos por usar el variador de frecuencia V20 SINAMICS de 2hp de alimentación monofásica y salida trifásica. La bomba eléctrica en la placa técnica como podemos ver en la **Fig. 44** los datos de potencia coinciden con la del variador.



**Fig. 44** Placa de la bomba eléctrica. Autores.

El resto de información de placa, la ingresamos a los parámetros del variador, como podemos apreciar en la **Fig. 45**. El variador cuenta con un panel en donde se puede navegar por un menú, se pueden seleccionar varias configuración de preestablecidas de procesos, están vienen de fabrica para

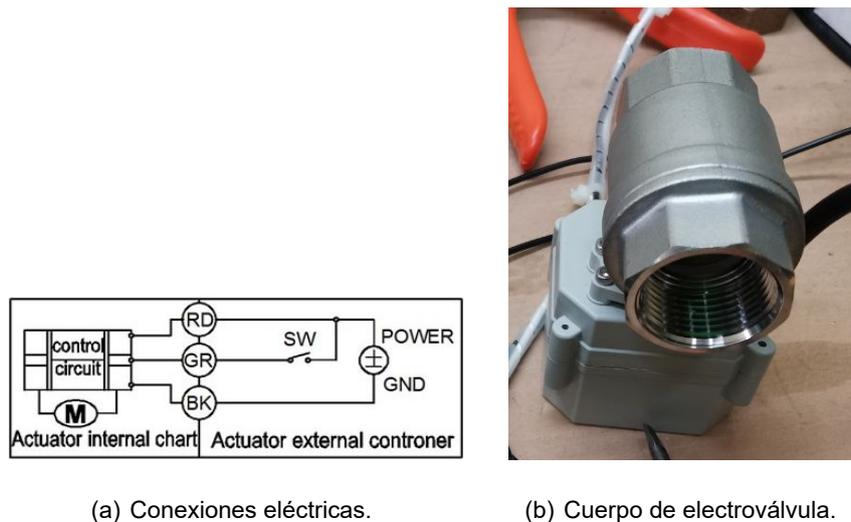


**Fig. 45** Ingreso de datos de placa al variador. Autores.

### 3.10. Selección de Instrumentos y Actuadores

#### 3.10.1. Electroválvula

La electroválvula seleccionada es el modelo genérico CR-03 (ver **Fig. 46**). Trabaja a presiones de hasta  $1\text{Mpa}$  y el tiempo de apertura es de  $6\text{s}$ .



**Fig. 46** Electroválvula.  
Autores.

#### 3.10.2. Sensor de Presión

El sensor que utilizamos es el SITRANS 7MF1564 (ver **Fig. 47**) el rango de operación es de  $0$  a  $100\text{PSI}$  lo que da una ventaja al momento de escalarlo a los bloques del LOGO! 8, es rápido y de cuerpo acorazado. Su alimentación es de  $10\text{-}36\text{VDC}$  y salida de  $4\text{-}20\text{mA}$ .



**Fig. 47** Sensor de presión [24].

### 3.10.3. Sensor de Humedad

Seleccionamos el sensor de humedad Fdit Soil Moisture, Modelo: JXBS-3001-TR cuenta con electrodos de acero inoxidable, es resistente a los ambientes hostiles con grado de protección IP68, registra humedad volumétrica es decir de 0-100 %. Su alimentación es de 12-24VDC. Tiene un error de 3 % si la lectura esta entre 0-53 %. Se puede observar en la siguiente **Fig. 48**.



**Fig. 48** Sensor de humedad.  
Autores.

### 3.10.4. Sensor de Nivel

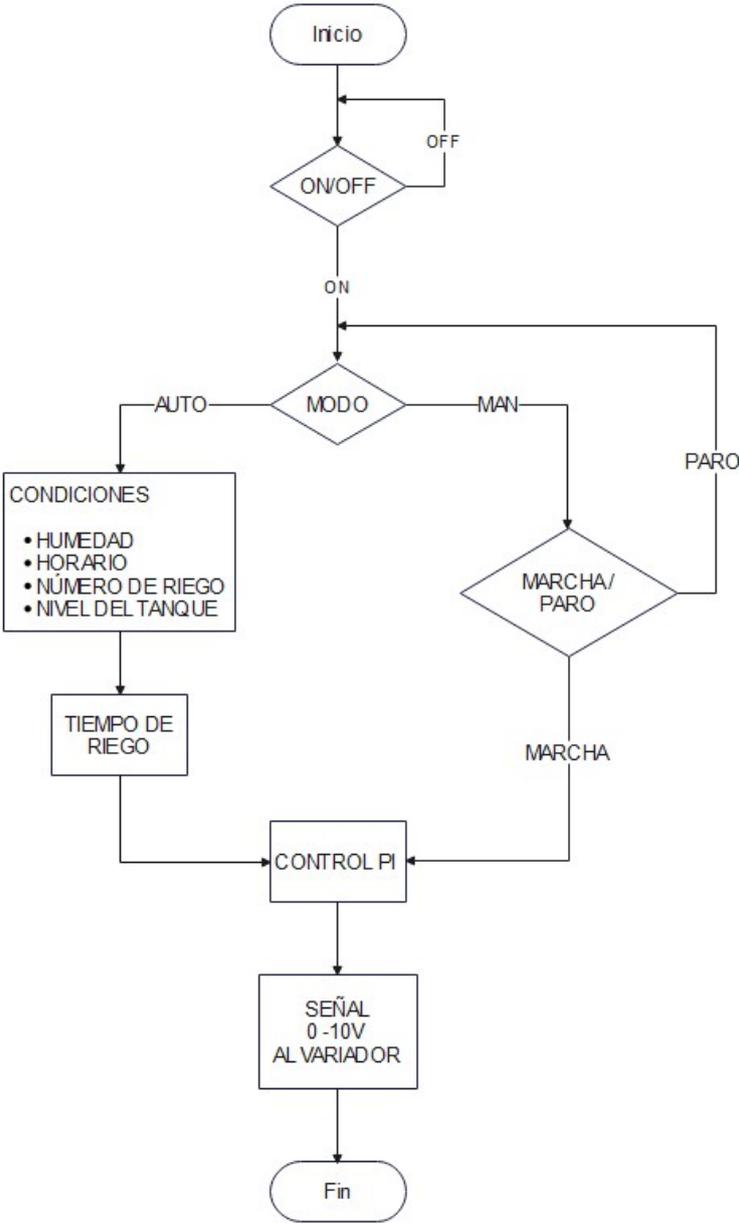
Para evitar que la bomba succione aire, se utilizó un sensor de nivel flotador modelo PAOLO (ver **Fig. 49**) tiene un (1) contacto NO y un (1) contacto NC, lo que permite utilizar directamente la señal al momento de que el contacto se cierre.



**Fig. 49** Sensor de Nivel [25].

**3.11. Desarrollo del Programa del Sistema**

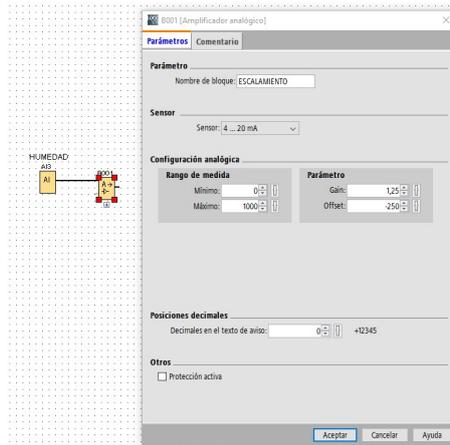
Desarrollamos el programa pensando en que el usuario, que operará el sistema de riego, es un agricultor, es decir, alguien que frecuentemente no tiene conocimientos formales de control automático, ni de electricidad, pero que sí entiende de selección entre un modo manual y un modo automático e identificar las luces piloto del tablero. En la siguiente **Fig. 50** se puede observar el esquema del programa.



**Fig. 50** Esquema del Programa. Autores.

### 3.11.1. Escalamiento del Sensor de Humedad

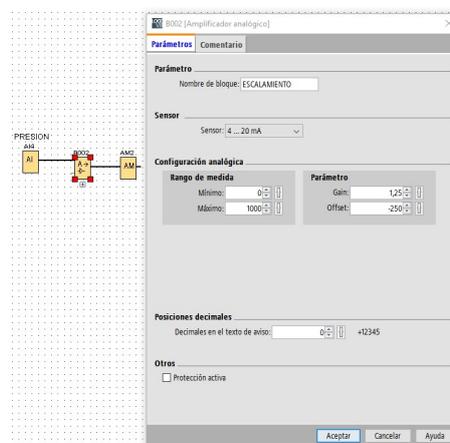
Los valores del sensor de humedad, están dados de 0 a 100 % y son magnitudes de volumen de agua que hay en esa parte del suelo, para escalar esos valores sabiendo que es una señal de 4 a 20 mA en el PLC LOGO! utilizamos el bloque Amplificador Analógico y seleccionamos el tipo de sensor, como muestra la **Fig. 51**.



**Fig. 51** Escalamiento de Humedad. Autores.

### 3.11.2. Escalamiento del Sensor de Presión

Para el sensor de presión se utilizó el mismo bloque Amplificador Analógico y la lógica de configuración es la misma como muestra la **Fig. 52**.



**Fig. 52** Escalamiento de Presión. Autores.

### 3.12. Cálculos de parámetros del suelo

Para que el programa haga el cálculo de, cuánta agua ha de regar, es necesario tener los valores de CC y PMP, y con los bloques matemáticos se podrá hacer el arreglo de un modelo matemático simple:

$$P_R = \frac{CC + PMP}{2} \quad (7)$$

$$P_R = \frac{28,70 + 15,70}{2} \quad (8)$$

$$P_R = 22,20\% \quad (9)$$

Lo que nos dará, el momento en que se debe regar, y con el modelo siguiente:

$$HFA = (P_R - CC) \quad (10)$$

$$HFA = (22,20 - 15,7) \quad (11)$$

$$HFA = 6,50\% \quad (12)$$

Nos dará la cantidad porcentual que se requiere de agua para regar.

#### 3.12.1. Cálculo del Volumen de Agua en Suelo

Usamos el bloque Instrucción Aritmética para realizar las operaciones matemáticas, Tomamos el valor obtenido del HFA y lo multiplicamos por el volumen en litros que ocupa una (1) planta de maíz en el suelo (ver **Fig. 53**). En la **Fig. 54** podemos observar el ingreso de los datos en el bloque.



**Fig. 53** Zona radicular de una planta de maíz.  
Autores.

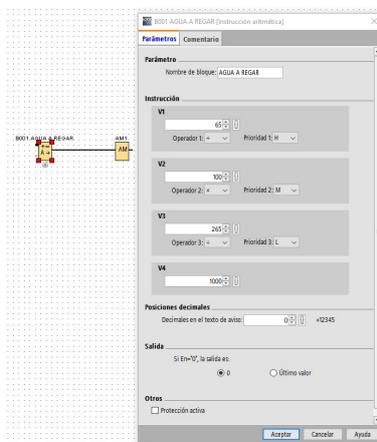
Convertimos de metros a litros el volumen de suelo que ocupa una planta de maíz:

$$V_s = 1m^3 \times \frac{1000L}{1m^3} \quad (13)$$

$$V_s = 0,00265m^3 \times \frac{1000L}{1m^3} \quad (14)$$

$$V_s = 2,65L \quad (15)$$

$V_s$  es el volumen del suelo en litros, es decir, el 100 % de agua para llenar todo el volumen ocupado de la planta de maíz.



**Fig. 54** Ingreso de los datos de volumen de agua.  
Autores.

### 3.13. Cantidad de Agua a Regar

Para determinar la cantidad de Agua de Riego, usamos la expresión:

$$A_R = V_s \times HFA \quad (16)$$

$$A_R = 2,65L \times 6,50\% \quad (17)$$

$$A_R = 0,164L \quad (18)$$

El  $A_R$  nos precisa la cantidad de volumen de agua que se debe de regar.

#### 3.13.1. Tiempo de Riego

El tiempo de riego también se podría confundir como la cantidad de Agua de Riego; la cantidad de agua que se riega dependerá de la presión que se esté bombeando, solo si se riega a una presión específica se tendrán los valores deseados. Para determinar el Tiempo del Riego se utilizaron las características de la cinta de riego, ya que esta tiene la posibilidad de dosificar el agua que se riega. Usamos la siguiente expresión:

$$T_R = \frac{A_R \times 3600s}{3L} \quad (19)$$

$$T_R = \frac{0,164L \times 3600s}{3L} \quad (20)$$

$$T_R = 196s \quad (21)$$

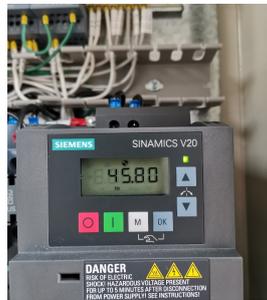
### 3.14. Identificación del modelo matemático del sistema de riego

Lo primero que hicimos fue bombear el agua a lazo abierto para poder encontrar la frecuencia de trabajo, para que la bomba alcance la presión requerida o Set Point de las cintas de goteo, es decir, 20.79 PSI como se observa en la **Fig. 55**.



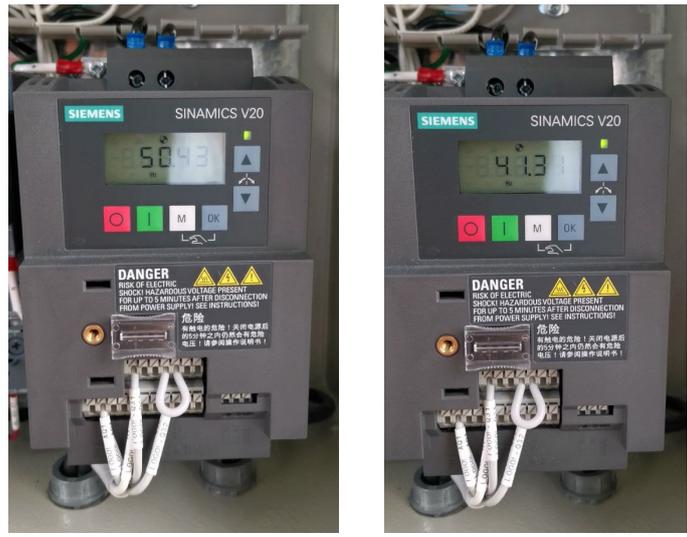
**Fig. 55** Presión de trabajo a lazo abierto.  
Autores.

Una vez localizada la frecuencia bombeando el agua en lazo abierto a 45.80Hz, en voltaje es 7.63V, como se muestra la **Fig. 56**.



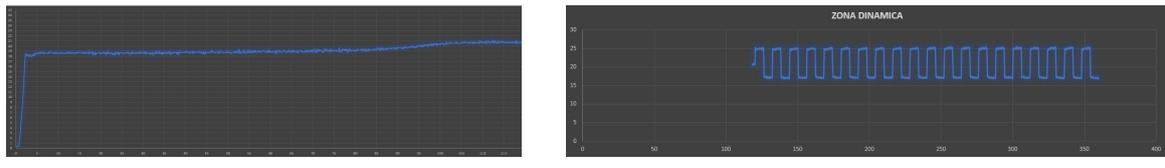
**Fig. 56** Frecuencia de trabajo a lazo abierto.  
Autores.

A continuación realizamos un programa que nos sirvió para encontrar las curvas del sistema, lo que se hizo fue aumentar un 10 % por encima de la frecuencia de trabajo, y luego de 6s, redujimos un 10 % de la frecuencia de trabajo, es decir, partimos con 45.80Hz, luego, una vez se establezca la presión, se aumenta a 50.38Hz y luego de 6s, se baja a 41.22Hz. Observamos que los niveles no eran exactos pero estaban muy cerca de lo que se esperaba, como se muestra en la **Fig. 57**). Para analizar la dinámica del sistema, observamos las transiciones de un nivel de frecuencia a otro, la gráfica resultante del ejercicio se muestra en la **Fig. 58**.

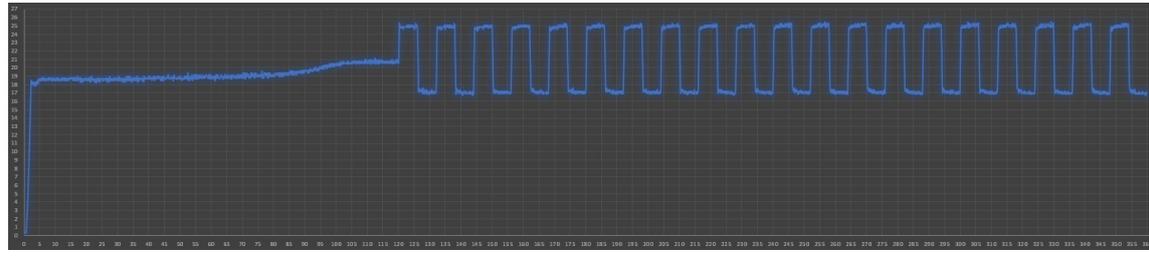


(a) Frecuencia +10 %. (b) Frecuencia -10 %.

**Fig. 57** Observación de las frecuencias.  
Autores.



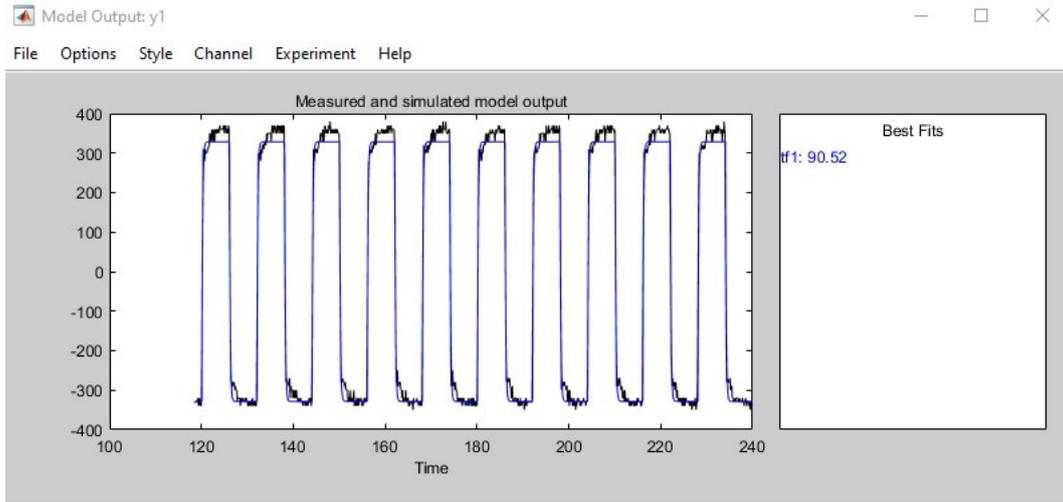
(a) Tiempo de estabilización. (b) Zona dinámica.



(c) Gráfica completa.

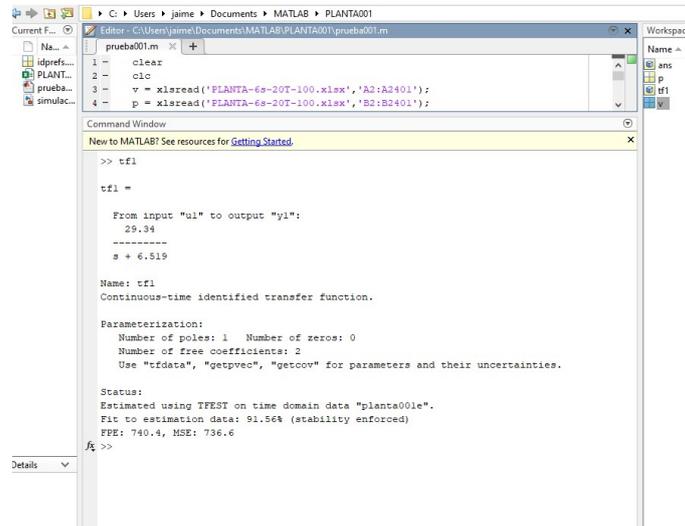
**Fig. 58** Curvas del sistema en lazo abierto.  
Autores.

Ingresamos la información de la gráfica a MATLAB para utilizar la herramienta Ident, que es la que nos dará la función de transferencia de forma polinómica, va a identificar la función que mejor responde al modelo que ingresamos, con un solo polo y negativo, se determina que es un sistema estable, como se muestra en la **Fig. 59**.



**Fig. 59** Simulación del modelo utilizando Ident. Autores.

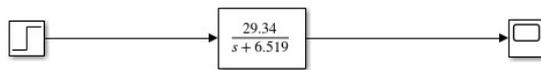
En la **Fig. 60** a continuación se muestra la planta obtenida luego del proceso de identificación.



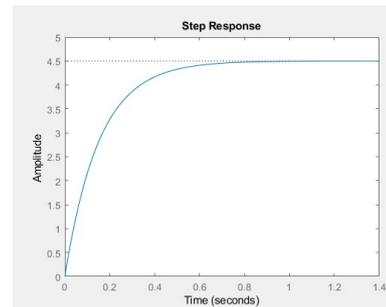
**Fig. 60** Planta del modelo obtenida utilizando Ident. Autores.

### 3.15. Simulación de la Planta

Utilizamos Simulink para simular la función de transferencia que obtuvimos con la herramienta Ident, en lazo abierto se le aplicó una entrada una función escalón con magnitud 1, y se observa que es un sistema estable, como se ve en la **Fig. 61**.



(a) Función de transferencia.



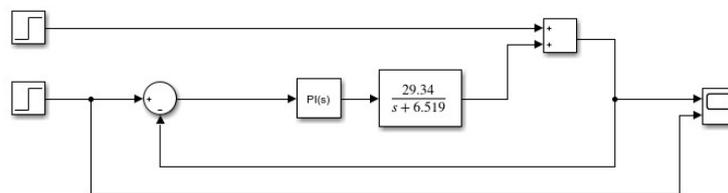
(b) Gráfica.

**Fig. 61** Simulación de la Función de Transferencia en lazo abierto.  
Autores.

### 3.16. Simulación del Controlador PI

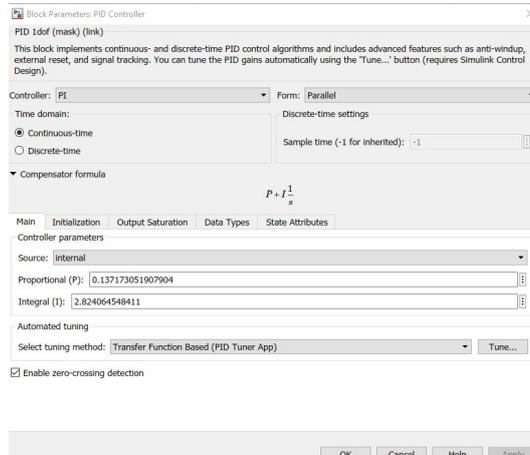
#### 3.16.1. Consideraciones del Control

Los laterales del riego tardan en llenarse de agua aproximadamente 100s, una vez éstas están llenas, se tiene presión en el circuito hidráulico, es decir, el control PI estará asumiendo un error del 100 % en todo el momento del llenado. El controlador iniciará su etapa de corrección más fina una vez reciba los niveles cercanos al Set Point, teniendo en cuenta esto, se simuló la planta con algunas perturbaciones (ver **Fig. 62**) y así comprobar el comportamiento y tiempo en que estos se logran corregir. En la podemos observar la simulación de la planta con el controlador PI incorporado.



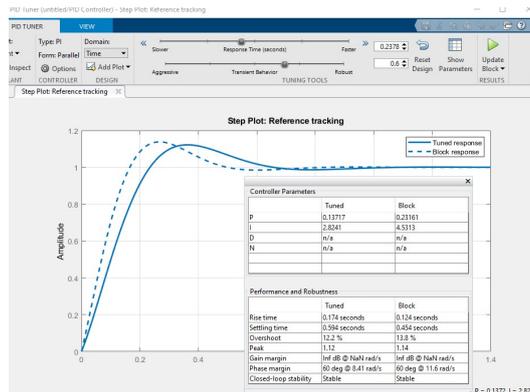
**Fig. 62** Diagrama de la planta en lazo cerrado.  
Autores.

Con la herramienta Autotuning se consiguieron los coeficientes  $K_p$  y  $K_i$ , como se muestra en la **Fig. 63**.



**Fig. 63** Sintonizador de coeficientes del controlador PI. Autores.

En la **Fig. 64** siguiente se aprecia el arreglo que se consiguió cambiando parámetros del Autotuning.



**Fig. 64** Parámetros de los coeficientes  $k_p$  y  $k_i$ . Autores.

La **Fig. 65** muestra el comportamiento de la planta con el controlador PI.



**Fig. 65** Simulación del Sistema en lazo cerrado. Autores.

### 3.16.2. Coeficientes Kc y Ti en el PLC

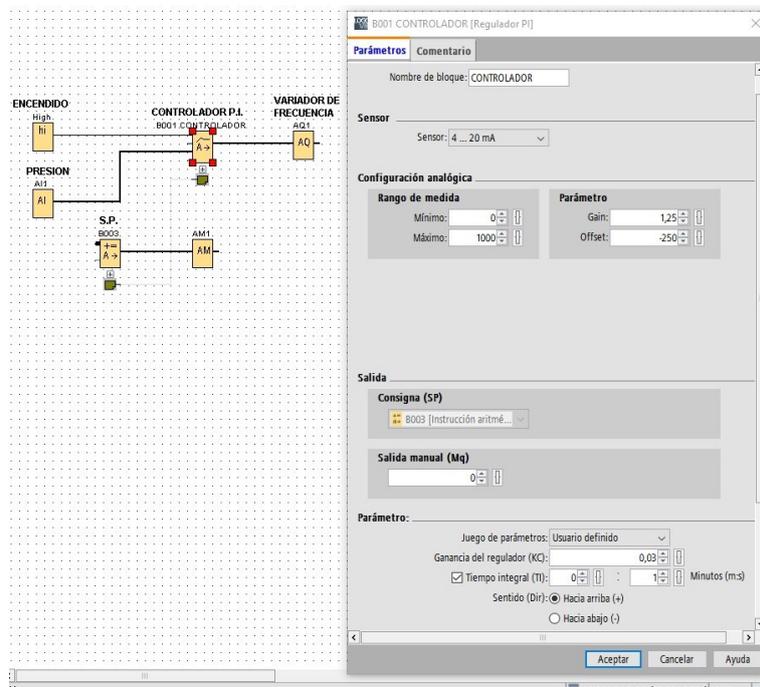
Para el ingreso de los coeficientes  $k_p$  y  $k_i$ , que obtuvimos del Autotuning de Simulink, observamos que en el bloque Controlador PI del LOGO! no requiere el coeficiente  $k_i$  pero, sí, el tiempo integral  $T_i$ , para calcularlo usamos la siguiente ecuación:

$$T_i = \frac{k_p}{k_i} \quad (22)$$

$$T_i = \frac{0,13717}{2,8241} \quad (23)$$

$$T_i = 0,048571s \quad (24)$$

Sin embargo el tiempo integral mínimo que se puede ingresar en el bloque PI, es 1s lo que nos llevó a volver a realizar una última simulación pero ahora con los coeficientes  $k_p$  y  $k_i$  iguales, es decir,  $k_p = k_i$ . El bloque se configuró de la siguiente manera como muestra la **Fig. 66**.



**Fig. 66** Configuración de los coeficientes Kc y Ti en bloque PI. Autores.

## Capítulo 4

### Resultados y Comparaciones

#### 4.1. Evaluación del Sistema Hidráulico Implementado

Se realizaron las pruebas de funcionamiento del circuito hidráulico implementado (ver **Fig. 67**) para evaluar que no haya obstrucciones en los goteros y que todos estén regando y también para comparar los cálculos teóricos que se obtuvieron en la etapa de diseño, para se bombeo el agua a una presión de trabajo de 20.7PSI para que los goteros rieguen 3L/h, para comprobar esto, se tomaron las muestras luego de que se haya llenado de agua el circuito hidráulico, se esperó aproximadamente 100s y desde ahí se utilizaron recipientes milimetrados (ver **Fig. 68**) para medir la cantidad de agua durante tiempos 1min.



**Fig. 67** Funcionamiento del circuito hidráulico implementado.  
Autores.

Realizamos una planilla (ver **TABLA V**) de registro de los valores que se midieron, en los laterales iniciales, medios y finales del circuito, y así se comprobó que los goteros riegan entre 50 a 51mL/min, considerándose de exitosos los resultados de los cálculos realizados para el circuito hidráulico.

**TABLA V**  
ANÁLISIS DE UNIFORMIDAD.  
Autores.

<b>t=1min</b>	<b>Vol. Medio [mL]</b>	<b>%Uniformidad</b>
Laterales Iniciales	51.0	
Laterales Medios	50.5	98.92 %
Laterales Finales	50.2	
<b>t=2min</b>	<b>Vol. Medio [mL]</b>	<b>%Uniformidad</b>
Laterales Iniciales	102.6	
Laterales Medios	100.5	98.47 %
Laterales Finales	100.0	



(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. 68** Medición de la cantidad de agua regada.  
Autores.

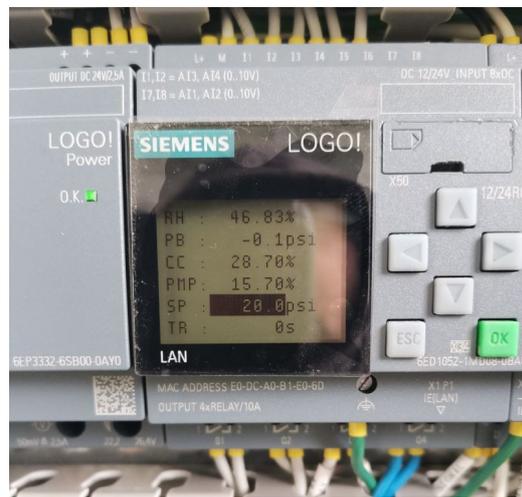
## 4.2. Evaluación del Sistema de Control del Riego

### 4.2.1. Pantalla del Controlador

Se hicieron las pruebas del funcionamiento de la pantalla del LOGO! para configurar y visualizar los datos, se ingresaron los parámetros con éxito y los bloques internos hicieron la lectura correctamente así como la presentación de los datos. En la **Fig. 69** se puede observar la pantalla configurada del LOGO!.



(a)



(b)

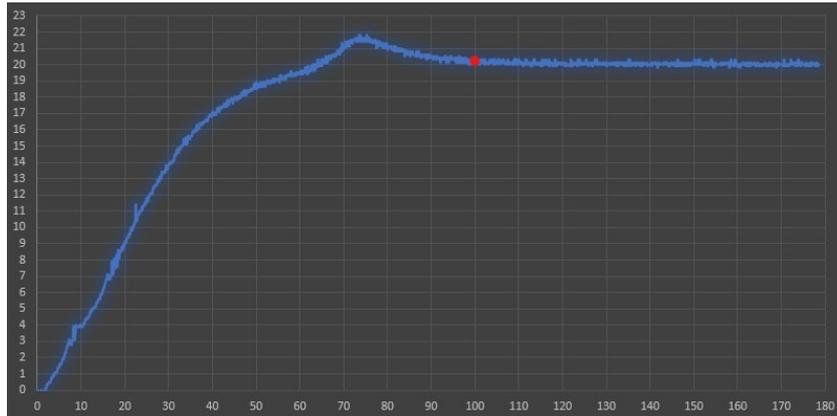


(c)

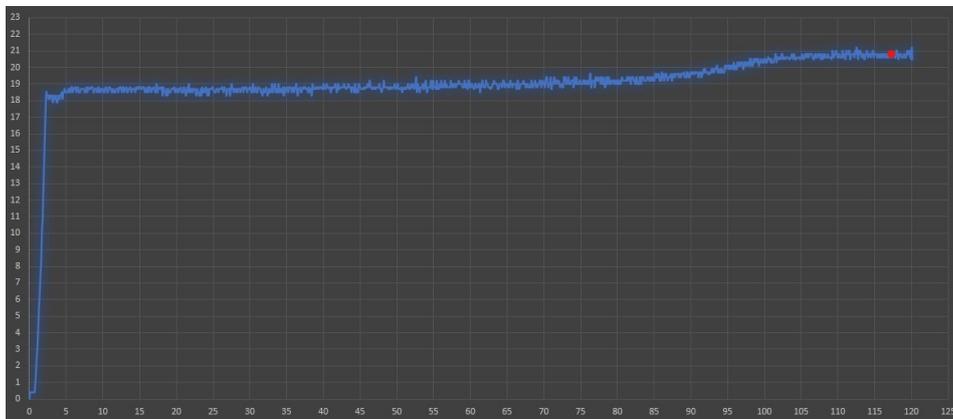
**Fig. 69** Funcionamiento de la pantalla del LOGO!.  
Autores.

#### 4.2.2. Control de la Presión de la Bomba

Se probaron los valores ingresados en el controlador PI del LOGO!:  $K_c=0,03$  y  $T_i=1s$ . Con el circuito hidráulico enteramente vacío se inicia la primera prueba, se observó que el tiempo de estabilización en el llenado de las tuberías se redujo a 100s en comparación cuando se lo hacía sin el uso del controlador que tomaba alrededor de 120s, como se observa en la **Fig. 70**.



(a)  $t = 100s$ . Usando Control PI.

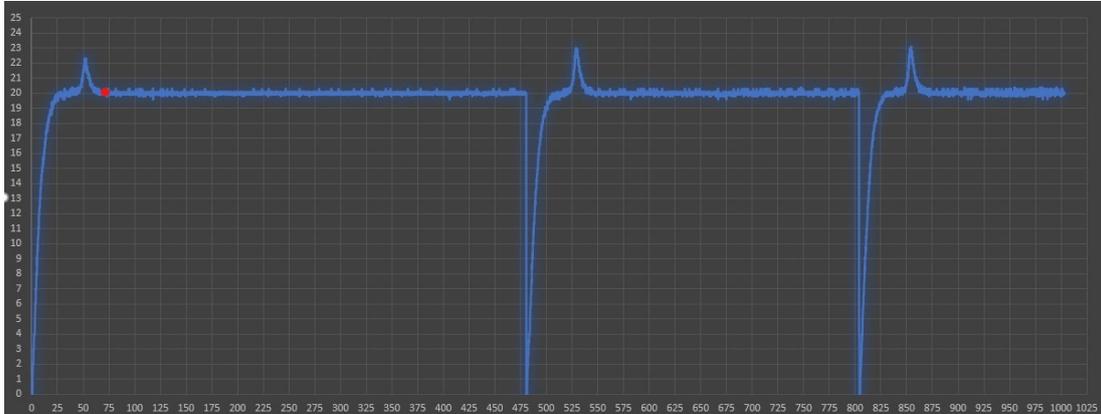


(b)  $t = 120s$ . Sin el Control PI.

**Fig. 70** Respuestas del sistema en el llenado del circuito.  
Autores.

Una vez realizadas las pruebas iniciales de presión en la etapa de llenado, se prosiguió con las pruebas de la presión con las tuberías llenas, se hicieron tres baches uno tras otro, dando como resultado que el tiempo de estabilización se redujo aún más, consiguiendo a estabilizarse a los 70s aproximadamente, también se observó que se alcanzó un pico más pronunciado que en la respuesta del llenado, como se evidencia en la **Fig. 71**. Los resultados obtenidos difieren

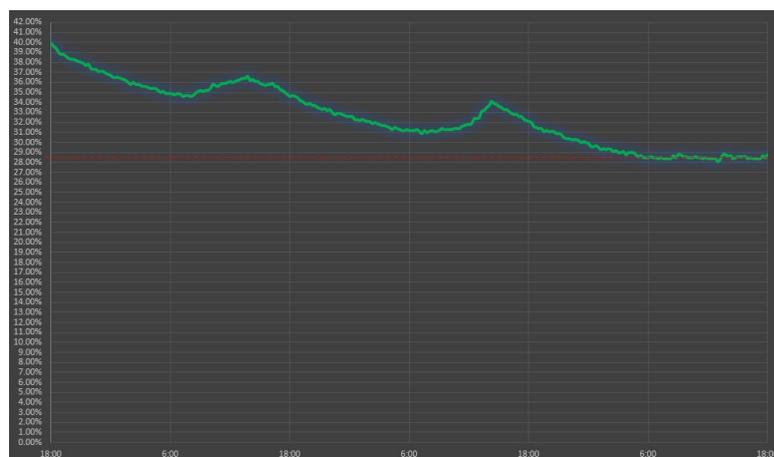
un tanto de la curva simulada en el Simulink, pero son muy cercanos los conseguidos en la planta real, lo que demuestra la gran utilidad del Simulink.



**Fig. 71** Respuestas del sistema cuando las tuberías están llenas.  
Autores.

#### 4.2.3. Control de la Humedad

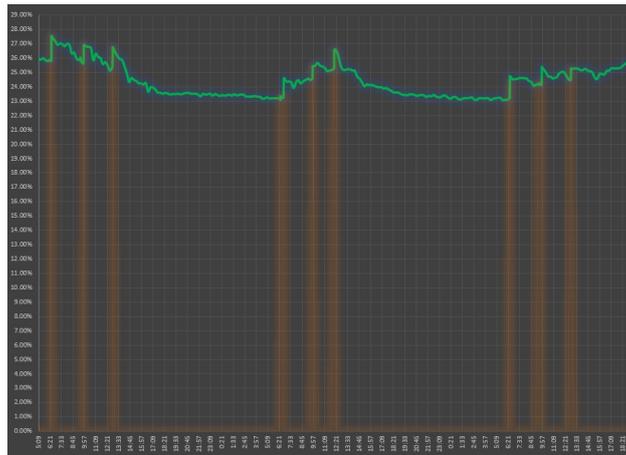
Con el sensor de humedad se hicieron los registros del suelo durante un periodo de 72 horas, para comparar la humedad a CC que se obtuvo de la tabla de texturas, y lo que se midió con el sensor. Se observó que el punto de CC estaba por debajo de lo que la tabla consideraba, esto se esperaba debido a que los suelos, aunque tengan las mismas texturas, las propiedades agronómicas, no. En la **Fig. 72** se muestra los registros obtenidos con el sensor de humedad.



**Fig. 72** Registros de humedad del suelo.  
Autores.

#### 4.2.4. Ciclos del Riego

Con el punto de CC= 28.70 % registrado se probaron los ciclos del riego, esto desde las 6:30am hasta las 18:30 de un mismo día, los riegos están separados por lapsos de tres horas, tiempo que permite al agua llegar a los niveles de la zona radicular. Se comprobó que los riegos en días soleados logran elevar los niveles de humedad como objetivo muy cerca del CC, como se puede apreciar en la siguiente **Fig. 73**.



**Fig. 73** Registro de los ciclos de riego.  
Autores.

### 4.3. Comparación de Eficiencia y Rentabilidad

#### 4.3.1. Eficiencia del Riego Propuesto

El sistema de control implementado supero el 98 % de eficiencia en llevar el agua a la zona de interés de la planta (ver **Fig. 74**), evitando que la maleza, que es producida por el exceso de agua crezca al rededor de la planta, como pasa con los sistemas de riegos masivos como el de cañón (ver **Fig. 75**), debido a que no cuentan con un control de dosificación del agua. El sistema propuesto también tiene un ahorro significativo, de la energía que utiliza, por ser un riego de baja presión y de intervalos cortos, gracias a que es un riego de precisión y a que se encuentra monitoreado por sensores.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 74** Riego en la zona radicular de las plantas.  
Autores.

A continuación se presentará una tabla comparativa (ver **TABLA VI**) en donde se describen los costos que requiere el método propuesto versus el de cañón.



**Fig. 75** Riego por cañón [26].

**TABLA VI**  
COMPARACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL POR HECTÁREA.  
Autores.

<b>Riego Propuesto</b>		<b>Riego Cañon</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Costo US \$/ha</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo US \$/ha</b>
Tuberías y accesorios	\$275.00	Tuberías y accesorios	\$1,800.00
Bomba eléctrica	\$375.00	Bomba a diesel	\$700.00
Cintilla de goteo	\$1,164.50	Mangueras	\$170.00
Mano de obra	\$500.00	Mano de obra	\$500.00
Caseta de tablero de control	\$495.00	Caseta de bomba	\$620.00
Tablero de control	\$1,460.00	Torres de riego	\$400.00
Sensores y actuadores	\$190.00		
<b>Total</b>	<b>\$4,459.50</b>	<b>Total</b>	<b>\$4,190.00</b>

En la siguiente **TABLA VII** se muestra una comparativa de sostenibilidad, utilizando criterios recomendados de la FAO [27].

**TABLA VII**  
COMPARACIÓN DE SOSTENIBILIDAD.  
Autores.

	<b>Riego propuesto</b>	<b>Riego cañón</b>
Inversión inicial	Alta	Mediana
Adaptación a los cultivos	Alta	Mediana
Adaptación a los terrenos	Alta	Baja
Consumo de agua	Baja	Alta
Eficiencia de riego	>95 %	65 %
Control del agua que se aplica	Sí	No
Riesgo ambiental	Muy baja	Muy alta
Plagas	Baja	Muy alta
Utilización de mano de obra	1 persona hasta 5 ha	1 persona/ha
Eficiencia energética	Muy Alto	Baja

#### 4.3.2. Análisis de la Rentabilidad con VAN y TIR

Se hace un análisis financiero utilizando los indicadores del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), a cinco años. Tendiendo en cuenta que, el cultivo del maíz tiene una duración de 120 días, se ha considerado dos cosechas anuales y la inversión inicial del proyecto amortizado a 5 años con un interés del 9.80 %. El maíz tiene un VAN de \$7,420.81 y un TIR de 64 %, mientras que el riego cañón logra un TIR del 54.68 %. Se puede apreciar en la **TABLA VIII**.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+i)^t} - I_0 \quad (25)$$

**TABLA VIII**  
ANÁLISIS DEL VAN Y TIR.  
Autores.

Riego propuesto		Riego Cañón		
Año	Flujo Neto	Año	Flujo Neto	
0	-\$4,459.50	0	-\$4,190.00	Inversión inicial
1	\$3,118.00	1	\$2,582.80	
2	\$3,118.00	2	\$2,582.80	
3	\$3,118.00	3	\$2,582.80	
4	\$3,118.00	4	\$2,582.80	
5	\$3,118.00	5	\$2,582.80	
<b>Interés</b>	9.80 %			
<b>VAN</b>	\$7,420.81		\$5,651.07	
<b>TIR</b>	64.03 %		54.68 %	

## Conclusiones

En este proyecto se dimensionó el sistema hidráulico, calculando para las tuberías primarias a 63mm de PVC, secundarias a 50mm PVC y cintas de goteo de 16mm con 0.20m de espacios entre agujeros, a un ratio de goteo de 3L/h, para el cultivo que tenía un área efectiva de 442 metros cuadrados. y se las organizó a 0.80m de distancia entre hileras.

Se determinaron los sensores de humedad de tipo volumétrico 0-100 % porque facilitaban los cálculos del tiempo de riego, y el de presión, absoluta, porque en el tubo en descarga no necesariamente se vacía luego de un ciclo de riego, permitiendo una correcta lectura.

Para controlar el sistema de riego el programa desarrollado para el LOGO! se lo realiza en dos etapas, una para ejecución manual y la otra parte de ejecución automática. En los dos modos de operación, se leen los datos de los sensores y en base a estas respuestas, se activa o desactiva la bomba que inyecta agua al sistema hidráulico.

El riego implementado ayuda de manera considerable al agricultor en reducir sus tiempos de trabajo y es rentable considerando los resultados de los indicadores del VAN de \$7,420.81 y TIR de 64.03 % a un interés del 9.8 %, respecto a los del método de canon que tuvo una TIR de 54.68 %.

## Recomendaciones

Se recomienda el uso de tuberías de PVC para las secciones primarias y secundarias, por tener un bajo coeficiente de fricción. Al seleccionar las cintas de riego se debe tener en cuenta si retienen el líquido una vez el ciclo del riego haya terminado, esto evitará que se tenga que esperar mucho tiempo en volverlas a llenar. Se deben emplear el uso de válvulas de aire en las secciones que tengan más altura, para impedir el efecto succión en las tuberías

El rango del sensor de presión deben ser acorde a las cantidades que se van a medir, esto facilitará los cálculos y escalamientos. Los electrodos del sensor de humedad se deben instalar herméticamente con el suelo, y cerca de la planta, estos es, en un área donde no dificulte los trabajos complementarios del cultivo.

Se recomienda el uso de diagramas de flujo para mantener un orden de programación, separar las rutinas por bloques o etapas. Para el escalamiento de los sensores es preferible usar los bloques aritméticos, debido a que se pueden corregir errores de lectura del sensor.

Se recomienda la implementación de este tipo de riegos por su alta rentabilidad y eficiencia de aprovechamiento del agua y su ahorro energético en el uso de tiempos de los equipos de bombeo, así como las potencias de las bombas son muy inferiores, respecto a las que se usa con el método cañón.

## Bibliografía

- [1] FAO. (2021, 16 junio). Portal de Suelos de la FAO [Online]. Disponible en: <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>.
- [2] FAO 2009. (2021, 16 junio). Guía para la descripción de suelos (4 ed.) [Online]. Disponible en: <https://www.fao.org/publications/card/en/c/0f070cdd-1b6d-53fa-add1-5c972fb299d2/>.
- [3] R. L. Paliwal, G. Granados, H. R. Lafitte y A. D. Violic. (2021, 04 marzo). El Maíz En Los Trópicos: Mejoramiento y producción. [Online]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/X7650S/x7650s00.htm>.
- [4] O. F. Cruz, El Cultivo Del Maíz, Manual para el cultivo de maíz en Honduras, 3ed. Tegucigalpa: DICTA, 2013.
- [5] Fundación Chile, (2021, 18 marzo). Manual De Recomendaciones Cultivo De Maíz Grano. [Online]. Disponible en: <http://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/cultivo-maiz-de-grano.pdf>.
- [6] F. Hernández. (2021, 01 abril). Fuentes de Agua de Riego y su Calidad. [online]. Disponible en: [https://www.agro-tecnologia-tropical.com/fuentes\\_de\\_agua.html](https://www.agro-tecnologia-tropical.com/fuentes_de_agua.html).
- [7] E. Pedroza, Hidráulica Básica Historia, conceptos previos y ecuaciones, 1 ed. México D.F.: IMTA, 2018.
- [8] M. A. Monge, Diseño agronómico e hidráulico de riegos agrícolas a presión, 1 ed. Madrid: Agrícola, 2018.
- [9] J. Saldarriaga, Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos, 1 ed. Bogotá: Alfaomega, 2007.
- [10] Iagua. (2021, 11 abril). «<https://www.iagua.es>,». [Online]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/cuantos-tipos-riego-hay>.
- [11] M.A. Liotta, R.A. Carrión, N. Ciancaglini y O. Pringles, Riego por Goteo, 1 ed. Comodoro Rivadavia: PROSAP INTA, 2015.

- [12] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 5 ed. Madrid: Ed. Pearson Educación S.A., 2010.
- [13] R. P. ÑECO GARCÍA,(2021, julio). Apuntes de sistemas de control. ed. San Vicente (Alicante): ECU, 2013. 404 p.[online]. Disponible en: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/62263?page=184>.
- [14] International Electrotechnical Commission, IEC. (2021, 18 mayo). Programmable Controller – Part 1: General Information, IEC-61131 (2 ed.) [Online]. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/4550>.
- [15] L.A. Bryan y E.A. Bryan, Programmable Controllers Theory and Implementation, 2 ed. Georgia, 1997.
- [16] M. Álvarez, Convertidores de frecuencia controladores de motores y srr, 1 ed. Barcelona: Marcombo S.A., 2000.
- [17] Cl. W. de Silva, Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [18] 1Library, (2021, 22 mayo). Válvulas Solenoides. Tipos de Válvulas de Solenoide [Online]. Disponible en: <https://1library.co/document/q730gnry-valvulas-solenoides-tipos-de-valvulas-de-solenoide.html>.
- [19] Cenicana, (2021, 22 mayo). ABC de los sensores de humedad en las labores de riego [Online]. Disponible en: <https://www.cenicana.org/abc-de-los-sensores-de-humedad-en-las-labores-de-riego>.
- [20] guide.directindustry, (2021, 18 abril). Qué sensor de presión elegir [Online]. Disponible en: <https://guide.directindustry.com/es/que-sensor-de-presion-elegir/>.
- [21] P. F. Díez. (2021, 05 abril). Bombas centrífugas y volumétricas. Academia [Online]. 3-139. Disponible en: [https://www.academia.edu/8929393/Bombas\\_centrifugas\\_y\\_volumetricas\\_ingenieria\\_](https://www.academia.edu/8929393/Bombas_centrifugas_y_volumetricas_ingenieria_).
- [22] V. L. Streeter, E. B. Wylie y K. W. Bedford, Mecánica de Fluidos, 9 ed. Santafé de Bogotá: Quebecor Impreandes, 1999.
- [23] A. R. Marchegiani, Bombas Centrifugas, 1 ed. Comahue: UNC, 2004.

- [24] Siemens, (2021, 18 junio). Industry Mall [Online]. Disponible en: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6EP3332-6SB00-0AY0>.
- [25] Promesa, (2021, 08 junio). «<https://www.promesa.com.ec/>» [Online]. Disponible en: <https://www.promesa.com.ec/producto/regulador-de-nivel-paolo>.
- [26] Irriga, (2021, 14 junio). «<https://www.irriga.com.mx/>» [Online]. Disponible en: <https://irriga.com.mx/aspersion-con-canon/>.
- [27] FAO, (2021, 06 junio). «<https://www.fao.org./>» [Online]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/aj470s/aj470s02.pdf>.
- [28] B. Sosa y D. Larrea, La tecnificación de la agricultura familiar bajo riego en Ecuador, 1 ed. Quito: CESA, 2014.

## Anexos

### Anexo 1: Pruebas de laboratorio del Suelo



(a) Secado de la muestra del suelo.



(b) Laboratorio de suelos.

	<b>ESTACION EXPERIMENTAL TROPICAL "PICHILINGUE"</b> <b>LABORATORIO DE SUELOS, TEJIDOS VEGETALES Y AGUAS</b> Km. 5 Carretera Quevedo - El Empalme; Apartado 24 Quevedo - Ecuador Telef. 052 783044 suelos.eetp@iniap.gob.ec
---	---

#### REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

<b>DATOS DEL PROPIETARIO</b> Nombre : SAUHING ASPIAZU JAIME Dirección : VINCES Ciudad : VINCES Teléfono : Fax :	<b>DATOS DE LA PROPIEDAD</b> Nombre : Provincia : Los Rios Cantón : VINCES Parroquia : Ubicación :	<b>PARA USO DEL LABORATORIO</b> Cultivo Actual : N° de Reporte : 7882 Fecha de Muestreo : 24/12/2020 Fecha de Ingreso : 07/01/2021 Fecha de Salida : 21/02/2021
--	---	--

N° Muest.	meq/100ml			dS/m	(%)	Ca	Mg	Ca+Mg	meq/100ml	(meq/l)½	ppm	Textura (%)			Clase Textural	
	Al+H	Al	Na	C.E.	M.O.							Mg	K	Σ Bases		RAS
101895					3,0	M	3,4	26,67	118,33	14,32			24	40	36	Franco-Arcilloso



"La muestra será guardada en el Laboratorio por los meses. Tiempo en el cual se podrán reclamar en los resultados"

<b>INTERPRETACION</b> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"> <b>Al+H, Al y Na</b>                      B = Bajo                      M = Medio                      T = Tóxico                 </td> <td style="width: 33%;"> <b>C.E.</b>                      NS = No Salino    S = Salino                      LS = Lig. Salino    MS = Muy Salino                 </td> <td style="width: 33%;"> <b>M.O. y Cl</b>                      B = Bajo                      M = Medio                      A = Alto                 </td> </tr> </table>	<b>Al+H, Al y Na</b> B = Bajo M = Medio T = Tóxico	<b>C.E.</b> NS = No Salino    S = Salino LS = Lig. Salino    MS = Muy Salino	<b>M.O. y Cl</b> B = Bajo M = Medio A = Alto	<b>ABREVIATURAS</b> C.E. = Conductividad Eléctrica M.O. = Materia Orgánica RAS = Relación de Adsorción de Sodio	<b>METODOLOGIA USADA</b> C.E. = Conductímetro M.O. = Titración de Walkley Black Al+H = Titración con NaOH
<b>Al+H, Al y Na</b> B = Bajo M = Medio T = Tóxico	<b>C.E.</b> NS = No Salino    S = Salino LS = Lig. Salino    MS = Muy Salino	<b>M.O. y Cl</b> B = Bajo M = Medio A = Alto			

  
**RESPONSABLE DPTO. SUELOS Y AGUA**

  
**RESPONSABLE LABORATORIO**

(c) Resultados del análisis del suelo.

**Fig. 76** Análisis textural del suelo.  
Autores.

## Anexo 2: Construcción de la caseta



(a) Armado de la estructura de caseta.



(b) Cerramiento de la caseta.



(c) Cimentación de estructura de bomba.



(d) Instalación de bomba a estructura.

**Fig. 77** Construcción de la caseta.  
Autores.

### Anexo 3: Instalación del circuito hidráulico



(a) Tendido de tubería secundaria.



(b) Manguerillas de laterales de riego.



(c) Instalación de las manguerillas de riego.



(d) Instalación de las cintas de goteo.



(e) Soterramiento de la tubería secundaria.



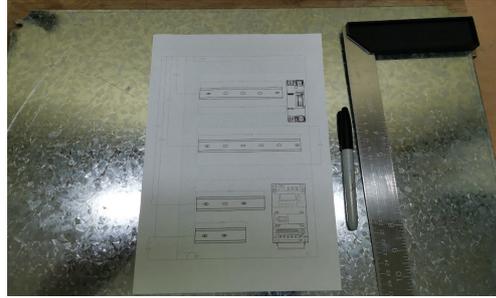
(f) Pruebas de cintas de goteo.

**Fig. 78** Instalación del circuito hidráulico.  
Autores.

## Anexo 4: Construcción del tablero de control



(a) Preparación del tablero.



(b) Mediciones y ubicación de componentes.



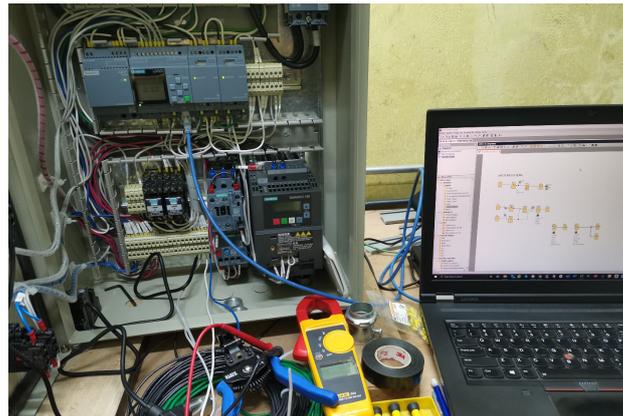
(c) Perforación de tapa frontal.



(d) Instalación de pulsadores, selectores y pilotos.



(e) Sujeción de cables.



(f) Pruebas de funcionamiento.

**Fig. 79** Construcción del tablero de control.  
Autores.

## Anexo 5: Programa de identificación de la planta

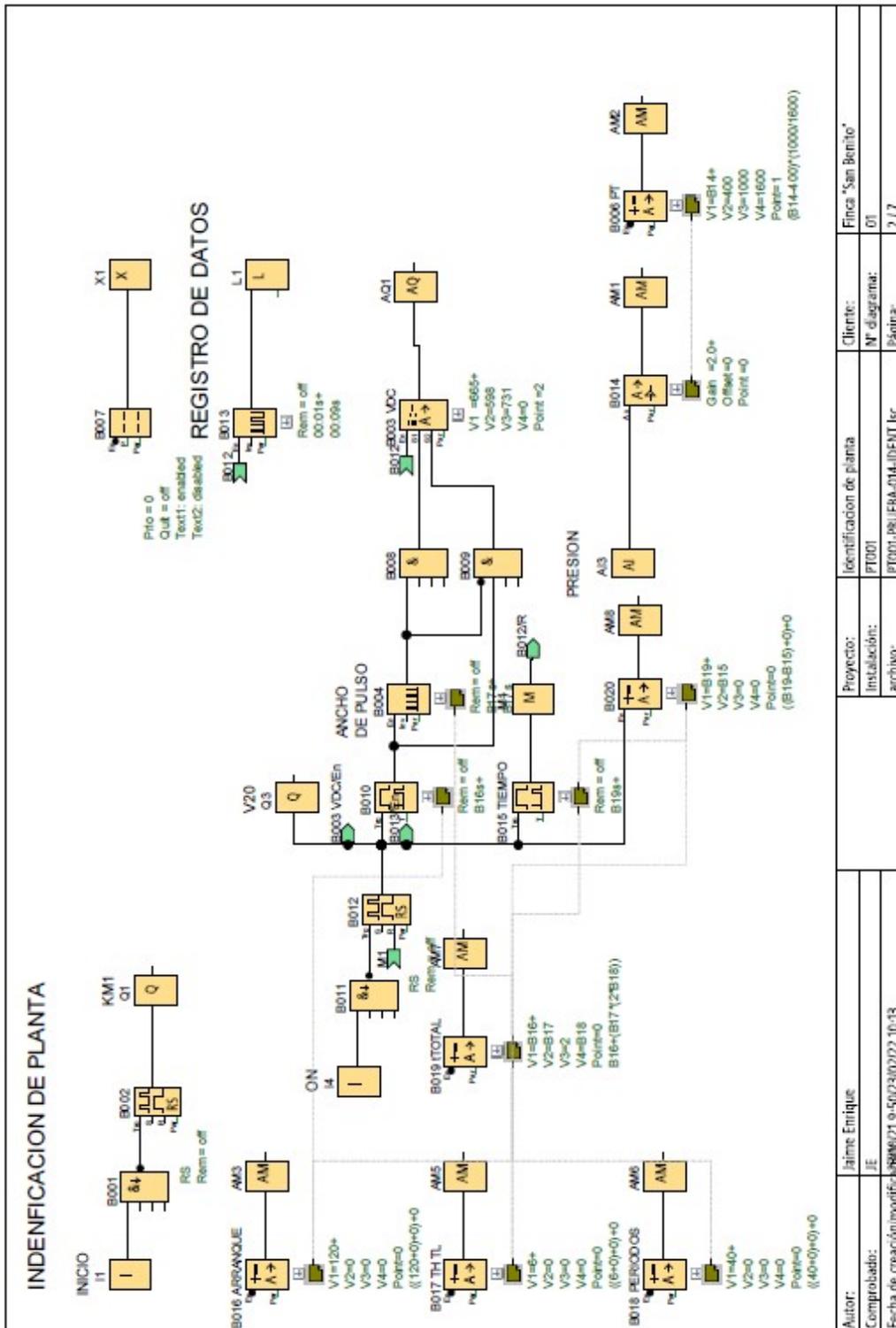


Fig. 80 Programa de identificación de la planta. Parte 1.  
Autores.

Número de bloque (tipo)		Par			
A13(Entrada analógica) : PRESION					
B002(Relé de impulsos) :		RS Rem			
B003 VDC(MUX analógico) :		V1= V2= V3= V4= Poin			
B004(Generador de impulsos asíncrono) : ANCHO DE PULSO		Rem B173 B173			
B006 PT(Instrucción aritmética) :		V1= V2= V3= V4= Poin (B14			
Autor:	Jaime Enrique	Proyecto:	Identificación de planta	Cliente:	Finca "San Benito"
Comprobado:	JE	Instalación:	PT001	Nº diagrama:	01
Fecha de creación:	25/02/2016 10:13	archivo:	PT001-PRUEBA-014-IDENT	Página:	3 / 7

**Fig. 81** Programa de identificación de la planta. Parte 2.  
Autores.

Número de bloque (tipo)		Par																																																
B007(Texto de aviso) :		Prio Qui Tex Tex																																																
<table border="1"> <tr> <td>+= B019 tTOTAL-AQ a...</td> <td>s</td> <td>+= B020-AQ amplificada</td> <td>s</td> </tr> <tr> <td>A→ 0</td> <td></td> <td>A→ 0</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>≡- B003 VDC-AQ ampl...</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>A→ 0.00</td> <td></td> </tr> <tr> <td>+= B006 PT-AQ amplifi...</td> <td>p s i</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>A→ 0.0</td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>A r r a n q u e</td> <td></td> <td>+= B016 ARRANQUE-V1</td> <td>s</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>A→ 120</td> <td></td> </tr> <tr> <td>T H T L</td> <td></td> <td>+= B017 TH TL-V1</td> <td>s</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>A→ 6</td> <td></td> </tr> <tr> <td>P e r i o d o s</td> <td></td> <td>+= B018 PERIODOS-V1</td> <td>T</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>A→ 40</td> <td></td> </tr> </table>		+= B019 tTOTAL-AQ a...	s	+= B020-AQ amplificada	s	A→ 0		A→ 0				≡- B003 VDC-AQ ampl...	V			A→ 0.00		+= B006 PT-AQ amplifi...	p s i			A→ 0.0				A r r a n q u e		+= B016 ARRANQUE-V1	s			A→ 120		T H T L		+= B017 TH TL-V1	s			A→ 6		P e r i o d o s		+= B018 PERIODOS-V1	T			A→ 40		→ Cor -C -L -L -L -L -L Des -D
+= B019 tTOTAL-AQ a...	s	+= B020-AQ amplificada	s																																															
A→ 0		A→ 0																																																
		≡- B003 VDC-AQ ampl...	V																																															
		A→ 0.00																																																
+= B006 PT-AQ amplifi...	p s i																																																	
A→ 0.0																																																		
A r r a n q u e		+= B016 ARRANQUE-V1	s																																															
		A→ 120																																																
T H T L		+= B017 TH TL-V1	s																																															
		A→ 6																																																
P e r i o d o s		+= B018 PERIODOS-V1	T																																															
		A→ 40																																																
B010(Retardo a la conexión) :		Rem B16																																																
B012(Relé de impulsos) :		RS Rem																																																
B013(Generador de impulsos asíncrono) :		Rem 00: 00:																																																
B014(Amplificador analógico) :		Gai Off Poi																																																
<table border="1"> <tr> <td>Autor:</td> <td>Jaime Enrique</td> <td>Proyecto:</td> <td>Identificación de planta</td> <td>Cliente:</td> <td>Finca "San Benito"</td> </tr> <tr> <td>Comprobado:</td> <td>JE</td> <td>Instalación:</td> <td>PT001</td> <td>Nº diagrama:</td> <td>01</td> </tr> <tr> <td>Fecha de creación:</td> <td>28/06/2016 10:23:02/22 10:13</td> <td>archivo:</td> <td>PT001-PRUEBA-014-IDENT</td> <td>Página:</td> <td>4 / 7</td> </tr> </table>			Autor:	Jaime Enrique	Proyecto:	Identificación de planta	Cliente:	Finca "San Benito"	Comprobado:	JE	Instalación:	PT001	Nº diagrama:	01	Fecha de creación:	28/06/2016 10:23:02/22 10:13	archivo:	PT001-PRUEBA-014-IDENT	Página:	4 / 7																														
Autor:	Jaime Enrique	Proyecto:	Identificación de planta	Cliente:	Finca "San Benito"																																													
Comprobado:	JE	Instalación:	PT001	Nº diagrama:	01																																													
Fecha de creación:	28/06/2016 10:23:02/22 10:13	archivo:	PT001-PRUEBA-014-IDENT	Página:	4 / 7																																													

Fig. 82 Programa de identificación de la planta. Parte 3.  
Autores.

## Anexo 6: Programa del control de riego

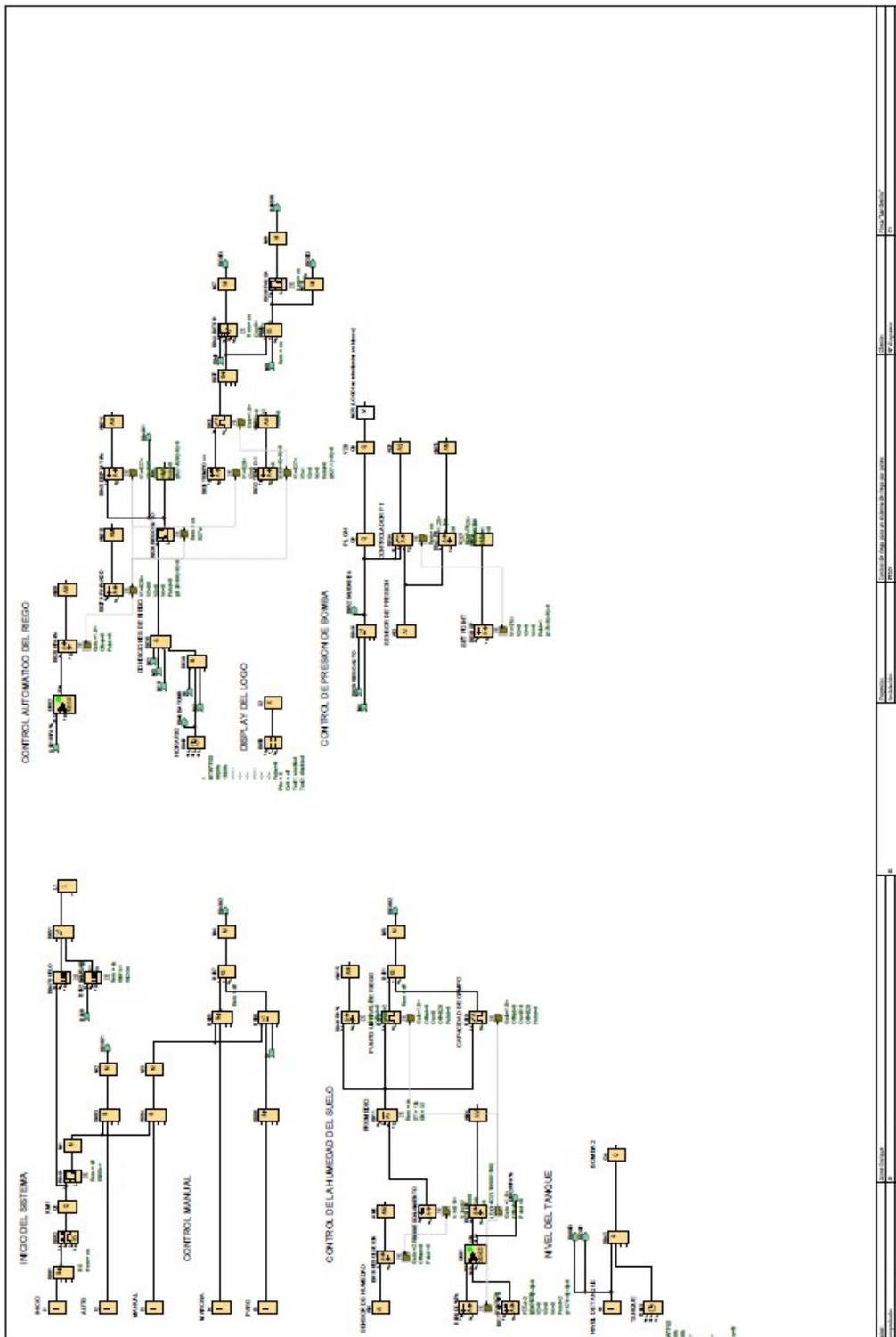


Fig. 83 Programa del control de riego. Parte 1.  
Autores.

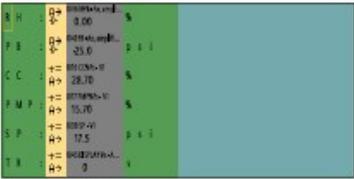
Número de bloque (tipo)	Parámetro
B038 SP(Instrucción aritmética) : SET POINT	V1=15+ V2=0 V3=0 V4=0 Polar=1 (105+0)+0
B040 (Temporizador semanal) : HORARIO	+ MWTFS5 06:30h 18:30h ---- -- -- -- -- Pulse=6
B041 PB(Amplificador analógico) :	Gain =1.25+ Offset=250 Polar =1
B042 (Temporizador semanal) : TANQUE	+ MWTFS5 06:30h 18:30h ---- -- -- -- -- Pulse=6
B044 BATCH(Contador de eventos) :	Res = on On=5+ Off=3 Scale=0
B045 DISPLAY 8(Instrucción aritmética) :	V1=10+ V2=0 V3=0 V4=0 Polar=0 (100+0)+0
B046 BPA(Amplificador analógico) :	Gain =1.5+ Offset=0 Polar =2
B047 SUELO(Generador de impulsos síncrono) :	Res = on On=25+ 14.00ms
B048 (Acordó a la consola) :	Res = off On=20+
B050(Texto de aviso) :	Pico = 0 Qui = off Test: enabled Test2: disabled  Configuración del ticker - Tick - Line1: N - Line2: M - Line3: M - Line4: M - Line5: M - Line6: M Destino de aviso - VlogKey de LOG01
 <p>Line1: B046 BPA-An Line2: B041 PB-An Line3: B038 CO/Ph/P Line4: B017 P/M/Ph/P Line5: B038 SP/P Line6: B045 DISPLAY 8-An</p>	
B052 SALIDAS(Generador de impulsos síncrono) :	Res = on On=25+ On=24ms
E(Estado) :	
D(Estado) :	
M(Estado) :	
F(Estado) :	
N(Estado) :	
O(Estado) :	
Q(Estado) :	

Fig. 84 Programa del control de riego. Parte 2.  
Autores.

Número de bloque (siges)	Parámetros
ADEntrada analógica : SENSOR DE PRESIÓN	
AAEntrada analógica : SENSOR DE HUMEDAD	
B002 (Relé de impulso)	RS Rets = on
B003 (Relé autoconclavado)	Rets = off
B004 ESCALAMIENTO (instrucción aritmética)	V1=400+ V2=400 V3=10000 V4=1000 Point=0 (400-400)/(10000-1000)
B005 RESOLUCIÓN (Relé analógico)	Gain = -2.0+ Offset=0 Point =0
B010 (Relé medio) : PIEDRIZO	Rets = on S1 = 10+ S2 = S1
B016 COM2 (instrucción aritmética)	V1=2070+ V2=0 V3=0 V4=0 Point=2 (2070-0)+0=0
B017 PMP (instrucción aritmética)	V1=1570+ V2=0 V3=0 V4=0 Point=2 (1570-0)+0=0
B018 (Comandador analógico de valor umbral) : PUNTO UMbral DE RIEGO	Gain=1.0+ Offset=0 On=0 Off=500 Point=0
B019 (Comandador analógico de valor umbral) : CAPACIDAD DE CAMPO	Gain=1.0+ Offset=0 On=115 Off=500 Point=0
B020 (Relé) (Relé analógico)	Gain = -1.0+ Offset=0 Point =0
B021 (Relé autoconclavado)	Rets = off
B027 (FA IN ADD (instrucción aritmética)	V1=328+ V2=0 V3=0 V4=0 Point=0 (328+0)+0=0
B028 (FA IN) (Relé analógico)	Gain = -1.0+ Offset=0 Point =0
B029 RIEGO AUTO (Relé de barrido (Salida de impulso))	Rets = on R070+
B030 (AND) : CONDICIONES DE RIEGO	
B031 (Comandador analógico de valor umbral)	Gain=1.0+ Offset=0 On=112 Off=0 Point=0
B032 TIEMPO -1 (instrucción aritmética)	V1=327+ V2=1 V3=0 V4=0 Point=0 (327-1)+0=0
B033 TIEMPO ++ (instrucción aritmética)	V1=329+ V2=0 V3=0 V4=0 Point=0 (329+0)+0=0
B034 (Regulador PI) : CONTROLADOR PI	Rets = on Gain = -1.25+ Offset = -200 S1 = 111 Mq = 0 Kc = 0.79 Tud = 0.02m Dl = 0 Point = 0
B035 (Relé autoconclavado)	Rets = on
B036 PAUSA (Retardo a la conexión)	Rets = on E3.003+

Autores	Autores	Revisión	Revisión	Revisión	Revisión	Revisión
Autores	Autores	Revisión	Revisión	Revisión	Revisión	Revisión
Autores	Autores	Revisión	Revisión	Revisión	Revisión	Revisión

Fig. 85 Programa del control de riego. Parte 3.  
Autores.

## Anexo 7: Desarrollo del cultivo de maíz



(a) Semilla de maíz.



(b) Siembra de semillas.



(c) Germinación de las semillas.



(d) Crecimiento de las plántulas.



(e) Desarrollo de hojas.

**Fig. 86** Desarrollo del cultivo de maíz.  
Autores.



(a) Vista panorámica del cultivo.



(b) Mazorca de maíz tierno.

**Fig. 87** Cosecha de choclo.  
Autores.