

**SISTEMA DE CONTROL INSTRUMENTADO PARA
CULTIVOS HIDROPÓNICOS**

**JUAN SEBASTIÁN CABRERA HIDALGO
RONALD ANDRÉS PANTOJA CHAVERRA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO FÍSICA
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2004**

**SISTEMA DE CONTROL INSTRUMENTADO PARA
CULTIVOS HIDROPÓNICOS**

**JUAN SEBASTIÁN CABRERA HIDALGO
RONALD ANDRÉS PANTOJA CHAVERRA**

**Trabajo de grado en la modalidad de proyecto de Investigación, para optar el
título de Ingenieros Físicos**

**Director
Ing. JUAN FERNANDO FLOREZ MARULANDA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO FÍSICA
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2004**

Nota de aceptación

Director

Ing. JUAN FERNANDO FLOREZ

Jurado

M.sc. EDGAR MATALLANA

Jurado

Dr. FABIO CABEZAS FAJARDO

Fecha de sustentación: Popayán, 1 de diciembre de 2004

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	11
1. HIDROPONÍA	13
2. SISTEMA DE NUTRICIÓN	16
2.1 ELECTROVÁLVULA DE LLENADO	17
2.2 FILTRO DE ARENA	18
2.3 TANQUE MEZCLADO	22
2.4 SENSORES DE NIVEL ALTO Y BAJO	22
2.5 ELECTROBOMBA	23
2.6 FILTRO DE MALLA	24

	pág
2.7 ELECTROVÁLVULA VÉNTURI	24
2.8 ELECTROVÁLVULA RIEGO	25
2.9 INYECTOR VÉNTURI	25
2.10 CANALES DE CULTIVO	31
2.11 SUSTRATO	32
2.12 CINTA DE RIEGO	32
2.13 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE NUTRICIÓN	33
3. SOLUCIÓN NUTRITIVA	37
3.1 NUTRIFEEED ESTÁNDAR	37
3.2 LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA EN LA SOLUCIÓN NUTRITIVA	49

	pág.
3.3 EL pH EN LA SOLUCIÓN NUTRITIVA	51
4. CONTROLADOR DE RIEGO	53
4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DE RIEGO	60
5. CONDUCTÍMETRO	64
5.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS	64
5.2 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS	67
5.3 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL CONDUCTÍMETRO	69
5.4 PROGRAMA DEL CONDUCTÍMETRO	72
5.4.1 Función filtro FIR	73
5.4.2 Función CALIBRAR	76

	pág
5.4.3 Función de atención a interrupción	77
5.5 CALIBRACIÓN DEL CONDUCTÍMETRO	78
6. pH METRO	81
6.1 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL pH METRO	82
6.2 CALIBRACIÓN DEL pH METRO	88
7. COSTO Y ANÁLISIS DE RENTABILIDAD	95
7.1 COSTOS DE INVERSIÓN	96
7.2 DEPRECIACIÓN DEL EQUIPO	96
7.3 COSTOS OPERACIONALES	97
7.4 INGRESOS POR VENTA	98

	pág
7.5 COSTO TOTAL	98
7.6 UTILIDAD	99
7.7 INDICE DE RENTABILIDAD	100
8. CONCLUSIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXOS	113

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 2.1 Elementos del sistema de nutrición	16
Tabla 2.2 Partes del filtro de arena	19
Tabla 2.3 Relación de presión caudal líquido succionado	26
Tabla 3.1 Relación nutricional entre el fertilizante nutrifeed estándar y la recomendada por la organización americana de alimentos	41
Tabla 3.2 Ajustes al fertilizante nutrifeed estándar	45
Tabla 3.3 Equivalencia de una solución nutritiva hecha con bases en sales simples	46
Tabla 3.4 Factores de conversión empleados en la formulación de la Solución nutritiva	46

	pág.
Tabla 3.5 Fuentes utilizadas para elaborar soluciones nutritivas	47
Tabla 3.6 Datos del cultivo	49
Tabla 7.1 Cuadro de inversiones	101
Tabla 7.2 Depreciación del equipo	102
Tabla 7.3 Costos operacionales	103

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1 Siembra con la técnica de raíz flotante	13
Figura 1.2 Siembra sobre sustrato	14
Figura 1.3 Sistema de nutrición a solución perdida	15
Figura 1.4 Sistema de nutrición a solución recirculante	15
Figura 2.1 Descripción del sistema de nutrición	17
Figura 2.2 Electroválvula de llenado	18
Figura 2.3 Partes del filtro de arena	20
Figura 2.4 Filtro de arena parte superior	21
Figura 2.5 Filtro de arena parte inferior	21
Figura 2.6 Flauta filtro de arena	21
Figura 2.7 Sierra para fabricar la flauta	21
Figura 2.8 Tanque de almacenamiento 500L.	22
Figura 2.9 Sensores de nivel	23
Figura 2.10 Electrobomba	23
Figura 2.11 Filtro de malla	24
Figura 2.12 Electroválvula venturi y electroválvula riego	25

	pág.
Figura 2.13 Tubo venturi	25
Figura 2.14 Representación inyector venturi	29
Figura 2.15 Tanque solución nutritiva	30
Figura 2.16 Canales de cultivo	31
Figura 2.17 Diagrama del cultivo	31
Figura 2.18 Sustrato cascarilla de arroz	32
Figura 2.19 Cintas de riego	33
Figura 2.20 Diagrama de cinta de riego	33
Figura 2.21 Unidad de cultivo hidropónico	34
Figura 2.22 Panorámica del sistema de nutrición	34
Figura 3.1 Consumo de agua por planta por día	39
Figura 3.2 Consumo de elementos mayores por planta	40
Figura 4.1 Diagrama controlador de riego	52
Figura 4.2 Interfaz de usuario del controlador	53
Figura 4.3 Estructura del menú	54
Figura 4.4 Pantalla principal y menú desplegable	55
Figura 4.5 Menú hora riego y configuración hora inicio riego 1	55
Figura 4.6 Duración del riego	56
Figura 4.7 Hora de llenado de tanque	57

	pág.
Figura 4.8 Potencia electrobomba	57
Figura 4.9 Actualizar Hora	58
Figura 4.10 Reporte de alarmas	59
Figura 4.11 Esquema electrónico del controlador de riego	62
Figura 5.1 Modelo de conductividad eléctrica	65
Figura 5.2 Diagrama en bloque del conductímetro	70
Figura 5.3 Electrodo de medición de conductividad	70
Figura 5.4 Diagrama eléctrico conductímetro	71
Figura 5.5 Diagrama de flujo programa principal conductímetro	73
Figura 5.6 Respuesta en frecuencia filtro FIR	75
Figura 5.7 Respuesta a señal escalón del filtro FIR	75
Figura 5.8 Diagrama de flujo de la rutina de calibración del conductímetro	78
Figura 5.9 Gráfica del valor de C.E (equipo comercial vs. equipo prueba)	79
Figura 6.1 Circuito de acople de señal	84
Figura 6.2 Diagrama del circuito de control del pH metro	87
Figura 6.3 Grafica del valor de pH (equipo comercial vs. equipo prueba)	91
Figura 6.4 Diagrama de flujo programa principal pH	92
Figura 6.5 Diagrama de flujo de la rutina de calibración del pH	95

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A . Clasificación botánica del tomate	113

GLOSARIO

ADC: conversión análoga digital.

CANALES DE CULTIVO: recipientes en los cuales se deposita sustrato en donde se realiza el sembrado de las plantas.

CHUPON AXILAR: crecimiento de nuevos tallos entre el tallo principal y hojas, generalmente son podados cuando tienen una longitud de 4 a 8 cm gracias a la mínima cicatriz que deja sobre el tallo es relativamente pequeña y por otra parte a la poca pérdida de energía por parte de la planta

DESCOPE: procedimiento de poda del extremo superior de la planta de tomate para detener su crecimiento en un momento dado.

ELECTROBOMBA: dispositivo eléctrico que permite impulsar un líquido.

ELECTROVALVULA: dispositivo eléctrico que controla el paso de líquido.

HP. caballos de fuerza: medida de potencia que equivale aproximadamente a 746 vatios.

INVERNADERO: edificio con paredes y cubierta de vidrio o plástico translúcido, empleado para el cultivo y la conservación de plantas.

LCD: display o pantalla de cristal líquido.

LIXIVIADOS: residuos líquidos proveniente de la plantación, posterior a un ciclo de riego.

psi (POUND SQUARE INCH): medida de presión dada en el sistema inglés, libra por pulgada cuadrada, la equivalencia en el sistema internacional es $1 \text{ PSI} = 0.105 \text{ Kg/cm}^2$.

p.p.m. (PARTES POR MILLÓN): medida de concentración; expresada en el sistema internacional como $\text{mgr.} / 1000\text{cm}^3$, es decir que por cada parte de soluto, hallan 1'000.0000 partes de solución.

RS232: protocolo de comunicación utilizado para la transferencia de datos entre el computador y los instrumentos de medición.

SOLENOIDE: alambre enrollado en forma de hélice.

SOLUCION NUTRITIVA: solución de agua y sales minerales que contiene los elementos esenciales para el desarrollo de la planta.

SUSTRATO: material químico y biológicamente inerte donde se siembra o establece la planta.

RESUMEN

El presente documento aborda los detalles de construcción de una unidad de cultivo hidropónico, evaluada en un cultivo de tomate, a la cual se integró un sistema automático de nutrición y equipos de medición de pH y conductividad eléctrica, diseñados e implementados por los autores.

Adicionalmente se presenta una formulación de la solución nutritiva para riego, elaborada a partir de sales de fácil consecución en la región, adaptada a las características de la unidad de cultivo hidropónico y cumpliendo con los requerimientos nutricionales del tomate.

Finalmente se dedica el ultimo capítulo del documento a realizar un análisis de la viabilidad económica, de una unidad productiva de mediana escala de 2500 plantas en un cultivo hidropónico similar al del sistema propuesto.

INTRODUCCIÓN

En este documento se recopilan los resultados del proyecto titulado “SISTEMA DE CONTROL INSTRUMENTADO PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS”, cuyo objetivo es desarrollar tecnología innovadora que permita la implementación de este tipo de cultivos a bajo costo y con elementos de fácil consecución en el país lo que lo hace viable social y económicamente, además de adicionar la automatización en el agro.

Colombia debe buscar alternativas de mejoramiento en sus técnicas de cultivo, las cuales permita competir en calidad y precio con los productos agrícolas foráneos, que a partir de la vigencia del tratado de libre comercio de las Américas y sobre todo con el tratado bilateral a firmar por parte de nuestro país con los EEUU, inundaran nuestro mercado; así la propuesta anterior, la cual combina una moderna infraestructura de cultivo con equipos de medición y control económicos, representa una salida viable que permite hacerle frente a la competencia.

La hidroponía esta aprobada a través del Proyecto Regional para la Superación de la Pobreza en Colombia, desarrollado por el Programa de Naciones Unidas para el desarrollo en distintos lugares del país. La Oficina Regional de la FAO <<Organización Americana de Alimentos>> para América Latina y el Caribe ha

tomado la iniciativa, conjuntamente con la Oficina del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo en Colombia, de unir esfuerzos e iniciar una actividad integrada con la finalidad de difundir esta tecnología que ha demostrado la capacidad de cultivar productos hortícolas casi perfectos, que demuestran ser competitivos y sanos en los mercados más exclusivos, permitiendo acceder a formas de organización y de gestión (microempresas) que generan procesos culturales de promoción personal y de superación de la pobreza; este enfoque ha sido desde siempre una preocupación fundamental de nuestra nación.

Los autores.

1. HIDROPONÍA

La palabra hidroponía se deriva del griego y significa literalmente trabajo o cultivo (ponos) en agua (hydros), lo cual se podría traducir mas explícitamente como el cultivo de la planta mediante solución nutritiva la cual contiene todos los elementos necesarios para su completo desarrollo. Esta solución es generalmente ofrecida a las raíces de la planta de dos maneras: La primera es en forma directa, donde las raíces se encuentran 'al aire' y en contacto directo con la solución. La segunda forma emplea un material biológica y químicamente inerte donde se siembra o establece la planta, este material se denomina en el ámbito de los hidroponistas *SUSTRATO*, cuya función no debe ser más que la de proporcionar un soporte mecánico a la planta y apropiada retención de humedad.

Figura 1.1 Siembra con la técnica de raíz flotante



Fuente: Organización americana de alimentos (FAO)

Figura 1.2 Siembra sobre sustrato

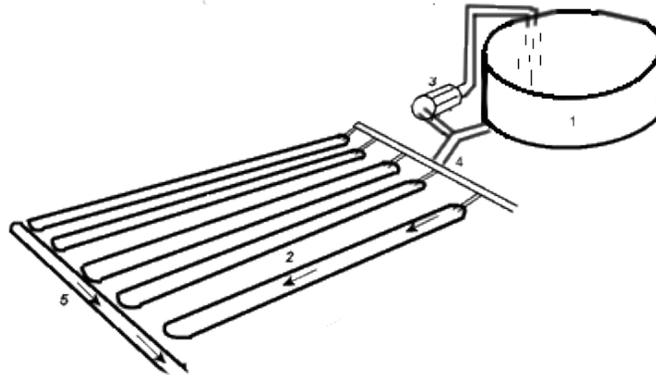


Fuente: Dr Calderon labs

El sistema de cultivo hidropónico que emplea sustrato se divide en dos grandes grupos: sistemas cerrados, que son aquellos en los que la solución nutritiva se recircula aportando de forma más o menos continua los nutrientes que la planta va consumiendo y el segundo, sistemas abiertos o a solución perdida, donde no se hace uso de los drenajes que traen los residuos de la solución proveniente de la plantación, estos residuos se denominan lixiviados.

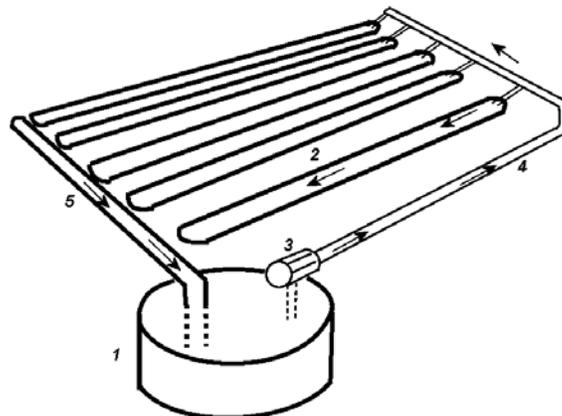
El interés del presente trabajo se centra en los cultivos hidropónicos de sistema abierto, el cual está compuesto de los siguientes elementos: 1- tanque de almacenamiento, 2 - canales de cultivo, 3 - electro-bomba, 4 - tubería de distribución y 5 – desagüe (ver figura: 1.3). Cada uno de estos elementos serán examinados detalladamente en el capítulo 2 “Sistema de nutrición”.

Figura 1.3: Sistema de nutrición a solución perdida



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Figura 1.4: Sistema de nutrición a solución recirculante.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

2. SISTEMA DE NUTRICIÓN

El sistema de nutrición está diseñado de tal forma que se realice fertirrigación, es decir que en un ciclo de riego se inyecte nutrientes. “En los cultivos Hidropónicos todos los elementos esenciales se suministran a las plantas disolviendo las sales fertilizantes en agua para obtener una solución con los nutrientes necesarios tanto para el crecimiento como en la maduración del fruto.”¹

En el presente proyecto se ha diseñado un sistema de nutrición que se ejecuta de manera automática, los principales elementos que lo componen se enseñan en la tabla 2.1.

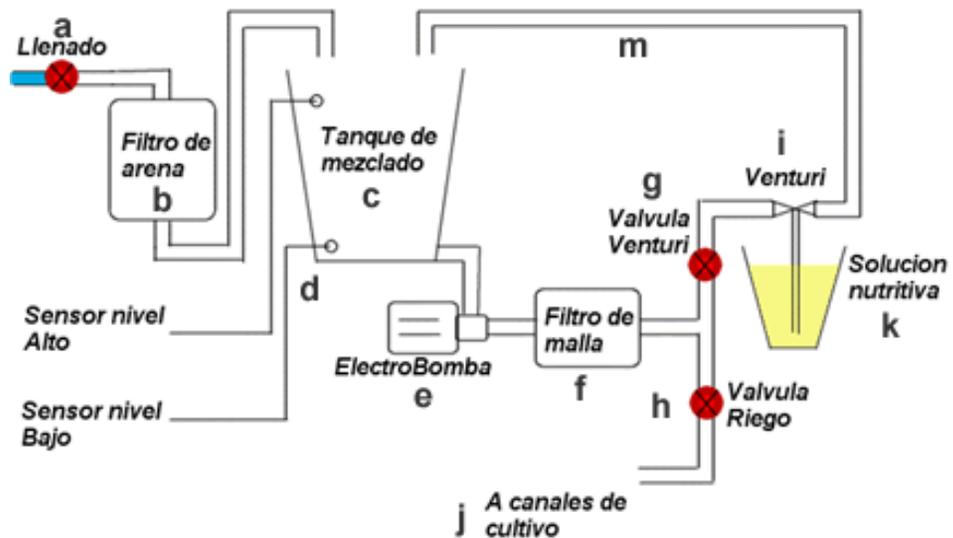
Tabla 2.1 Elementos del sistema de nutrición

a. Válvula de llenado.	h. Válvula riego.
b. Filtro de arena.	i. Inyector tipo Vénturi.
c. Tanque mezclado.	j. Manómetros.
d. Sensores de nivel alto y bajo.	k. Tanque solución nutritiva
e. Electro-bomba.	l. Canales de cultivo.
f. Filtro de malla.	m. Tuberías PVC
g. Válvula Vénturi.	n. Cinta de riego

Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

¹ LLANOS Pedro Hernán, La Solución Nutritiva, Nutrientes Comerciales, Formulas completas WALCO S.A.; Mayo 18 de 2001; Bogotá D.C., Colombia.

Figura 2.1 Descripción del sistema de nutrición



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

A continuación se detallará cada uno de los componentes del sistema de nutrición, resaltando la funcionalidad y operatividad en campo.

2.1 ELECTROVÁLVULA DE LLENADO (a)

Tiene como función controlar el paso de agua de la acometida al filtro de arena, y consecuentemente al tanque de mezclado. Se acciona con 120V-AC en el instante que el sensor de nivel bajo se encuentre inactivo, hasta que el sensor de nivel alto se active, momento en que se retira la alimentación de 120V-AC cerrándose para impedir el paso del agua. La electroválvula tiene la entrada roscada de ¼” y salida de 1/8”

Figura 2.2: Electroválvula de llenado



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

2.2 FILTRO DE ARENA (b)

El filtro es el pulmón del sistema de riego, teniendo como función impedir que partículas macroscópicas lleguen a la cinta de riego, evitando así las obstrucciones de los agujeros de goteo. El filtro esta compuesto principalmente por las siguientes partes:

1. Dispensor, dispersa la entrada de agua al filtro evitando golpear directamente la arena.
2. La flauta, cuya función es dejar pasar el agua pero no la arena.
3. La arena, que es el medio de filtrado.

A continuación se presenta la lista de los accesorios necesarios para la construcción de un filtro de arena.

Tabla 2.2 Partes del filtro de arena

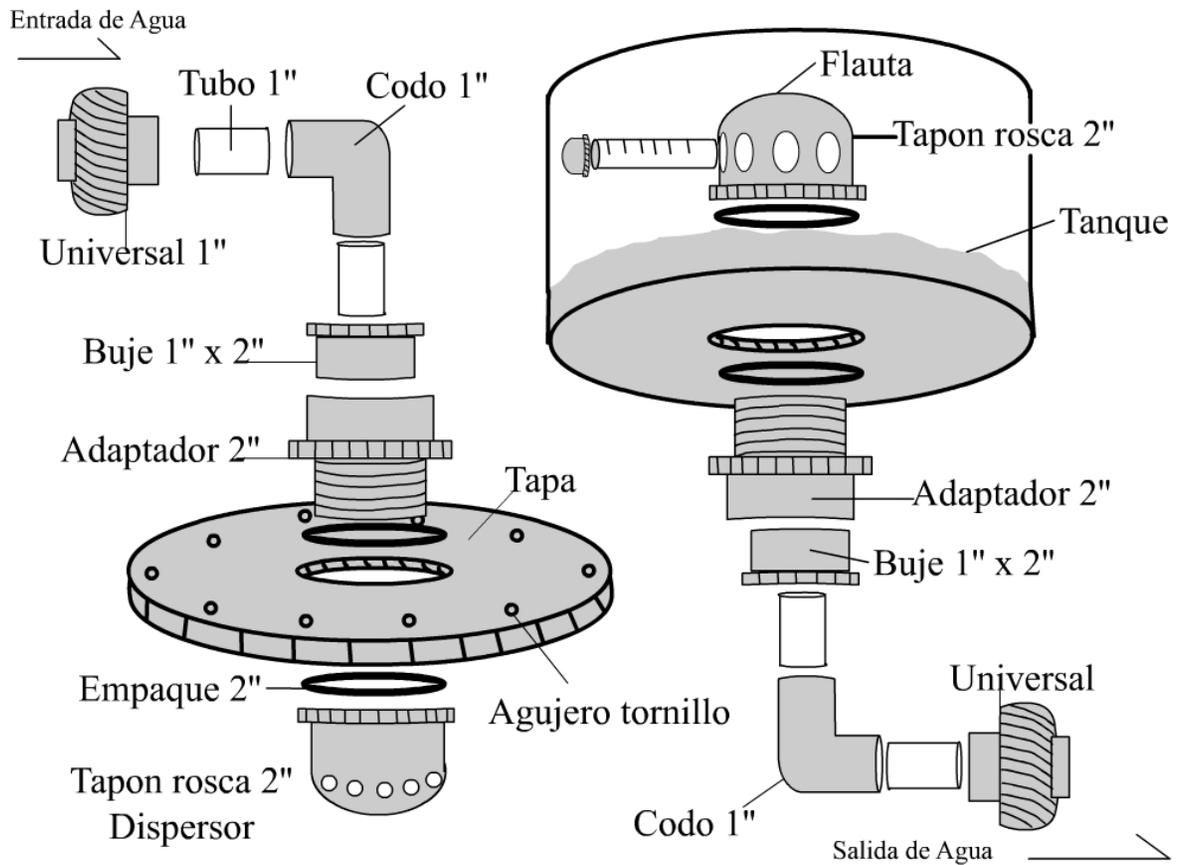
Unidades	Descripción	Tamaño en Pulgadas	PVC
2	Uniones Universal	1	PVC
2	Codo	1	PVC
2	Buje	2x1	PVC
2	Adaptador macho	2	PVC
4	Empaque	2	PVC
2	Tapón rosca	2	
1	Empaque para la tapa	1m	
1	Barril con Tapa		Plástico duro
10	Tornillos con tuerca	1 x 5/32	
1	Graba fina		
1	Graba mediana		
1	Graba grande		

Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

En la figura 2.3 se describe la manera en que se ensambla el filtro de arena, exponiendo cada uno de los componentes mencionados en la tabla 2.2.

En el diagrama que se muestra en la figura 2.3 se presenta la idea de como construir un filtro de arena de muy bajo costo cuya capacidad promedio es de 70 litros por minuto (L/min). La presión de trabajo no debe exceder las 15 libras por pulga cuadrada (psi) y ser de 10 psi de preferencia.

Figura 2.3: Partes del filtro de arena.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

Tener en cuenta que se debe realizar un lavado cuando el valor de presión salida disminuya considerablemente; el procedimiento a seguir es bastante simple, se debe conectar el flujo de agua de manera inversa al filtro, es decir, la manguera de la acometida se conecta a la salida del filtro, esto se conoce como retro-lavado.

Figura 2.4 Filtro arena parte superior



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

Figura 2.5 Filtro arena parte inferior.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

Figura 2.6 Flauta filtro de arena.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

Figura 2.7 Sierra para fabricar flauta



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

2.3 TANQUE MEZCLADO (c)

Es utilizado para almacenar y mezclar la solución nutritiva con el agua, tiene una capacidad de 500L y esta fabricado en polietileno negro con el fin evitar la formación de algas a causa de la luz solar.

Figura 2.8 Tanque de almacenamiento 500l



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

2.4 SENSORES DE NIVEL ALTO Y BAJO (d)

Son utilizados para medir la cantidad de agua que se emplea en cada riego, además de que protegen la electro-bomba en el momento en que el agua se agote, ya que esta no debe funcionar en ausencia de agua. Los sensores están fabricados con dos tornillos separados por 1cm y recubiertos con masilla epóxica, siendo este el soporte del electrodo. El principio de funcionamiento es por conductividad eléctrica (ver mayor información acerca del funcionamiento del electrodo en el capítulo 5 “Conductímetro”).

Figura 2.9: Sensores de nivel.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

2.5 ELECTRO-BOMBA (e)

Se constituye en uno de los componentes claves del sistema, la cual requiere cuidado especial no sólo en cuanto a su elección, sino también a su operación y cuidado en ausencia de fluido. Su función es impulsar, homogenizar y oxigenar la solución nutritiva antes de ser enviada a los canales de cultivo. Las características técnicas son: caudal máximo: 40 L/min, potencia: 0.5 HP. Marcha a 120V-AC.

Figura 2.10: Electro-Bomba.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

2.6 FILTRO DE MALLA (f)

Para obtener mayor pureza en el agua que va hacia la cinta de riego se construye e instala un filtro de malla con agujeros de aproximadamente 100 - 150 μm de diámetro. Este hace que pequeñas partículas no lleguen a la cinta de riego, evitando así las obstrucciones en los agujeros de goteo.

Figura 2.11 Filtro de malla.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

2.7 ELECTROVÁVULA VÉNTURI (g)

Es una válvula solenoide¹ que tiene como función controlar el paso de agua que va hacia el tubo Vénturi, es decir, mientras esta electroválvula se encuentra activa, el agua se está mezclando con solución nutritiva. Las características técnicas son:

- Alimentación 24V-AC
- Entrada y salida a una pulgada
- Control de flujo.

¹ **SOLENOIDE:** Alambre enrollado en forma de hélice.

2.8 ELECTROVÁLVULA RIEGO (h)

Seguido de la mezcla de agua con solución nutritiva, se activa la electroválvula de riego, que como su nombre lo indica, permite que el fluido se dirija directamente a las cintas de goteo realizándose el fertirriego. Las características técnicas de esta electroválvula son idénticas a la electroválvula vénturi.

Figura 2.12 Electroválvula vénturi y electroválvula riego



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

2.9 INYECTOR VÉNTURI (i)

Se utiliza para mezclar la solución nutritiva con el agua de riego.

Figura 2.13 Tubo vénturi



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

Para su correcta utilización el fabricante (Mazzei Injectors) provee datos que relacionan presión de entrada y salida con el caudal del fluido succionado y el caudal del flujo en movimiento (ver tabla 2.3).

Tabla 2.3 Relación de presión - caudal del líquido succionado

Presiones Operativas		Modelo 484 Inyector Vénturi	
Presión de entrada Kg./cm ²	Presión de salida Kg./cm ²	fluido en movimiento L/min	Líquido succionado L/min
0.35	0.00	3.8	0.88
	0.07	3.6	0.76
	0.14	3.4	0.50
	0.21	3.3	0.25
	0.28	3.2	0.13
0.7	0.00	6.8	1.20
	0.14	6.4	1.01
	0.35	5.9	0.50
	0.49	5.5	0.19
	0.56		
1.05	0.00	7.9	1.20
	0.35	7.6	0.95
	0.49	7.2	0.69
	0.70	6.8	0.32
	0.84		

Fuente: Mazzei injectors ¹

¹ <http://www.mazzei.net>, - link: Tablas de Funcionamiento

Para efectuar la puesta a punto del inyector vénturi, graduamos la presión de entrada con una válvula de cierre ubicada previamente al inyector vénturi a 1.05 psi; para la presión de salida no encontramos ninguna resistencia hidrauca, por tanto esta no supera los 0.35 Kg/cm². Con estos datos se obtiene un caudal de succión de 0.95 L/min, que para efectos práticos se puede aproximar a 1 L/min.

A continuación se describira la explicación física de por que se presenta el fenómeno de succión en el interior del inyector tipo vénturi. Un inyector de esta categoría es un dispositivo que clásicamente incorpora una simple convergencia y divergencia a través de una sección y usa los principios de Bernoulli para relacionar la velocidad con la presión del fluido.

De acuerdo con el teorema de Bernoulli, la velocidad en la parte estrecha de la canalización tiene que ser mayor que en la ancha, y por estar ambas a la misma altura, la presión en la parte ancha es mayor que en la estrecha. Por tanto, cuando un fluido incrementa su velocidad sin variar de nivel, su presión disminuye. A continuación se analiza la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad, con el fin de demostrar su funcionalidad.

$$P_1 + \frac{1}{2} \delta V_1^2 + \delta g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \delta V_2^2 + \delta g h_2 \quad (2.1) \text{ Ecuación de Bernoulli}$$

Donde: P_1 y P_2 Presiones a lado y lado del estrangulamiento.

V_1 y V_2 Velocidades a lado y lado del estrangulamiento.

h_1 y h_2	alturas a lado y lado del estrangulamiento.
δ	Densidad, considerar que es un fluido incompresible.
g	Gravedad.

“La ecuación de Bernoulli señala que la suma de la presión, (P), la energía cinética por unidad de volumen ($1/2\delta v^2$) y la energía potencial gravitacional por unidad de volumen (δgy) tiene el mismo valor en todos los puntos a lo largo de una línea de corriente”¹

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = cte \quad (2.2) \text{ Ecuación de continuidad}$$

Donde:

- A_1 =Área de sección transversal a la entrada del vénturi
- A_2 =Área de sección transversal en la garganta de succión - vénturi
- V_1 =Velocidad fluido en la sección de entrada del vénturi
- V_2 =Velocidad fluido en la sección de la garganta de succión - vénturi

“La ecuación de continuidad expresa que el producto del área y de la velocidad del fluido en todos los puntos a lo largo del tubo es una constante en el caso de un fluido incompresible”².

¹ RAYMOND A. Serway, James Madison University; McGraw – Hill Tomo I, cuarta edición Pág. 434

² Ibid, p 433.

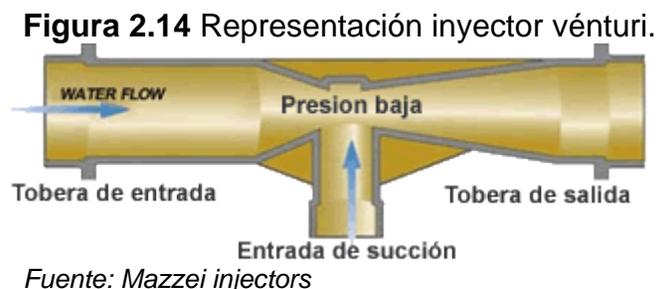
En el inyector vénturi la altura en donde se miden los valores de presión, es decir antes y después del estrangulamiento, es la misma, por tanto, h_1 y h_2 son las mismas $h_1 = h_2 = h$; por tanto la ecuación 2.1 se transforma en:

$$P_1 + \frac{1}{2}\delta V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\delta V_2^2 \quad (2.3)$$

Expresada de una forma mas general se tiene:

$$P + \frac{1}{2}\delta V^2 = cte \quad (2.4)$$

De la ecuación de continuidad (2.2) se deduce que si el área disminuye la velocidad aumenta, por tanto si llevamos esta conclusión a la ecuación 2.4 tendremos que si el área disminuye la presión disminuye, ya que la velocidad aumenta, y esta expresión se mantenga constante.



Lo que nos lleva a concluir que al producirse una reducción gradual, pero importante, del diámetro desde la tobera de entrada hasta la garganta de succión, se produce a su vez una disminución brusca de la presión relativa en la última. Si el caudal que circula por el vénturi es tal que la presión relativa en la garganta es

mucho menor que la presión atmosférica, y en la misma se conecta una conducción a un depósito “abierto” con la solución fertilizante, se producirá una succión generada por la diferencia de presión entre presión atmosférica y la presión de la garganta de succión.

2.10 TANQUE SOLUCIÓN NUTRITIVA

Tiene como funcionalidad almacenar la solución nutritiva, con una capacidad de 20 litros. En la sección 2.8, “Inyector Vénturi”, se determinó que el caudal graduado de succión es de 1 L/min, por tanto, se fija 1 minuto de apertura a la electroválvula Vénturi, y realizando 3 riegos diarios, la cantidad de solución nutritiva desalojada de este tanque por día es de 3 litros, así, el tanque puede almacenar solución nutritiva por un periodo no mayor a 6 días.

El tanque es transparente con el fin de verificar fácilmente el consumo diario de la solución, sin embargo, este debe ser recubierto con una bolsa negra para evitar el crecimiento de algas debido a la presencia de luz solar.

Figura 2.15 Tanque solución nutritiva.

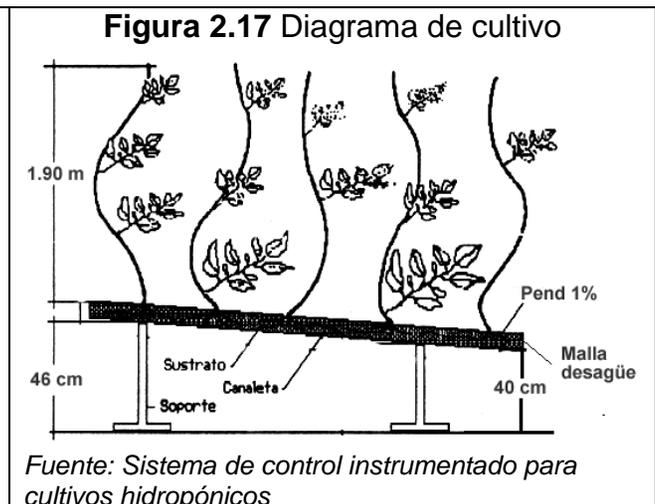


Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

2.11 CANALES DE CULTIVO

Retienen el sustrato donde se siembran las plantas, y donde las raíces entran en contacto con la solución nutritiva; están fabricados en madera con dimensiones de 6.0m de largo, 0.3m de ancho 0.2m de alto, recubiertos internamente con polietileno con el fin de evitar que la madera se pudra rápidamente.

Los canales están instalados con una pendiente del 1% lo que quiere decir que por cada metro de longitud, se incrementa 1 cm la diferencia de altura de los extremos de los canales. En el extremo de menor altura se instala una rejilla de malla plástica con agujeros de 1cm permitiendo el drenaje de la solución, esto con el objeto de evitar la excesiva acumulación de solución que causa salinización en las raíces llegando hasta a podrir las mismas (ver figuras 2.16 y 2.17).



2.12 SUSTRATO

Como sustrato se utilizó la cascarilla de arroz semi-quemada ya utilizada con anterioridad en un primer cultivo. Al sustrato antiguo se le realizó un lavado con agua hasta que la conductividad eléctrica del drenaje descendió hasta 0.1 mS/cm. Se le mezcló un 20 % de cascarilla nueva y con esto se estableció una capa de 8 cm. de profundidad en los canales de cultivo.

Figura 2.18 Sustrato – Cascarilla de arroz.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

2.13 Cinta de riego: Tiene como función distribuir el agua de riego de una manera homogénea sobre los canales de cultivo. “Para el presente proyecto se utilizo cintas de la marca “*Chapin watermatics*” serie 500, de 16 mm de diámetro interno; con separación entre agujeros de 10 cm y un caudal por metro de 7.44 L/h/m a una presión constante de 10 psi”¹

Para el buen funcionamiento de las cintas se hacen las siguientes recomendaciones:

¹ CERVIÑO Pablo; Tenso Tape, tensotape@tensolite.com.ar; Argentina; 2004

1. Para evitar el crecimiento de algas al interior de la cinta o en la tubería de distribución, se adiciona ácido fosfórico al 55% (H_3PO_4), dos riegos por semana en una concentración de 1cm^3 por cada litro de agua, es decir si se tiene un riego de 50L se adicionará 50cm^3 de H_3PO_4
2. Colocar siempre la cinta con **los goteros hacia arriba**, esto con el fin de evitar que los agujeros de la cinta se tapen con partículas decantadas en el interior de las cintas.
3. “Emplearse filtros adecuados según la calidad del agua. Se aconseja utilizar un grado de filtración de 125 - 115 micras”¹.

Figura 2.19 Cintas de riego



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Figura 2.20 Diagrama cinta de riego



Fuente: Cortesía Copersa-“Tiger tape”

2.14 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE NUTRICIÓN

Para poner a prueba el sistema de nutrición se construyó una unidad de cultivo hidropónico de 81 m^2 , altura: 3.2 m, fabricado con guadua, madera, plástico, malla

¹ <http://www.ediho.es/copersa/malla.html>

anti-insectos, alambre, tuercas y tornillos. La unidad se encuentra ubicada en la parcelación La Fortaleza kilómetro 7 vía Cali desde Popayán, en la que se cultivó 150 plantas de tomate variedad Rocío (ver anexo A); espacio destinado para la evaluación del sistema de nutrición. (ver figura 2.21)

Figura 2.21 Unidad de cultivo hidropónico



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Figura 2.22 Panorámica del sistema de nutrición



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Las ventajas de contar con el sistema automático de nutrición propuesto identificadas en la unidad de cultivo hidropónico son las siguientes:

- El cultivador puede dedicar mayor tiempo a labores relacionadas con el cuidado del cultivo tales como: podas, fumigación y recolección de frutos.
- La dosificación tanto de agua como nutrientes en diversos ciclos de riego permite un mejor aprovechamiento de estos y por ende el desarrollo acelerado de la planta; por otra parte, se previene la formación de encharcamientos desfavorables para el sistema radicular, que además sirve de precursor de plagas y enfermedades tales como la gota (*Phytophthora infestans Mill*).
- El cultivar en un sustrato inerte presenta ventajas ecológicas; aprovechamiento de un residuo como lo es la cascarilla de arroz, evita la erosión del subsuelo y minimización del consumo de agua
- Disminución del tiempo por ciclo de cultivo debido a que no es necesario grandes procedimientos de resiembra, que para el caso de tomate en cultivos tradicionales demanda alrededor de 20 a 30 días, en donde se efectúan las siguientes actividades: extracción de raíces, desyerbada, esterilización, regeneración del suelo y por último ensurcamiento. En el

caso del sistema propuesto estas actividades se realizan en un tiempo aproximado de 2 días, ya que solo se efectúa la extracción de raíz y un procedimiento rápido de esterilización.

- Como consecuencia de las ventajas identificadas en el sistema automático de nutrición se tiene el mejoramiento en tamaño y calidad de frutos que repercute en una mayor utilidad y rentabilidad del cultivo.
- Es verdad que en el mundo existen diversas propuestas de sistema automático para invernaderos que en nuestra sociedad han ganado la fama de ser altamente costosos, sin embargo se ha logrado implementar un sistema adaptado a los recursos económicos de la región ya que el sistema sería fabricado con un alto valor agregado en software y un bajo costo de producción. Evita una serie de aranceles de importación y permite la creación de microempresa que ayudaría a mejorar la tasa de desempleo en el país.

3. SOLUCIÓN NUTRITIVA

“El rendimiento del cultivo de tomate, tanto a nivel de campo como de invernadero depende de muchos factores en especial, de la nutrición mineral de las plantas. Desde hace muchos años se habla de los requerimientos nutricionales de las plantas sin que hasta el presente nadie haya dado una definición concreta de este término. Estos requerimientos pueden ser definidos en términos de lo que una planta necesita para completar su ciclo de vida y producir una determinada cosecha o también como lo que una planta "come" durante un tiempo definido o lo que las plantas comen en la unidad de tiempo por unidad de superficie etc. Otros encuentran apropiado asimilar los requerimientos de las plantas con los volúmenes exportados de nutrientes por los productos de las cosechas.”¹

3.1 NUTRIFEED ESTÁNDAR

“Es una línea de fertilizantes sólidos diseñada con base en los estados de desarrollo de un cultivo, que se caracteriza por tener una composición

¹ CALDERÓN Sáenz, Felipe; REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE UN CULTIVO DE TOMATE BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN LA SABANA DE BOGOTA Dr. Calderón Laboratorios Ltda.; Agosto 15 de 2002 Bogotá D.C., Colombia S.A.

completa y balanceada de nutrientes en altas concentraciones, una alta solubilidad, reacción ácida y ausencia de cloro y sodio”¹.

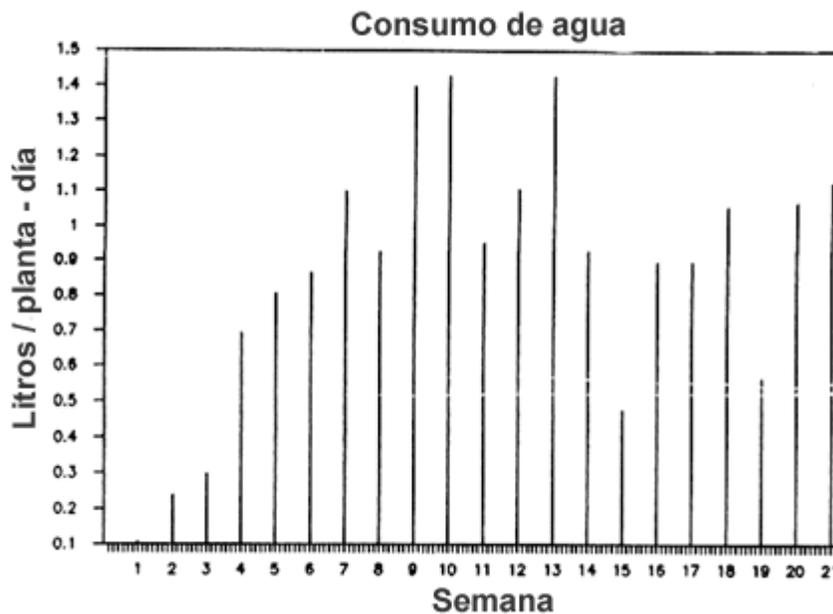
Gracias a su alta solubilidad y su elevada concentración, Nutrifeed es recomendada para sistemas de nutrición que utilicen fertirrigación; por esta razón, se decide trabajar con este tipo fertilizante. La solución escogida, entre el abanico de posibilidades que esta presenta, es la estándar ya que además de cumplir con gran parte de los requisitos nutricionales del tomate, se adecua a cualquier época del cultivo.

La figura 3.1 indica el consumo de agua a lo largo del cultivo de tomate. Es notable la correspondencia entre la poda y la merma en el consumo de agua; inicialmente va en aumento, esto a consecuencia de que la planta esta en pleno crecimiento, sin embargo, en la semana 10, época en que se realiza la primera poda de hojas bajas es decir las hojas más antiguas, el consumo se reduce notoriamente; atribuido a que con el tiempo las hojas reducen el área de exposición a la luz solar haciendo que disminuya significativamente su actividad fotosintética, de igual forma se repite en la semana 13, 15, 18. Por último la planta al cumplir con la estatura adecuada que es de aproximadamente 1.80m se procede a realizar el descope, esta poda es con el fin de detener el crecimiento de la planta.

¹ LLANOS Pedro Hernán, La Solución Nutritiva, Nutrientes Comerciales, Formulas completas WALCO S.A.; Mayo 18 de 2001; Bogotá D.C., Colombia.

Es notable que el suministro promedio de agua sea de 1 litro por planta por día, lo que da como consecuencia que se aplique 1 gramo de nutrifeed por planta por día.

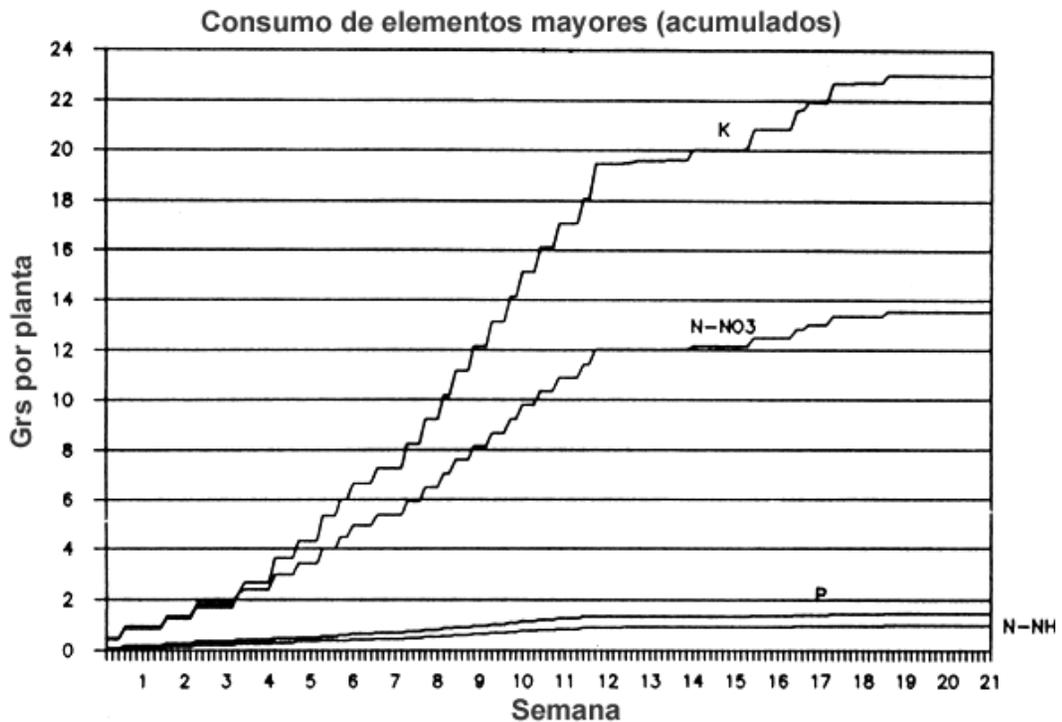
Figura 3.1: Consumo de agua por planta por día



Fuente: Dr. Calderón Laboratorios Ltda.

La grafica 3.2 muestra el consumo de elementos mayores NPK (Nitrógeno – Fósforo – Potasio) nótese que en el periodo de crecimiento de la planta que va hasta la semana 12, el nitrógeno es consumido en gran proporción ya que los tallos y la hojas principalmente se componen de este elemento; con respecto al potasio, es un elemento consumido constantemente ya que es el principal componentes de los frutos. El fósforo interviene principalmente en la generación de raíces, por tal motivo es consumido al comienzo del cultivo.

Figura 3.2: Consumo de elementos mayores por planta



Fuente: Dr. Calderón Laboratorios Ltda

La tabla 3.1 muestra todos los elementos que son indispensables para la planta, encontrándose resaltados los que la solución nutritiva Nutrifeed Standard presenta deficiencia en comparación con la tabla nutricional recomendada por la FAO (Organización Americana de Alimentos) especializada para el tomate, por tanto para suplir las deficiencias, suministramos la cantidad de elementos restantes utilizando otras fuentes de nutrición. Recordemos que la planta consume un promedio de 1 litro de agua por día y si agregamos 1 gramo de nutrifeed por planta, la concentración es

$$\text{de } 1 \frac{\text{gr}(\text{nutrifeed})}{\text{L } H_2O}$$

Tabla 3.1: Relación nutricional entre el fertilizante nutrifeed estándar y la recomendada por la Organización Americana de Alimentos (FAO)

Composición Compuesto	%	Elemento	%	(ppm)	FAO (1990)
Nitrógeno <u>Amoniacal</u>	8	N	8	80	150-225
Nitrógeno <u>Nítrico</u>	9	N	9	90	
				total N = 170	
P ₂ O ₅	17	P	7.42	74.2	30-45
K ₂ O	17	K	14.16	141.6	300-500
MgO	0.4	Mg	0.24	2.4	40-50
Ca	X	X	X	X	150-300
S	0.4	S	0.4	4	--
Fe	0.04	Fe	0.04	0.4	3-6
Mn	0.08	Mn	0.08	0.8	0.5-1
B	0.05	B	0.05	0.5	0-0.4
Cu	0.07	Cu	0.07	0.7	0.1
Zn	0.03	Zn	0.03	0.3	0.1
Mo	0.01	Mo	0.01	0.1	0.05

Fuente: Coljap S.A, FAO, Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos.

A continuación se resuelve para cada uno de los elementos en deficiencia, indicando en la tabla 3.2 los nuevos ajustes para cumplir con las recomendaciones hechas por la FAO.

Para el calcio (Ca) que es el caso más crítico por su ausencia, se le suministra a las plantas Nitrato de Calcio. Según la FAO el calcio debe estar al menos en 150ppm, lo que significa que se debe agregar una concentración de nitrato de calcio de 0.84gr/litro, resultado obtenido gracias a una relación

lineal elaborada desde la tabla 3.3; además hay que tener en cuenta que no solo se realizará aporte en Ca sino también en nitrógeno(N).

En la tabla 3.3 aparece un listado de compuestos utilizados como fuente de elementos de nutrición; para el caso del nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ se determina que con una dosis de 1gr/litro habrá un aporte de 185ppm de calcio y 130 ppm de nitrógeno.

$$\begin{aligned} 1.04\text{gr/L}_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2} &\rightarrow 185\text{ppm}_{\text{Ca}} \\ \dots\text{gr/L}_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2} &\rightarrow 150\text{ppm}_{\text{Ca}} \end{aligned}$$

Para el potasio (K) se suministra sulfato de potasio (K_2SO_4); según la tabla 3.1 nutrifeed aporta 140ppm de K y en comparación con la recomendación de la FAO que es de al menos 300ppm, lo que da como consecuencia una deficiencia de 160ppm. Según la tabla 3.5 el 50% de sulfato de potasio (K_2SO_4) es de óxido de potasio K_2O y para obtener el aporte exacto de potasio (K) en lugar de K_2O se multiplica por un factor de 0.83 (ver tabla 4.4), este es un dato experimental que depende tanto de la composición química de la sal como de su solubilidad, ya que este factor siempre va ser algo menor al que se podría calcular estiquiométricamente.

Para el magnesio (Mg) la fuente a utilizar es el sulfato de magnesio (MgSO_4), para este elemento, Nutrifeed Estándar tan solo aporta 2.4 ppm y se recomienda entre 40 y 50ppm; por lo tanto, se ajusta la solución a un valor entre este rango. Según la tabla 3.3 el sulfato de magnesio (MgSO_4) aporta 24ppm de magnesio (Mg) por tanto:

$$0.246\text{gr/ltr MgSO}_4 \rightarrow 24\text{ppm de Mg}$$

$$X \rightarrow 40\text{ppm de Mg}$$

$$X = 0.410 \text{ gr de MgSO}_4 / \text{ litro MgSO}_4$$

De igual manera se debe registrar el incremento en azufre (S), cálculo que se realiza a través de la siguiente relación lineal:

$$0.246\text{gr/L MgSO}_4 \rightarrow 32 \text{ ppm de S}$$

$$0.307\text{gr/L MgSO}_4 \rightarrow X$$

$$X = 40 \text{ ppm de S}$$

Tabla 3.2 Ajustes al fertilizante Nutrifeed standar

Composición Compuesto	%	Elemento	%	(ppm)	FAO (1990)
Nitrógeno <u>Amoniacal</u>	8	N	8	80	150-225
Nitrógeno <u>Nítrico</u>	9	N	9	90	
Nitrado de <u>Calcio</u>				130 total N = 300	
P ₂ O ₅	17	P	7.42	74.2	30-45
K ₂ O K ₂ SO ₄	17	K	14.16	141.6 160 Total K: 301.4	300-500
MgO MgSO ₄	0.4	Mg	0.24	2.4 40 Total Mg: 42.4	40-50
Ca	X	X	X	150	150-300
S K ₂ SO ₄ MgSO	0.4	S	0.4	4 92 40 Total: 136	-- (80)
Fe	0.04	Fe	0.04	0.4	3-6
Mn	0.08	Mn	0.08	0.8	0.5-1
B	0.05	B	0.05	0.5	0-0.4
Cu	0.07	Cu	0.07	0.7	0.1

Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Tabla 3.3 Equivalencia de una solución nutritiva hecha con base en sales simples

Sal simple	Estado	Elementos		gr/litro	Aportes ppm	
Ca(NO ₃) ₂	l/s	Ca	N	1.040	Ca 185	N 130
NH ₄ H ₂ PO ₄	s	P	N	0.170	P 44	N 20
KNO ₃	s	K	N	0.550	K 208	N 70
Mg(NO ₃) ₂	l	Mg	N	0.460	Mg 24	N 28
FeCit	l/s	Fe		0.100	Fe 5.6	
MgSO ₄	s	S	Mg	0.246	S 32	Mg 24
MnSO ₄	s	Mn	S	0.001	Mn 0.26	
CuSO ₄	s	Cu	S	0.00024	Cu 0.06	
ZnSO ₄	s	Zn	S	0.0006	Zn 0.13	
H ₃ BO ₄	s	B		0.0031	B 0.52	
Mo-A	s	Mo	N	0.00001	Mo 0.006	
CoSO ₄	s	Co	S	0.00001	Co 0.002	
KCl	s	Cl	K	0.00187	Cl 0.9	

Fuente: Organización Americana de Alimentos

Tabla 3.4 Factores de conversión empleados en la formulación de solución nutritiva

Elemento	x	Factor	Igual	Elemento	x	Factor	Igual
P ₂ O ₅	x	0.44	P	P	x	2.29	P ₂ O ₅
K ₂ O	x	0.83	K	K	x	1.2	K ₂ O
CaO	x	0.71	Ca	Ca	x	1.4	CaO
MgO	x	0.6	Mg	Mg	x	1.66	MgO
SO ₃	x	0.4	S	S	x	2.5	SO ₃
FeO	x	0.78	Fe	Fe	x	1.29	FeO
MnO	x	0.77	Mn	Mn	x	1.29	MnO
CuO	x	0.79	Cu	Cu	x	1.25	CuO
B ₂ O ₃	x	0.31	B	B	x	3.22	B ₂ O ₃
ZnO	x	0.79	Zn	Zn	x	1.25	ZnO

Fuente: Organización Americana de Alimentos

Tabla 3.5 Fuentes Utilizadas para elaborar soluciones nutritivas

ELEMENTO	FUENTE	FORMULA	COMPOSICION	OBSERVACIONES
Nitrógeno	Amoníaco	NH_4OH	N-NH ₄ : 109 gr/L	Una sal altamente soluble y pura Altamente soluble muy pura
	Nitrato de Calcio	$Ca(NO_3)_2$ HNO_3	N-NO ₃ : 12% Ca: 18%	
	Acido Nítrico Nitrato de Amoníaco	NH_4NO_3	N-NO ₃ : 160 gr/L N-NO ₃ : 13-15 % N-NH ₄ : 13-15 % N-NO ₃ : 13% K: 39% N-Org: 46% C-CO ₂ : 20%	
	Nitrato de Potasio Urea	KNO_3 $CO(NH_2)_2$		
Fósforo	Fosfato Monoamónico	$NH_4H_2PO_4$	N-NH ₄ : 12% P ₂ O ₅ : 60%	
	Fosfato diamónico	$(NH_4)_2HPO_4$	N-NH ₄ : 21% P ₂ O ₅ : 53%	
	Fosfato Monopotásico	KH_2PO_4	P ₂ O ₅ : 55% K ₂ O: 30%	Muy bueno para corregir las deficiencias de P y K
	Acido Fosfórico	H_3PO_4	P ₂ O ₅ 1040 gr/L.	
Potasio	Cloruro de Potasio	KCl	K ₂ O :60% Cl-Cl: 48%	Deberá utilizarse solamente en caso de deficiencias en K, y cuando no este presente el cloruro sódico en la solución Tiene una solubilidad muy baja, pero se disuelve en agua caliente
	Nitrato de Potasio	KNO_3	K ₂ O :46% N-NO ₃ : 13%	
	Sulfato de Potasio	K_2SO_4	K ₂ O: 50% S-SO ₄ : 24%	
	Potasa Cáustica	KOH	K: 60%	
Calcio	Sulfato de Calcio	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$		Muy insoluble, no puede ser utilizado en las soluciones nutritivas.
	Nitrato de Calcio	$Ca(NO_3)_2$		
Magnesio	Nitrato de Magnesio	$Mg(NO_3)_2$	Mg: 53g/L N-NO ₃ : 60g/L	Excelente, barato, altamente soluble, sal pura
	Sulfato de Magnesio	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Mg: 10% S-SO ₄ : 13%	
Azufre	Sulfato de Amonio	$(NH_4)_2SO_4$		

Continuación tabla 3.5.				
Hierro	Quelato de Hierro	Terasol-Fe	Fe: 20 %	La mejor fuente de Hierro
Manganeso	Sulfato de Manganeso	$MnSO_4 \cdot 4H_2O$	Mn: 28%	
Cobre	Sulfato de Cobre Nitrato de Cobre	$CoSO_4 \cdot 5H_2O$ $Cu(NO_3)_2$	Cu: 25% Cu: 300 grs/L	
Zinc	Sulfato de Zinc	$ZnSO_4$	Zn: 22%	
Boro	Acido bórico	H_3BO_3	B: 16.4%	La mejor fuente de boro, se disuelve en agua caliente
Molibdeno	Molibdato de Amonio	$(NH_4)_6Mo_7O_{24}$	Mo: 60%	
Cobalto	Sulfato de Cobalto	$CoSO_4 \cdot 5H_2O$	Co: 20%	
Sílice	Silicato de Sodio	Na_2SiO_3	Si: 30% Na: 25%	

Fuente: Organización Americana de Alimentos

Para efectuar el riego se utilizó el “sistema de nutrición” diseñado en el presente proyecto, con una regularidad de tres veces por día. Los riegos se efectuaron con un caudal de 7.0 litro por minuto durante un lapso de aproximadamente 15 minutos. Las horas en las cuales se aplicaron los riegos fueron 8:00 AM, 12:00 AM y 3:30 PM.

La tabla 3.6 agrupa los datos más relevantes de la unidad de cultivo hidropónico.

Tabla 3.6 Datos del cultivo

Edad del cultivo (Días de transplante)	140 Días
Número de plantas	149
Plantas con virosis por semilla	3
Agua total consumida	21000 Lts.
Área total de siembra mt2.	40 mt2.
Producción total de tomate estimada	1015 Kgs

Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

3.2 LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA EN LA SOLUCION NUTRITIVA

La conductividad eléctrica es un indicador de la calidad del agua empleada para la preparación de la solución nutritiva, además de permitir estimar la concentración de nutrientes que esta posee.

Es igualmente importante la determinación de altos niveles de salinización en el sustrato, en donde dada la acumulación excesiva de sales la conductividad eléctrica de los lixiviados tiende a ser mayor que la de la solución nutritiva con que se esta regando. En el unidad de cultivo se permitió intencionalmente un incremento por encima de 8 mS/cm¹ del agua de riego, al proporcionar todos los nutrientes de un día, en el primer riego de la mañana, poco tiempo después se observó un amarillamiento inicial y secado posterior de las hojas de la base de la planta que continuaba hacia arriba, así como la pérdida de coloración de las hojas nuevas; típicos síntomas de deficiencia en la absorción de nutrientes.

“Se debe cuidar no sobrepasar el límite superior de 3.0 mS/cm en las soluciones nutritivas, ya que debido a una mayor concentración de elementos minerales disueltos, la absorción de agua y por ende la de nutrientes disminuye, afectando así el crecimiento del cultivo.”²

Otra utilidad del conductímetro en la unidad de cultivo hidropónico, es la adecuación del sustrato a emplear en un nuevo ciclo de cultivo, ya que se debe realizar un lavado del mismo hasta que la conductividad eléctrica del drenaje descienda hasta 0.1 mS/cm.

¹ MiliSimens por centímetro, Unidad de Conductividad Eléctrica.

² CARRASCO Gilda; La empresa hidropónica de mediana escala; Editorial Universidad de Talca; Talca Chile; Pág. 37.

3.3 EL pH EN LA SOLUCION NUTRITIVA

Otro parámetro que se debe controlar para mantener disponibles los elementos nutritivos en la solución nutritiva es el pH, o sea el grado de acidez o alcalinidad de la solución. El rango de pH en el cual los nutrientes se encuentran disponibles ocurre entre 5,5 y 7.

Las correcciones de pH generalmente se realizan para acidificar la solución al rango óptimo anteriormente señalado. Para disminuir el pH a un valor mínimo de 5,5, se agrega una solución ácida, la cual se compone de una mezcla de ácido nítrico (HNO_3) y ácido ortofosfórico (H_3PO_4) en una proporción de 3:1, preparada al 5%. Es decir, al preparar 10 litros de solución con la mezcla indicada, se agrega a 9.500 cc de agua contenidos en un recipiente, 380 cc de ácido nítrico (HNO_3) y 120 cc de ácido ortofosfórico (H_3PO_4). Si no se dispusiera de alguno de estos dos ácidos, se sugiere preparar la solución con el ácido existente, agregando 500 ml de ácido nítrico (HNO_3) o ácido ortofosfórico (H_3PO_4) a 9.500 cc de agua.

Si se requiere alcalinizar la solución nutritiva, o sea aumentar el pH hasta el rango óptimo, se deberá preparar una solución básica al 10% de hidróxido de potasio (KOH) para luego aplicar un pequeño volumen a la solución. Los gránulos de este compuesto se agregan a 500 cc de agua agitando

constantemente hasta disolver la sal, luego se rellena con el agua restante hasta alcanzar 1 litro de solución.

El sustrato requiere de un monitoreo frecuente del nivel de pH en los drenajes del cultivo, ya que se presentan incrementos abruptos en determinadas edades del cultivo, que afectan directamente al sistema radicular conduciendo incluso a la muerte de la planta.

“En muchos casos, en los cultivos de tomate se ha reportado muerte del sistema radicular en época de fructificación. Esta muerte coincide aproximadamente con el inicio de la recolección de frutos. Esta situación puede estar asociada con la disminución observada en el pH de la rizósfera¹ causada a su vez por el efecto hormonal que desencadena el proceso de maduración. A nivel radicular se presenta una mayor "acidez" por el catión Potasio y las raíces pueden tornarse altamente sensibles a la presencia del ión Amonio, el cual también es absorbido con avidéz causando posibles efectos fitotóxicos en el sistema radicular”²

¹ Área ocupada por las raíces de la planta.

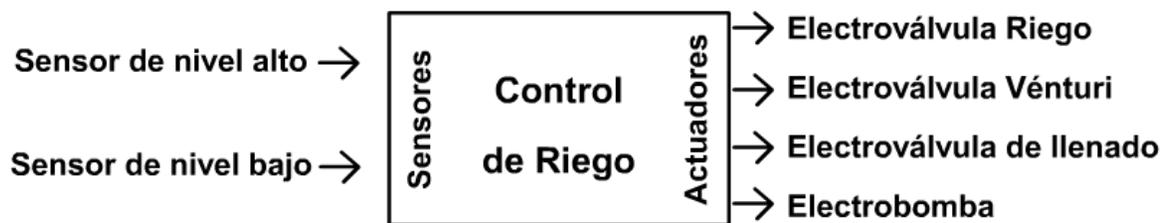
² CALDERÓN Sáenz, Felipe; REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE UN CULTIVO DE TOMATE BAJO CONDICIONES DEINVERNADERO EN LA SABANA DE BOGOTA Dr. Calderón Laboratorios Ltda.; Agosto 15 de 2002 Bogotá D.C., Colombia S.A.

4. CONTROLADOR DE RIEGO

Es el componente electrónico encargado de coordinar las acciones de las electroválvulas y la electrobomba que son los principales elementos que permiten efectuar el riego. En él se pueden programar hasta seis riegos por día, cada uno de los cuales inicia con el llenado del tanque colector, prosigue con la adición de solución nutritiva y finaliza con la distribución de esta a los canales de cultivo.

Las entrada de un controlador son las señales medidas por los sensores en el proceso y la acción correctiva son las señales de salida entregadas a los actuadores; en este caso se emplean sensores de conductividad eléctrica para determinar el nivel de agua en el tanque colector y como actuadores aparecen las electroválvulas y la electro-bomba impulsora del agua de riego (ver figura 4.1)

Figura 4.1 Diagrama controlador de riego

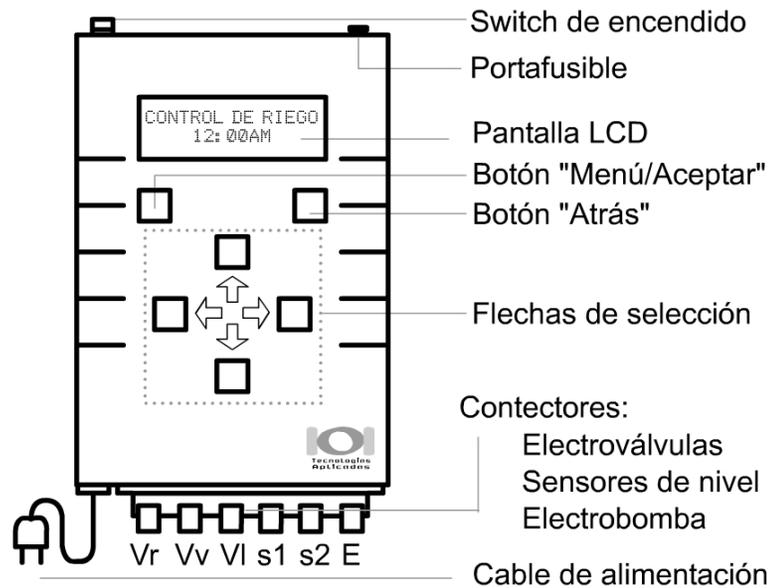


Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

El funcionamiento del controlador esta supeditado a los siguientes parámetros de configuración: hora actual, horas de riego, potencia de la electro-bomba, hora de llenado de tanque y tiempos de riego.

Los anteriores parámetros son ingresados al controlador (ver figura 4.2) por medio de una interfase de usuario basada en un teclado de seis pulsadores y una pantalla LCD de 2 líneas por 16 caracteres; además el controlador esta dotado con un panel de conexión para los sensores y actuadores, rotulados de la siguiente manera: **Vr** → Electroválvula riego, **Vv** → Electroválvula vénturi, **VI** → Electroválvula de llenado, **s1** → Sensor nivel alto, **s2** → Sensor nivel bajo, **E** → Electro-Bomba

Figura 4.2 Interfaz de usuario del controlador

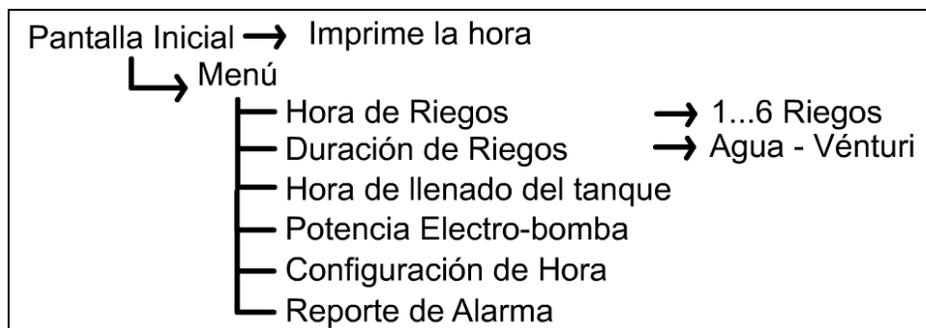


Fuente: Sistema de control para cultivos hidropónicos.

La electroválvula riego (Vr), tiene como finalidad controlar el paso de agua que va hacia los canales de cultivo; la electroválvula vénturi (Vv), controla el paso de agua hacia el sistema vénturi; la electroválvula de llenado (VI), controla el paso de agua hacia el tanque de almacenamiento; los sensores nivel alto (s1) y bajo (s2), detectan las condiciones de llenado del tanque de almacenamiento y por último la electro-bomba, es el elemento encargado de impulsar el agua del tanque de almacenamiento a las cintas de riego (ver capítulo 2 “SISTEMA DE NUTRICIÓN”).

Para la respectiva configuración del controlador se estructura un menú desplegable, en el que a través de las flechas de selección se ingresan los parámetros antes mencionados (Ver Figura 4.3)

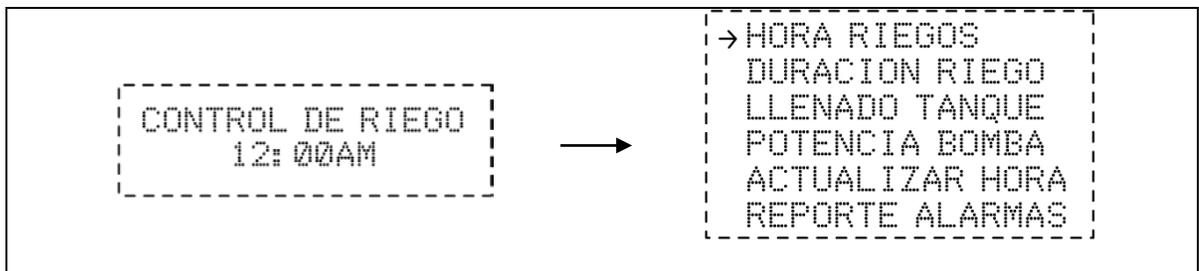
Figura 4.3 Estructura del menú



Fuente: Sistema de control para cultivos hidropónicos.

En la pantalla principal continuamente se esta imprimiendo el mensaje “CONTROLADOR DE RIEGO” y la hora actual; si se desea entrar modificar la programación se debe pulsar la tecla “Menú/Aceptar” y escoger el parámetro a configurar. (ver figura 4.4)

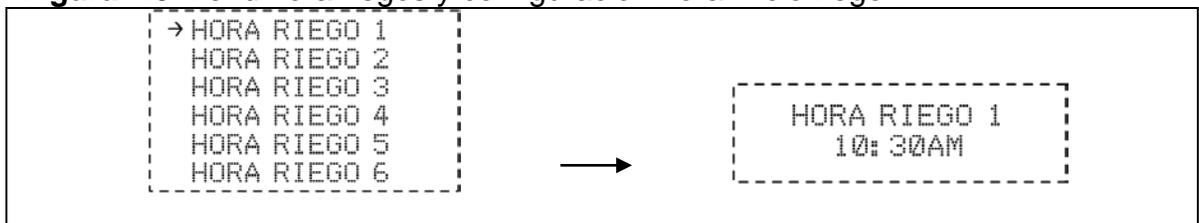
Figura 4.4 Pantalla principal y menú desplegable



Fuente: sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

A continuación se describe el funcionamiento de cada uno de los parámetros ajustables en el sistema de control. Al elegir la opción “**Hora riego**” aparece un menú indicando los seis posible ciclos de riego a configurar, en donde se le debe indica al controlador la hora exacta en la que se debe ejecutar cada de estos; si en un caso dado no se desea programar alguno de estos, se le debe ajustar con la hora 00:00AM.

Figura 4.5 Menú hora riegos y configuración hora inicio riego 1



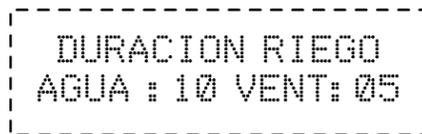
Fuente: sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Un parámetro igualmente importante es la “**Duración riego**”; en esta se ingresa el tiempo de duración de activación de la electroválvula de véntruri (Vv) permitiendo el paso del agua hacia el tubo véntruri para la inyección de solución nutritiva y el tiempo máximo de activación de la electroválvula de riego (Vr), es decir el tiempo estimado de duración del suministro de agua hacia los canales de cultivo.

El tiempo de activación de la electroválvula de riego es un parámetro utilizado por seguridad ya que normalmente el encargado de informar cuando se finaliza un ciclo de riego es el sensor de nivel bajo (s2), sin embargo, si por algún motivo este no se llegase a activar, sobrepasando el tiempo estimado de riego, el controlador esta en capacidad de detener el funcionamiento del sistema y generar una alarma que posteriormente se registra en el reporte de alarmas.

Entre las posibles causas que impiden la activación del sensor de nivel bajo (S2), están los taponamientos de las cintas y filtros o la disfunción en sensores.

Figura 4.6 Duración del riego

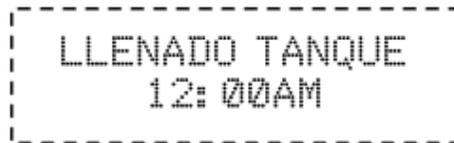


DURACION RIEGO
AGUA : 10 VENT: 05

Fuente: sistema instrumentado para cultivos hidropónicos

La opción llenado tanque le permite al usuario llenar el tanque colector a cualquier hora del día siendo esto de gran utilidad en lugares donde el suministro de agua es interrumpido constantemente.

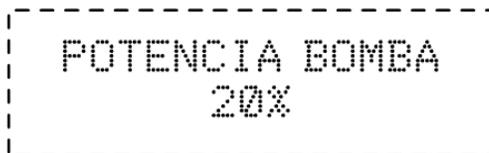
Figura 4.7 Hora de llenado de tanque



Fuente: sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Para regular la presión ejercida en las cintas de riego, existe un módulo de control denominado “**potencia bomba**“, el cual gradúa dicho parámetro en una escala porcentual de 0 a 100; siendo además muy conveniente para efectos de ahorro de energía.

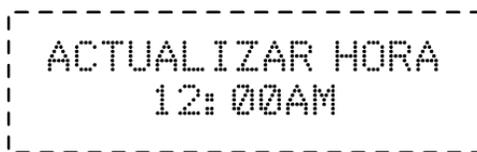
Figura 4.8 Potencia Electrobomba.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

La opción “**Actualizar hora**” sirve para actualizar el sistema de reloj interno del controlador, con la particularidad de permanecer configurado en ausencia de energía, gracias al reloj calendario implementado en el hardware. (ver sección 4.1)

Figura 4.9 Actualizar hora



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

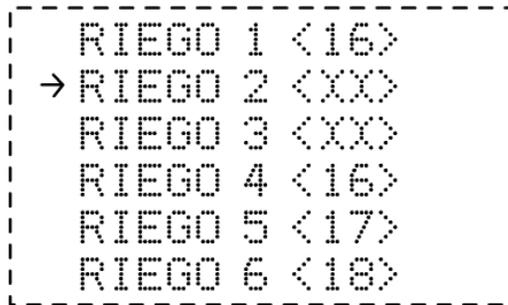
Adicionalmente existe un “**Reporte de alarmas**” que es de gran utilidad en el continuo monitoreo del sistema. Por el hecho de tratarse de un sistema automático no implica que esté exento de fallas, por lo tanto se debe realizar una revisión periódica con el fin de verificar el buen funcionamiento del mismo, caso contrario proceder a realizar los correctivos pertinentes. Para ello se ha diseñado un menú en el que se puede escoger cualquier riego del día y analizar el estado final del ciclo de riego (ver figura 4.10).

Cuando un riego finaliza exitosamente se imprime entre corchetes angulares el tiempo total de duración del ciclo riego; en caso dado de no completarse el ciclo, se imprime <XX> informado que el tiempo de riego excedió los límites estimados. Para conocer la causa que hizo que el ciclo no se cumpliera exitosamente, se presiona la tecla “Menú/Aceptar” desplegándose una serie de mensajes, informando el momento exacto en que se presentó la interrupción.

El hecho de informar el tiempo total de riego, actúa como un indicador de gestión en el que se puede evaluar el estado del filtro o de las cintas de riego. Si se

registra un continuo incremento, se deduce que existe un taponamiento en alguna de estas.

Figura 4.10 Reporte de alarmas



RIEGO 1 <16>
→ RIEGO 2 <XX>
RIEGO 3 <XX>
RIEGO 4 <16>
RIEGO 5 <17>
RIEGO 6 <18>

Fuente sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE RIEGO

El elemento central del controlador de riego es el microcontrolador PIC 18F452 en donde se ejecuta un programa escrito en ANSI C bajo la herramienta de desarrollo PICC18 de la empresa HI-TECH, el cual se encarga de atender el teclado de mando, desplegar mensajes en la pantalla LCD¹, leer los sensores de nivel, comunicarse con el módulo reloj calendario y generar las señales de control para los actuadores.

El diagrama circuital se ilustra en la figura 4.11, en ella se observa que el circuito es alimentado por una fuente de 5V regulados por IC7, y estabilizado por C8. Existe una batería adicional de Litio a 3V que sirve de respaldo para el módulo de

¹ Display de Cristal Liquido

reloj calendario, permitiendo continuar su funcionamiento aún en caso de falla en el fluido eléctrico, evitando así la pérdida de la configuración de la hora y fecha. Este problema fue identificado en un primer prototipo probado en un cultivo anterior, donde resultaba imposible garantizar el correcto funcionamiento del sistema aún en cortos periodos de tiempo.

El integrado que realiza las funciones de reloj calendario es el de referencia DS1302 fabricado por la empresa Dallas Semiconductor, capacitado para informar la hora en formato militar y AM-PM, la fecha y día de la semana. Se comunica sincrónicamente con el microcontrolador para la transmisión y recepción de los registros de configuración y datos.

Los sensores de nivel son alimentados mediante los pines RA0 y RA1 del microcontrolador con voltaje alterno y la señal de salida es conectada a través de las entradas analógicas RA3 y RA5 del modulo ADC¹, quien detectará radicales cambios en dicha señal dependiendo del nivel de humedad al que se encuentren sometidos.

El circuito de detección de cruce por cero inyecta una señal cuadrada en RB0 de la misma frecuencia y fase de la corriente de la red eléctrica domiciliaria, la cual es empleada para controlar el voltaje de salida a la electrobomba, dado que sirve

¹ Modulo de Conversión Análogo Digital

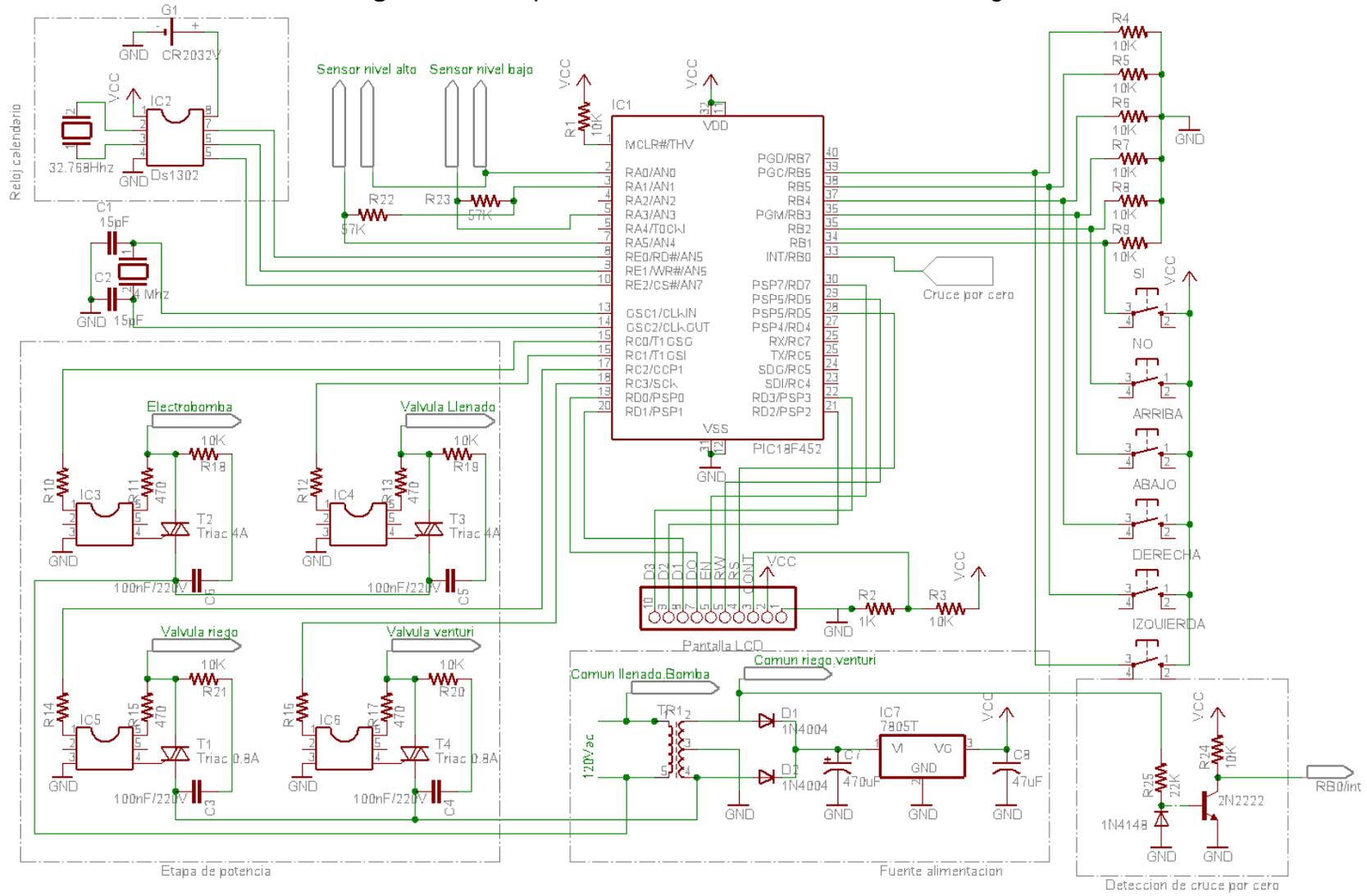
como base de tiempo para la generación de los pulsos necesarios en el control de potencia por ángulo de disparo.

Cada actuador es accionado mediante su respectivo modulo de potencia, el cual puede proporcionar tanto voltajes de salida de 120Vac para el caso de la electrobomba y la electroválvula de llenado (VI), como de 24 Vac para las electroválvulas vénturi (Vv) y riego (Vr). Cada modulo esta conformado por un opto-triac (IC3, IC4, IC5, IC6) que amplifica los pulsos de disparo de los triacs (T1, T2, T3, T4).

Los triacs deben protegerse contra incrementos bruscos de corriente por tanto se incluye una red RC dispuesta en paralelo con ellos. Esta protección se hace necesaria cuando la carga a activar por el triac es de tipo inductiva como electroválvulas y electrobombas, en las cuales la corriente de arranque tiende a ser muy alta.

Los seis pulsadores corresponden al teclado de mando y están conectados al puerto B del microcontrolador. La pantalla de cristal liquido hitachi de 16 caracteres por 2 líneas (referencia CT-0417) es conecta al puerto C y configurada en modo de operación de 4 líneas, esto con el fin de reducir el número de pines asignados a la misma.

Figura 4.11 Esquema electrónico del controlador de riego



Fuente: Sistema de control para cultivos hidropónicos.

5. CONDUCTÍMETRO

“La conductividad eléctrica de un medio, se define como la capacidad que tiene el medio (que por lo general contiene sales inorgánicas en solución o electrolitos) para conducir la corriente eléctrica. El agua pura, no es buena conductora, sin embargo las sales disueltas incrementan esta propiedad. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad.”¹

5.1 CONSIDERACIONES TEORICAS

La conductividad eléctrica es el recíproco de la resistencia a corriente alterna, medida entre las caras opuestas de un cubo de 1.0 cm de arista de una solución acuosa a una temperatura especificada. Esta solución se comporta como un conductor eléctrico donde se pueden aplicar las leyes físicas de la resistencia eléctrica. Las unidades de la conductividad eléctrica son el Siemens/cm (las

¹ SAENZ Calderon, Felipe; La conductividad eléctrica -ce- y la conductividad eléctrica a granel -ceg- del suelo como base para la medición de la humedad del suelo; Bogota Colombia; <http://www.drcaideronlabs.com/index.html>.

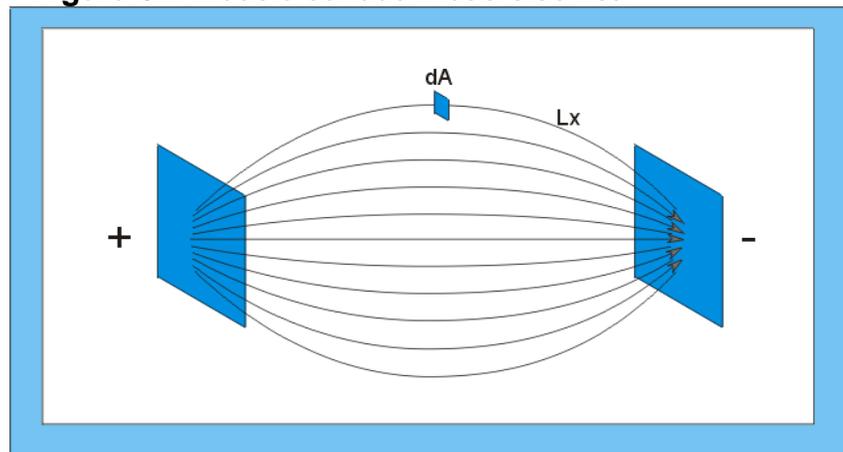
unidades antiguas, eran los mhos/cm que son numéricamente equivalentes al S/cm).

La deducción de las fórmulas para la determinación de la conductividad eléctrica en un medio acuoso, homogéneo e isotópico se realiza considerando que el transporte de carga se efectúa a través de un número muy grande de filamentos de corriente como se ilustra en la figura 5.1, en donde:

dA = Diferencial de área del filamento.

L_x = Camino o ruta de cada filamento de corriente eléctrica.

Figura 5.1 Modelo conductividad eléctrica



Fuente: Fisicoquímica de Atkins

Se puede observar en la figura 5.1 que todos los posibles filamentos se encuentran configurados como resistencias en paralelo (los mismos terminales de inicio y fin), por lo que la conductancia en el material estaría dada por:

$$\frac{1}{R_t} = \sum_{X=1}^n \frac{1}{R_x} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

En donde:

$$\frac{1}{R_t} = \text{Conductancia total de todos los caminos}$$

$$\frac{1}{R_x} = \text{Conductancia del camino } x.$$

Pero R_x , resistencia en cada camino, esta determinada a su vez por la resistividad eléctrica ρ del material, su longitud, y su área de la siguiente manera:

$$R_x = \rho \times \frac{L_x}{dA} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Reemplazando la ecuación 5.2 en 5.1 y haciendo tender el número de caminos a infinito se obtiene:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{\rho} \int \frac{dA}{L_x}$$

Por definición la conductividad eléctrica $C.E.$ es igual al inverso de la resistividad del material, así:

$$C.E = \frac{1}{R_t} \times \left[\int \frac{dA}{L_x} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Haciendo uso de la ley de ohm Rt puede ser expresada en términos de corriente y voltaje de la siguiente forma:

$$C.E = \frac{I(t)}{V(t)} \times \left[\int \frac{dA}{Lx} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

En esta última ecuación, $I(t)$ es la conducción eléctrica, $\frac{I(t)}{V(t)}$ es la conductancia y la ecuación completa es la conductividad. El último término de la ecuación se denomina constante de electrodo que depende únicamente de la geometría del electrodo y del espacio circundante. Cuando hay alguna pared o barrera que interrumpa el paso de la corriente por el espacio circundante, esta afectará también la constante de electrodo. Las unidades de la constante de celda son usualmente cm^{-1} . En general, mientras más separados se encuentren los electrodos, menor será el valor de la constante de celda.

5.2 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

En la práctica la conductividad eléctrica de una solución se mide mediante el uso de una corriente alterna (AC) con el fin de evitar los efectos de la polarización. Cuando se usa una corriente continua (DC) los iones vecinos al electrodo emigran hacia este, produciendo un doble efecto en la solución; por una parte se disminuye el número de electrolitos en el medio, y por otra parte se presenta acumulación de iones en los electrodos (un proceso similar a la electrólisis), esto hace que la

conductividad se altere como consecuencia de la variación en la concentración y la carencia de movilidad de los iones en las cercanías al electrodo. Este fenómeno se llama polarización de los electrodos y hace imposible medir la conductividad por medio de corriente DC. Por tal motivo los conductímetros utilizan una corriente AC, cuya frecuencia varía desde 60 Hz hasta 3000 Hz. En la práctica se recomienda utilizar una corriente alterna con una frecuencia alrededor de 1000 Hz¹. La forma de señal más utilizada es la onda cuadrada.

En cuanto al ámbito de la hidroponía para fines prácticos, se trabaja con el Factor de conductividad (Fc), que se define como:

$$F_c = C.E. \left(\frac{mS}{cm} \right) \times 10 \quad \text{Ecuación 5.5}$$

El rango de conductividad eléctrica usualmente requerido para un adecuado crecimiento del cultivo, se encuentra entre un Fc de 15 a 30.

Para efectos prácticos el equipo de medición de conductividad eléctrica visualiza además del factor de conductividad Fc su equivalente en mS/cm. En resumen los requerimientos de diseño del conductímetro son los siguientes:

- Rango de medición de factor de conductividad de 0 a 30.
- Señal de excitación del electrodo: $\pm 5V$, 1Kz, onda cuadrada.

¹ ATKINS P.W, Fisicoquímica, Addison Wesley Iberoamericana, Wilmington, Delaware EEUU,1985, pag.780.

5.3 DISEÑO ELECTRONICO DEL CONDUCTÍMETRO

El medidor de conductividad eléctrica esta conformado por tres bloques principales: el elemento sensor primario (E.S.P), un elemento modificador de la variable (E.M.V), y un microcontrolador que se encarga de procesar la señal eléctrica y convertirla en una medida legible para el usuario.

Como se observa en la figura 5.2 el electrodo (E.S.P) entrega un valor de resistencia proporcional a la conductividad eléctrica del medio en que se encuentra sumergido, este valor de resistencia es convertido a un valor de voltaje por medio de un divisor de tensión (E.M.V), el cual puede ser interpretado por el modulo de conversión análogo digital de un microcontrolador PIC 16F873A.

Internamente en el microcontrolador se realiza un filtrado digital de la señal de entrada y el valor obtenido es evaluado en una función matemática como la variable independiente y la variable dependiente es la medida de conductividad eléctrica; que será desplegada en una pantalla LCD; además de la posibilidad de enviarla simultáneamente a través de comunicación serial RS232¹ a un computador.

¹ Protocolo de comunicación utilizado para la transferencia de datos entre el computador y los instrumentos de medición

Figura. 5.2 Diagrama en bloques conductímetro



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

El electrodo de medición fue adquirido en Dr. Calderón labs y su referencia es 0432, estos electrodos han sido ampliamente probados con éxito en diferentes cultivos y durante extensos periodos de tiempo.

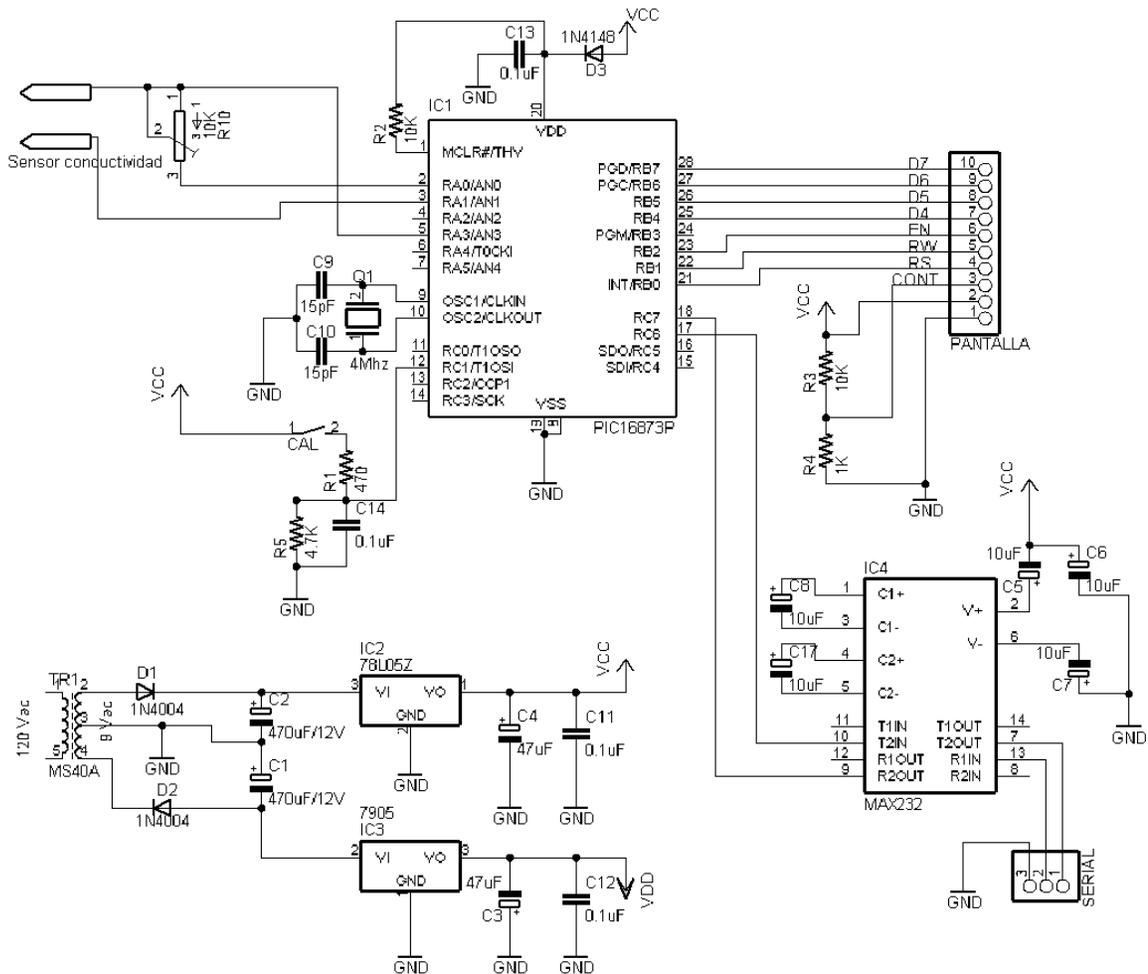
Figura 5.3 Electrodo de medición de conductividad



Fuente: Dr. Calderón Labs.

El diagrama circuital del medidor de conductividad es ilustrado en la figura 5.4 el cual fue diseñado en el programa Eagle Layout Editor 4.03.

Figura 5.4 Diagrama eléctrico conductímetro



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

El electrodo se comporta como una resistencia variable que forma un divisor de tensión con R10, el voltaje obtenido del divisor se envía al módulo de conversión análogo digital del microcontrolador por la entrada RA3. El sentido de la corriente en el electrodo es conmutado al alternar el voltaje en los pines RA0 y RA1 del microcontrolador.

Un pulsador con circuito antirrebote RC es conectado al microcontrolador en RC1 para generar una secuencia de calibración del conductímetro cuando el usuario así lo desee. La comunicación serial esta a cargo del modulo USART incluido en el microcontrolador y los niveles de voltaje adaptados por IC4 MAX232 para comunicación con el computador.

Las lecturas son desplegadas por una pantalla LCD que se controla por medio del puerto B del microcontrolador. Todo el circuito es alimentado por una fuente de voltaje dual de ± 5 Voltios regulada por IC2 e IC3 y estabilizada por C3, C4, C11 y C12.

5.4 PROGRAMA DEL CONDUCTÍMETRO

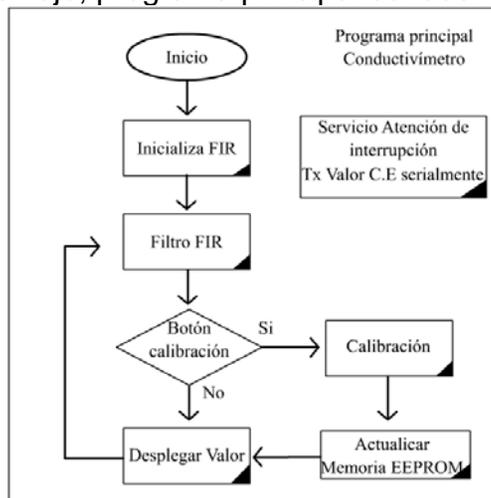
Tal como se mencionó anteriormente el microcontrolador es el encargado de procesar la señal del voltaje que el electrodo proporciona y así convertirla en un valor decimal que será desplegado en una pantalla LCD. Para ello se diseño un programa en ANSI C en la herramienta PICC demo¹ de la empresa HI-TECH; esta herramienta permite una rápida y confiable implementación al incorporar librerías de desarrollo en el programa, las cuales son distribuidas por la misma empresa.

El algoritmo implementado se muestra en la Figura 5.5, en ella se observa que la primera rutina que se ejecuta es la configuración del microcontrolador PIC

¹ www.hitech.com

16F873A, en esta se realizan los ajustes pertinentes para el correcto funcionamiento del integrado; seguidamente se llama a la rutina de inicialización del filtro FIR, en ella se toman 27 muestras de la señal de entrada, necesarias para ser operadas con los coeficientes del filtro; luego si el botón de calibración se encuentra inactivo, se imprime el valor de conductividad medido; caso contrario, se hace un llamado a la rutina de calibración.

Figura 5.5 Diagrama de flujo, programa principal conductímetro



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

5.4.1 Función Filtro FIR

Esta función es la encargada de leer el valor de voltaje en el modulo ADC y realizarle un filtrado pasa-bajas FIR, *Finite impulse response* (respuesta de impulso finito), cuya función es eliminar componentes indeseadas “Ruido aleatorio”, originado principalmente en la etapa digital del circuito o en la fuente de alimentación que por regla general son ruidos de alta frecuencia.

Para facilitar la labor de diseño del filtro se recurrió al programa dsPIC FD Lite¹, un paquete computacional distribuido por la empresa MICROCHIP, en donde a partir de unos parámetros de diseño se generan las graficas de respuesta a diferentes frecuencias, así como un arreglo de coeficientes numéricos necesarios para la implementación del filtro. Los parámetros de diseño fueron los siguientes:

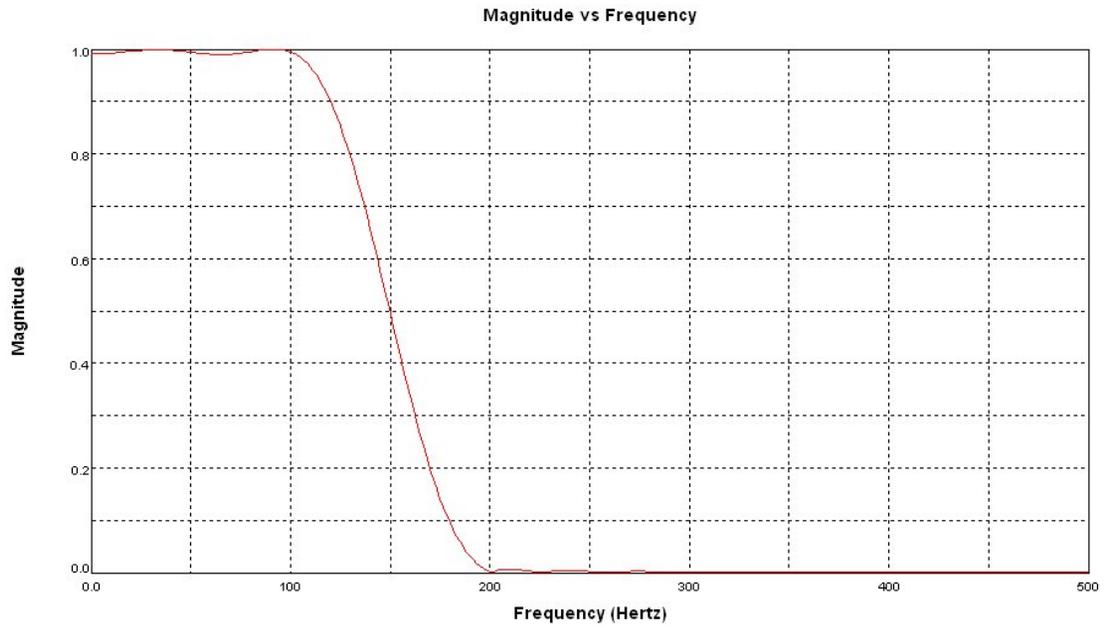
- Frecuencia de muestreo = 1000 Hz
- Frecuencia pasa banda = 100 Hz
- Frecuencia de rechazo de banda = 200 Hz

La frecuencia de muestreo es determinada por la frecuencia de polarización del electrodo, tomando en cuenta que se realiza una medición del voltaje cada periodo de dicha señal.

Dado que los cambios de conductividad eléctrica en una solución son lentos y que además interesa eliminar ruidos de alta frecuencia, se ha escogido 100Hz como la frecuencia en la cual el filtro empezará a disminuir progresivamente su ganancia, hasta llegar a 200Hz a partir de donde la repuesta es nula.

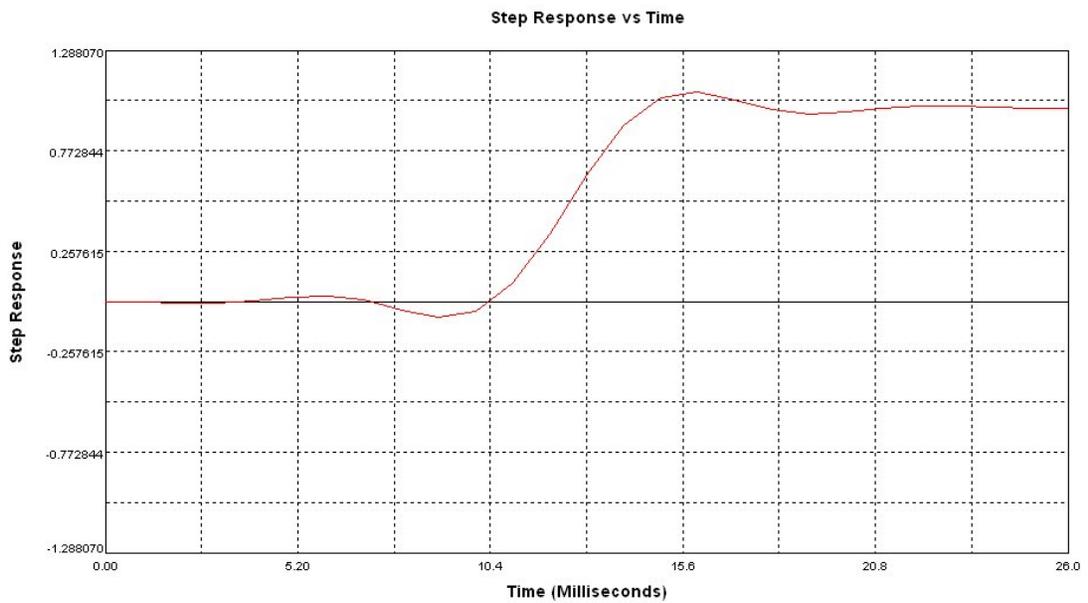
¹ www.microchip.com

Figura 5.6 Respuesta en frecuencia filtro FIR



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Figura 5.7 Respuesta a señal escalón del filtro FIR



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Otro parámetro importante del filtro pasa bajas es su respuesta a una señal escalón, situación que en la practica equivale a introducir el electrodo en una solución salina. La Figura 5.7 ilustra este comportamiento observándose un tiempo de respuesta de alrededor de 26ms.

5.4.2 Función CALIBRAR

La medida de conductividad eléctrica en una solución depende solo de la conductancia y la constante del electrodo según la siguiente ecuación:

$$C.E = \frac{1}{Rt} \times \left[\int \frac{dA}{Lx} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Si la rutina de calibración se realiza con una solución buffer de conductividad conocida el objetivo principal seria encontrar la constante del electrodo, ya que la conductancia se puede determinar por la resistencia entre los terminales y esta a su vez determinada por el voltaje medido en el divisor de tensión.

Despejando la constante de electrodo se tiene:

$$\left[\int \frac{dA}{Lx} \right]^{-1} = Rt \times C.E \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Donde Rt es:

$$Rt = R_{10} \times \frac{Vcc - Vsal}{Vsal} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

R10 es la resistencia con la cual el electrodo forma el divisor de tensión, Vcc es el voltaje de polarización del divisor y Vsal es el voltaje entregado. La ecuación que despeja la constante del electrodo sería:

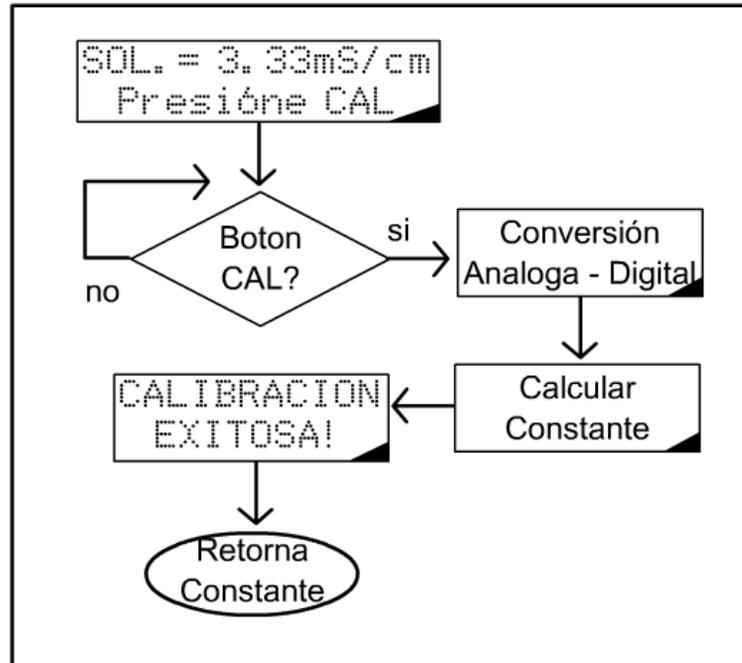
$$\left[\int \frac{dA}{Lx} \right]^{-1} = R_{10} \times \frac{Vcc - Vsal}{Vsal} \times C.E \quad \text{Ecuación 5.9}$$

Esta es la constante que se retorna la rutina de calibración el cual se esquematiza en la figura 5.8, en ella se observa que una vez pulsado el botón de calibración se despliega un mensaje indicando que se debe ingresar el electrodo en una solución cuya conductividad sea de 3.33 mS/cm, nuevamente se pulsa el botón de calibración para calcular la constante del electrodo con la ecuación previamente estudiada y de esta manera finalizar el procedimiento de calibración.

5.4.3 Función de atención a interrupción

El conductímetro está capacitado para enviar el valor medido a un ordenador por medio de comunicación serial. Este trabajo es facilitado al generar una interrupción en el microcontrolador cuando el ordenador envía cualquier carácter por el puerto COM al que está conectado el instrumento. Una vez generada la interrupción, se transmite una serie de caracteres ASCII correspondientes al valor de conductividad medido.

Figura 5.8 Diagrama de flujo de la rutina de calibración del conductímetro.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

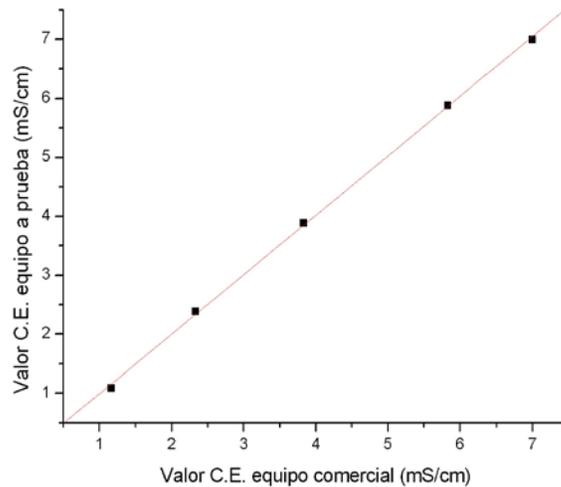
5.5 CALIBRACION DEL CONDUCTÍMETRO

Para la puesta en marcha del conductímetro se prepara una solución de 5 mS/cm, la cual sirve para ajustar R10 hasta que el voltaje de salida del divisor de tensión se encuentre en 5V, lo anterior con el objeto de ajustar el rango de medición del equipo; luego se introduce el electrodo en la solución de referencia de 3.3 mS/cm y se procede a ejecutar la rutina de calibración (ver sección 5.4.2 Función CALIBRAR).

Para evaluar el desempeño del equipo frente a uno de laboratorio se efectúa una práctica en la cual se varía la concentración de cloruro de sodio en una solución

acuosa, se toman diversas mediciones en ambos equipos y se grafican los resultados (Ver figura 5.9).

Figura 5.9 Gráfica de valor de C.E. del equipo comercial vs. valor de C.E. del equipo a prueba.



Fuente: *Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos*

La figura 5.9 muestra la relación entre el valor de conductividad medido con el equipo comercial y el de prueba, la regresión lineal presenta una desviación estándar “ σ ” de 0.06269, lo que quiere decir que, si utilizamos el equipo de prueba para realizar una medición, el valor real de este se hallará con un 98% de certeza en un intervalo de:

$$VALOR \ MEDIDO \pm 3 \sigma$$

Lo que permite concluir que el desempeño del equipo de prueba con respecto al comercial es bastante óptimo, garantizando el buen funcionamiento del instrumento.

6. PH METRO

El grado de acidez o alcalinidad de la solución nutritiva es de vital importancia en el desarrollo de las plantas, “ellas pueden tomar los elementos en forma óptima cuando el pH esta comprendido entre 5.5 y 7.0”¹, valores por fuera de este rango pueden afectar la absorción de nutrientes, o incluso podrían causar la muerte del sistema radicular, de aquí se desprende la importancia de contar con un instrumento apropiado de medición de pH en un cultivo.

En el presente trabajo de grado se desarrolló un equipo de medición de pH que posee las siguientes características:

- Rango de medición de pH entre 0 y 14.
- Calibración automática empleando un solo pulsador.
- Posibilidad de lectura de pH y control de calibración remota por medio de comunicación serial.
- Lectura directa en una pantalla de cristal liquido.

¹ CARRASCO Gilda; La empresa hidropónica de mediana escala; Editorial Universidad de Talca; Talca Chile; Pág. 37.

6.1 DISEÑO ELECTRONICO DEL pH-METRO

El equipo esta basado en una sonda de uso general marca METTLER TOLEDO referencia INLAB 407, que actúa como conversor de la variable física (pH) a una señal eléctrica (voltaje), este dispositivo presenta las siguientes características que se tomaron en cuenta en el diseño electrónico.

Tabla 6.1: Características del electrodo de pH marca METTLER TOLEDO referencia INLAB 407,

Descripción	Rango
• Valor de pH	0 - 14
• Punto cero	7.00 ± 0.25
• Temperatura	0 – 80 °C
• $\Delta V/\Delta^\circ\text{pH}$	0.060 V/°pH
• Resistencia interna	< 900 M Ω
• Conector	BNC
• Tiempo de respuesta	< 20 seg

La información anterior es proporcionada por el fabricante y de ella se establece que la sonda entrega un voltaje de cero voltios cuando el pH se encuentra en algún valor entre 7.00 ± 0.25 , además se establece que desde ese punto el voltaje aumenta en 0.06 voltios cuando el pH disminuye en un grado y correspondientemente que el voltaje disminuye 0.06V cuando el pH aumenta en un grado.

Otra característica de vital importancia es la alta resistencia interna de la sonda, cuyo valor puede ser tan alto como 900 MΩ, lo que implica que se debe incluir en el circuito eléctrico una etapa de acople de impedancia para evitar que la información entregada por la sonda se pierda.

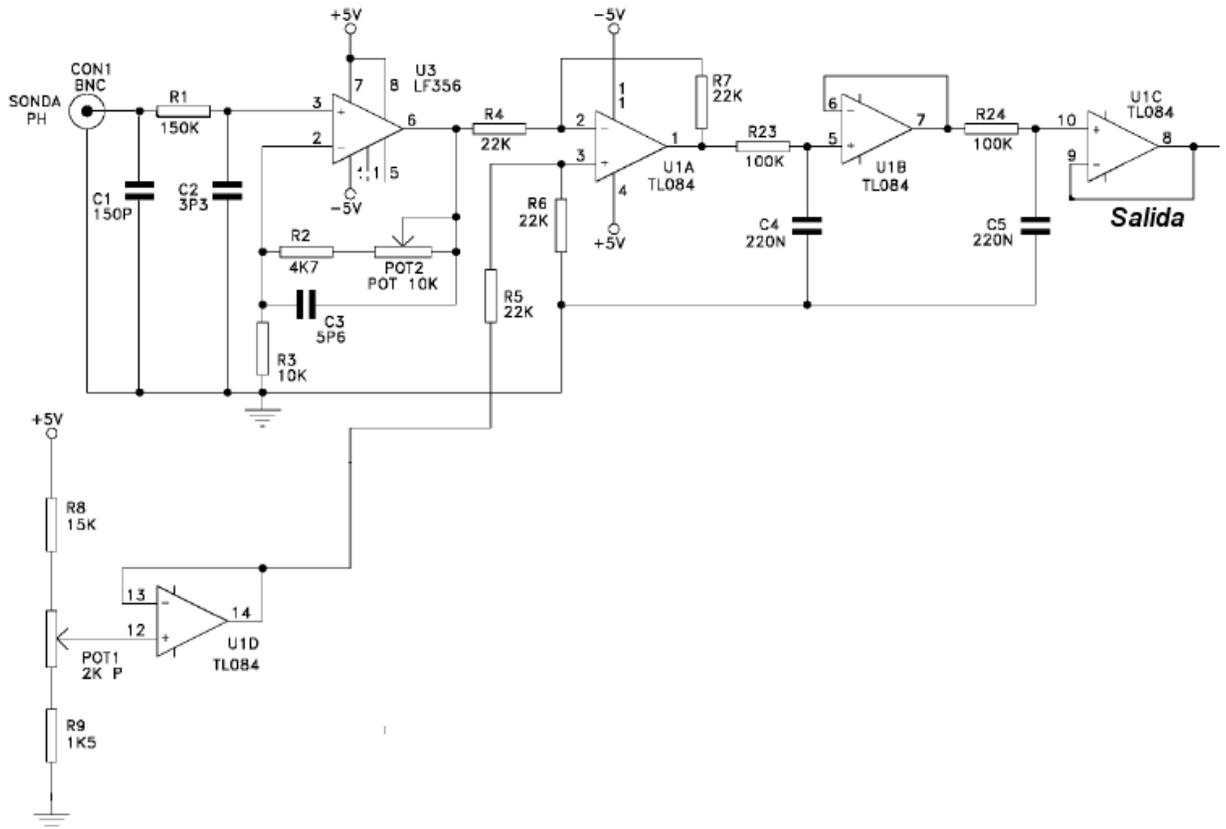
Un aspecto a tener en cuenta es que la sonda entrega voltajes tanto positivos como negativos y dado que los conversores analógico digital trabajan generalmente con voltajes positivos, se debe llevar el voltaje entregado por la sonda a un nivel adecuado para el conversor. El circuito que acopla la impedancia de la sonda y lleva el voltaje entregado por la misma a niveles adecuados es el que se muestra en la figura 6.1:

La sonda va conectada al amplificador U3 a través de un filtro paso bajo¹ de aproximadamente 10Hz formado por R1, C1 y la propia resistencia interna de la sonda. El amplificador operacional U3, junto con R2, R3 y POT2 constituye un amplificador no inversor de ganancia ajustable entre 1.5 y 2.5. Se ha elegido este modelo de amplificador operacional (LF356) y esta configuración debido a su altísima impedancia de entrada, mayor que un Tera-ohmio (10^{12} ohmios). Los condensadores C2 y C3 son una protección contra ruido debido

¹ El filtro pasa bajo es utilizado para evitar el ruido de alta frecuencia generado por las señales digitales

a auto-oscilación recomendada por el fabricante del LF356 National Semiconductor.¹

Figura 6.1 Circuito de acople de señal



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 6.1 Tenemos que la ecuación de la sonda es:

$$V = 0.06(7 - PH) \quad \text{Ecuación - Electrodo de pH}$$

¹ National semiconductors; LF155/156/135/136/137 JFET input Operational Amplifiers (NSC05292.PDF) Mayo 2000

En esta primera etapa se busca a través de POT2, una amplificación de 1.7, así la señal se modificaría a:

$$V \approx 1.7 \cdot [0.060 \cdot (7 - pH)] \approx 0.1 \cdot (7 - pH)$$

El divisor de tensión formado por R8, R9 y POT1, constituye una referencia de tensión ajustable entre 400mV y 950mV. Puesto que la corriente que circula por él es mínima, la temperatura de las resistencias dependerá casi exclusivamente de la temperatura ambiente, y al tener coeficientes de temperatura iguales, su relación, y por tanto la referencia de tensión, se mantendrán estables; esta tensión de referencia se lleva a través del seguidor de tensión U1D a la entrada positiva del restador constituido por U1A, R4, R5, R6 y R7. La finalidad del seguidor de tensión U1D es independizar la referencia de tensión del resto del circuito.

A la entrada negativa del restador se aplica la salida del amplificador de entrada U3 para mantener la precisión de este restador es conveniente que R4 a R7 sean resistencias del 1% de precisión. En el circuito se han puesto de 22K, pero pueden ser de cualquier valor entre 10K y 50K, siempre que sean todas iguales; la linealidad del circuito depende enormemente de la igualdad de estas resistencias.

POT1 se calibrará hasta obtener un voltaje de referencia de 700 mV, por consiguiente la ecuación del voltaje en función de pH sería la siguiente:

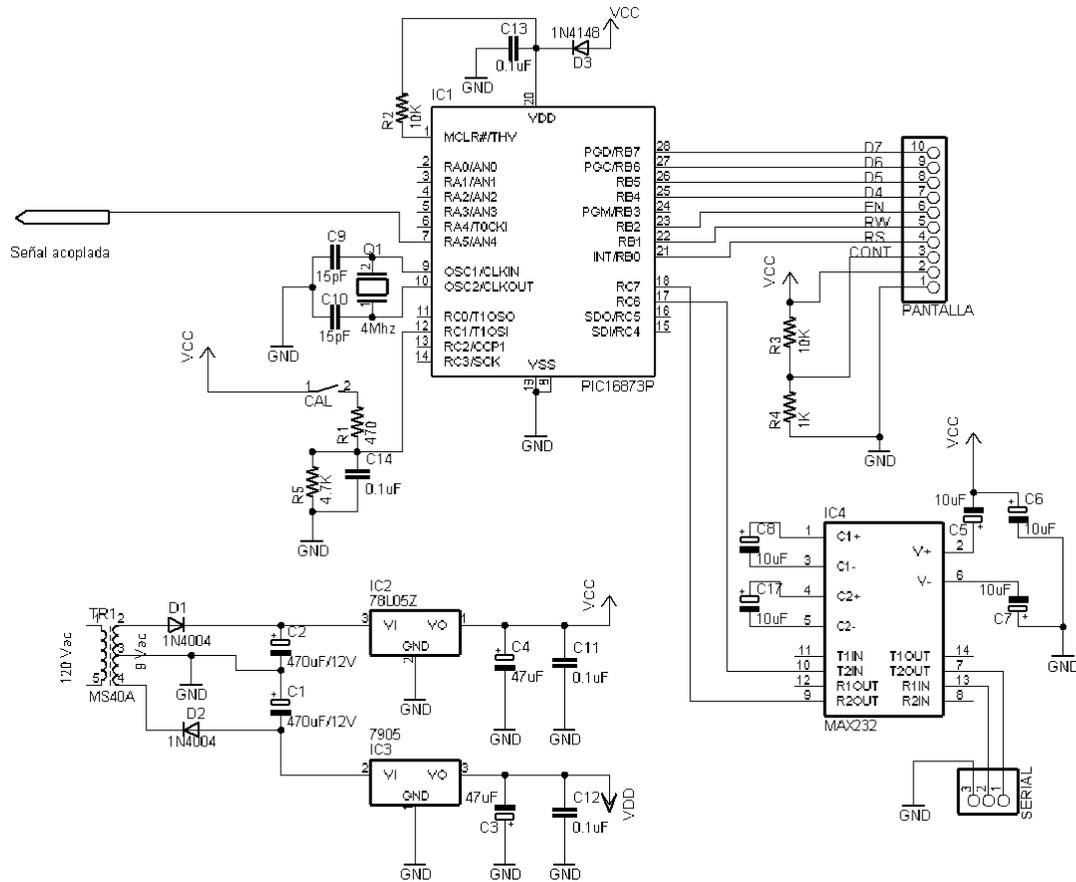
$$V \approx 0.7 - [0.1 \cdot (7 - pH)] = 0.7 - (0.7 - 0.1 \cdot pH) = 0.1 \cdot pH$$

Los operacionales U1B y U1C junto con R23, R24, C4 y C5 constituyen filtros pasa-bajas con frecuencias de corte de 10 Hz., para eliminar posibles ruidos generados en las etapas anteriores.

En la figura 6.2 se describe el circuito digital de control del pH metro. En donde se distingue que la señal del electrodo proveniente del circuito de acople, se inyecta a una de las entradas analógicas del microcontrolador 16F873A quien a través del modulo interno de ADC se obtiene el valor digitalizado de la señal.

Un pulsador con circuito antirrebote RC es conectado al microcontrolador en RC1 para generar una secuencia de calibración del pHmetro cuando el usuario así lo desee. El instrumento debe tener la capacidad de conectarse a un computador, por lo tanto se implementa una comunicación serial a cargo del modulo USART contenido en el microcontrolador; los niveles de voltaje que esta requiere son adaptados a través del IC4 MAX232

Figura6.2 Diagrama del circuito de control del pH metro.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Las lecturas de pH son desplegadas en una pantalla LCD gobernada a través del puerto B del microcontrolador. En la parte inferior del diagrama se indica la fuente de alimentación tiene por características ± 5 Voltios regulada por IC2, e IC3 y estabilizada por C3, C4, C11 y C12.

6.2 CALIBRACIÓN pH-METRO

La señal de voltaje entregada por el electrodo de pH, luego de pasar por el circuito de acople es enviada a un microcontrolador de la familia 16F87XA quien por medio del módulo de conversión análogo digital, calcula el valor de pH a partir de una regresión lineal cuyos coeficientes se obtienen de un procedimiento de calibración descrito a continuación.

La caracterización se hizo tomando como referencia un pHmetro comercial, el cual tiene una precisión 10 veces mayor a la del pHmetro a evaluar. El proceso primordialmente busca un modelo matemático que se adecue a las características del electrodo, por tanto se diseña un experimento práctico que relaciona la información entregada por el electrodo (voltaje) y la que revela el pHmetro comercial.

Inicialmente se debe cerciorar que el pHmetro comercial se encuentra funcionando correctamente, por consiguiente se lo pone a prueba utilizando soluciones buffer que poseen valores de pH conocidos, por ejemplo pH 4 o pH 7; en el momento que se corrobore que este trabaja adecuadamente, se procede a recopilar una serie de datos comparativos entre el electrodo de pH a caracterizar y el instrumento comercial; para ello se prepara dos soluciones, una a partir de ácido fosfórico (ácida) y la otra con soda cáustica (básica), con el fin de abarcar el rango completo de operación del electrodo,

es decir, de 0 a 7 para las soluciones ácidas y de 7 a 14 para las soluciones básicas.

Con el objetivo de encontrar un modelo matemático que se adapte correctamente a nuestro instrumento, se toma un amplio universo de datos, con el fin de plasmarlos en una grafica y extraer de ella una ecuación que relacione la señal suministrada por el electrodo y la unidad de interpretación para el hombre, el pH.

Se sumergen los dos electrodos en agua destilada, el electrodo a caracterizar y el comercial; a la que se le adiciona cantidades dosificadas de ácido fosfórico; en cada adición se registra el valor de pH entregado tanto para el electrodo de prueba como el comercial, de igual manera se procede con la solución básica (soda cáustica).

Se tomaron sesenta y nueve (69) datos, en tres (3) experiencias, con el fin de minimizar en lo posible la desviación estándar del universo de datos.

Inicialmente la respuesta del sensor no fue estable, el ruido eléctrico inducido por las conexiones en el circuito electrónico hizo oscilar la señal; por tal motivo se toma las siguientes decisiones:

1. La optimización del circuito impreso, para tal efecto, se rediseña el plano de conexión utilizando el programa EAGLE Layout Editor 4.03 especial para el diseño de circuitos impresos; y el manual “TECHNIQUES THAT REDUCE SYSTEM NOISE IN ADC CIRCUIT” (Técnica de reducción de ruido, en circuitos que emplean conversión análogo digital).¹
2. Adicionar al programa de calibración un filtro digital FIR; que reduciría el ruido eléctrico de alta frecuencia² (ver sección 5.4.1 Función filtro FIR).

Se repite la experiencia con el ácido fosfórico y la soda cáustica con las nuevas modificaciones, dando como respuesta una señal más estable.

La figura 6.3 muestra la relación entre el valor de pH proporcionado por ambos electrodos, obteniendo una desviación estándar “ σ ” de 0.01358, lo que quiere decir que, si utilizamos el electrodo de prueba para realizar una medición, el valor real de esta se hallará con un 98% de certeza en un intervalo de:

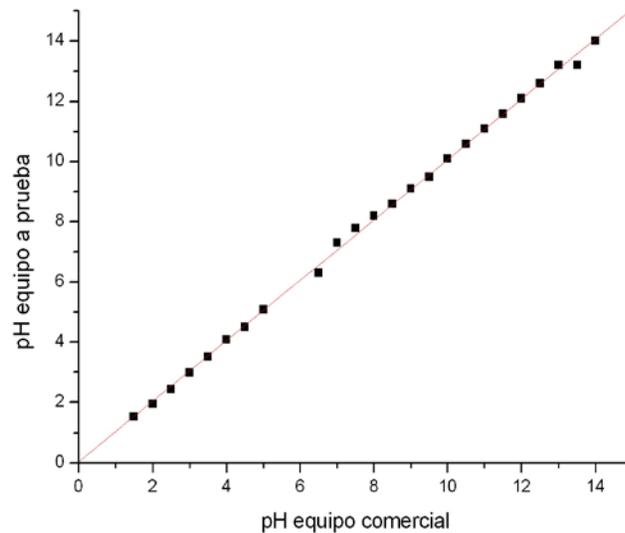
$$VALOR \ MEDIDO \pm 3 \sigma$$

¹ BAKER Bonnie, TECHNIQUES THAT REDUCE SYSTEM NOISE IN ADC CIRCUIT, Microchip Technology; February 18 - 2004

² VIKRAM Pasham, Andy Miller, and Ken Chapman; TRANSPOSED FORM FIR FILTERS - Application Note: Virtex and Virtex-II Series; Xilinx; October 25 de 2001

La anterior expresión permite concluir que el desempeño del electrodo con respecto al comercial es bastante óptimo, garantizando el buen funcionamiento del instrumento.

Figura 6.3 Gráfica de valor de pH del equipo comercial vs. valor de pH equipo a prueba,

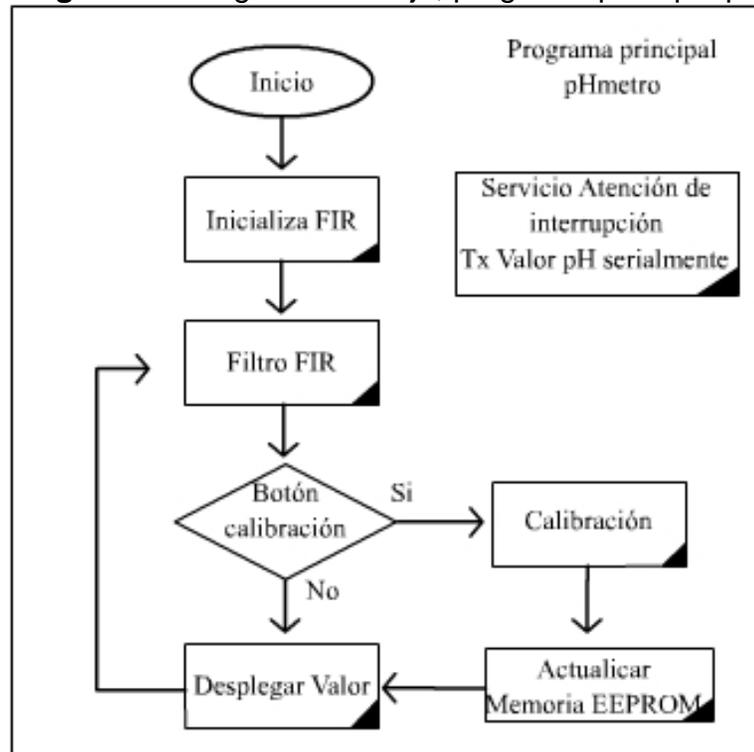


Fuente: *Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos*

Por último para realizar la calibración del pHmetro se recurre a la rutina especial de calibración que se ejecuta en el microcontrolador (ver figura 6.4); tal como se mencionó anteriormente, el microcontrolador es el encargado de procesar la señal de voltaje que proporciona el electrodo y convertirla en un valor decimal que será desplegado en una pantalla LCD. Para ello, se diseñó un programa en ANSI C con la herramienta PICC de la empresa HI-TECH; esta herramienta permite una rápida y confiable implementación al incorporar

librerías de desarrollo en el programa, las cuales son distribuidas por la misma empresa.

Figura 6.4 Diagrama de flujo, programa principal pHmetro



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

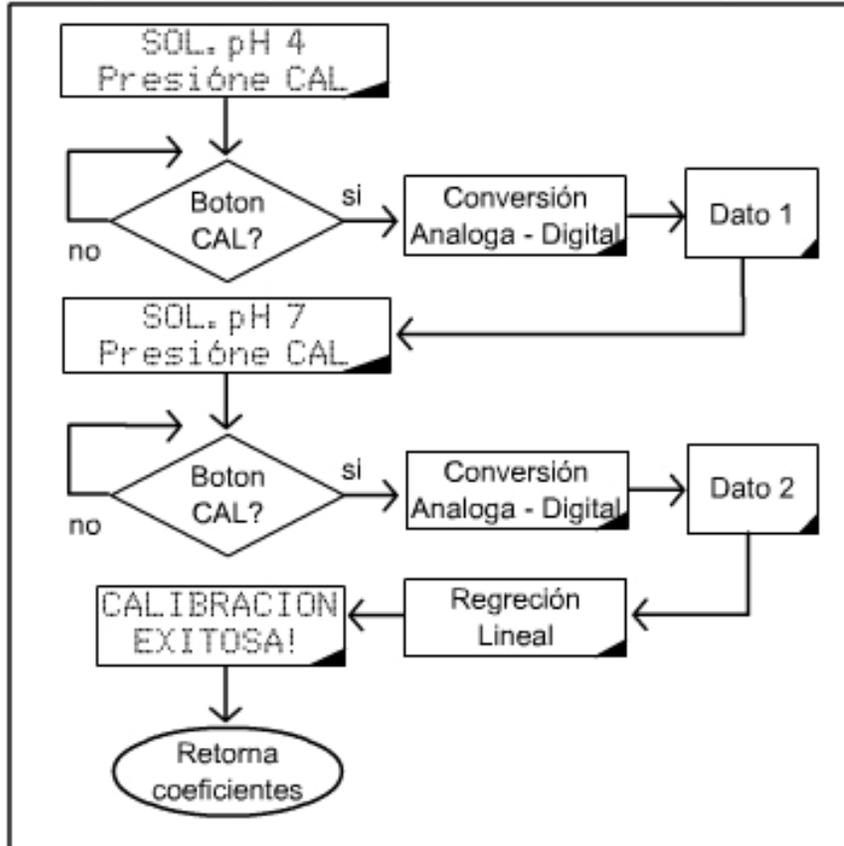
Según el diagrama en bloque del algoritmo del pHmetro (ver figura 6.4), la primera rutina que se ejecuta es la configuración del microcontrolador PIC 16F873A, en esta se realizan los ajustes pertinentes para el correcto funcionamiento del integrado; seguidamente se llama a la inicialización del Filtro FIR, en el se toman 27 muestras de la señal de entrada, necesarias para calcular los coeficientes del filtro; luego si el botón de calibración esta

inactivo, se imprime el valor de pH registrado en pantalla; caso contrario, se hace una llamado a la rutina de calibración (ver figura 6.5); esta comienza desplegando un mensaje que sugiere sumergir el electrodo en una solución de pH 4. Cuando el usuario haya realizado este procedimiento, pulsa nuevamente el botón de calibración, entonces aparece un nuevo mensaje solicitando que se sumerja ahora el electrodo en una solución de pH 7, instante en que el programa calcula los coeficientes del modelo lineal que relaciona la señal del electrodo y los valores de pH y de esta manera finalizar el procedimiento de calibración.

El pHmetro esta capacitado para enviar el valor medido a un ordenador por medio de comunicación serial. Este trabajo es facilitado al generar una interrupción en el microcontrolador cuando el ordenador envía cualquier carácter por el puerto comunicación serial (COM)¹ al que esta conectado el instrumento. Una vez generada la interrupción, se transmite una serie de caracteres ASCII correspondientes al valor de pH medido.

¹ COM, Puerto de comunicación serial.

Figura 6.5 Diagrama de flujo de la rutina de calibración del pH metro.



Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

7. COSTOS Y ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

Para incorporar esta técnica de cultivo como una alternativa productiva de especies hortícolas, primero se deberá conocer el monto de la inversión requerida, los costos operacionales de producción y la utilidad de la Unidad productiva. Este análisis permite evaluar la factibilidad de obtención de utilidades al corto y mediano plazo, para la cual se consideran los siguientes supuestos:

1. Se cuenta con el terreno, el cual posee instalaciones de agua y energía eléctrica.
2. Se ha asumido que se cultivará tomate a una densidad de plantación de 2.5 plantas por m², un invernadero de 1000 m² es suficiente espacio para 2500 plantas.
3. Se planea obtener un período de cultivo promedio desde trasplante a cosecha de 17 semanas, por lo que se espera obtener aproximadamente 2.4 cosechas al año.
4. Con el objetivo de simplificar el cálculo, no se ha considerado el costo alternativo del dinero.
5. Se ha considerado que los costos de inversión son amortizados en cuatro años **(tiempo de crédito para pequeño y mediano cultivador vigente**

por el Banco Agrario de Colombia¹) a través de las primeras 9 cosechas en forma lineal.

7.1 COSTOS DE INVERSIÓN

Para establecer una unidad hidropónica, es necesario considerar los costos de los elementos que la componen y la puesta en marcha del sistema, los cuales se describen en la tabla 7.1, recordemos que la inversión se hace para un invernadero de 1000m² con una capacidad de 2500 plantas.

7.2 DEPRECIACIÓN DEL EQUIPO

A los materiales y herramientas que componen la unidad hidropónica se les otorga un periodo de vida útil, es decir, en el momento que alguno de estos elementos es completamente depreciado, es imprescindible su reemplazo; en la tabla 7.2 describe la depreciación estimada por cada elemento que compone una unidad de cultivo, calculada de la siguiente forma:

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{Valor del elemento}}{\text{años vida útil}} \quad \text{Ecuación 7.1}$$

¹ Dato suministrado por la entidad bancaria el 26 de Octubre de 2004.

7.3 COSTOS OPERACIONALES

Los costos operacionales comprenden los insumos directos de producción, la mano de obra y la depreciación del equipo para una cosecha de tomates. Los valores obtenidos se presentan en la tabla 7.3, y son calculados de la siguiente manera:

$$VALOR \ POR \ PLANTA = \frac{VALOR \ TOTAL \ INSUMO}{NÚMERO \ DE \ PLANTAS} \quad \text{Ecuación 7.2}$$

El número total de plantas es de 2500, sin embargo, se adquieren 25 más ya que de acuerdo al proveedor de la semilla pueden estar contaminadas con virosis; según datos locales, una de cada 100 plantas puede tener virosis.

La depreciación por cosecha se obtiene de la siguiente relación:

$$DEPRECIACIÓN \ POR \ COSECHA = \frac{DEPRECIACIÓN \ ANUAL}{NUMERO \ DE \ COSECHAS \ ANUALES}$$

Ecuación 7.3

La depreciación anual es calculada en la tabla 7.2 y el número de cosechas anuales es de 2.4

7.4 INGRESOS POR VENTA

Según los antecedentes locales se ha determinado que la caja de tomate de buena calidad de 15 a 17Kg aproximadamente, se vende según la oferta existente en el mercado, y su precio oscila entre \$10.000 y \$22.000. Datos históricos indican que cada planta en cultivos hidropónicos produce alrededor de 7 – 8 Kg útiles de tomate, teniendo en cuenta que en cada cosecha se tendrán 2500 plantas, la producción obtenida sería de 1094 cajas de tomate, siendo así se tendría una venta mínima de \$10'934.500, y una máxima de \$24'062.500 para un promedio de \$17'500.000

7.5 COSTO TOTAL

El costo total es la sumatoria de todos los costos involucrados, en otras palabras, el costo de inversión más el costo variable de operación. De acuerdo con supuesto, se ha dividido la inversión entre 48 (meses de gracia), dato obtenido de acuerdo a la solicitud de crédito al Banco Agrario de Colombia, que otorga seis (6) meses de obligaciones congeladas, es decir el tiempo de duración de la primera cosecha incluyendo la adecuación de infraestructura y su comercialización; y cuatro (4) años de aporte a la deuda. Cada fracción de este costo se ha sumado al costo variable de cada cosecha. Es decir:

$$COSTO \ INVERSION \ POR \ PLANTA = \frac{\frac{TOTAL \ INVERSIÓN}{NUMERO \ DE \ PLANTAS}}{MESES \ DE \ GRACIA} \text{ Ecuación 7.4}$$

De acuerdo a la tabla 7.1 el total de la inversión es de \$11'818.200,00, dinero obtenido por medio de un préstamo con el Banco Agrario a 4 años, con un interés anual del 24%, lo que incrementa el costo total de la inversión a \$23'1636.72,00; El número total de plantas es de 2500 por cosecha, y en el año se realizan 2.4 cosechas; datos que arrojan un resultado del costo de inversión por planta de aproximadamente \$965

De igual forma se debe calcular el costo variable de operación por planta; según la tabla 7.3 el costo de operación por planta es de \$2.254,00; por lo tanto, el costo total por planta que es la suma del costo de inversión más el costo de operación es de \$3.220

7.6 UTILIDAD

Con la información generada anteriormente es posible estimar la utilidad por cosecha, como se muestra a continuación:

$$\text{Utilidad} = \text{Ingreso total / planta} - \text{Costo total / planta}$$

Utilidad **mínima**:

$$4.375 \text{ pesos/planta} - 3.219 \text{ pesos/planta} = 1155,28 \text{ pesos/planta}$$

Utilidad **máxima**:

$$9.625 \text{ pesos/planta} - 3.219 \text{ pesos/planta} = 6405 \text{ pesos/planta}$$

7.7 ÍNDICE DE RENTABILIDAD (I.R.)

El índice de rentabilidad desde la primera cosecha se calcula de la siguiente forma:

$$I.R(mín) = \frac{\text{Utilidad}_\text{Mínima}_\text{por}_\text{Planta}}{\text{inversion}_\text{total}_\text{por}_\text{Planta}} \times 100 = \frac{1155}{3220} \times 100 = 35\%$$

$$I.R(máx) = \frac{\text{Utilidad}_\text{Máxima}_\text{por}_\text{Planta}}{\text{inversion}_\text{total}_\text{por}_\text{Planta}} \times 100 = \frac{6405}{3220} \times 100 = 199\%$$

Tabla 7.1 Cuadro de inversiones

INVERSIONES	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Electrobomba 1", 0.5 Hp.	1	N/A	180.000,00	180.000,00
Controlador de riego electrónico	1	N/A	150.000,00	150.000,00
Tanque de almacenamiento 500 Lt	1	N/A	180.000,00	180.000,00
Tubería distribuidora, colectora y accesorios	1	N/A	128.000,00	128.000,00
Filtro de arena	1	N/A	70.000,00	70.000,00
Filtro de malla	1	N/A	90.000,00	90.000,00
Vénturi de 1/2"	2	N/A	160.000,00	320.000,00
Válvula solenoide	3	N/A	65.000,00	195.000,00
Válvula de llenado	1	N/A	14.000,00	14.000,00
Canales de cultivo	1	N/A	1'750.000,00	1'750.000,00
Cascarilla de arroz (con transporte)	1	N/A	1'250.000,00	1'250.000,00
Guadua invernadero(con transporte)	714	UNIDAD	2.500,00	1'785.000,00
Plástico y polisombra invernadero	437	KILO	7.100,00	3'102.700,00
Jornales (Mano de obra)	86	DIA	10.000,00	860.000,00
Fumigadora Royal Cóndor 20lt	1	N/A	165.000,00	165.000,00
Gramera de 500gr	1	N/A	45.000,00	450.00,00
Ferretería	1	N/A	933.500,00	933.500,00
Cintas de riego	2000	METRO	300,00	600.000,00
Total inversión				11'818.200,00

Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Tabla 7.2 Depreciación del equipo

ITEM	VALOR A DEPRESIAR	VIDA UTIL AÑOS	MONTO ANUAL DEPRECIADO
Electrobomba 1", 0.5 Hp.	180.000,00	6	30.000,00
Controlador de riego electrónico	150.000,00	6	25.000,00
Tanque de almacenamiento 200 Lt	180.000,00	15	12.000,00
Tubería distribuidora, colectora y accesorios	128.000,00	6	21.333,33
Filtro de arena	70.000,00	6	11.666,67
Filtro de malla	90.000,00	3	30.000,00
Vénturi de 1/2"	320.000,00	4	80.000,00
Válvula solenoide	195.000,00	5	39.000,00
Válvula de llenado	14.000,00	5	2.800,00
Canales de cultivo	1'750.000,00	3	583.333,33
Cascarilla de arroz	1'250.000,00	5	250.000,00
Guadua invernadero	1'785.000,00	6	297.500,00
Plástico invernadero	3'102.700,00	2	1'551.350,00
Fumigadora Royal Cóndor Hobby 8lt	165.000,00	10	16.500,00
Gramera de 500gr	45.000,00	10	4.500,00
Ferretería	933.500,00	10	93.350,00
Cintas de riego	600.000,00	2	300.000,00
Total depreciación anual			3'348.333,33

Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

Tabla 7.3 Costos operacionales

COSTOS OPERACIONALES	CANTIDAD REQUERIDA	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR POR PANTA
Plántulas	2.525,00	150,00	378.750,00	151,50
Nutrifeed	350,00	3.000,00	1'050.000,00	420,00
Nitrato de calcio	350,00	2.700,00	945.000,00	378,00
Sulfato de potasio	140,00	2.000,00	280.000,00	112,00
Sulfato de magnesio	122,00	2.000,00	244.000,00	97,60
Energía eléctrica watt x hora	100,00	150,00	15.000,00	6,00
Fumigantes	1,00	347.500,00	347.500,00	139,00
Mano de obra	40,00	10.000,00	400.000,00	160,00
Depreciación por cosecha			1'500.000,00	600,00
Total costos de producción				2.064,10
Imprevistos (5%)				95,00
Costos de venta (5%)				95,00
Total costos operacionales				2.254,10

Fuente: Sistema de control instrumentado para cultivos hidropónicos

8. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se demuestra a través de una evaluación crítica y objetiva la conveniencia de la implementación de unidades de cultivo hidropónico, en zonas del país que presenten características similares a la región caucana. La evaluación se realizó desde el punto de vista técnico, productivo, social y ecológico identificándose las grandes ventajas de contar con un sistema de control instrumentado, tanto en un sistema de cultivo hidropónico como en los tradicionales.

La viabilidad técnica del proyecto es el punto mejor detallado en el presente documento, puesto que se describe la construcción de una “unidad de cultivo hidropónico” en sus esferas claves, la hidroponía y su automatización, lo cual permite establecer que, en la región caucana se cuenta con los recursos tecnológicos para la obtención de los materiales y equipos necesarios en el montaje de una unidad hidropónica, sin importar el grado de automatización que en ella se desee implementar.

En cuanto al análisis de viabilidad económica, se debe resaltar como uno de los factores que incrementa la productividad de un cultivo está relacionado con la densidad de siembra de la especie, en el caso específico del tomate, esta puede

ubicarse entre 2 y 2.5 plantas/m² en cultivos tradicionales¹. En la unidad de cultivo hidropónico se cultivó con una densidad superior en un 25% sin mayores inconvenientes. Esto sugiere que realmente se pueden lograr incrementos significativos en la densidad de siembra para el sistema propuesto, reduciendo principalmente los costos de inversión.

Por otra parte, el ciclo de cultivo de tomate en cultivos tradicionales es de aproximadamente seis meses, tiempo que puede reducirse en un sistema con las características de la unidad propuesta a cuatro meses y medio, basándose en la disminución del tiempo de preparación y adecuación del suelo a cultivar necesarios en los cultivos tradicionales, así como en la ya demostrada rapidez de crecimiento de las plantas en cultivos hidropónicos. Este hecho reduce considerablemente los costos variables de operación y aumenta la productividad.

En Colombia la implementación de cultivos hidropónicos no ha gozado de una amplia aceptación debido a sus altos costos de inversión, sin embargo en el presente proyecto se desmitifica esta afirmación. De acuerdo con el análisis de costo y rentabilidad aprobada por el Ingeniero Juan Carlos Velásquez López² y las consideraciones expuestas anteriormente, se demuestra como cultivar bajo las

¹ Esta información ha sido recolectada en trabajo de campo en los departamentos de Cauca y Nariño y corroborada por el Ing. Juan Carlos Velásquez, jefe de diseño de cultivo, Multiagro LTDA, empresa que asesora alrededor de 300 cultivadores de tomate en el departamento del cauca.

² Juan Carlos Velásquez López; Ingeniero Agrónomo Universidad Nacional de Colombia, Jefe de diseño de cultivos; Multiagro Ltda.

condiciones de una unidad de cultivo hidropónico es una alternativa que ofrece altos índices de producción y rentabilidad.

Los beneficios económicos para la región asociados a una posible masificación de la unidad de cultivo hidropónico, no se limita únicamente a los obtenidos del incremento directo de la productividad y la calidad de los frutos, sino que se hace extensivo a otras actividades como son la siembra y corte de guadua, la comercialización de precursores agrícolas y la fabricación de instrumentos y equipos de riego, incentivando así la creación de microempresas para suplir estas necesidades.

Colombia debe buscar alternativas de mejoramiento en sus técnicas de cultivo que permita competir en calidad y precio con los productos agrícolas foráneos, los cuales a partir de la vigencia del tratado de libre comercio de las Américas y sobre todo con el tratado bilateral que nuestro país desea firmar se desea firmar con los EEUU, inundarán el mercado local; así la propuesta anterior representa una salida viable que permite hacerle frente a la competencia, ya que al combinar una infraestructura adaptada a los recursos de nuestra región y con equipos de medición y control económicos, se logran obtener frutos de alta calidad y bajo costo.

En el ámbito social, la unidad de cultivo hidropónico se puede consolidar en la región como una opción apropiada en la lucha contra la pobreza y la disminución

de índices de desnutrición, principalmente en regiones áridas como el sur del departamento del Cauca y el norte de Nariño, en dónde Instituciones como la Unión Europea están incentivando proyectos de desarrollo productivo a través de mecanismo como los laboratorios de paz. Experiencias anteriores en países como Guatemala y Chile arrojan resultados favorables, lo cual refuerza la importancia de la implementación de dichos cultivos.

La práctica de la hidroponía no requiere necesariamente la inclusión de sistemas automáticos, de hecho en la documentación recopilada de los planes de incentivo de la FAO para Latinoamérica, no se incluye ningún grado de automatización ni de instrumentación dado los elevados costos que estos requieren al tener que ser importados de países como Israel, Holanda, Egipto y EEUU, ingresando con altos niveles arancelarios además de resentir el cambio en la moneda. La elaboración a bajo costo del controlador automático de riego, el pHmetro y el medidor de conductividad eléctrica durante el desarrollo del proyecto ratifica la viabilidad de construirlos en el país como un gran aporte al fortalecimiento de los cultivos hidropónicos y tradicionales.

Un obstáculo en la implementación de una unidad hidropónica diseñada como base para un desarrollo productivo de interés social, es la baja escolaridad de los campesinos nativos. Sin embargo por medio de programas de capacitación en

dónde se presente el manejo de la técnica y los cuidados del cultivo, puede ser superado de una manera satisfactoria.

Considerando el escenario ambiental, un sistema de cultivo hidropónico que aproveche un desecho natural como la cascarilla de arroz representa una contribución al mantenimiento del medio ambiente. Por otra parte, al sembrar en sustrato se evita la erosión del subsuelo debida a los constantes procesos de fertilización y esterilización que requieren los cultivos tradicionales.

Otro beneficio ambiental derivado de la facilidad con que la unidad de cultivo hidropónico puede variar la cantidad de agua de riego dependiendo del requerimiento del cultivo, es el correcto manejo del recurso hídrico, el cual puede ser escaso incluso en algunas regiones del departamento del Cauca.

Las ventajas de contar con el sistema automático de nutrición propuesto identificadas en la unidad de cultivo hidropónico son las siguientes:

- El cultivador puede dedicar mayor tiempo a labores relacionadas con el cuidado del cultivo tales como: podas, fumigación y recolección de frutos.
- La dosificación tanto de agua como nutrientes en diversos ciclos de riego permite un mejor aprovechamiento de estos y por ende el desarrollo

acelerado de la planta; por otra parte, se previene la formación de encharcamientos desfavorables para el sistema radicular, los cuales además, sirven como precursores de plagas y enfermedades tales como la gota (*Phytophthora infestans* Mill).

- Es verdad que en el mundo existen diversas propuestas de sistemas automáticos para invernaderos que en nuestra sociedad han ganado la fama de ser altamente costosos, sin embargo se ha logrado implementar un sistema adaptado a los recursos económicos de la región ya que el sistema sería fabricado con un alto valor agregado en software y un bajo costo de producción, evita una serie de aranceles de importación y permite la creación de microempresa, hecho que ayudaría a mejorar la tasa de desempleo en el país.

Como conclusión general se tiene que la unidad de cultivo hidropónica es viable técnica y económicamente, favorable al medio ambiente y se perfila como una herramienta de desarrollo social.

BIBLIOGRAFÍA

ATKINS P.W, Fisicoquímica, Addison Wesley Iberoamericana, Wilmington, Delaware EEUU,1985,

BAKER Bonnie, TECHNIQUES THAT REDUCE SYSTEM NOISE IN ADC CIRCUIT, Microchip Technology; February 18 – 2004

CARRASCO Gilda. La empresa hidropónica de mediana escala: la técnica de la solución nutritiva recirculante, Chile, Universidad de Talca,1996

CALDERON Felipe. Requerimientos nutricionales de un cultivo de claveles bajo invernadero en la sabana de Bogota, Bogota Colombia, Laboratorios Dr. Calderon, Mayo 1990.

CORPORACIÓN COLOMBIA INTERNACIONAL. Manual del exportador de frutas, hortalizas y tubérculos en Colombia. 2003

FIGUEROA Juan F. Agricultura urbana en la región metropolitana de Santiago de Chile, Chile, Oficina regional de la Fao para América Latina y el Caribe. 1995

GIMENO, Carmen, CALVILLO Jesús. Colección de tomates en cultivo ecológico en invernadero. "Asociación Biolur. Bergarako Nekazal Etxea, c/ Arteaga 23, 20570 Bergara (Gipuzkoa)." Presentado en el I congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica. Toledo, septiembre de 1994

JARAMILLO, Carlos Felipe. Crisis y transformación de la agricultura colombiana Fondo de Cultura Económica y Banco de la República, Bogotá, 2002. 110p

MARULANDA, Cesar. La huerta hidropónica popular. Santiago de Chile. Oficina regional de la FAO para Latinoamérica y el Caribe, 1997 118p.

NATIONAL SEMICONDUCTORS; LF155/156/135/136/137 JFET input Operational Amplifiers (NSC05292.PDF) Mayo 2000

NEW GROWING SYSTEM "UN NUEVO SISTEMA DE CULTIVO". PULPÍ (Almería) España 1991 p22.

MARFA, Oriol. Utilización eficiente de los fertilizantes en cultivo intensivo hidropónico en circuito cerrado. Instituto de investigación y tecnologías agropecuarias. Cabriels – Barcelona 2001 24p

PARALLAX INC, Mediciones ambientales, primera edición en castellano, 1999.

POLACK, Andrés; MITIDIERI, Mariel. Producción de tomate diferenciado y protocolo preliminar de manejo integrado de plagas y enfermedades. San Pedro, Buenos Aires, ARGENTINA, 2002 18p.

SERWAY, Raymond A., James Madison University; McGraw – Hill Tomo I, cuarta edición. 1990.

SOLSONA¹, C., NETO², M., IBAÑEZ¹ M. y ROSELL¹, J. I. Diseño de una onda eléctrica de medida de contenido de agua en el suelo. Universidade Federal de Goiás (Brasil) 2001, 6p

VIKRAM Pasham, Andy Miller, and Ken Chapman; TRANSPOSED FORM FIR FILTERS - Application Note: Virtex and Virtex-II Series; Xilinx; October 25 de 2001

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

<http://www.ediho.es/copersa/malla.html>

<http://www.hitech.com>

ANEXOS

Anexo A. Clasificación botánica del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill)

Subdivisión:	Angiospermae.
Clase:	Dicotyledoneae.
Género:	<i>Lycopersicon</i> .
Especie:	<i>esculentum</i> .
Familia:	Solanaceae.
Subfamilia:	solanoideae.
Tribu:	solanae.
Variedad:	Rocío.

Fuente: PÉREZ, Juana *et al.* Guía técnica del cultivo de tomate. Centro Nacional de Tecnología agropecuaria y forestal. El salvador: 2002. p. 9.