



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSTGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**“INYECCIÓN DE FERTILIZANTES CON
BOMBAS DE PALETAS ROTATORIAS Y
CONTROL POR CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN
SOLUCIONES MADRE PARA FERTIRRIEGO”**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA:

ING. MIGUEL ANGEL PEÑA PERALTA



Chapingo, México; junio de 2008

**INYECCIÓN DE FERTILIZANTE CON BOMBAS DE PALETAS ROTATORIAS Y
CONTROL POR CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN
SOLUCIONES MADRE PARA FERTIRRIEGO**

Tesis realizada por MIGUEL ANGEL PEÑA PERALTA, bajo la dirección del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



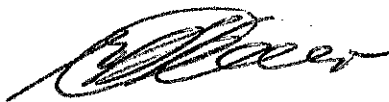
DR. FEDERICO HAHN SCHLAM

ASESOR:



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR:



DR. EUGENIO ROMANCHIK KRIUCHKOVA

DEDICATORIA

Al Señor Pedro Alejandro Alonso y Luís

y

A la señora Martha Torres

Que siempre están en los momentos difíciles

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a la Universidad Autónoma Chapingo y al postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua por darme la oportunidad de realizar los estudios de Maestría en Ingeniería.

Doy gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT, al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola y al Departamento de Irrigación por el apoyo brindado durante los estudios de postgrado.

Durante la realización de este trabajo recibí el invaluable apoyo de la familia Alonso a quienes deseo expresarles mi gratitud y de manera muy especial a:

La M.C. Sylvia Alonso Jiménez,
A la Srita. Alejandra Jessica Camacho Alonso
Al Sr. Pedro Alejandro Alonso y Luis

A mi amigo el M.I. Antonio Yam

Al Ing. Ignacio Salazar Salazar por su colaboración y asesoría en las pruebas en el campo Tlapeaxco, así como a las personas que laboran en este campo experimental.

Al Dr. Federico Hahn Schlam por compartirme sus conocimientos y darme su apoyo al inicio, durante y en la conclusión de este trabajo de investigación. Al Dr. Romanchik K. por las observaciones y sugerencias para este documento. Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por el apoyo brindado en la gestión administrativa como coordinador del IAUIA para el buen término de esta tesis así como las observaciones realizadas a la misma. A Lidia por la paciencia en los trámites administrativos y su agradable atención. No puedo terminar sin antes darle gracias a este gran país que es México y externar mi gusto y disponibilidad por contribuir para hacerlo mejor cada día.

Datos Biográficos

El autor de la presente tesis Miguel Angel Peña Peralta nació el 1 de octubre de 1976 en San Jerónimo Amanalco Texcoco Estado de México. En el año 2000 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo donde cursó la carrera de Ingeniero Mecánico Agrícola. En el año 2002 fue consejero universitario representando al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. En el año 2003 participó en el congreso Metánica en la Habana Cuba con el proyecto “Diseño de empaques para el transporte de piña.” En el año 2004 realizó una estancia en Berlín y Posdam Alemania para conocer el funcionamiento de la empresa ALBA Service Mit Sistem (empresa de reciclaje de basura) y ATB Instituto de Ingeniería Agrícola Bornim Posdam, con apoyo de la Universidad de Humboldt Berlín. En el año 2005 realizó su estancia preprofesional en el Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos con el proyecto; diseño y construcción de una cosechadora de frijol para la zona Huetar Norte, bajo el convenio México-Costa Rica para la producción de frijol variedad *Brunca*.

Participó en el proceso de admisión de la Universidad Autónoma Chapingo en: 2003 como aplicador en la sede de Ixcaquixtla, Puebla.

2004 como aplicador en la sede Martínez de la Torre Veracruz

2005 como aplicador en la sede central, Universidad Autónoma Chapingo

2006 como aplicador en Huauchinango, Puebla

2007 como coordinador en la sede central, Universidad Autónoma Chapingo.

En el año 2007 coautoría del artículo científico: “Tomato yield and electrical conductivity on a tezontle fertigated greenhouse using a novel gravity injection system” en la revista, Canadian Biosystems Engineering, <http://www.bioeng.ca>.

En el año 2008 colaboró como asesor de tesis de licenciatura titulada, “Daños Mecánicos en cinco variedades de manzana”, además de formar parte del jurado examinador como vocal.

INYECCIÓN DE FERTILIZANTE CON BOMBAS DE PALETAS Y CONTROL POR CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN SOLUCIONES MADRE PARA FERTIRRIEGO

FERTILIZER INJECTION WITH ROTARY VANE PUMPS AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY CONTROL IN MIXED SOLUTIONS FOR FERTIRRIGATION

Miguel Angel Peña Peralta¹ y Federico Hahn Schlam²

RESUMEN

La inyección de fertilizantes en el fertirriego se realiza comúnmente a través de tubos Venturi y se controla con ayuda de sensores de conductividad y pH colocados en la salida del riego. Los tubos Venturi presentan problemas de caídas de presión durante la inyección. De este modo se innova con el diseño un equipo de fertirriego controlando las pérdidas de presión usando un sistema de inyección de fertilizantes por bombas de paletas rotatorias que suministran un caudal continuo. El control de la inyección lo hace un PLC Millennium II XT- 20 con un programa basado en las relaciones de conductividad eléctrica que existen entre las soluciones madre al ser mezcladas entre si y al diluirlas en agua en pruebas de laboratorio utilizando soluciones concentradas para jitomate saladet. Las relaciones permiten predecir el comportamiento de la conductividad eléctrica al variar el porcentaje de cada uno de los elementos que la componen. Las ecuaciones indican que debe suministrarse una relación 3:100 3 de fertilizante por 100 de agua para obtener la conductividad en el rango de 2 a 3 [mS/cm] valor donde la planta tiene un mejor aprovechamiento de los nutrientes. Al comparar la caída de presión en la salida de la inyección el sistema Venturi pierde 40 [kPa] y el equipo con bombas de paletas no presenta pérdidas de presión.

Palabras clave: Fertirriego, conductividad eléctrica, PLC, Bomba de paleta rotatoria.

1 Tesista

2 Director

ABSTRACT

The injection of fertilizers in fertirrigation is commonly undertaken through Venturi pipes and controlled with the help of conductivity and pH sensors placed at the irrigation outlet point. The Venturi pipes suffer from pressure drops during injection. The fertirrigation equipment was, therefore, redesigned so that pressure drops are controlled by means of a fertilizer injection system powered by rotary vane pumps that provide a continuous volume. A PLC Millennium II XT - 20 controls the injection using a program based on the electrical conductivity relationships that exist between the mixed solutions when mixed amongst themselves and when diluted in water in laboratory tests using concentrated solutions for Saladet tomatoes. These relationships allow one to predict the behaviour of the electrical conductivity when varying the percentage of each one of the elements that make it up. According to the equations, a ratio of 3:100 3 -- 3 of fertilizer per 100 of water -- must be provided in order to obtain conductivity in the 2 to 3 [mS/cm] value range, in which the plant has a better opportunity to take advantage of the nutrients. Comparing the pressure drops in the injection outlet point, the Venturi system loses 40 [kPa] while the system powered by rotary vane pumps does not lose pressure.

Key words: Fertirrigation, Electrical conductivity, PLC, Rotary vane pump

ÍNDICE

I INTRODUCCIÓN	1
----------------------	---

II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Conductividad eléctrica del agua.....	3
2.2 Fertirrigación	3
2.3 Fertilizantes	6
2.4 Equipos para fertirrigación	14
2.5 Equipos de inyección.....	17
2.6 Sistemas de agitación	21
2.7 Filtros.....	22
2.8 Secciones de riego	24
2.9 Sistema de control automático.....	24
III MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
3. 1 Ubicación del proyecto.....	27
3.2 Esquema del proyecto.....	28
3.3 Sistema de soporte almacenamiento y distribución.....	28
3.4 Sistema de inyección de fertilizantes y agitación.....	31
3.4.1 Inyección de fertilizante por bombas de paletas.....	32
3.4.2 Inyección por medio de bomba peristáltica.....	34
3.5 Mecanismo de agitación	37
3.6 Instalación de filtros	40
3.7 Cableado del equipo de fertirriego	41
3.8 Diseño del sistema hidráulico del cabezal de riego.....	44
3.9 Sistema de control y medición automático por PLC	46
3.10 Control por conductividad de las soluciones madre.....	48
3.11 Desarrollo del programa en el PLC	50
3.12 Pruebas con el equipo de fertirriego	52
3.13 Pruebas de conductividad en sustrato y macetas en producción.	53
IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54

4.1 Inyector.....	54
4.2 Bomba de paletas.....	54
4.3 bomba peristáltica.....	56
4.4 Agitación	61
4.5 Tuberías	63
4.6 Programa del PLC por conductividad de la solución madre.	63
4.7 Resultados al evaluar el sensor de C.E.....	72
4.8 Diseño del programa en el PLC Millenium II	73
4.9 Pruebas con el equipo de fertirriego	76
4.10 Resultados de las mediciones con sustrato	78
V CONCLUSIONES.....	81
Orientación del trabajo futuro.....	82
VI REFERENCIAS	83
ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema del proceso de fertirriego	8
Figura 2.2 Influencia del pH en el aprovechamiento de nutrientes por las plantas	8

Figura 2.3 Sistema Elgal 2000.....	16
Figura 2.4 Sistema Fertigal	16
Figura 2.5 Sistema Nutrimac	16
Figura 2.6 Sistema Inline-Jet de netafim	16
Figura 2.7 Tubo Venturi	17
Figura 2.8 Bomba de embolo.	19
Figura 2.9 Esquema de una bomba centrífuga	19
Figura 2.10 Bomba de paletas deslizantes	20
Figura 2.11 Bomba peristáltica doble y sencilla.....	21
Figura 2.12 Turbinas axiales de palas planas a 90°	22
Figura 2.13 Filtros de malla y anillos respectivamente	23
Figura 2.14 PLC Millenium II. Crouzet USA.com	26
Figura 3.1 Vista satelital del campo experimental Tlapeaxco.....	27
Figura 3.2 Esquema del sistema de fertirriego	28
Figura 3.3 Diseño propuesto de la instalación de fertirriego en el campo Tlapeaxco.....	30
Figura 3.4 Sistema hidráulico.....	30
Figura 3.5 Diagrama de inyección de fertilizantes líquidos concentrados.	32
Figura 3.6 Operación del inyector	32
Figura 3.7 Motor y bomba de paletas para la aplicación en fertirriego	33
Figura 3.8 Instalación para la prueba de la bomba de paletas rotatorias.	33
Figura 3.9 Bomba peristáltica prototipo.	34
Figura 3.10 Mangueras utilizadas en el experimento	34
Figura 3.11 Sistema para suministrar y controlar la presión del agua	35
Figura 3.12 Máquina INSTRON 4469. Equipo para realizar ensayos destructivos	36
Figura 3.13 Pruebas de compresión para manguera de látex	37
Figura 3.14 Pruebas de compresión para manguera cristal PVC hidrocarburos	37
Figura 3.15 Dibujo del componente de agitación de fertilizantes	38
Figura 3.16 Diseño de la instalación del agitador en el tinaco	38
Figura 3.17 Apariencia final del soporte sobre el tinaco y el sistema de agitación.....	39
Figura 3.18 Turbinas de agitación, fuera y dentro del tanque.	40
Figura 3.19 Incorporación de una válvula check para prevenir el flujo de agua	44

Figura 3.20 a) Presión del resorte con la inyección apagada	45
Figura 3.21 Válvula antirretorno instalada en la tubería de inyección.....	45
Figura 3.22 la línea de agua con dirección de la bomba centrífuga a los tinaco.	46
Figura 3.23 Esquema del sistema de control.	47
Figura 3.24 Materiales para obtener las conductividades de las soluciones	49
Figura 3.25 Evaluación del sensor de C.E.....	50
Figura 3.26 Diagrama de flujo del programa de control de inyección	51
Figura 3.27 Diagrama de la tarjeta de potencia para válvulas y bombas	52
Figura 4.1 Diseño y prueba del inyector	54
Figura 4.2 Comportamiento del tiempo en la bomba de paletas al desalojar un litro de agua a diferentes presiones.....	55
Figura 4.3 Relación entre tiempo y presión en la inyección de un litro de agua.....	55
Figura 4.4 Daños ocasionados a la manguera de cristal PVC para hidrocarburos	57
Figura 4.5 Disminución del caudal al dañarse la manguera de cristal PVC para agua.	59
Figura 4.6 Apariencia de la manguera de látex al sacarla de la bomba peristáltica.	59
Figura 4.7 Comparación de los tres tipos de mangueras con la máquina Instron.	60
Figura 4.8 Comparación de la manguera cristal PVC hidrocarburos antes y después de someterla a trabajo con la bomba peristáltica.....	61
Figura 4.9 Tendencia de la conductividad eléctrica al realizarse la agitación.	62
Figura 4.10 Comportamiento de la C.E. manteniendo constante la cantidad de solución A y variando la solución B en la mezcla.	64
Figura 4.11 Comportamiento de la C.E. sin variar la cantidad de la solución A	64
Figura 4.12 Comportamiento de la C.E. sin variar la cantidad de la solución C	65
Figura 4.13 Tendencia de la conductividad al comparar las tres pruebas.	65
Figura 4.14 Conductividad de la solución A al diluirse con agua.....	66
Figura 4.15 Comportamiento de la solución B al diluirse con agua.	67
Figura 4.16 Comportamiento de la solución C al diluirse con agua.	67
Figura 4.17 Tendencia de la conductividad al comparar las tres pruebas.	68
Figura 4.18 Incremento de la C.E. en el agua al agregar la mezcla A-B.....	69
Figura 4.19 Incremento de la C.E. en el agua al agregar la mezcla A-C.....	69
Figura 4.20 Incremento de la C.E. en el agua al agregar la mezcla C-B.....	70

Figura 4.21	Incremento de la C.E. en el agua al agregar la mezcla A-B-C.....	70
Figura 4.22	Tendencia de la conductividad al comparar las tres pruebas.	71
Figura 4.23	Comportamiento al evaluar el sensor de C.E.	72
Figura 4.24	Diagrama de tiempos del proceso de fertirrigación en un riego.	73
Figura 4.25	Diagrama de tiempo del proceso de fertirrigación en un día.	74
Figura 4.26	Diagrama del programa realizado en el PLC.	75
Figura 4.27	Posición de los goteros en la muestra tomada para medición de la C.E.	77
Figura 4.28	Conductividad del sustrato de tezontle en estado virgen.	78
Figura 4.29	Conductividad eléctrica del tezontle	78
Figura 4.30	Comportamiento de la C.E. durante los riegos con fertilizante	79
Figura 4.31	Comportamiento de la C.E. durante los riegos sin fertilizante.	80
Figura A-1.	Diagrama del cableado en el sistema de fertirriego.	93
Figura A-2	Dibujo del inyector parte interna	94
Figura A-3.	Boquilla del inyector	95
Figura A-4.	Ensamble del inyector.....	96

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1	Valores de conductividad de algunas muestras típicas.....	3
------------	---	---

Cuadro 2.2 Solubilidad de algunos fertilizantes al variar la temperatura.....	7
Cuadro 2.3 Variación de la CE al variar la concentración de nutrientes.....	10
Cuadro 2.4 Fuentes y características de los fertilizantes más comunes	12
Cuadro 2.5 Compatibilidad entre fertilizantes solubles	13
Cuadro 2.6 Antagonismo y sinergismo entre iones	13
Cuadro 2.7 Características comparativas de equipos de fertirriego en internet	15
Cuadro 2.8 Aplicación de los filtros de acuerdo al contaminante.....	23
Cuadro 3.1 Características de los filtros en el sistema de riego mallas y anillos	41
Cuadro 3.2 Calculo de calibre de cable en cobre a 25 °C.	43
Cuadro 3.3 Compuestos químicos que integran a las soluciones madre.....	49
Cuadro 4.1 Datos de las mediciones de velocidad de la bomba peristáltica.	56
Cuadro 4.2 Datos tomados con manguera de cristal PVC para hidrocarburos.....	57
Cuadro 4.3 Datos tomados con la manguera cristal PVC para agua.....	58
Cuadro 4.4 Conductividades de las soluciones madre.	63
Cuadro 4.5 Conductividades de las mezclas con las soluciones.	63
Cuadro 4.6 Relación de voltaje con los Bits del PLC Millenium II	73
Cuadro 4.7 Presión de trabajo del equipo diseñado y el equipo de Tlapeaxco	76
Cuadro A-1 Características de fertilizantes macronutrientes usados en fertirriego	85
Cuadro A-2 Materiales utilizados para el ensamble de tuberías	86
Cuadro A-3 Materiales ocupados en la instalación eléctrica.....	89
Cuadro A-4 Motores, bombas y materiales utilizados el sistema de fertirriego.....	89
Cuadro A-5 Materiales utilizados en la construcción del circuito de potencia	90
Cuadro A-6 Medidas MESH de tamices estándar ingleses y norteamericanos	91
Cuadro A-7 Datos obtenidos al diluir la solución A en agua	92

I INTRODUCCIÓN

El sector agrícola se ve obligado a producir en espacios cada vez más reducidos, desarrollar nuevos genotipos y optimizar el recurso agua. En los últimos años se han desarrollado tecnologías de riego que buscan optimizar el recurso del agua para su uso en la producción agrícola. Entre estas tecnologías innovadoras de riego se tienen a los sistemas de riego presurizado y los sistemas de fertirriego los cuales agregan nutrientes a través del flujo del agua a las plantas.

Los sistemas de fertirriego están marcando una nueva era en las técnicas de producción agrícola, ya que permiten optimizar el uso de fertilizantes y el ahorro de agua evitando la contaminación de los acuíferos. El mercado ofrece equipos de control en fertirriego pero el costo elevado de adquisición es la principal desventaja para agricultores de pequeñas producciones. Las técnicas actuales que usan tubos Venturi para la inyección de fertilizantes ocasionan las pérdidas de presión en el sistema de riego presurizado por lo cual estos dispositivos no son los ideales. Otra de las variables que debe considerarse es el efecto de la aplicación de fertilizantes en el sustrato lo cual define la exactitud que debe tener el controlador de conductividad eléctrica.

Este trabajo presenta un sistema de fertirriego innovador en cuanto a la forma de inyectar los fertilizantes al utilizar bombas de paletas rotatorias que ofrecen altas presiones y caudales continuos. En la dosificación de fertilizantes se propone un sistema de control a través del monitoreo constante de la conductividad eléctrica en las soluciones madre que son las soluciones concentradas de fertilizante soluble. Al mezclar y diluir en agua las soluciones fertilizantes la conductividad eléctrica tiende a aumentar o disminuir por lo tanto si se conocen las relaciones entre las soluciones madre y su conductividad puede controlarse la conductividad eléctrica de salida al riego según lo requieran los cultivos variando la cantidad y tiempo de inyección del fertilizante.

El diseño de este equipo se basa en un PLC (programador lógico controlable) para automatizar el sistema. Las bombas y los componentes electrónicos, son productos de costos relativamente bajos y accesibles. Este equipo resulta económico, robusto, fácil de utilizar y con un control particular por tinaco lo cual permite una mejor distribución de fertilizantes a lo largo del crecimiento de las plantas. El prototipo desarrollado fue aplicado en un invernadero donde se producen plantas de jitomate saladet.

1.1 Objetivo general

- Diseñar y construir un sistema de fertirriego con inyección de fertilizantes por bombas de presión y control por PLC

1.2 Objetivos específicos

- Utilizar bombas de presión para la inyección de fertilizantes en fertirriego.
- Obtener una relación del comportamiento de la conductividad eléctrica en las soluciones madre de los fertilizantes.
- Desarrollar un programa para el PLC con los datos obtenidos de las pruebas con las soluciones madre.

1.3 Hipótesis

El uso de bombas de paletas rotatorias para la inyección de fertilizantes elimina el problema de caídas de presión en los sistemas de fertirriego. La inyección de fertilizantes puede controlarse midiendo la conductividad eléctrica de las soluciones en los tinacos utilizando un sensor de C.E. y un PLC.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Conductividad eléctrica del agua

La conductividad eléctrica, se define como la capacidad que tiene el medio para conducir la corriente eléctrica (Calderón, 2002) y expresa la concentración total de sales solubles contenidas en el agua. El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida depende del número de iones presentes y de su movilidad. La conductividad eléctrica se expresa normalmente en las unidades de *[Siemens/cm]* o, *[mhos/cm]* y sus equivalencias son las siguientes: 1 *[milimhos/cm]* = 1 *[dS/m]* = 1000 *[μS/cm]* = 1 *[mS/cm]*. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad, cuadro 2.1.

Cuadro 2.1 *Valores de conductividad de algunas muestras típicas*

Solución	Conductividad a 25°C
Agua pura	0.05 <i>[μS/cm]</i>
Agua de alimentación a calderas	1 a 5 <i>[μS/cm]</i>
Agua potable	50 a 100 <i>[μS/cm]</i>
Solución de suelo	0.5 - 2.5 <i>[mS/cm]</i>
Agua de mar	53 <i>[mS/cm]</i>
5 % NaOH	223 <i>[mS/cm]</i>

2.2 Fertirrigación

La fertirrigación consiste en la aplicación de abono disuelto en el agua de riego, distribuyéndolo uniformemente para que prácticamente cada gota de agua contenga la misma cantidad de fertilizante (Avidán 2004). Por otra parte, Carreño (1999), la define como la incorporación de las sustancias fertilizantes al suelo a través del agua de riego.

La práctica de la fertirrigación es relativamente reciente, a pesar de haberse iniciado en California en el año 1930. Actualmente es utilizada en la mayoría de los países con tradición en cultivos intensivos como Estados Unidos, Australia, Sudáfrica, Israel, España y México entre otros. La fertirrigación se asocia con sistemas de riego por goteo, exudación y microaspersión principalmente aunque existe la posibilidad de su aplicación en otros sistemas como el riego por aspersión, (www.fertiberia.com).

Ventajas y desventajas de la fertirrigación

Ventajas: Dosificación racional de fertilizantes, ahorro considerable de agua, utilización de aguas de riego de baja calidad, nutrición optimizada del cultivo, mayor rendimiento y calidad de los frutos, control de la contaminación, mayor eficacia y rentabilidad de los fertilizantes, alternativas en la utilización de diversos tipos de fertilizantes y automatización de la fertilización, (Avidán, 2004).

Desventajas: Costo inicial elevado de infraestructura, obturación de goteros, manejo por personal especializado, toxicidad. El agua mezclada no debe beberse, contaminación de aguas subterráneas, adaptabilidad del fertilizante, interacciones entre las sustancias inyectadas y el agua de riego, peligro de corrosión, requerimientos de seguridad, se requiere un funcionamiento correcto de los componentes del sistema, (Avidán, 2004).

Las ventajas que aporta el sistema de fertirrigación compensan sobradamente los inconvenientes pues éstos pueden tener una solución relativamente simple. El costo inicial puede amortizarse en poco tiempo, la obturación de goteros puede evitarse siguiendo una tecnología de fertirrigación adecuada, el problema de formación del personal se resuelve mediante cursos de formación y obras de divulgación escritas por especialistas, (Avidán, 2004).

2.2.1 Proceso de fertirrigación

Para centrar el tema de fertirrigación es necesario describir previamente el proceso completo (figura 2.1). En primer lugar, hay que preparar adecuadamente el sustrato del que debe nutrirse la planta para que la aplicación de fertilizantes en el riego tenga la máxima eficacia. Por otra parte, desde que se fabrica una solución madre concentrada en un cabezal de riego hasta que la planta toma los nutrientes de la solución del sustrato, resultado de la interacción entre la disolución fertilizante que llega a los goteros y dicho sustrato, transcurren una serie de etapas en el proceso de fertirrigación que pueden provocar un gran número de problemas (Moya 2002).

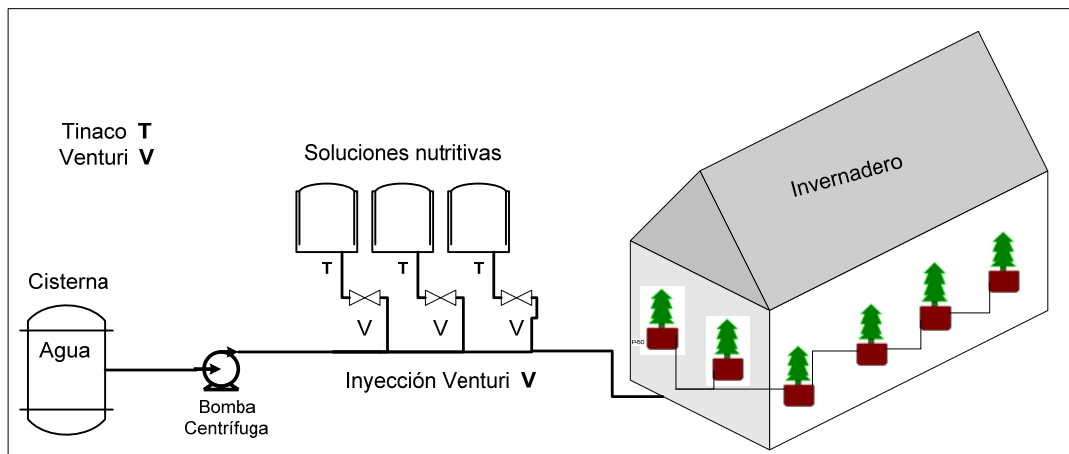


Figura 2.1 Esquema del proceso de fertirriego.

El cabezal de riego consta de diferentes módulos, distribuidos según una secuencia lógica de mezcla de fertilizantes y agua de riego. En primer lugar están los tanques de fertilizantes de los que se extraen, mediante un inyector, las soluciones concentradas de fertilizantes. Debe establecerse un programa de tiempos y diluciones con el agua de riego. Por lo regular las diluciones con el agua de riego se realizan en las proporciones de 1/100 a 1/1 000, controlando el pH y CE adecuados. Así se obtiene la solución fertilizante que después de filtrada llega a la red de goteros. Esta solución reacciona con el sustrato y da lugar a la solución nutritiva de la que se alimenta la planta (Carreño 1999).

Destaca la utilización de tres soluciones concentradas de fertilizantes. La A contiene los macro-nutrientes, excepto el Ca, en medio ácido y la B con las sales de Ca exclusivamente. En el depósito C se suele incluir los micro-nutrientes. En otro depósito se almacena el ácido nítrico cuya misión es, fundamentalmente, la de desobturar goteros cuando sea necesario. En muchos casos la solución de ácido nítrico se utiliza para realizar lavados sistemáticos al final de cada fertirrigación. La posibilidad de mezclar en el depósito B las sales de Ca y los micro-nutrientes puede considerarse cuando su almacenamiento no es prolongado y con un pH entre 4.5 y 6. En cualquier caso, la utilización de un depósito para los micronutrientes es más seguro para la estabilidad de los correspondientes quelatos (Cadahía 1998).

2.3 Fertilizantes

Son los elementos nutritivos que se suministran a las plantas para complementar las necesidades nutricionales de su crecimiento y desarrollo (Ramos, 2001). Los fertilizantes pueden clasificarse de acuerdo a diversos criterios, pero en principio para ser adecuados a la fertirrigación deben ser solubles. En cuanto se refiere al uso con el riego, se clasificaran en dos clases:

Fertilizantes líquidos: abastecidos en forma de soluciones saturadas listas para usar sin necesidad de tratamientos previos. Si bien éstos en general contienen menor concentración de nutrientes aumentando el costo de transporte y almacenamiento, su manejo en fertirriego es más cómodo que con los fertilizantes sólidos (Peña y Montiel 1998).

Fertilizantes sólidos: fácilmente solubles que deben disolverse antes de comenzar la fertilización; el factor de solubilidad es distinto para cada tipo y composición, y generalmente aumenta con la temperatura (Peña y Montiel 1998). Los dos tipos pueden ser simples o compuestos, desde el punto de vista de la composición de los nutrientes.

Los fertilizantes simples contienen un solo nutriente y los compuestos contienen dos o más elementos nutritivos, a veces también micro-elementos. Estos últimos muchas veces están formulados para distintos etapas del desarrollo de un cultivo (Carreño 1999). En la actualidad es común atribuir a los fertilizantes solubles la característica de hidrosolubles, si bien los primeros son eficaces para aplicación directa al suelo, los segundos son los productos idóneos para la inyección en todo tipo de sistemas de riego. Este tipo de fertilizantes se disuelve totalmente sin precipitados y forman una solución cristalina sin turbiedad resultando en una mínima contaminación del agua freática y de superficie, minimizando los riesgos de corrosión y taponamiento en los emisores del sistema de riego y distribución de agua, (Carreño 1999).

Solubilidad y Temperatura

De un fertilizante sólido interesa saber a que temperatura del agua tiene mayor grado de solubilidad. Muchos fertilizantes al disolverse aumentan la temperatura de la solución (Reacción exotérmica) y otras la disminuyen (Reacción endotérmica). Con esta información al prepararse una solución multinutrientes deben disolverse los de reacción exotérmica para facilitar la disolución de los segundos (Ramos 2001). El cuadro 2.2 es una guía para éstas características.

Cuadro 2.2 Variación de la solubilidad de algunos fertilizantes al variar la temperatura.

	TEMPERATURA (°C)					
	0	5	10	20	25	30
Fertilizante	g/L.....					
Urea	680	780	850	1060	1200	1330
Sulfato de amonio	700	715	730	750	770	780
Sulfato de potasio	70	80	90	110	120	130
Cloruro de potasio	280	290	310	340	350	370
Nitrato de potasio	130	180	210	320	370	460

Salinidad, pH y conductividad eléctrica de los fertilizantes

Debe conocerse como afecta el pH y la conductividad eléctrica del agua de riego al final de la solución pues la mayoría de los cultivos aprovechan mejor los nutrientes con un pH de 6 a 7.5 (figura 2.2). Es muy importante utilizar productos de bajo equivalente salino (Vera y De la Peña, 1994) debido a que los iones acompañantes de algunos productos no son absorbidos en altas cantidades y dejan residuos que elevan la salinidad del suelo.

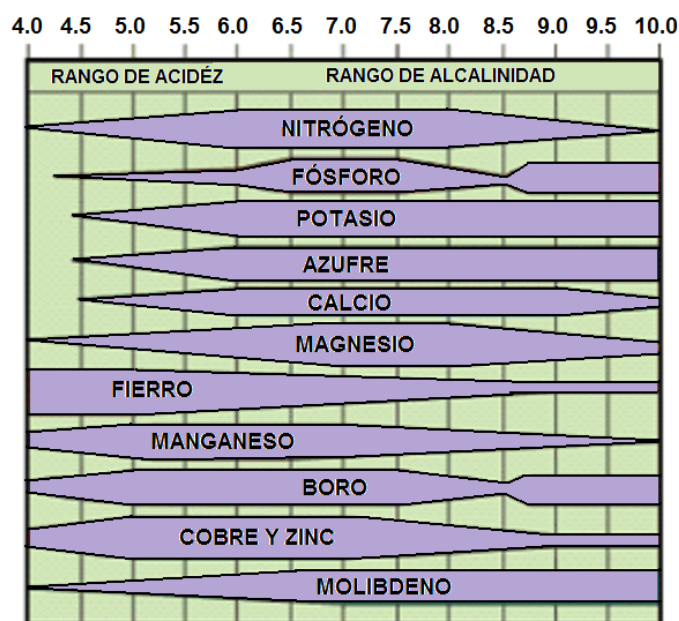


Figura 2.2 Influencia del pH en el aprovechamiento de nutrientes por las plantas (NPFI, 1996).

Fertilizantes Nitrogenados

El nitrógeno es el principal nutriente a considerar y el más fácil de manejar en fertirriego ya que hay muchas fuentes solubles y baratas. Las concentraciones de nitrógeno consideradas como óptimas en la solución de suelo, son 200 a 250 ppm [mg/L]. Se comienza el ciclo de cultivo con concentraciones menores, de 100 ppm, y se incrementan a medida que crece y se desarrolla. Las cantidades totales a agregar por cultivo, dependen de la etapa de crecimiento del cultivo, modalidad de cosecha, gustos del mercado y variedad, (fertilizando.com).

Fertilizantes Fosfatados

El fósforo tiende a acumularse en el suelo, detectándose valores muy altos en sitios con más de dos años consecutivos de cultivo debido a su baja movilidad en el suelo. Una vez aplicado se mueve a las raíces por difusión y no por flujo acuoso, (fertilizando.com). Para la mayoría de los cultivos de 1 a 4 ppm en la solución del suelo es suficiente para el crecimiento, desarrollo y fructificación. El método más eficiente para el suministro de fósforo por fertirrigación es con ácido fosfórico por su alta solubilidad y concentración.

Fertilizantes Potásicos

El potasio posee también poca movilidad en el suelo, ya que es mantenido con éxito en los sitios de intercambio. Sin embargo se moviliza más que el fósforo y mucho menos que el nitrato o la urea. Las cantidades usuales en la solución de riego, oscilan entre 80 y 120 ppm al comienzo del desarrollo del cultivo para incrementarse progresivamente hasta alcanzar 300 y 350 ppm en el pico de la producción, (fertilizando.com).

Micronutrientes

Se denominan micronutrientes u oligoelementos a los elementos nutritivos que siendo esenciales son utilizados por las plantas en cantidades relativamente bajas (Cadahía, 1998). En fertirrigación más que en ningún otro sistema de cultivo es necesaria la aplicación de micronutrientes ya que las raíces de las plantas confinadas al gotero solo van a poder explorar una pequeña parte del sustrato, cuyo contenido en micronutrientes disponibles puede ser insuficiente para el buen desarrollo del cultivo, (Cadahía, 1998). Además, una aplicación adecuada en macronutrientes hace que éstos no sean los factores limitantes de la producción, recayendo esta responsabilidad en los micronutrientes. El uso de sustratos y aguas de riego calizas o alcalinas disminuye la solubilidad y disponibilidad de los metales, por lo que, aunque estén presentes en cantidades suficientes no lo están en formas asimilables por los cultivos.

Índice salino

Uno de los requisitos indispensables para lograr eficiencia en el sistema agua-suelo-planta es una baja salinidad, medida por la conductividad eléctrica (C.E.) de la solución fertilizante o solución de suelo, lograrla es también una preocupación de los productores quienes a través de cultivos sucesivos en el mismo sitio incrementan los riesgos de acumulación de sales (Darwich, 2006).

La salinidad, es mejor tolerada en períodos de alta intensidad lumínica. Por otra parte, una mayor salinidad es favorable para el desarrollo de sabor durante el período de maduración de los frutos, especialmente levantando los niveles de potasio. Es peligroso sin embargo, regular el exceso de salinidad restringiendo el volumen de agua a regar, pues provoca entre otros problemas, una mayor incidencia de podredumbre apical (Avidán 2004).

Los fertilizantes son sales que contribuyen al aumento de la salinidad en el agua de riego, afectando la presión osmótica con que el agua es absorbida por la planta requiriendo consecuentemente mayor energía, (Imas 2002). La operación de fertirrigar, al agregar fertilizantes, aumenta la concentración salina del agua de riego y la de la solución del suelo. El cuadro 2.3 muestra la relación de la C.E. con la concentración de fertilizantes en la solución.

Cuadro 2.3 Variación de la CE al variar la concentración de nutrientes.

	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA [mS/cm]			
	2.0	3.0	4.0	5.0
Nutrientes	mg/L.....			
Nitrógeno (NO ₃)	180	310	435	560
Fósforo (P)	40	40	40	40
Potasio (K)	300	500	700	900
Calcio (Ca)	200	330	470	600
Magnesio (Mg)	40	65	95	120

Productos formulados.

Existe una amplia gama de fertilizantes cristalinos para aplicarlos en fertirrigación con una composición de N, P, y K que poseen un alto grado de solubilidad, generando un pH y una conductividad eléctrica adecuada. La disponibilidad en el mercado es amplia y las formulaciones muy diversas. Actualmente la tendencia del mercado es utilizar este tipo de productos, especialmente elaborados para fertirriego. Se entregan con información técnica adicional, que orienta al productor y/o técnico, para dosificar la cantidad necesaria para cada cultivo y en cada etapa de producción, (Peña y Montiel 1998). Preparar mezclas balanceadas supone conjugar una serie de factores relacionados a las fuentes disponibles. Deben satisfacerse y optimizarse factores de precio por nutriente; peligro de excesiva salinización, de acidez y por supuesto a los requerimientos del cultivo (Imas 2002).

Preparación de soluciones nutritivas

En invernaderos, donde se usa el método de dosificación cualitativa o proporcional, se preparan soluciones madre concentradas en el cabezal de riego a partir de la dilución de fertilizantes. Los concentrados deben prepararse por separado esto se debe a que existe incompatibilidad de ciertos iones a permanecer en solución a una elevada concentración, por ejemplo los iones fosfatos y sulfatos precipitan en presencia del ion calcio en soluciones concentradas. Otras combinaciones, por ejemplo, sulfato de amonio y cloruro de potasio en el tanque reduce significativamente la solubilidad de la mezcla (Carreño y Magán 1999). En aguas ricas en calcio y bicarbonatos, el sulfato de calcio precipitará y tapaná los goteros. La inyección de soluciones con urea inducirá la precipitación de carbonato de calcio debido al aumento del pH de la solución. Por ultimo la solución madre debe estar protegida de los factores ambientales como la luz, humedad y altas temperaturas (Carreño y Magán 1999).

Es difícil lograr una combinación de sales para dar una concentración ideal de nutrientes debido a que la solubilidad depende de factores como el pH, la concentración de las soluciones y la temperatura (Imas 2002). Cualquier concentración de más de dos productos reducirá la solubilidad de cada material por separado. Los cuadros 2.4 y 2.5 son una guía apropiada. La base de un sistema de fertirrigación es el almacenamiento de dos soluciones madre, una conteniendo los iones fosfatos y otra conteniendo los iones calcio y magnesio, el resto de los nutrientes se agregan a estas soluciones madre o en recipiente separado.

Cuadro 2.4 Fuentes, concentración de nutrientes, índice salino y solubilidad de algunos fertilizantes más comunes disponibles en el mercado.

Fertilizante	CONTENIDO DE NUTRIENTES (%)							
	Solubilidad ¹	Índice Salino ²	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
ácido fosfórico	5285	--	--	72	--	--	--	--
cloruro de potasio	347	116	--	--	60	--	--	--
fosfato monoamónico	282	30	11	52	--	--	--	--
fosfato diamónico	575	34	18	46	--	--	--	--
fosfato monopotásico	260	--	--	52	34	--	--	--
nitrate de amonio	1183	105	34	--	--	--	--	--
nitrate de calcio	3410	53	--	17	--	--	24	--
nitrate de magnesio	423	--	11	--	--	--	10	--
nitrate de potasio	316	74	13	--	44	--	--	--
sulfato de amonio	760	69	21	--	--	--	--	23
sulfato de magnesio	260	44	--	--	--	--	16	13
sulfato de potasio	110	46	--	--	50	--	--	18
urea	1193	75	46	--	--	--	--	--

¹ Solubilidad en [g/L] [Kg/m³] a 20 ° C de la forma cristalina de la sal, de aquellos fertilizantes más usados para preparar soluciones de fertirrigación.

² El índice salino se calcula por el incremento en presión osmótica producido por un peso igual de fertilizante relativo al nitrato de sodio (Índice Salino = 100).

Cuadro 2.5 Compatibilidad entre fertilizantes solubles.

	Urea	Nitrato de Amonio	Sulfato de Amonio	Nitrato de Calcio	Nitrato de Magnesio	Fosfato Monoamónico	Fosfato Monopotásico	Nitrato de Potasio	Sulfato de Potasio	Cloruro de Potasio	Ácido Fosfórico	Ácido Nítrico	Ácido Sulfúrico	Sulfatos Fe, Zn, Cu, Mn	Quelatos Fe, Zn, Cu, Mn	Sulfato de magnesio
Urea																
Nitrato de Amonio																
Sulfato de Amonio																
Nitrato de Calcio																
Nitrato de Magnesio																
Fosfato Monoamónico																
Fosfato Monopotásico																
Nitrato de Potasio																
Sulfato de Potasio																
Cloruro de Potasio																
Ácido Fosfórico																
Ácido Nítrico																
Ácido Sulfúrico																
Sulfatos Fe, Zn, Cu, Mn																
Quelatos Fe, Zn, Cu, Mn																
Sulfato de Magnesio																

Compatible 

Se reduce la solubilidad 

Incompatible 

Antagonismo y sinergismo entre iones

Son dos elementos que deben tomarse en cuenta para la preparación y el cálculo de la solución nutritiva. Al aumentar la concentración de iones iguales a los del producto en cuestión, disminuye la solubilidad (Avidán y Nathan 2004), cuadro 2.6.

Cuadro 2.6 Antagonismo y sinergismo entre iones

ION	ANTAGÓNICO CON	SINÉRGICO CON
Nitrógeno	Potasio	Magnesio
Fósforo	Potasio, Hierro, Zinc	Magnesio
Potasio	Boro, Magnesio	Magnesio, Hierro
Calcio	Potasio, Hierro, Magnesio	---
Sodio	Magnesio, Calcio	---
Bicarbonato	Hierro	---
Sulfato	Calcio	Sodio

Fuente: Pizarra (1996).

La concentración de un fertilizante es la cantidad del elemento nutritivo en su respectiva unidad realmente asimilable por la planta (Imas, 2002). Los fertilizantes sólidos tienen la propiedad de absorber la humedad del medio. Es importante mantenerlos cerrados en depósitos a los efectos de evitar este fenómeno (Avidán y Nathan 2004). Fertilizantes que contienen urea y amonio pueden perder nitrógeno en depósitos, por volatilización de amonio por lo que deben almacenarse en tanques sellados. Acidificando la solución se pueden reducir las pérdidas (Avidán y Nathan 2004).

Guía de preparación de solución nutritiva (Cadahia, 1998)

- Se deben pesar las sales individualmente, evitando en lo posible pérdidas de material, asegurando una variación de más o menos 5 % en una escala en gramos. Llenar el tanque con agua en un 10 % de su totalidad.
- Disolver cada sal separadamente en recipientes grandes llenos de agua y volcarlos en el tanque repitiendo la operación hasta disolver totalmente la sal. Se puede utilizar agua caliente en caso de una difícil disolución.
- Disolver los micronutrientes primero y luego los macro.
- Cuando se trata de volúmenes pequeños se puede mezclar los sulfatos en forma seca antes de disolverse. Lo mismo con los nitratos y fosfatos.
- Dejar circular unos segundos la solución de nutrientes y medir el pH ajustándolo de ser necesario con ácido sulfúrico o con hidróxido de potasio. Un pH alto puede causar la precipitación del Fe, Mn, PO₄, Ca y Mg.

2.4 Equipos para fertirrigación

A mediados de la década de los 70's empezaron a utilizarse simultáneamente equipos para la incorporación de los fertilizantes al agua de riego, que fundamentalmente fueron tanques de fertilización. Con el paso del tiempo se han ido incorporando otros sistemas entre los que destacan los equipos de inyección, la aspiración directa de la solución de un depósito por la bomba de riego, equipos de fertirrigación con tubos Venturi, y por último equipos de fertirrigación automáticos controlados por programadores (Carreño y Magán, 1999).

La incorporación de fertilizantes se efectúa mediante dispositivos que se sitúan, normalmente, en el cabezal o bien en las cabeceras de las unidades operacionales de riego. En todos los casos, debe instalarse un filtro a continuación del dispositivo de fertilización para evitar el paso a la red de riego de residuos e impurezas. El equipo utilizado para el fertirriego se produce en diferentes tipos y modelos con características variadas en ventajas limitaciones y costos siendo la confiabilidad, exactitud, operación, energía, adaptabilidad a la automatización, garantía, servicio, estándares, experiencia de campo y precio algunos criterios para la selección del equipo (Nathan, 2004)

Equipos automáticos existentes.

Dentro de los equipos existentes está el Mixer Elgal 2000 (Figura 2.3), el Fertigal (Figura 2.4), el Nutrimac (figura 2.5) y el Inline-Jet (figura 2.6) entre otros equipos comerciales anunciados en internet. El cuadro 2.7 presenta la comparación entre estos equipos.

Cuadro 2.7 Características comparativas de algunos equipos de fertirriego ofrecidos en internet.

Características	Equipos			
	Elgal 2000	Fertigal	Nutrimac	Inline-Jet
Método de control	Por sensores pH y C.E.	Por sensores pH y C.E.	Por sensores pH y C.E.	timer
Control de	Volumen y tiempo	Volumen y tiempo	tiempo	No hay dispositivo
Tipo de inyección	Venturi	Venturi	Venturi	Venturi
Dispositivo de control	electroválvulas	electroválvulas	Electroválvulas	Bomba centrífuga
Mantenimiento	Requiere capacitación	Requiere capacitación	Requiere capacitación	mínimo
costos	€ 40 000	€ 42 000	€ 17 800	€ 11000
Explotación	Pequeña y mediana	Ajustable	Ajustable	Gran escala

El sistema Elgal 2000 presenta un control exacto de la aplicación de fertilizante, dosificación con base al volumen o al tiempo y control automático del pH y CE.

El sistema Fertigal realiza la inyección a la línea por Venturi, puede manejar hasta 350 [L/hora] tiene un control exacto y es de fácil mantenimiento, las tuberías son de PVC, cuenta con caja de conexiones eléctricas y sistema de filtrado.



Figura 2.3 Sistema Elgal 2000



Figura 2.4 Sistema Fertigal.



Figura 2.5 Sistema nutrimac

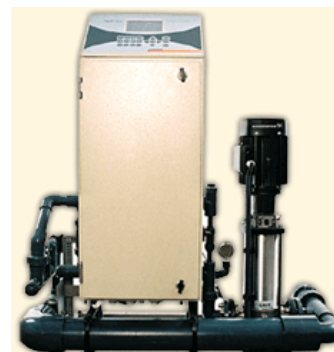


Figura 2.6 Sistema Inline-Jet de netafim

El sistema Nutrimac realiza la aportación de abonos a la red de riego mediante inyector tipo Venturi, manteniendo estables los niveles de pH y conductividad eléctrica, permite la programación de los riegos por sectores independientes o agrupados. Tiene sistema de filtrado y caja de conexiones eléctricas. Cada canal de dosificación viene equipado con un medidor visual de caudales y puede suministrar de 30 a 300 [L/h] de fertilizante. Las opciones de medición y control de C.E. y pH pueden incorporarse con facilidad. El equipo Inline-Jet de Netafim es una unidad de inyección en línea que controla la aplicación adecuada de fertilizantes para caudales de 5 a 20 [m³/h].

2.5 Equipos de inyección

La aplicación de fertilizantes a través del sistema de riego presurizado requiere la inyección de una solución fertilizante al sistema siendo necesario superar la presión de la red. Para lograr este objetivo existen diversos enfoques como gradiente de presión con tanques de fertilización, succión producida por el principio Venturi, inyección por medio de un motor (Avidán y Nathan 2004).

Inyección por tanque fertilizante

El tanque va conectado paralelamente a la red de tubería. La desviación de una parte del flujo del agua de riego es obtenida por un gradiente de presión y dirigida al tanque donde se mezcla con el fertilizante para después continuar su recorrido. Cuanto mayor sea el gradiente de presión mayor es la tasa de inyección. Son económicos y de simple construcción, no requieren energía externa, pueden transportarse y permiten amplias tasas de dilución de fertilizante (Avidán 2004). Presentan inconvenientes como pérdida de presión y bajo control en el control de la inyección,

Inyección por tubo Venturi

Este inyector opera bajo el principio de Venturi (figura 2.7), una constricción en el flujo con una entrada específica y un diseño de salida instalado en la tubería crea un vacío producto del aumento de la velocidad a través de la constricción, (Avidán y Nathan 2004)

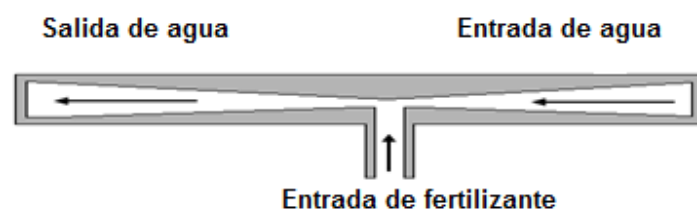


Figura 2.7 Tubo Venturi.

Las ventajas que ofrece el tubo Venturi son que no requiere energía externa para operar, utiliza la fuente de energía del sistema de riego, carece de partes móviles, es fácil de instalar, económico, puede usarse en el control de la inyección.

El principal inconveniente es la pérdida de presión que genera en la red de tuberías, pierde un tercio de la presión de entrada o más. Para sistemas de baja presión como la microaspersión y goteo puede no haber suficiente presión para operar el Venturi. Cada modelo tiene un rango de operación limitado y las variaciones de presión afectan la tasa de inyección. En general la presión debe ser suficiente y constante para asegurar su óptimo desempeño.

Inyección por bombas

Los fertilizantes pueden ser inyectados en la red de riego por medio de una bomba (FAO 1986). En este caso el recipiente no tiene que estar a la misma presión de la tubería principal y se puede fabricar de material ligero y quedar abierto. Su accionamiento puede ser eléctrico, hidráulico o por motor de combustión, lo que tiene consecuencias en la automatización. Las bombas inyectoras, dentro de un rango de operación, deben tener una exactitud de distribución de más o menos 1%. y ser construidas de materiales anticorrosivos.

Bombas hidráulicas

Las bombas hidráulicas operan por medio del flujo de agua que pasa por una turbina o pistón. Muchos modelos permiten regular la tasa de inyección en forma proporcional al flujo de riego de la línea y a la presión. El motor opera dentro de un rango de presión definido por el fabricante. Si el flujo cesa, la inyección se detendrá inmediatamente. Estas bombas operan generalmente en cabezales centrales, (Avidán 2002) como inconveniente estas bombas expulsan el agua que las acciona generando desperdicios y caídas de presión.

Bombas de diafragma

La bomba consiste de dos diafragmas, uno superior y otro inferior, ligados por una vara central vertical. Durante el movimiento hacia arriba, el fertilizante entra a la cámara y sale cuando cambia el movimiento, pueden ser de accionamiento hidráulica o eléctrico y presentan una inyección pulsada (Avidán 2002).

Bombas de émbolo

En las bombas de émbolo (figura 2.8) el fertilizante es desalojado de las cámaras de trabajo por el movimiento alternativo de un pistón, pueden ser de accionamiento hidráulico, eléctrico o mecánico. El mecanismo sufre desgaste prematuro si el fertilizante contiene impurezas sin filtrar, (Fernández, 2002).

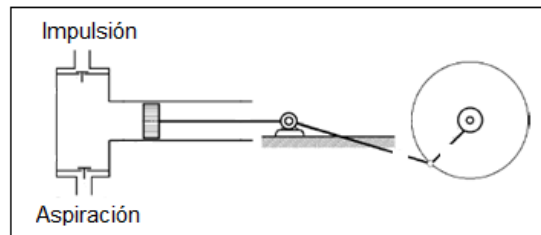


Figura 2.8 Bomba de émbolo.

Bombas centrífugas

En las bombas centrífugas la energía se comunica al líquido por medio de álabes en movimientos de rotación, (figura 2.9). Los elementos constructivos de que constan son: una tubería de aspiración, el impulsor o rodete, y una tubería de impulsión. Las ventajas principales de las bombas centrífugas son: caudal constante, presión uniforme, sencillez de construcción, tamaño reducido, bajo mantenimiento y flexibilidad de regulación. Uno de sus pocos inconvenientes es la necesidad de cebado previo al funcionamiento, ya que las bombas centrífugas no son autoaspirantes, (Fernández, 2002). Algunos tipos de bombas centrífugas son: radiales, axiales y diagonales, de impulsor abierto, semiabierto y cerrado, de tipo horizontal y vertical.

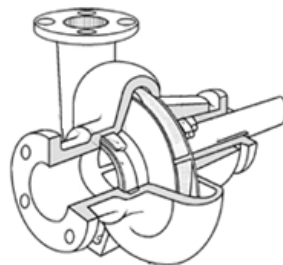


Figura 2.9 Esquema de una bomba centrífuga.

Bombas de paletas rotatorias

Las bombas de paletas rotatorias no son utilizadas en fertirriego pero como se menciona en los objetivos de este trabajo se plantea su aplicación en la inyección de fertilizante por lo que se describen sus características.

Las bombas de paletas rotatorias (figura 2.10) consisten en un conjunto de cuatro o más paletas con cinemática radial, el rotor es un cilindro hueco con ranuras radiales en las que oscilan o deslizan las paletas, desplazando el líquido de forma continua y uniforme. Estas bombas presentan una amplia descarga, permiten un control absoluto sobre el caudal desalojado y generan altas presiones de bombeo. (<http://www.termica.webhop.info/>).

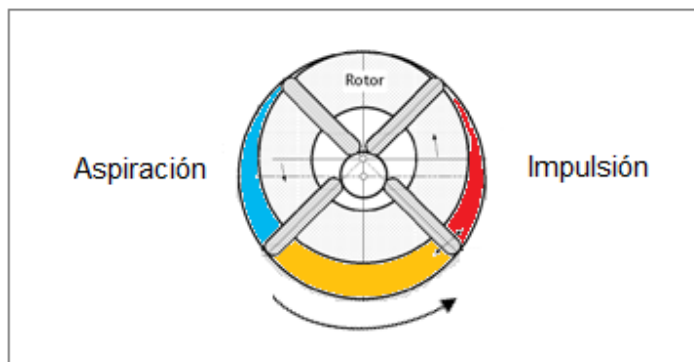


Figura 2.10 Bomba de paletas deslizantes

Bomba peristáltica

Al igual que las bombas de paletas las bombas peristálticas no son explotadas en sistemas de fertirriego. Una bomba peristáltica es un tipo de bomba de desplazamiento positivo usada para bombear fluidos de características variadas (figura 2.11). Los líquidos altamente viscosos son bombeados sin problema por esta bomba. Es ideal para aplicaciones en que se requieran grandes dosificaciones o presiones de trabajo hasta de 1750 [kPa]. Debido a que el producto bombeado está sólo en contacto con la manguera y con ningún elemento mecánico, la bomba peristáltica es ideal para aplicaciones que requieran el manejo de líquidos corrosivos o abrasivos, (<http://wikipedia.org>).

El funcionamiento de la bomba peristáltica se basa en el movimiento alternativo de contracción y relajación de la manguera, lo que crea el movimiento del fluido. Un rotor con rodillos unidos a la circunferencia externa comprimen el tubo flexible forzando el fluido a ser bombeado, cuando la manguera deja de ser presionada el fluido es transportado a la bomba, (www.acomybombas.com.ar).

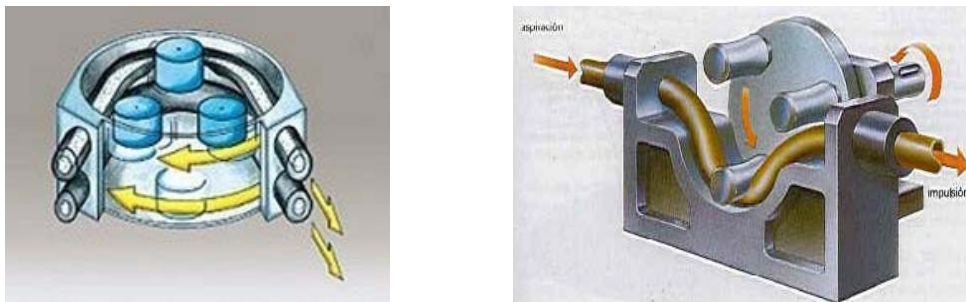


Figura 2.11 Bomba peristáltica doble y sencilla.

Debido al principio de operación de la bomba, las mangueras usadas son de materiales especiales, con propiedades que ofrecen resistencia a la compresión y fricción constante a la que se ven sometidas. Entre los materiales utilizados en la fabricación de estas mangueras se encuentran: caucho natural, buna-N, EPDM (etileno propileno dieno monómero de caucho), Hypalon® (marca comercial para polietileno y caucho sintético). Destaca su resistencia a productos químicos, temperaturas extremas y luz UV. La principal desventaja que presentan estas mangueras es su alto costo de adquisición por ser equipo industrial.

2.6 Sistemas de agitación

La mezcla de fertilizantes debe agitarse periódicamente para conseguir una homogeneidad en el fluido antes de cada riego. Los agitadores mecánicos y neumáticos son los más utilizados en fertirriego. Los agitadores neumáticos inyectan aire a presión dentro del tinaco creando una turbulencia en la mezcla de fertilizantes. Los agitadores mecánicos hacen girar una propela dentro del recipiente contenedor hasta lograr una homogeneización de la mezcla, (www.sisagdetro.com).

Existen diferentes tipos de agitadores:

- Verticales con motorreductor y montaje por medio de brida.
- Portátiles con motor neumático montaje por medio de pinza.
- Portátiles con motorreductor y montaje por pinza
- Montados en tripie, fijos o móviles con motor eléctrico o neumático, directos o con caja reductora de velocidad.

Entre las propelas existentes se encuentran las de tipo turbina para homogeneización, tipo expandible para recipientes de cuello estrecho en donde las aspas se elevan al girar, tipo marina para agitar el producto y/o enfriarlo a velocidades moderadas, tipo disco cawler para dispersar, triturar y/o cortar el producto y tipo disco saw, utilizado para triturar producto como frutas, grumos etc.

Turbinas axiales de palas planas

Las turbinas axiales de palas planas a 90° homogeneizan económicamente a pequeña y mediana capacidad. El flujo generado por este tipo de paleta es predominantemente axial con un componente radial (figura 2.12). Las turbinas de palas planas funcionan con velocidad lenta y un porcentaje de turbulencia más elevado. Estas turbinas requieren menores costos de fabricación y son a menudo, suficientes para aplicaciones comunes de mezcla.

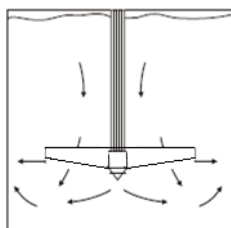


Figura 2.12 Turbinas axiales de palas planas a 90°

2.7 Filtros

Estos dispositivos evitan el paso de impurezas como partículas y sólidos en suspensión contenidos en el agua, protegiendo de obturaciones a los sistemas de riego localizado, (elriego.com). Es importante instalar filtros adecuados para evitar el paso de elementos que pudieran obstruir las salidas.

La selección de los filtros se hace según la calidad del agua y tipo de impurezas, pero por lo general se propone la utilización de filtros de mallas o anillos de 100 a 130 mesh, contruidos de acero inoxidable, poliéster o nylon (elriego.com). El parámetro que comúnmente se utiliza para evaluar la capacidad de retención del filtro es el número de mesh, que se define como el número de orificios por pulgada lineal, contados a partir del centro de un hilo, por ejemplo una malla de 120 mesh tiene 120 orificios por pulgada (Spears® Tech. Info 2008). El cuadro A-6 de los anexos muestra la relación del numero mesh con la dimensión del orificio en [mm].

Los principales filtros usados en fertirriego son:

Filtros de mallas (figura 2.13a), presentan un cartucho en cuyo interior van cilindros concéntricos de mallas, que tienen la función de retener partículas más finas, generalmente inorgánicas, y algunos contaminantes orgánicos. Estos filtros pueden lavarse manualmente.

Filtro de anillos (figura 2.13b), impiden el paso de partículas pequeñas, como limos y materia orgánica; por medio de discos ranurados, superpuestos a presión uno sobre otro. Dependiendo del contaminante se elige el tipo de filtro (cuadro 2.8).

Cuadro 2.8 Aplicación de los filtros de acuerdo al contaminante.

Contaminante	Hidrociclones	Malla	Anillos
Arena	X	X	
Limo, arcillas		X	X
Materia orgánica		X	X
Partículas y sólidos en suspensión		X	X



Figura 2.13 Filtros de malla y anillos respectivamente

2.8 Secciones de riego

Los sistemas de fertirriego deben abastecer áreas de cultivo que muchas veces rebasan la capacidad de entrega de los equipos en una sola aplicación. Tener un equipo de grandes dimensiones eleva los costos de adquisición y mantenimiento. Debido a estas causas suelen diseñarse las redes de tuberías dividiéndolas en secciones que se dimensionan en función de la capacidad del equipo y al tamaño de la zona de riego. Las secciones de riego son controladas a través de válvulas manuales o electromagnéticas las cuales permiten o impiden el flujo del riego. Tener dividida el área de cultivo ofrece ventajas como controlar la presión del sistema al cerrar o abrir secciones, si se implementan válvulas electromagnéticas puede controlarse la apertura de la sección a regar en tiempos determinados por medio de un sistema electrónico, (Urrestarazu, 1997).

2.9 Sistema de control automático

Los sistemas actuales de fertirriego utilizan controles automáticos para llevar a cabo las funciones de actuación. El mercado ofrece una amplia gama de sistemas de control electrónico y programas de cómputo construidos para el fertirriego, sin embargo sus costos son elevados y limitan al usuario en el uso de las funciones. Por esta razón existen alternativas en equipo electrónico para realizar un diseño que se ajuste a las necesidades del sistema de fertirriego. Entre estas alternativas se tienen a los microcontroladores, los PIC's y los PLC's.

Microcontrolador

Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Se compone de la memoria ROM (memoria de sólo lectura), memoria RAM (memoria de acceso aleatorio), líneas de entrada/salida (I/O) llamados puertos. La lógica de control coordina la interacción entre los demás bloques, (www.atmel.com/mc).

2.9.1 PLC

Los PLC (Programmable Logic Controller) son dispositivos electrónicos usados en automatización los cuales controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales; Los PLC pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas y ejecutar estrategias de control. Los PLC actuales pueden comunicarse con otros controladores y computadoras en redes de área local, y son una parte fundamental de los modernos sistemas de control.

Los lenguajes de programación permiten implementar algoritmos complejos mediante diagramas de flujo menos difíciles de interpretar. El FBD (Function Block Diagram) es un lenguaje que emplea compuertas lógicas y bloques con distintas funciones conectados entre si, incluyendo diferentes tipos de operandos, como lógica booleana, contactos, bobinas, hasta operaciones más complejas como operadores matemáticos, manejo de contadores, temporizadores tablas, apuntadores, algoritmos PID y funciones de comunicación multiprotocolos que le permitirían interconectarse con otros dispositivos.

Los PLC pueden manejar altas cargas de potencia; requieren poco diseño eléctrico y el problema de diseño se centra en expresar las operaciones y secuencias en los diagramas de funciones. Las aplicaciones de PLC son normalmente hechos a la medida del sistema. Las señales digitales o discretas como los interruptores, son simplemente 0 ó 1.

Las señales discretas son enviadas usando la tensión o la intensidad, donde un rango específico corresponderá al 0 y otro rango al 1. Las señales analógicas son como el control de volumen, variable entre 0 y el tope de escala. Esto es normalmente interpretado con valores enteros por el PLC. Presión, temperatura, flujo, pH, C.E. y peso son normalmente representados por señales analógicas. Las señales analógicas pueden usar tensión o intensidad con una magnitud proporcional al valor de la señal que se procesa.

2.9. 2 PLC Crouzet Millenium II

El Millenium II (figura 2.14) permite automatizar pequeños equipos para aplicaciones como embalaje, distribución automática, irrigación, gestión de bombas, control de climatización y de calefacción, entre otras. Dispone de entradas digitales, potenciométricas o analógicas de 16 bits, salidas relé, estáticas o PWM y una pantalla LCD con 4 líneas de 18 caracteres, textos rotativos y barras de indicación de estado. Según el modelo, está disponible para ser alimentado por una fuente de 12 o 24 [V] con corriente directa, o bien con 24 y 100-240 [V] a corriente alterna. Entre sus funciones, se incluye la temporización en 5 modalidades, tres formas de conteo, regulación PID (proporciona integral derivativo), el cálculo mediante funciones aritméticas, operaciones lógicas (and, or, nand, nor, xor, not), la creación de programas secuenciales y la ejecución de eventos en tiempo real, (www.crouzet.us/m2).



Figura 2.14 PLC Millenium II. Crouzet USA.com

Sus extensiones analógicas pueden adquirir valores de corriente, tensión o temperatura para convertirlos en señales numéricas adecuadas para el controlador lógico. Entre sus opciones de comunicación, el Millenium II da la posibilidad de supervisar y conectar equipos, conectando los controladores lógicos a Buses de terreno (Modbus, Ethernet) o vía Módem (RTC o GSM). Permite la simulación para comprobar en tiempo real el resultado de la programación. Los programas pueden ser transferidos directamente sobre los módulos, a distancia vía las soluciones de módem, o en local con o sin hilos (Bluetooth).

III MATERIALES Y MÉTODOS

3. 1 Ubicación del proyecto

El área donde se realizó el proyecto fue el Laboratorio de Ingeniería de Riego del Departamento de Irrigación (figura 3.1), campo Tlapeaxco del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, el cual está ubicado en el km. 38 de la carretera México - Texcoco, con las siguientes coordenadas 19° 29' Latitud Norte, 98° 54' de longitud Oeste y a una altura de 2,250 m.s.n.m. Los tinacos se colocaron a un lado de la caseta de control del sistema que actualmente utilizan los invernaderos de este campo.



Figura 3.1 Vista satelital del campo experimental Tlapeaxco. Google Earth 2008®

3.2 Esquema del proyecto

El equipo de fertirriego diseñado para un invernadero (figura 3.2) se compone de diferentes elementos mecánicos y electrónicos para la medición, control y accionamiento de motores y bombas. Los sistemas que forman parte del equipo final son:

- Sistema de soporte y distribución (tinacos, cisterna, estructura, bombas)
- Sistema de Accionamiento (bombeo, inyección de fertilizantes y agitación).
- Sistema de control (Medición y accionamiento de servomandos)

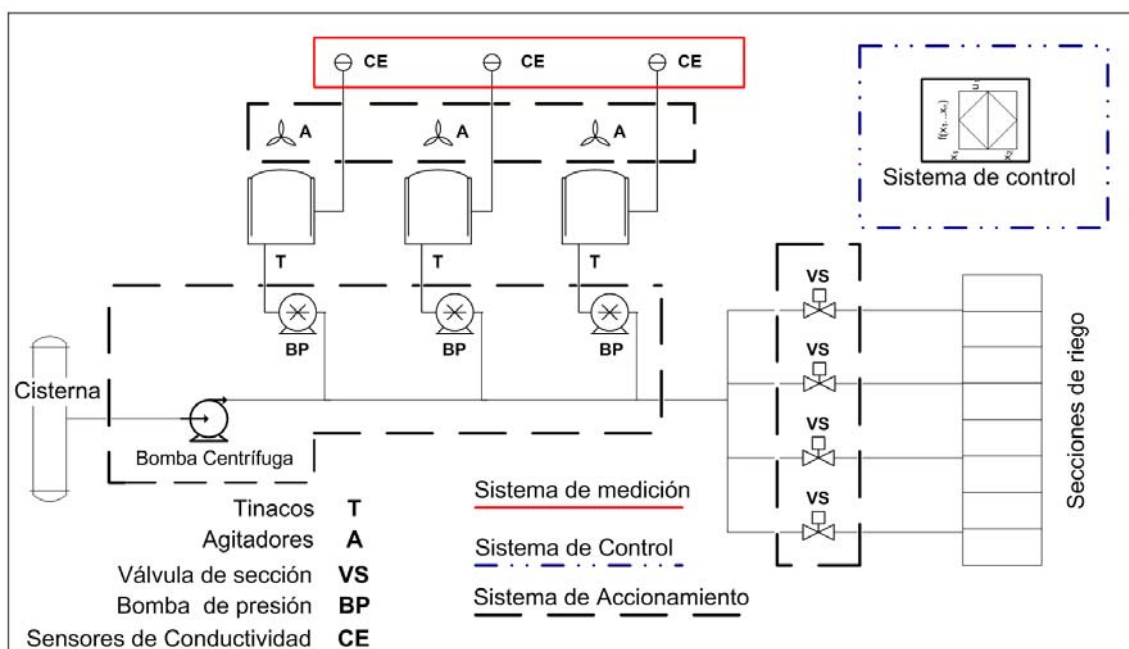


Figura 3.2 Esquema del sistema de fertirriego

3.3 Sistema de soporte almacenamiento y distribución

Es necesario el diseño de un sistema de almacenaje de fertilizantes en forma líquida y su acondicionamiento a la red de conductos donde se tomarán los fertilizantes para posteriormente inyectarlos a la tubería de riego, mejor conocido como cabezal de riego. El primer factor a tomar en cuenta para dimensionar el equipo es la cantidad de fertilizante que debe suministrarse, el tamaño de los contenedores de solución nutritiva y la capacidad de la bomba que inyectará el fertilizante.

Las dimensiones y capacidad del sistema son una variable que está en función del área de cultivo, disponibilidad de agua, recursos económicos y uso del sistema entre otros. Para este diseño se tomarán las dimensiones de la demanda actual de un invernadero localizado dentro del campo experimental Tlapeaxco que consume 3300 litros de fertilizantes semanalmente.

Descarga de la bomba inyectora

Para encontrar el tamaño adecuado de la bomba es necesario saber la cantidad de solución fertilizante a inyectar por día, así como el tiempo de riego.

Los datos utilizados fueron:

- Dosis de fertilizante a inyectar por día, 550 [L]
- Siete riegos espaciados en una hora y media
- Nueve minutos durante cada riego

El caudal (q) de fertilizante por día es la suma de la mezcla de los tres recipientes.

$$q = \frac{Df}{cB} \quad (3.1)$$

Donde: Df es la dosis de fertilizantes; y cB la cantidad de bombas inyectoras. Considerando una dosis de 550 [L/día], con tres bombas de inyección el caudal proporcionado es de 183.3 [L/día]. Con siete riegos por día, el gasto por riego es de 26.2 [L/riego]. El caudal suministrado por bomba es $26.2/9 = 2.99$ [L/min]

Capacidad del tanque

Para un abastecimiento y preparación adecuada de las soluciones fertilizantes se propone una duración de una semana en cada recarga. Con este dato se calcula el tamaño de los tinacos. El consumo es de 550 [L/día] y 3300 [L] a la semana, dividido en tres tinacos se obtiene 1100 [L] por recipiente. Los tinacos comerciales, que se ajustan son de 1200 [L] de capacidad, por lo que la recarga deberá hacerse cada seis días, pudiéndose aumentar o disminuir el tiempo de recarga de acuerdo a la concentración de la solución fertilizante determinada por el usuario.

La instalación del equipo propuesto durante el diseño se muestra en las figura 3.3, en ésta figura se muestra la ubicación de los tinacos, los invernaderos y el cuarto de control. En la figura 3.4, se muestra el esquema del sistema hidráulico para la aplicación de fertilizantes en el riego utilizando bombas de alta presión.

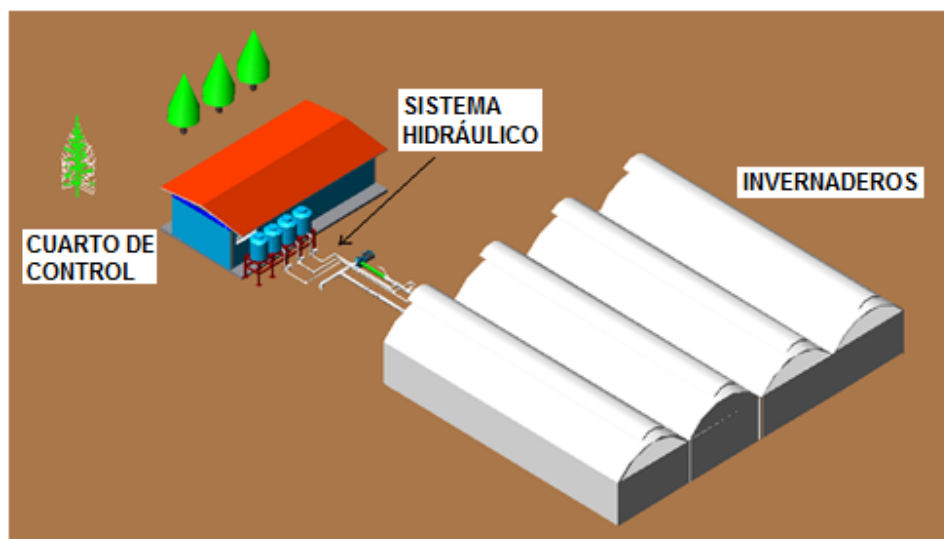


Figura 3.3 Propuesta del diseño de la instalación de fertirriego en el campo Tlapeaxco.

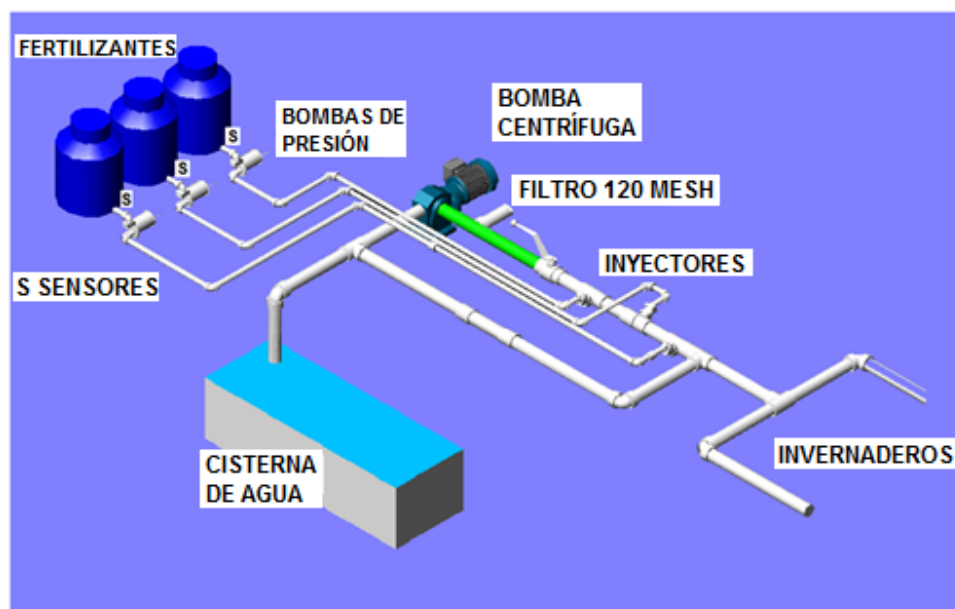


Figura 3.4 Sistema hidráulico.

3.4 Sistema de inyección de fertilizantes y agitación.

El esquema de inyección de fertilizantes propuesto (figura 3.5) consiste en conectar una bomba de presión para cada tinaco de las soluciones madre y conectarlas a la red de riego donde se inyectan los fertilizantes a presión. Se propone la inyección por medio de bombas de presión con la finalidad de evitar las caídas de presión en la red de tuberías que generan otros dispositivos de inyección como los tubos de Venturi

La bomba centrífuga inicia su funcionamiento generando presión en la red de tuberías. Las bombas 1,2 y 3 ubicadas en los tinacos inician su funcionamiento y crean un flujo de fertilizante que pasa por un filtro llegando a la tubería principal donde se encuentra el inyector el cual empuja el fertilizante a una presión de 250 [kPa]. Esta presión es suficiente para forzar la inyección de fertilizante a la tubería de riego. Sensores instalados en los recipientes de solución madre miden la C.E. y envían la señal a un PLC el cual controlará el tiempo de inyección del fertilizante líquido.

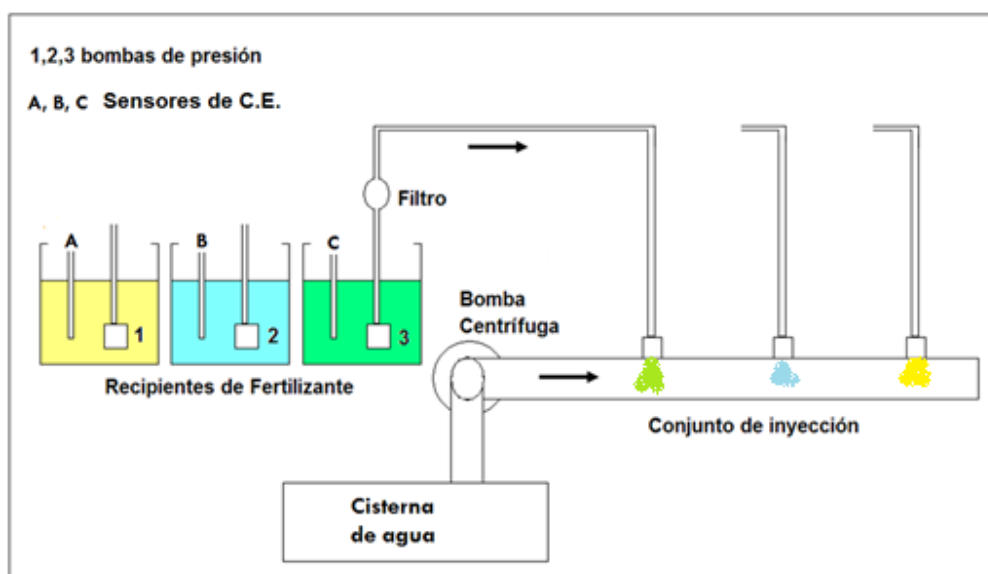


Figura 3.5 Diagrama de inyección de fertilizantes líquidos concentrados.

Para el sistema de inyección de fertilizantes se probaron dos diferentes tipos de bombas, la bomba de paletas rotatorias y la bomba peristáltica, porque tienen la capacidad de generar altas presiones de bombeo y caudales uniformes libres de pulsos permitiendo el control sobre el volumen que desalojan. La bomba para alimentar la red principal de riego fue la misma utilizada en el campo experimental Tlapeaxco, una centrífuga Franklin Electric de 3 hp con un caudal de 300 litros por minuto.

Diseño del inyector

El inyector para este equipo debe producir un chorro de forma cónica con dirección opuesta al flujo del agua de riego dentro de la tubería con la finalidad de lograr un mezclado uniforme del fertilizante con el agua, como característica adicional debe permitir el flujo de 3 [L/min] mismo que deben mandar las bombas de presión, el diseño debe ser robusto y resistente a la salinidad. El agua de riego fluye a una presión cercana a 276 [kPa] el fertilizante debe ser inyectado a una presión que supere los 345 [kPa] para mezclarlo con el agua y dirigirse a las plantas (figura 3.6).



Figura 3.6 Operación del inyector

3.4.1 Inyección de fertilizante por bombas de paletas

Las bombas de paletas son utilizadas en muchos campos de la ingeniería, pero en el fertirriego no han sido explotadas. El tamaño de la bomba requerida debe entregar un caudal de 3 [L/min], y debe ser impulsada por motor eléctrico.

Se utilizó una bomba del tipo de paletas rotatorias de la marca PROCON con un motor A.O. Smith de 1/3" de [hp], figura 3.7.



Figura 3.7 Motor y bomba de paletas para la aplicación en fertirriego.

Las pruebas que se realizaron a la bomba fueron las siguientes:

- Caudal desalojado en vacío
- Presión de trabajo max/min
- Relación, caudal desalojado / tiempo / presión.

Para realizarlas se desarrollo un prototipo (figura 3.8), que consta de una válvula de paso de alta presión, un manómetro y una boquilla inyectora. Para llevar a cabo la prueba de vacio simplemente se procedió a accionar la bomba y dejar que suministrara agua para determinar la relación caudal-tiempo, utilizando probetas y un cronómetro.



Figura 3.8 Instalación para la prueba de la bomba de paletas rotatorias.

Se estudió la diferencia de caudal desalojado restringiendo la salida de la bomba, con el objetivo de conocer la relación existente entre el caudal, el tiempo y la presión. La restricción del flujo se hizo con una válvula y el inyector diseñado, en ambas situaciones se tomó como referencia el desalojo de un litro de agua.

3.4.2 Inyección por medio de bomba peristáltica

Se usó una bomba peristáltica (figura 3.9) para realizar pruebas de dosificación y evaluar la bomba. Se alimentó con 24 [V] y se midió la velocidad de giro con un tacómetro digital. Para medir el flujo se utilizaron probetas graduadas con capacidades de 1000, 500 y 100 mililitros y un cronómetro para medir el tiempo. Se hicieron pruebas con cuatro tipos de manguera comercial: Látex, manguera cristal PVC para hidrocarburos, manguera cristal PVC para agua, manguera cristal PVC capa sencilla, (figura 3.10). La decisión de usar estas mangueras fue por la facilidad de adquisición en el mercado y su economía.

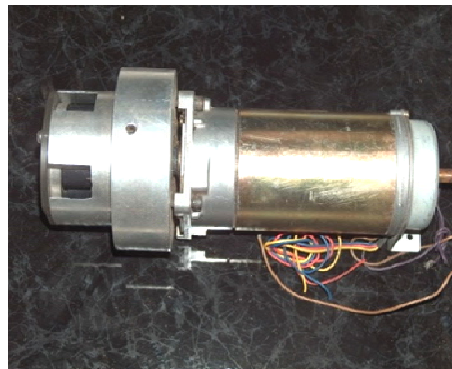


Figura 3.9 Bomba peristáltica prototipo.

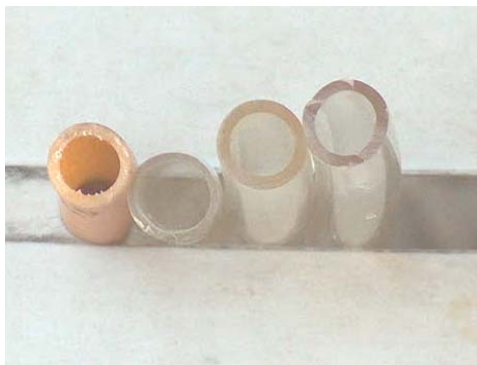


Figura 3.10 Mangueras utilizadas en el experimento

Los parámetros que se requieren conocer son:

- Revoluciones de la bomba
- Efecto de la duración de vida de las mangueras.
- Variación del caudal, por deterioro de la manguera al trabajar en la bomba.
- Retorno del líquido al parar la bomba

Se midieron las revoluciones de la bomba en dos fases. La primera fue con la bomba en vacío es decir sin carga de trabajo. La segunda fase fue medir las revoluciones de la bomba con carga de trabajo (bombeando agua). Para medir velocidad se utilizó un tacómetro digital EXTECH de manufactura alemana, este equipo permite medir por contacto físico y por luz estroboscópica. Para el caso de la bomba se utilizó la medición por contacto y las unidades de medida fueron revoluciones por minuto.

El caudal se mide activando la bomba y midiendo el desalojo de agua en un minuto. Para observar las fugas en la manguera de la bomba peristáltica se hizo circular agua con la bomba de paletas, restringiendo la salida del líquido con una válvula de paso para generar presión (figura 3.11). La presión se monitoreó con un manómetro que indicaba la presión de trabajo.



Figura 3.11 Sistema para suministrar y controlar la presión del agua en la tubería de la bomba peristáltica.

Para evaluar las mangueras se instaló cada tipo de manguera en la carcasa y se hizo funcionar la bomba en lapsos de un minuto. En cada caso se tomaron lecturas del caudal desalojado, presión de trabajo, presencia de fugas por retorno del líquido y daños en la manguera. Los valores de presión donde interesa detectar fugas son: 345, 276, 207, 138 y 69 [kPa].

Ensayos destructivos con las mangueras en la máquina Instron 4469

Se realizaron ensayos destructivos con las diferentes mangueras donde fue necesario el uso de una máquina INSTRON 4469 (figura 3.12), propiedad del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. La prueba realizada fue de compresión hasta el límite de 50 [kN] obteniendo la gráfica de esfuerzo y deformación para cada tipo de manguera.



Figura 3.12 Máquina INSTRON 4469. Equipo para realizar ensayos destructivos en materiales a través de compresión y tensión.

La máquina INSTRON 4469 cuenta con sensores piezoeléctricos que mandan información a la computadora del sistema, que procesa la información y emite tablas de resultados y gráficas de comportamiento. Los siguientes parámetros son considerados: desplazamiento máximo, deformación máxima, deformación porcentual y carga en punto rotura.

En las figuras 3.13 y 3.14 se muestran las mangueras de látex y cristal PVC para hidrocarburos, al colocarlas en las celdas de cargas y su deformación después de la prueba.



Figura 3.13 Pruebas de compresión para manguera de látex usando la máquina INSTRON 4469



Figura 3.14 Pruebas de compresión para manguera cristal PVC hidrocarburos usando la máquina INSTRON 4469

3.5 Mecanismo de agitación

La mayoría de los fertilizantes sólidos se disuelven bien solo que al estar en reposo tienden a crear sedimentos, por lo que es necesario agitar la solución fertilizante antes de inyectarlo al riego.

Para el desarrollo de este proyecto se optó por utilizar un sistema de agitación de turbinas axiales de palas planas a 90° accionadas con motor eléctrico (figura 3.15) el cual debe adaptarse al tinaco (figura 3.16).

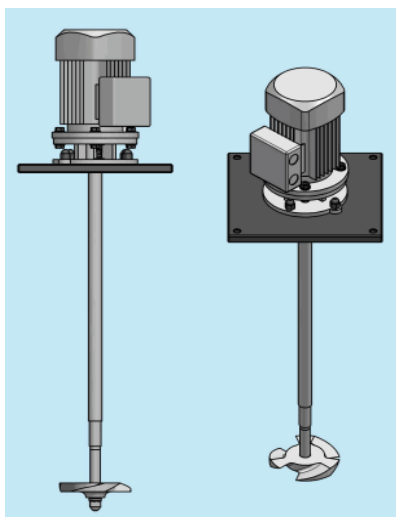


Figura 3.15 Dibujo del componente de agitación de fertilizantes (Autodesk inventor 2008).

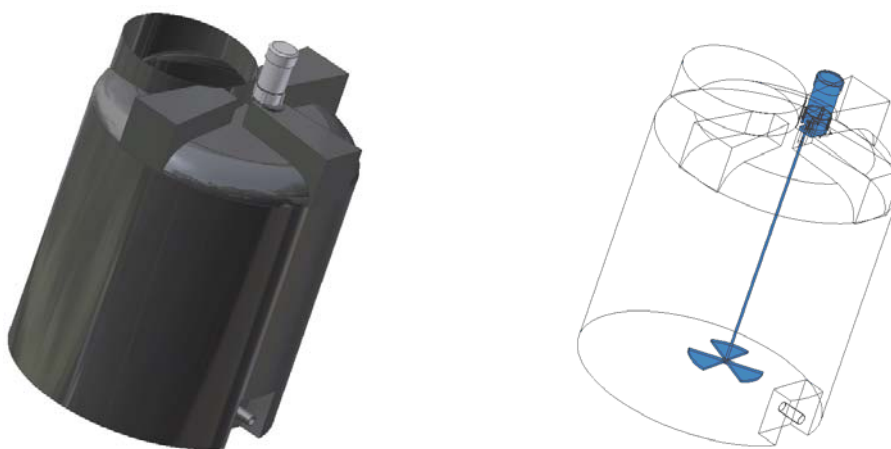


Figura 3.16 Diseño de la instalación del agitador en el tinaco (Autodesk inventor 2008)

Para transmitir el movimiento del motor eléctrico a las turbinas se utilizaron barras y coples de acero inoxidable y prisioneros tipo Allen. Para mover las flechas se utilizaron motoreductores de bajo consumo de energía. Estos motores alimentados a 127 [V] trabajan a 1800 [rpm] y consumen 800 [mA] sin carga de trabajo, su velocidad de operación es de 106 [rpm]

Acoplamiento del sistema de agitación en el tinaco

El mecanismo de agitación requirió de un soporte ya que el tinaco no puede absorber la vibración ni contener el peso del equipo. La base del motor en el tinaco sufría un pandeo ocasionando que la turbina chocara contra la pared del tinaco. La modificación consistió en la fabricación de una barra metálica con apoyos en las costillas del tinaco y unas perforaciones para sujetarlo al motor, figura 3.17.



Figura 3.17 Apariencia final del soporte sobre el tinaco y el sistema de agitación.

Pruebas con el sistema de agitación

Teóricamente al agitar con fuerza y de forma constante un recipiente cerrado puede obtenerse una excelente mezcla de sus componentes y una C.E. máxima. Bajo este principio se diluyó una pequeña muestra con 500 [mL] de agua y 20 [g] de fertilizante y se agitó fuertemente. La relación de la muestra con la preparación final es de 1:2400, que se adecua con la capacidad de los tinacos 1200 [L] y la cantidad de fertilizante en el costal, que pesó 48 [kg]. La C.E. obtenida de la muestra sirvió para comparar la conductividad de la mezcla en el tinaco y de este modo ver la eficiencia del sistema agitador. El fertilizante utilizado en esta prueba fue sulfato de magnesio porque se encuentra entre los fertilizantes de más baja solubilidad que se utilizan en el campo Tlapeaxco. La solución elaborada requirió de una báscula digital y un medidor de C.E. HANNA HI 98311.

Antes de agregar el fertilizante en los tinacos se hicieron pruebas de agitación con diferentes alturas de agua observando el movimiento del agua. La turbina genera buena turbulencia hasta una altura de líquido no mayor de 30 [cm], con base en esta observación se hicieron modificaciones al prototipo de agitación para garantizar un buen mezclado, incorporando cuatro turbinas más al eje, con una separación de 25 [cm] y con esto cubrir la altura total del tinaco (figura 3.18).

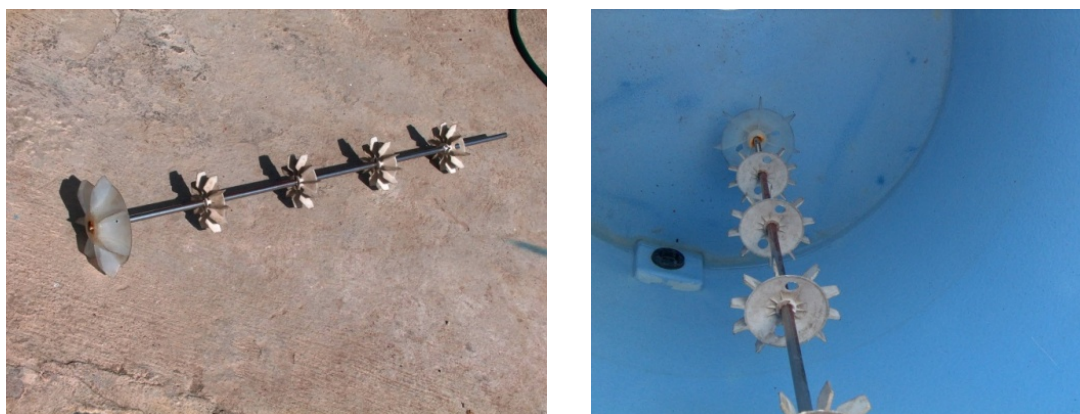


Figura 3.18 Turbinas de agitación, fuera y dentro del tanque.

Efectuado el llenado del tinaco con las proporciones calculadas de agua y fertilizante y la adición de cuatro turbinas al agitador se realizaron pruebas para ver el comportamiento de mezclado midiendo la conductividad cada minuto hasta obtener homogeneidad en la salinidad de la solución.

3.6 Instalación de filtros

Los filtros instalados en el equipo de este proyecto son para la protección de las bombas de paletas y presentan las características que muestra el cuadro 3.1, el filtro se coloca antes de la entrada de la bomba y pueden admitir partículas no mayores a 1 [mm] por lo que una medida de 30 mesh (0.595 [mm]) es suficiente. Los filtros de salida con dirección a los goteros deben de ser de 120 mesh los cuales no están incluidos en este diseño pero deben instalarse.

Cuadro 3.1 Características de los filtros instalados en el sistema de riego mallas y anillos

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIONES
Material del filtro	PVC
Diámetro del elemento	1.5 [pulgadas]
Flujo o gasto filtrado por unidad	3 [L/min].
Mallas	poliamida
Lavado	inverso manual
Calidad de filtrado	30 mesh

3.7 Cableado del equipo de fertirriego

Una vez colocados todos los componentes del sistema de fertirriego se da paso al diseño de la instalación eléctrica para alimentar, recibir y enviar señales de los sensores y motores. Las alimentaciones principales y su consumo se enumeran a continuación:

- Una bomba centrífuga 2237.1 [W]
- Tres bombas de paletas de 1/3 de [hp]. Total 994.266 [W]
- Tres motores agitadores de la solución A,B,C. de ¼ [hp]. Total 559.275 [W]
- Señal de los sensores de C.E. 1 [W]
- Alimentación del modulo de control PLC y sistema de potencia. 5 [W]
- Alimentación de las válvulas de control de sección de riego. 30 [W]

De acuerdo a los datos la bomba centrífuga debe manejar un sistema trifásico 3F-3H (tres fases tres hilos) mientras que los demás accesorios un sistema monofásico. 1F-2H.

Se busca conocer el calibre y propiedades de los cables a usar. De acuerdo a las características del equipo de fertirriego debe usarse un cable resistente a la intemperie, por lo que el tipo THW (*Temperature-Humidity-Weather*) se ajusta perfectamente. Al tener dos sistemas (monofásico y trifásico), debe calcularse el amperaje para cada sistema y obtener los calibres de los cables.

La bomba centrífuga maneja 2237.1 [W] de potencia para obtener la corriente se usa la formula.

$$I = \frac{W}{\sqrt{3} * V * \eta * Fp} \quad (3.2)$$

Donde: I es igual a la corriente, W la potencia, V el voltaje, η la eficiencia y Fp el factor de potencia. Como es un sistema trifásico se utiliza la $\sqrt{3}$

$$I = \frac{2237.1 [W]}{\sqrt{3} * 440 [V] * 0.85 * 0.90}$$

$I = 3.84 [A]$. La regla indica que al trabajar con motores debe multiplicarse la corriente por 1.25 para incluir el factor de arranque. Así que: $I = 3.84 [A] * 1.25$ por tanto $I = 4.8 [A]$.

Esta corriente se afectará enseguida por los factores de corrección debidos al agrupamiento y a la temperatura ambiente, tomando una temperatura ambiente de 45°C y una temperatura en el conductor de 90°C, el factor es 0.87, para el agrupamiento el factor es de 0.87. Entonces la corriente afectada es: $I\Delta = \frac{4.8 [A]}{0.87 * 0.87}$ finalmente $I\Delta = 6.34 [A]$.

Esta corriente afectada ($I\Delta$) no existe realmente, es sólo una manera de considerar las condiciones adversas en las que trabajará el conductor. Al consultar el calibre necesario para transportar 6.34 [A] en el cuadro 3.2, se encontró que el 14 AWG puede transportar hasta 16 [A] al aire libre, por lo tanto al elegir este calibre se tiene un factor de seguridad muy bueno. Para los componentes del sistema monofásico. Se suman las potencias obteniendo 1590 [W].

$$I = \frac{W}{V * \eta * F.P} \quad (3.3)$$

$$I = \frac{1590 [W]}{127 [V] * 0.85 * 0.90} \quad ; \quad I = 16.37 [A]$$

Multiplicando por el factor de arranque $I = 16.37 [A] * 1.25$; $I = 20.47[A]$, multiplicando por los factores de agrupamiento y temperatura $I\Delta = \frac{20.47 [A]}{0.87*0.87}$ se obtiene el valor del consumo de la línea principal $I\Delta = 27 [A]$. De acuerdo al cuadro 3.2, un calibre 10 AWG puede soportar hasta 32 [A] por lo que se eligió este calibre para la alimentación principal.

Al realizar los cálculos para cada motor monofásico se tiene un consumo de 4.3 [A] para las bombas y 3.2 [A] para los agitadores. Como el consumo de estos motores es menor por ende el número de calibre es mayor, empero por cuestiones comerciales y económicas se decidió utilizar un calibre 14 AWG para conectar bombas y agitadores. Los calibres 10, 12 y 14 AWG son los mas usados en las instalaciones eléctricas de consumo moderado por lo tanto existen varias opciones de calidad y precio en el mercado

Cuadro 3.2 *Calculo de calibre de cable en cobre a 25 °C.*

Calibre AWG No	Resistencia $\Omega/100$ m	Amperaje Máximo (A)*			Dimensiones	
		TIPO DE CABLE			Diám. mm	Area cm ²
		UF	USE, THW TW, THWN	NM		
4/0	0,01669	211	248		13,412	1,4129
3/0	0,02106	178	216		11,921	1,1161
2/0	0,02660	157	189		10,608	0,8839
1/0	0,03346	135	162		9,462	0,7032
2	0,05314	103	124		7,419	0,4322
4	0,08497	76	92		5,874	0,2710
6	0,1345	59	70		4,710	0,1742
8	0,2101	43	54		3,268	0,0839
10	0,3339	32	32	30	2,580	0,0523
12	0,5314	22	22	20	2,047	0,0329
14	0,8432	16	16	15	1,621	0,0206

Tabla 310-13 de la NOM-001-SEMP-1994

El esquema del cableado diseñado para el sistema de fertirriego se observa en los anexos de este documento, (figura A-1) con base en ese esquema se procede a la instalación.

3.8 Diseño del sistema hidráulico del cabezal de riego.

Se diseñaron las tuberías de transporte y suministro de fertilizante considerando las siguientes líneas hidráulicas.

- Líneas de los tinacos A, B, C, D a las bombas y red de agua de riego.
- Líneas de llenado de agua a los tinacos A,B,C

Para el inciso 1 debe enviarse el contenido de los tinacos a sus bombas correspondientes, el fertilizante debe pasar por un filtro y después a la bomba de paletas rotatorias. El fluido a presión debe entrar al sistema de riego tal como lo muestra la figura 3.19.

Al esquema propuesto se le agregó una válvula check y un medidor de presión a la entrada de la red de riego, con el objetivo de evitar el flujo de agua hacia los tinacos.

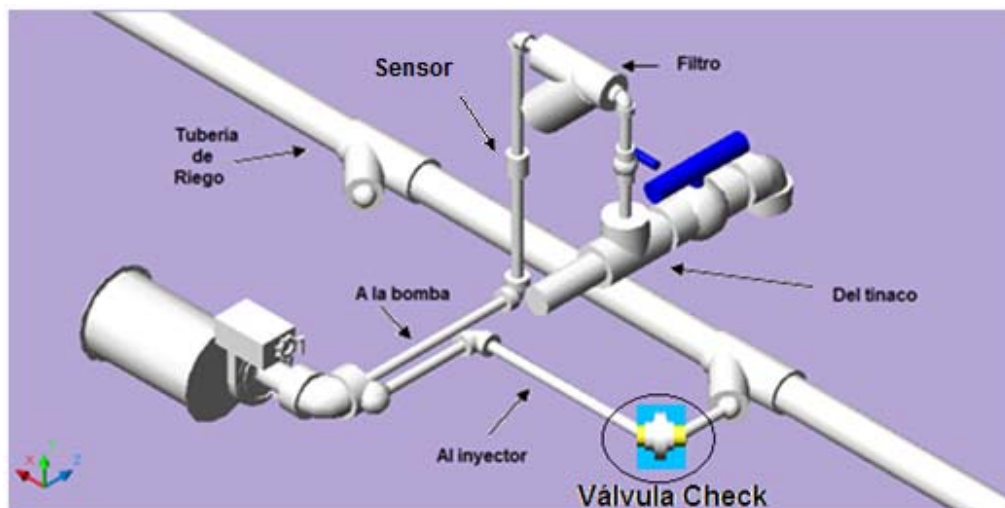


Figura 3.19 Incorporación de una válvula check para prevenir el flujo de agua a los tinacos de fertilizante.

Conectadas las tuberías y con el tinaco lleno de fertilizante se inicio la activación de la bomba para observar la inyección. Al desactivar la bomba se observó que existía un flujo de fertilizante a través del sistema de inyección producido por efecto de la fuerza de gravedad.

El fertilizante se vertía todo el tiempo a la red de riego, por lo que fue necesario hacer modificaciones en la zona donde se ubicaba la válvula check, colocando una válvula anti-retorno con apertura forzada. La válvula anti-retorno, en funcionamiento normal se mantiene abierta gracias a la presión ejercida por el flujo del fertilizante, el cual vence una resistencia mecánica ofrecida por un resorte. Cuando la presión cambia de dirección acciona la válvula desplazándola en sentido contrario y enclavándola en posición cerrada. Con la bomba de paletas apagada la válvula no permite el flujo de fertilizante ya que la fuerza del resorte es mayor que el peso del fertilizante en el tinaco. La operación de la válvula se muestra en la figura 3.20.



Figura 3.20 a) Presión del resorte con la inyección apagada.
b) Apertura de la válvula a una presión de 104[kPa].

La fuerza que debe aplicar el resorte para eliminar las fugas es de 15.24 [N], dato obtenido con la máquina Instron, cuando el manómetro de la válvula marca 103 [kPa]. Esta modificación eliminó el problema de goteo en las tuberías de inyección de fertilizante. El material del resorte es de aceros al carbono ASTM 227 clase II con un diámetro de 1.5 [cm] y una longitud sin carga de 8 [cm]. La válvula quedó como lo muestra la figura 3.21.

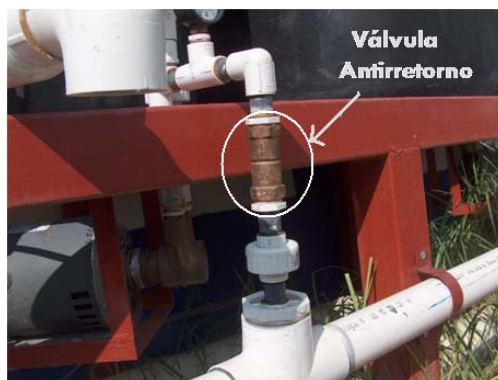


Figura 3.21 Válvula antirretorno instalada en la tubería de inyección.

La válvula antirretorno es de bronce así que se decidió mantener el material en solución salina de 70 [mS/cm] por un mes después de este tiempo se inspeccionó la válvula y no se encontraron daños ocasionados por las sales.

Por las dimensiones de los tinacos el llenado debe hacerse con la bomba principal de riego, dirigiendo el caudal hacia los tinacos, figura 3.22.

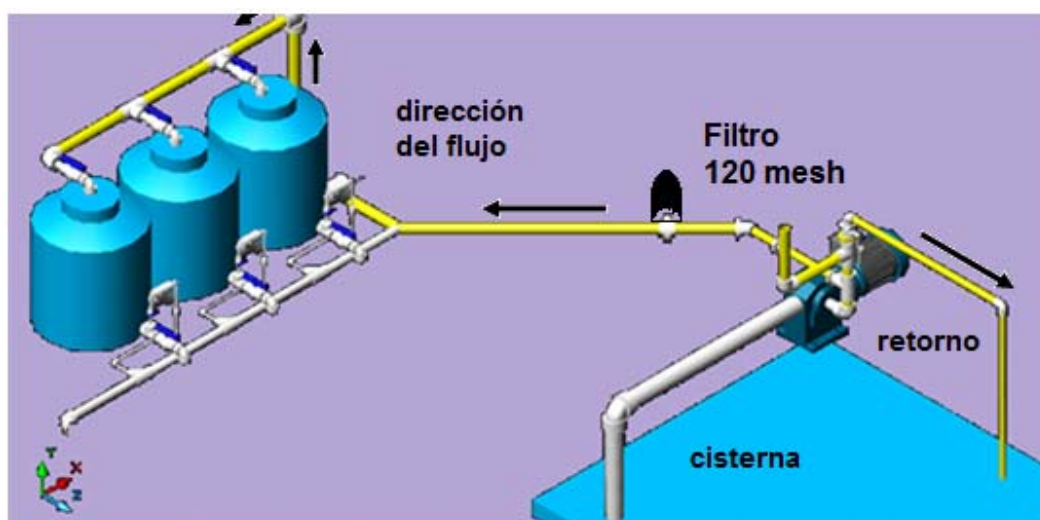


Figura 3.22 la línea de agua con dirección de la bomba centrífuga a los tinaco.

Con el objetivo de tener control en el flujo del caudal de llenado a los tinacos se instaló una línea de retorno a la cisterna de agua.

3.9 Sistema de control y medición automático por PLC

El sistema de control automático es el corazón del sistema de fertirriego y es el encargado de procesar las mediciones de C.E. y pH de la mezcla agua-fertilizante y de este modo tomar las decisiones correspondientes. El programa controla todos los dispositivos y servomandos como son: los motores de agitación, las bombas de paletas, y la bomba centrífuga. El PLC utiliza las señales de los sensores para controlar los motores (figura 3.23).

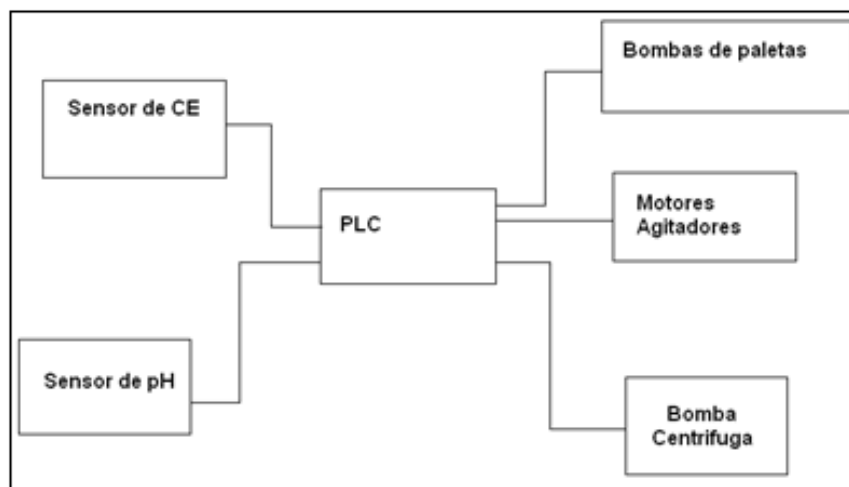


Figura 3.23 Esquema del sistema de control.

La función del PLC es mantener un control total en el suministro de fertilizantes y agua a los cultivos, así como la medición de niveles de CE. De su capacidad de respuesta depende el buen desarrollo del cultivo. Los requerimientos que se exigen al sistema de control son los siguientes:

- Fácil manejo en su operación
- Monitoreo de las señales de los sensores de conductividad eléctrica y pH.
- Activar los servomandos con base a las lecturas de los sensores y a los tiempos programados.
- Controlar el funcionamiento de los motores de agitación, bombas de presión, bomba centrífuga y válvulas de sección.
- Económico
- Fácil mantenimiento

El modelo del PLC utilizado fue el Millenium II XT-20 que cuenta con 8 entradas digitales, 4 entradas analógicas, 12 salidas digitales. El sistema requiere de una fuente de alimentación de 24 [VDC].

El programa del PLC es el corazón del sistema de fertirriego. La programación se hizo a través de un diagrama funcional con escalas de tiempo, que permite hacer un modelo del proceso a automatizar, contemplando las entradas y acciones a realizar. Como entradas se tomaron las señales de los sensores de C.E. y pH además de la señal de encendido del equipo. Se asumieron como salidas las señales de activación a los motores de agitación, válvulas de sección, bombas de paletas y bomba centrífuga.

Los bloques de función utilizados en el programa se seleccionan de acuerdo a las funciones que debe realizar. El PLC debe procesar las señales de los sensores de C.E. y pH, activar las bombas de paletas, los motores de los agitadores así como el tiempo de riego dado por la bomba centrífuga, además de accionar las válvulas de sección.

3.10 Control por conductividad de las soluciones madre

Cuando se preparan las soluciones madre, éstas adquieren una conductividad eléctrica que depende del tipo de fertilizantes y su concentración en los tinacos. Esta concentración debe disminuir al suministrar la solución al riego. El personal encargado de preparar las soluciones debe cuidar la concentración de la solución porque de ello depende mantener la conductividad final que llega al cultivo y que oscila entre 1.5 y 3 [mS/cm] de acuerdo a la etapa de desarrollo del cultivo.

El control de fertirriego bajo este principio consiste en vigilar la conductividad eléctrica de las soluciones madre y con estos datos elegir el tiempo de inyección de cada bomba o el área a regar. Debe conocerse el valor de la conductividad eléctrica de cada solución madre y de las mezclas entre ellas para de este modo registrar el comportamiento de la conductividad eléctrica y adquirir la tendencia de la C.E. Finalmente cada mezcla debe diluirse con agua en cantidades medidas tomando datos que muestren la relación de conductividad con el porcentaje de fertilizante en el agua. Los fertilizantes de los cuales se componen las soluciones madre para esta prueba se presentan en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3 *Compuestos químicos que integran a las soluciones madre.*

Solución	Compuesto
A	Nitrato de Calcio, Nitrato de Potasio, Acido Nítrico HNO_3 .
B	Sulfato de Magnesio Fosfato monopotásico.
C	Sulfato ferroso, Sulfato de Manganeso, Sulfato de Zinc, Sulfato de Cobre, Tetraborato de Sodio.

Para efectuar estas mediciones se requiere un medidor de C.E. YSI Modelo 32 de Yellow Springs Instruments Co. Inc. (figura 3.24).

Las soluciones concentradas de fertilizante son mezcladas luego de ser medidas en pipetas graduadas depositándose en un vaso de precipitado. Con agua destilada es fácil diluir la C.E. de la solución.

**Figura 3.24** *Materiales utilizados para obtener las conductividades de las soluciones madre.*

Sensor de C.E.

El electrodo de C.E. utilizado en este diseño es el HANNA HI 7634-00, para lo cual es necesario obtener una relación de la conductividad eléctrica del fertilizante con el voltaje emitido por el sensor. Se utiliza agua destilada y una solución de C.E. de 70 [mS/cm]. Se introduce la sonda (alimentada con 5 [Vac]) al agua y el medidor de conductividad para determinar la relación de las señales. Se agrega fertilizante en cantidades medidas con el objetivo de elevar la C.E. y tomar datos de los valores en cada aplicación (figura 3.25).



Figura 3.25 Evaluación del sensor de C.E.

Obtenido el parámetro que interesa del sensor se debe introducir la señal eléctrica al PLC. El PLC cuya entrada puede ser de 0 a 10 [V] contiene un ADC (convertidor analógico digital) que relaciona la señal de entrada con bits de salida en un rango de 0 a 255. La misma técnica debe utilizarse con el sensor de pH en este caso el valor que interesa controlar está comprendido entre 4 y 7.5

3.11 Desarrollo del programa en el PLC

Con las conductividades obtenidas de las pruebas con las soluciones madre y los parámetros del sensor de C.E. se realiza el programa del PLC para controlar la dosificación del fertilizante. La secuencia que debe seguir el programa en el PLC es el siguiente:

- Monitorear la C.E. de los recipientes.
- De acuerdo a los valores obtenidos de C.E. elegir el modo de riego.
- Regar 7 minutos por hora cada sección de las 8 horas hasta las 15 horas.
- Agitar las soluciones por 3 minutos antes de cada riego Retrasar la inyección de fertilizante por 3 segundos al inicio de cada riego.
- Accionar las bombas de fertilizante

El diagrama de flujo se presenta en la figura 3.26.

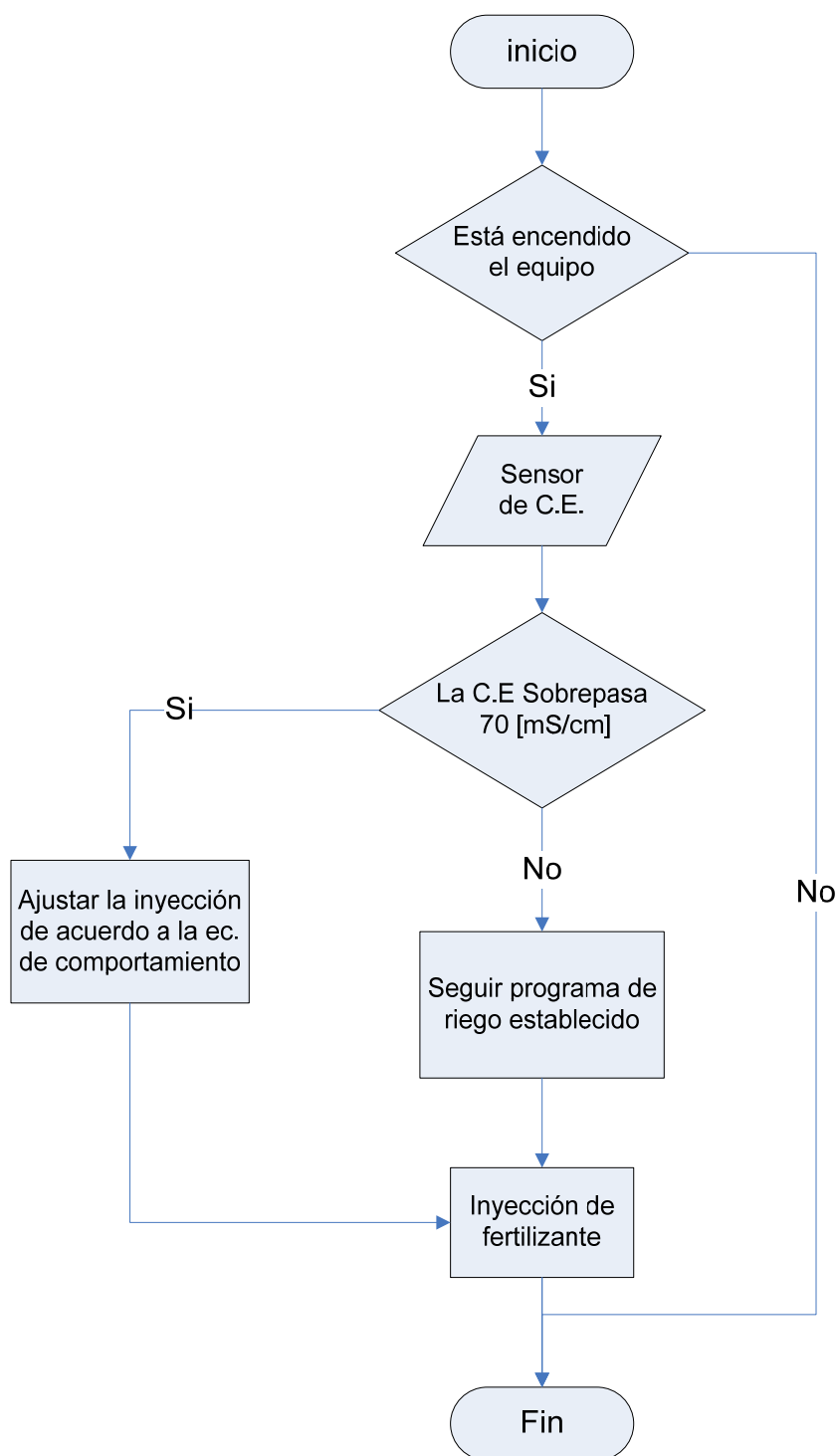


Figura 3.26 Diagrama de flujo del programa de control de inyección, vigilando la C.E. de las soluciones madre en los recipientes

Al conectar los PLC's con circuitos de potencia, no está por demás protegerlos con un circuito de aislamiento. El control electrónico para la activación de las bombas y motores se hizo con triac's (figura 3.27), accionados por circuitos MOC 3011. Estos optoacopladores no tienen un contacto físico con el circuito del controlador, pues se activan por señales ópticas, garantizando el aislamiento de accionamiento entre los motores y el PLC.

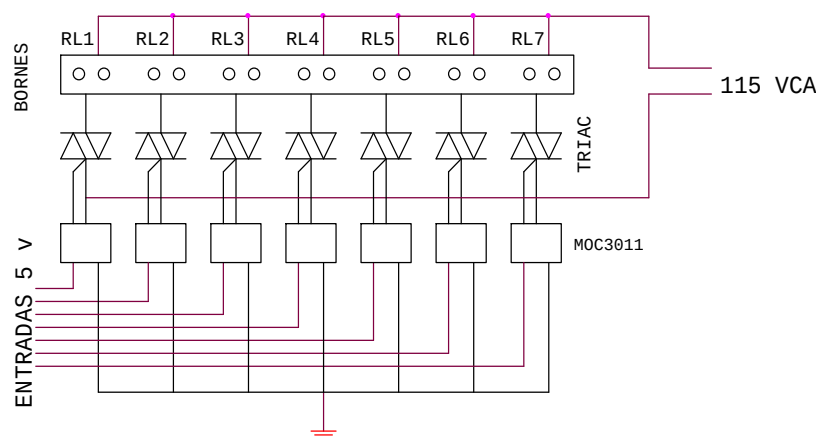


Figura 3.27 Diagrama de la tarjeta de potencia para accionar válvulas y bombas de 127 [vca].

3.12 Pruebas con el equipo de fertirriego

Construido el sistema de fertirriego es imperioso evaluarlo, por lo que se realizaron pruebas para observar el funcionamiento del equipo, conectándolo a una red de riego. Las pruebas que interesan para el equipo se enuncian a continuación:

- Prueba de presión en el sistema de riego.
- Prueba de homogeneidad de fertilizante en los goteros.
- Monitoreo de los tiempos de activación.

Prueba de presión en el sistema de fertirriego

La metodología consiste en accionar el sistema de fertirriego y medir la presión a la salida de la bomba centrífuga, a la salida de la inyección y al final de la cinta de goteros realizando una tabla comparativa.

Prueba de homogeneidad en los goteros

Para esta prueba se tomaron muestras de líquido de algunos goteros al azar y se midió la C.E. con los resultados obtenidos se realizó una comparación y una prueba estadística para observar variaciones entre las muestras tomadas.

Monitoreo de los tiempos de activación

Finalmente esta prueba consiste en corroborar si el equipo se acciona en los tiempos programados, vigilando en el transcurso de un día de trabajo usando un cronometro y comparando estos tiempos.

3.13 Pruebas de conductividad en sustrato y macetas en producción.

Previendo que el equipo en algún momento pudiera fallar e inyectar solución fertilizante en mayor o menor proporción a la programada, se optó por llevar a cabo mediciones en el sustrato de las plantas a la salida de los goteros para investigar el comportamiento de la C.E. en el sustrato y los efectos de una variación repentina de la conductividad.

El primer experimento consistió en tomar sustrato virgen, es decir que no había sido utilizado anteriormente para el fertirriego, y medir su conductividad con un medidor de C.E. HANNA HI 98311 para suelo. Posteriormente se le agregó agua al sustrato y se midió nuevamente la C.E.

Al experimentar con el sustrato de las macetas se realizaron mediciones de conductividad al término del último riego del día y antes del primer riego del día siguiente. En ambas mediciones se aplicó un muestreo aleatorio en macetas para obtener el valor promedio de la C.E. Obtenidos estos datos lo siguiente fue realizar mediciones de conductividad en los sustratos durante todo el ciclo de riego que duró 7 horas. Para finalizar la prueba, se eliminó el gotero de fertirriego y se instaló una línea para suministrar agua simple en los tiempos y cantidades establecidos para los riegos.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Inyector

Al probar el inyector diseñado se obtuvo una inyección de forma cónica como se muestra en la figura 4.1. La presión necesaria para lograr un chorro uniforme debe estar comprendida entre 170 [kPa] y 414 [kPa]. El diseño y las dimensiones del inyector se muestran en los anexos.



Figura 4.1 Diseño y prueba del inyector

4.2 Bomba de paletas

Prueba de Caudal desalojado en vacío

En la prueba en vacío se determinó que la bomba suministra 3 [L/min]

Relación, caudal desalojado /presión de restricción.

La presión de trabajo para los equipos de fertirriego se encuentra en el rango de 207 a 276 [kPa]. Al probar la bomba de paletas rotatorias sin inyector se obtiene la figura 4.2, que muestra la variación del caudal con el aumento de presión. La bomba no presenta variaciones en la cantidad de agua bombeada (un litro) en 20 segundos hasta que la presión llega a los 414 [kPa], después de esta presión el tiempo para bombear un litro de agua comienza a aumentar, hasta 40 [s] a 690 [kPa]. La figura 4.3 muestra la relación presión-tiempo al inyectar un litro de fertilizante, como se observa a 207 [kPa] el tiempo aumenta un segundo y se conserva hasta las 483 [kPa], al sobrepasar este valor el tiempo comienza a elevarse.

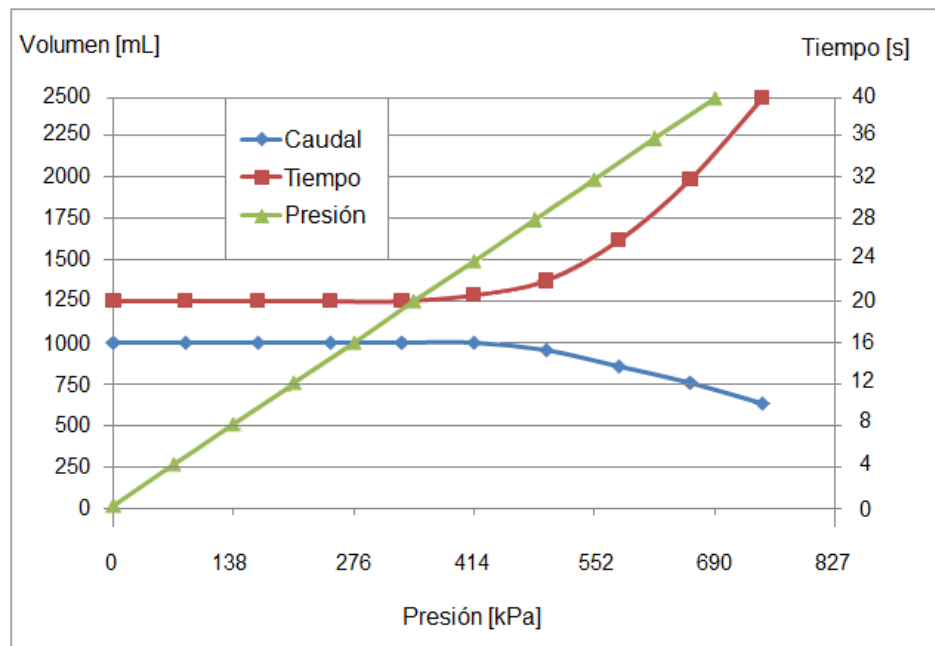


Figura 4.2 Comportamiento del tiempo en la bomba de paletas al desalojar un litro de agua a diferentes presiones.

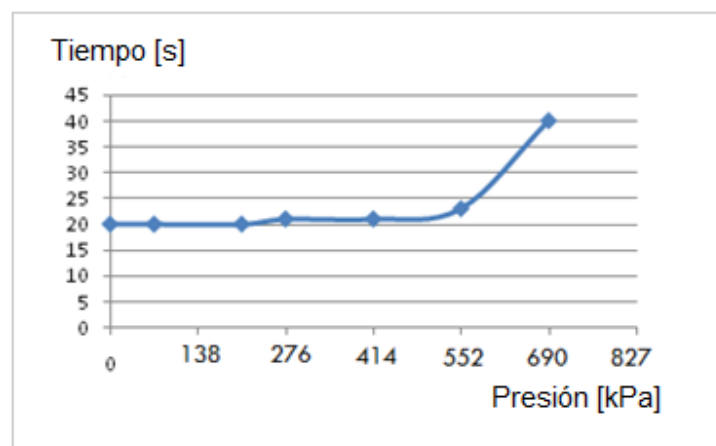


Figura 4.3 Relación entre tiempo y presión en la inyección de un litro de agua.

Cuando se utiliza el inyector el tiempo para suministrar un litro de fertilizante se mantiene en 21 segundos, de 70 [kPa] hasta llegar a 414 [kPa]. Con este resultado se tiene la confianza que el inyector puede utilizarse en la inyección de fertilizantes dentro del rango de trabajo de los sistemas de fertirriego sin afectar el caudal inyectado en el tiempo. Por lo tanto en una hora pueden inyectarse 180 litros de fertilizante.

4.3 bomba peristáltica

Los resultados al medir la velocidad de la bomba se muestran en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1 Datos obtenidos en las mediciones de velocidad de la bomba sin carga y con carga.

	Velocidad de la bomba sin carga [rpm]	Velocidad de la bomba con carga [rpm]
Muestras	248	207
	246	215
	244	215
	244	209
	244	209
	248	211
	244	211
	248	211
	245	213
	249	211
PROMEDIO	246	211

El valor promedio de la velocidad de la bomba sin carga fue de 246 [rpm]. Con carga de trabajo 211 [rpm], hay una pérdida de velocidad de 35 [rpm] aproximadamente un 15%, ocasionada por el esfuerzo que realiza la bomba al comprimir la manguera. El Tramo de manguera útil entre la carcasa y los rodillos de la bomba es de 82 [mm] y alberga un volumen de 3 [ml]. El desplazamiento de este volumen se realiza en media vuelta del rotor, es decir 6 [ml] de fluido por vuelta, lo cual debe desplazar un volumen de 1266 [mL] por minuto.

Con carga de trabajo la bomba tiene una velocidad de 211 [rpm] en promedio, dando un caudal de 420 [mL/min] (tabla 4.2). La bomba desplaza por vuelta 2 [mL] de fluido en vez de 6 [mL]. Esto se debe a la velocidad de restitución de la manguera que está directamente ligada con las propiedades elásticas del material y la velocidad del rotor de la bomba peristáltica.

Prueba con las diferentes mangueras en la bomba peristáltica

La manguera cristal PVC para hidrocarburos con diámetro 9.5 [mm] y pared de 2 [mm]. Fue probada en periodos de un minuto y con una presión en el sistema de 345 [kPa]. Los datos adquiridos en 10 pruebas se muestran en el cuadro 4.2.

Cuadro 4.2 Datos tomados con manguera de cristal PVC para hidrocarburos.

prueba	Flujo [mL]	Fugas por retorno [mL]
1	420	0
2	415	0
3	400	0
4	415	0
5	430	0
6	410	0
7	425	0
8	425	0
9	430	0
10	430	0
promedio	420	

El tiempo total de trabajo de la bomba fue de 18 minutos, después de este tiempo la manguera falló, al romperse la pared por la presión de contacto con los rodillos de la carcasa como lo muestra la figura 4.4.



Figura 4.4 Daños ocasionados a la manguera de cristal PVC para hidrocarburos

Los resultados al evaluar la manguera cristal PVC para agua, con diámetro 9.5 [mm] y pared de 2 [mm] se observan en el cuadro 4.3. Cada prueba fue de un minuto y con presión variable en el sistema.

Cuadro 4.3 Datos tomados con la manguera cristal PVC para agua.

prueba	Flujo [mL]	Presión [kPa]	Fugas [mL]
1	480	345	0
2	465	345	0
3	440	345	0
4	390	345	si
5	240	207	si
6	190	172	si
7	175	138	si
8	185	69	si
9	170	69	si
10	155	0	si

Los datos de presión en el cuadro 4.3, se refieren a la presión que se creó dentro de las tuberías para ayudar a determinar fugas por contraflujo en la manguera con la bomba apagada. Cuando inicia el goteo en la manguera con la bomba apagada se disminuye la presión del sistema hasta el punto donde desaparecen las fugas posteriormente se activa la bomba y se observa nuevamente el comportamiento, el objetivo de la prueba es determinar si existe un rango de presión donde no se presenten fugas a pesar del daño que va adquiriendo la manguera. La prueba muestra que las fugas van en aumento en relación con el tiempo de uso de la manguera.

El problema de las fugas podría solucionarse acondicionando una válvula check para evitar el contraflujo del líquido siempre y cuando la manguera resistiera por lo menos una semana de trabajo continuo manteniendo un caudal constante pero la manguera cristal PVC para agua comenzó a fallar a los tres minutos disminuyendo el volumen y presión suministrados debido al maltrato de la manguera con los rodillos de la bomba (figura 4.5).

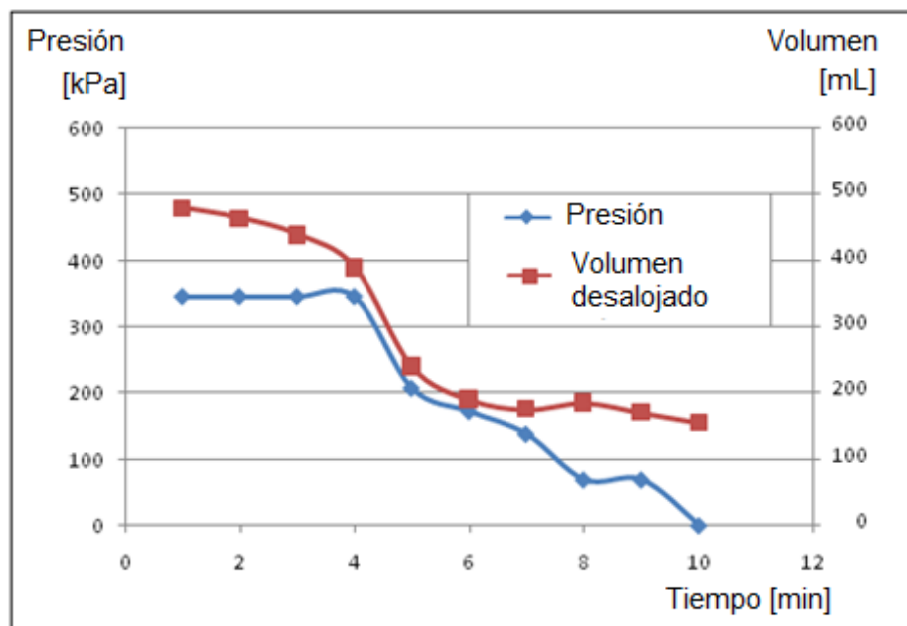


Figura 4.5 Disminución del caudal y presión al dañarse la manguera de cristal PVC para agua.

El espesor de pared (1 milímetro), de la manguera de cristal PVC capa sencilla no permitió su evaluación porque ofrece escasa resistencia a la compresión. Esta manguera requiere mayor tiempo para retornar a la forma redonda y por lo tanto no bombea el líquido. La manguera de PVC capa sencilla no debe usarse en esta bomba peristáltica.

Con la manguera de látex de 1 [mm] de espesor no fue posible tomar datos por las siguientes causas: la presión de los rodillos ocasionó que las paredes de la manguera se pegaran entre si (figura 4.6), impidiendo la restitución del cuerpo de la manguera. La manguera se salió varias veces de la pista de los rodillos por lo escurridizo y resbaloso del material.



Figura 4.6 Apariencia de la manguera de látex al sacarla de la carcasa de la bomba peristáltica.

Pruebas de las mangueras usando la maquina Instron

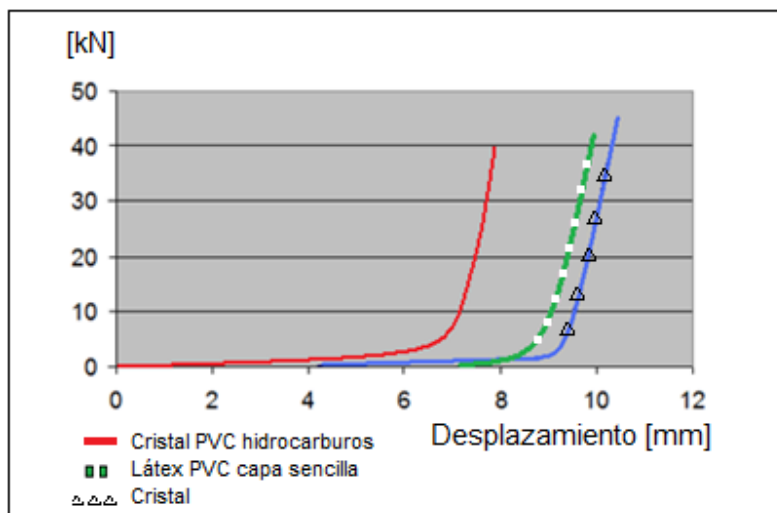


Figura 4.7 Comparación de los tres tipos de mangueras analizadas por la máquina Instron.

De acuerdo a la figura 4.7 la manguera cristal PVC para hidrocarburos ofrece resistencia desde que las paredes hacen contacto con la celda de carga de la maquina INSTRON 4469, la resistencia va en aumento hasta el punto donde se juntan las paredes, a partir de este instante la resistencia se incrementa y el material se deforma. La manguera de látex ofrece resistencia a la compresión hasta que sus paredes tienen contacto, comenzando la deformación de la manguera. El látex es demasiado flexible y deformable.

La manguera PVC de capa sencilla tiene el mayor desplazamiento de las tres mangueras evaluadas y se deforma de manera permanente. Por último se realizó una prueba de comparación con la manguera cristal PVC para hidrocarburos (figura 4.8). Cuando la manguera es nueva el comportamiento se observa en la línea continua, cuando la manguera ha sido sometida a carga de trabajo con la bomba peristáltica su comportamiento cambia a la línea punteada. Como se aprecia el material usado es más deformable que el nuevo y su resistencia ha disminuido. Además del aplastamiento el vencimiento del material pudo ser ocasionado por efecto de suspensiones con sólidos afectando las paredes de la manguera ya que fueron usadas sin filtros.

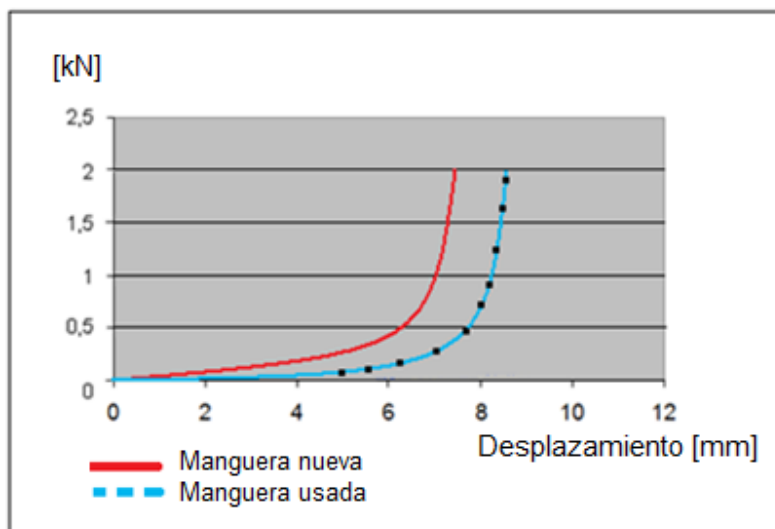


Figura 4.8 Comparación de la manguera cristal PVC hidrocarburos antes y después de someterla a trabajo con la bomba peristáltica.

De acuerdo a las pruebas realizadas, para lograr un buen desempeño con la bomba peristáltica es necesario utilizar una manguera con alta resistencia, flexibilidad y durabilidad, buscando materiales de aplicación industrial. Las mangueras probadas no cumplen con las características mínimas para ser usadas en la bomba peristáltica de usarlas tendrían que ser intercambiados continuamente.

4.4 Agitación

Al preparar la muestra de referencia se midió una conductividad de 18.66 [mS/cm]. Una vez rediseñado el complemento de agitación se procedió a su evaluación que consistió en agitar el contenido del tinaco y tomar muestras cada minuto de donde se obtuvieron los datos de la figura 4.9. Después de agitar la mezcla del tinaco por 20 [min] la máxima conductividad obtenida fue de 18.43 [mS/cm] contra 18.66 [mS/cm] de la muestra de referencia. La diferencia entre las conductividades es de 0.23 [mS/cm].

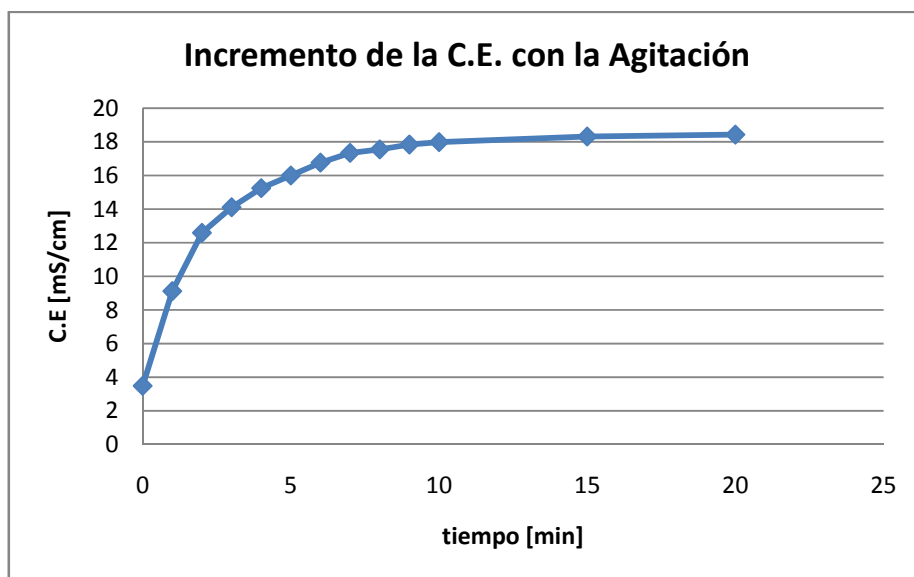


Figura 4.9 Tendencia de la conductividad eléctrica al realizarse la agitación.

La constante de tiempo del proceso de agitación es el momento en el que llega al 63.2 % del valor final de 18.43 [mS/cm]. La constante de tiempo se cumple al llegar a 11.65 [mS/cm] lo cual ocurre antes de los dos minutos. A las cinco constantes de tiempo la conductividad llega al 99% por lo que un periodo de 10 minutos de agitación es suficiente.

La mezcla se dejó en reposo por un día, después se midió la C.E. la cual se vio afectada en un punto. Posteriormente se hizo funcionar el agitador monitoreando la conductividad hasta alcanzar el último valor medido, esta vez la agitación duró dos minutos. De acuerdo a las constantes de tiempo, al preparar el fertilizante en los tinacos la agitación debe hacerse por 10 [min], tiempo suficiente para alcanzar el 99% de la conductividad en la solución madre. Con base en los experimentos realizados se comprueba que después de la primera agitación el contenido del tinaco debe agitarse 2 minutos al inicio del ciclo de riego en el día para asegurar la conductividad y dispersar los nutrientes. Durante estas pruebas el motor agitador no sufrió calentamiento al agitar la carga de 1200 [L].

4.5 Tuberías

La tubería se sometió a pruebas de detección de fugas, se accionaron las bombas y se observaron con especial atención todas y cada una de las conexiones, uniones y ensambles. No se detectaron fugas. A los filtros instalados se les hizo circular la cantidad de fertilizante contenido en el tinaco, después se extrajeron las mallas para observar algún tipo de obstrucción. No se detectaron problemas. Los filtros instalados son de 30 mesh por esta razón no tienen problema de obturación y protegen a la bomba. Con base a la experiencia en el sistema Tlapeaxco puede hacerse el lavado de las mallas semanalmente aprovechando el tiempo utilizado en la recarga de fertilizantes.

4.6 Programa del PLC por conductividad de la solución madre.

En la medición de la conductividad eléctrica de las soluciones madre para el jitomate saladet se obtuvieron los resultados del cuadro 4.4. Las mediciones se realizaron a 25 °C.

Cuadro 4.4 Conductividades de las soluciones madre.

Solución	Conductividad Eléctrica [mS/cm]
A	68.79
B	37.35
C	51.69

Al mezclar partes iguales de las soluciones se obtienen las C.E. del cuadro 4.5. La solución ABC se compone de 1/3 de cada solución.

Cuadro 4.5 Conductividades de las mezclas con las soluciones.

Mezcla	C.E. [mS/cm]
A-C	56.95
A-B	54.06
C-B	40.91
ABC	51.30

Posteriormente se prepararon mezclas con las soluciones en estos porcentajes: (100 100), (100 90), (100 80), (100 70), (100 60), (100 50), (100 40), (100 30), (100 20) y (100 10); obteniéndose las gráficas 4.10, 4.11, 4.12.

Comportamiento de la conductividad en la mezcla con las soluciones A y B. Se agrega la solución B en pequeñas proporciones hasta igualar las cantidades de ambas soluciones.

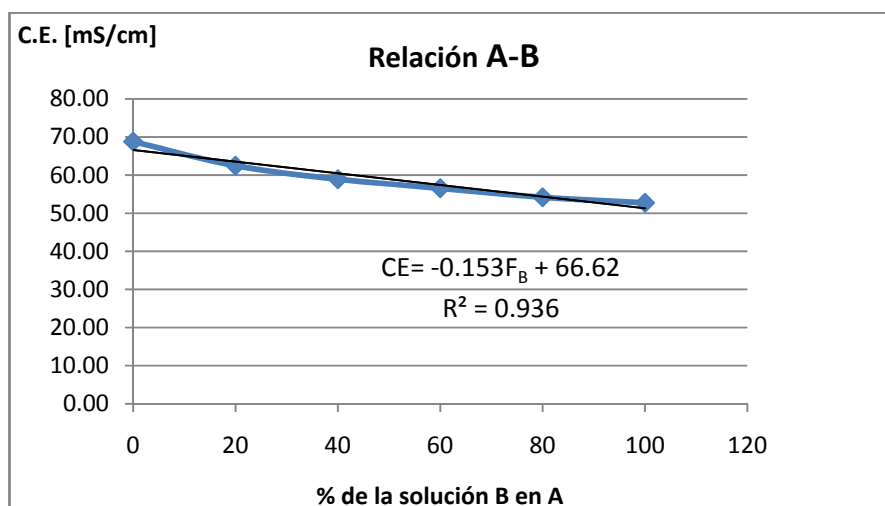


Figura 4.10 Comportamiento de la C.E. manteniendo constante la cantidad de solución A y variando la solución B en la mezcla.

Comportamiento de la conductividad en la mezcla de las soluciones A y C. En este caso la solución que es agregada en proporciones es la C.

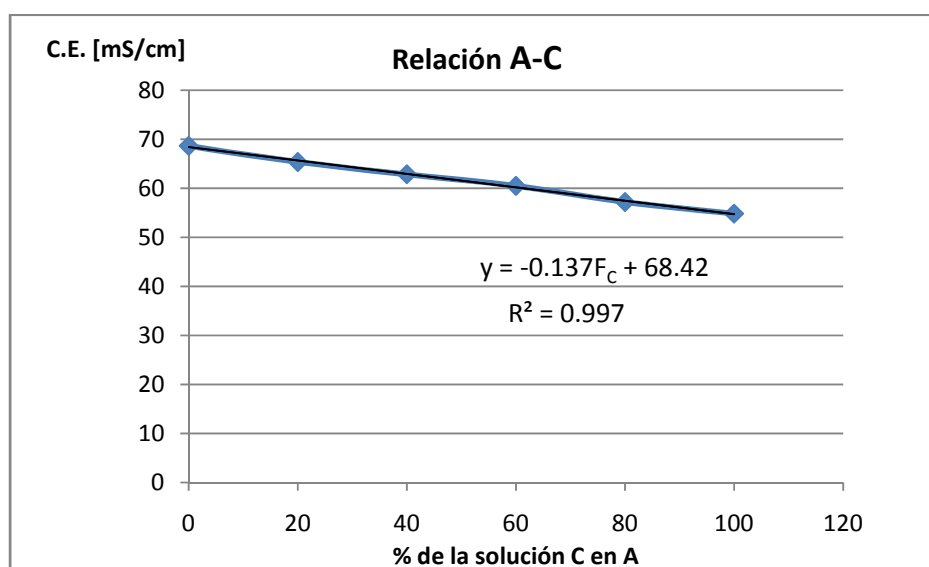


Figura 4.11 Comportamiento de la C.E. al mantener constante la cantidad de solución A y variar la solución C en la mezcla.

Comportamiento de la conductividad en la solución A al agregarle la solución C en proporciones hasta igualar las cantidades.

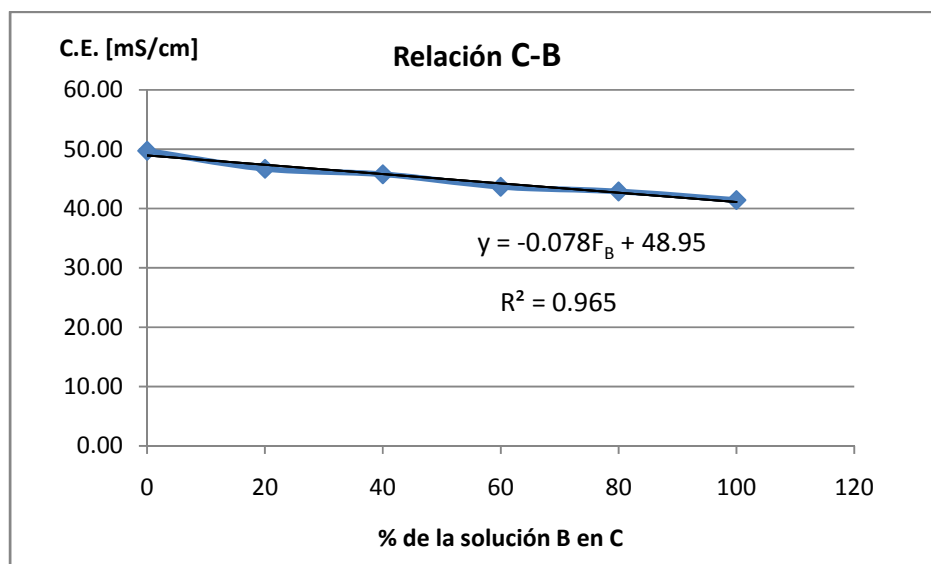


Figura 4.12 Comportamiento de la C.E. al mantener constante la cantidad de solución C y variar la solución B en la mezcla.

Al ajustar las gráficas y comparar la tendencia en las conductividades de las mezclas se obtiene la figura 4.13.

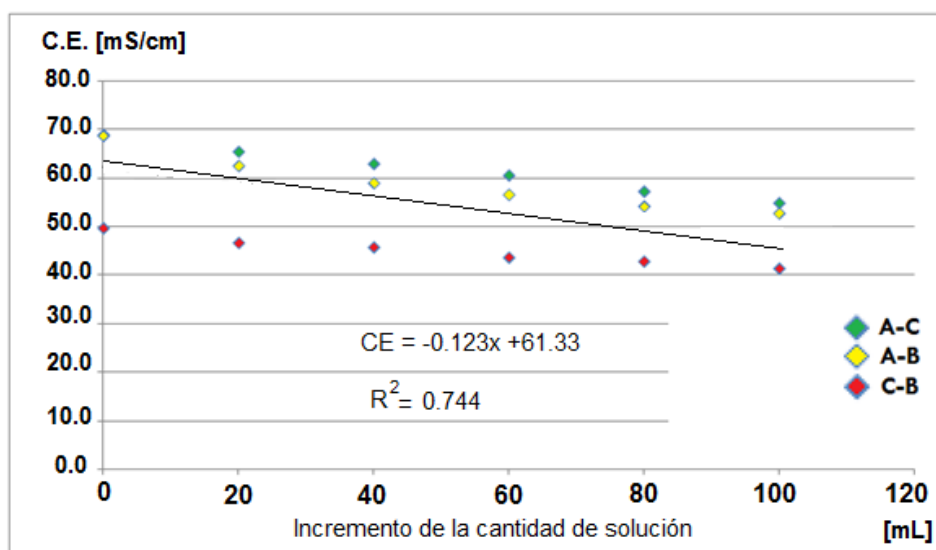


Figura 4.13 Tendencia de la conductividad al comparar las tres pruebas.

También se obtienen las relaciones 4.1, 4.2 y 4.3 para cada mezcla. Donde CE se refiere a la conductividad eléctrica y F_B y F_C el volumen agregado en la mezcla del fertilizante correspondiente.

- Relación A-B $CE = -0.153F_B + 66.62$ (4.1)

- Relación C-B $CE = -0.078F_B + 48.95$ (4.2)

- Relación A-C $CE = -0.137F_C + 68.42$ (4.3)

Determinando una relación general se obtiene la ec. 4.4 donde x es el volumen agregado de la solución A, B o C.

$$CE = -0.123x + 61.33 \quad (4.4)$$

Esta ecuación puede ayudar en la predicción del comportamiento de la conductividad al mezclar soluciones y variar la proporción de una de ellas. Como lo muestran las gráficas la conductividad sigue un patrón lineal al mezclar las soluciones.

Al diluir las soluciones con agua se obtuvieron las conductividades mostradas en las figuras 4.14 a la 4.16. La cantidad de agua que se utilizó en todas las pruebas fue de 300 [mL] a una temperatura de 25°C.

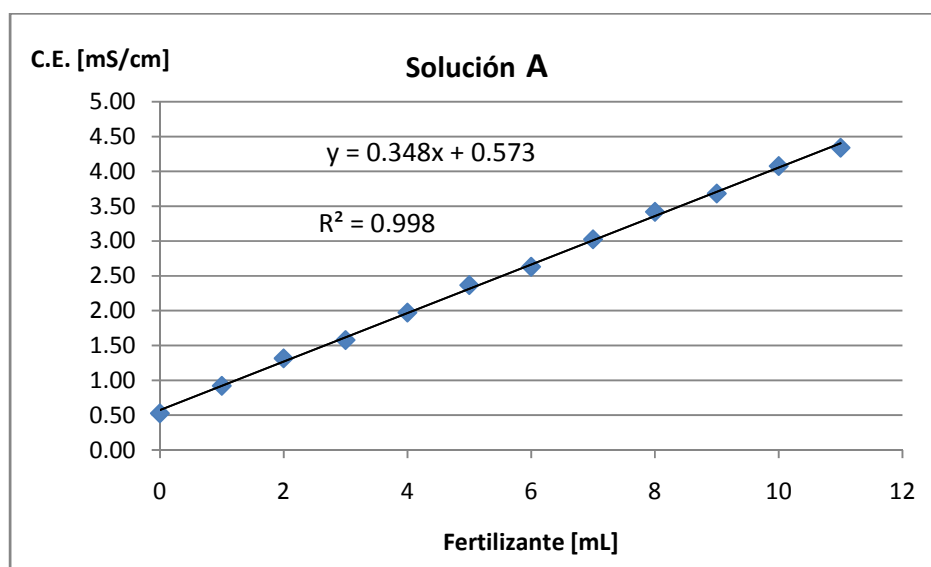


Figura 4.14 Conductividad de la solución A al diluirse con agua.

Al diluir la solución B con el agua de riego se obtiene la figura 4.15

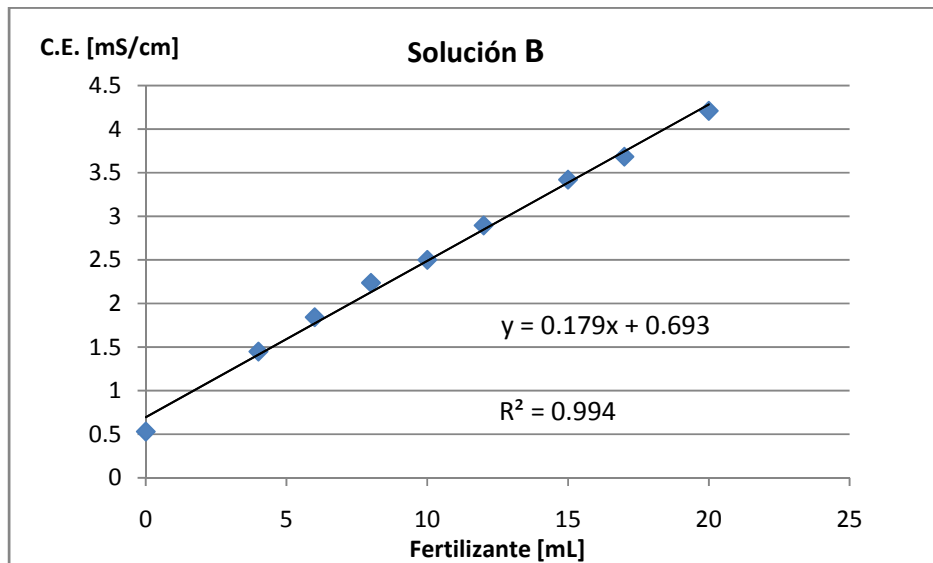


Figura 4.15 Comportamiento de la solución B al diluirse con agua.

Al diluir la solución C con el agua de riego se obtiene la figura 4.15. La tendencia en el incremento de la C.E. sigue un comportamiento lineal al igual que con las soluciones A y B. En las tres situaciones el valor de la R^2 se aproxima a 1.

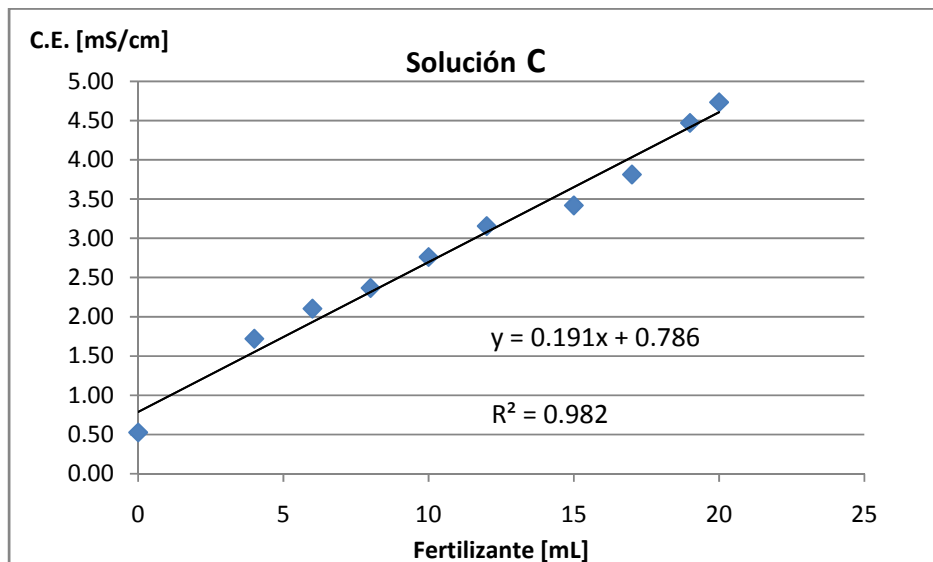


Figura 4.16 Comportamiento de la solución C al diluirse con agua.

En la gráfica 4.17 se compara el incremento de la conductividad eléctrica en las tres soluciones.

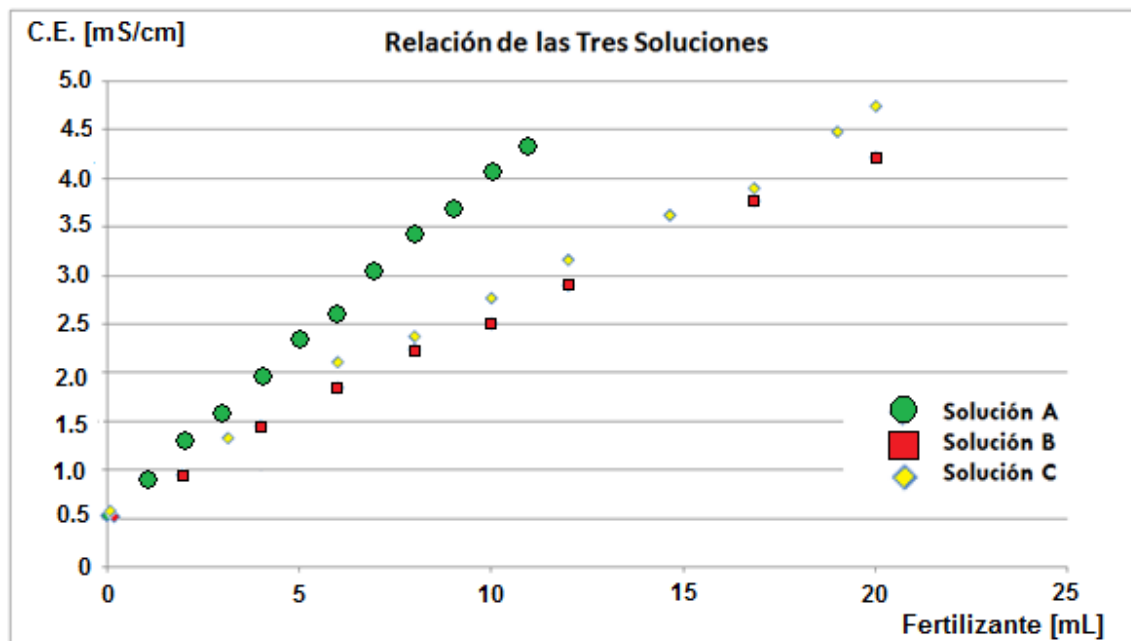


Figura 4.17 Tendencia de la conductividad al comparar las tres pruebas.

La C.E. de la mezcla se incrementa en mayor proporción al agregar la solución A que al agregar las soluciones B o C. La conductividad obtenida con la solución A tiene una mayor pendiente en comparación con las soluciones B y C al agregar la misma cantidad de fertilizante al agua. Por ejemplo considerando que se agregan 20 [mL] de fertilizante en agua la C.E. con la solución A es de 4.1 [mS/cm] mientras que la C.E. con la solución B es de 2.5 [mS/cm] y con C de 2.8 [mS/cm]. Al ajustar las gráficas se obtiene una relación para cada solución como lo muestran las ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7 donde CE es el incremento de la conductividad y las variables F_A , F_B y F_C el volumen de fertilizante agregado en el agua. La C.E. es linealmente proporcional al volumen agregado de fertilizante.

$$\text{Solución A} \quad CE = 0.348 F_A + 0.573 \quad (4.5)$$

$$\text{Solución B} \quad CE = 0.179 F_B + 0.693 \quad (4.6)$$

$$\text{Solución C} \quad CE = 0.191 F_C + 0.786 \quad (4.7)$$

Las conductividades al diluir las mezclas fertilizantes con agua se muestran en las gráficas 4.18 a la 4.21. La cantidad de agua que se utilizó en las pruebas fue de 300 [mL] a una temperatura de 25°C.

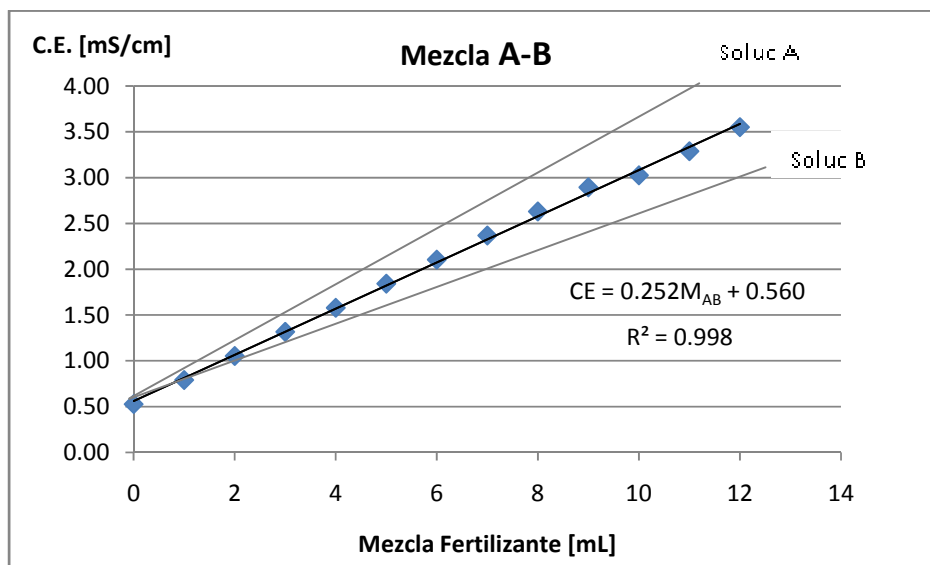


Figura 4.18 Incremento de la conductividad eléctrica en el agua al agregar la mezcla A-B.

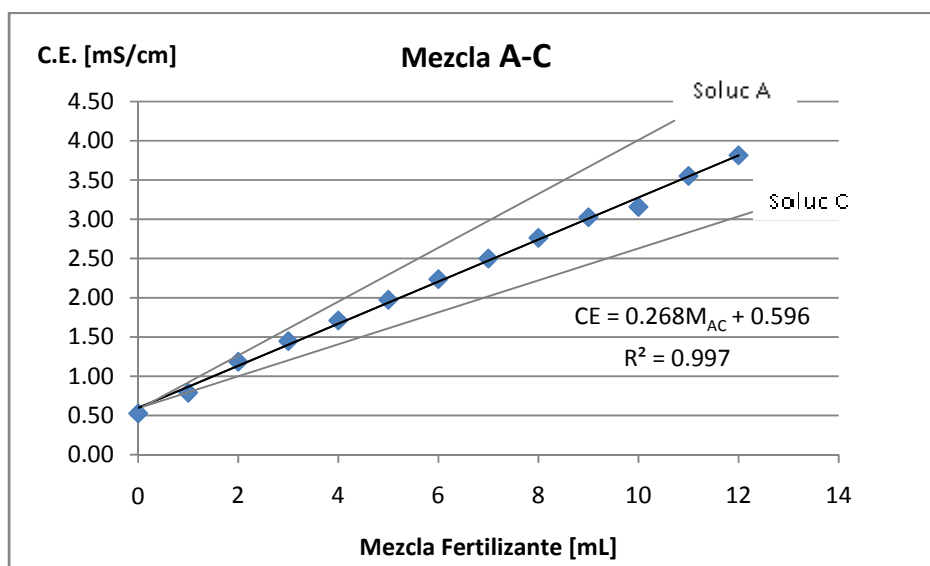


Figura 4.19 Incremento de la conductividad eléctrica en el agua al agregar la mezcla A-C.

Se obtienen las ecuaciones para las relaciones de las mezclas A-B y A-C donde las variables M_{AB} y M_{AC} se refieren al volumen agregado de la mezcla al agua.

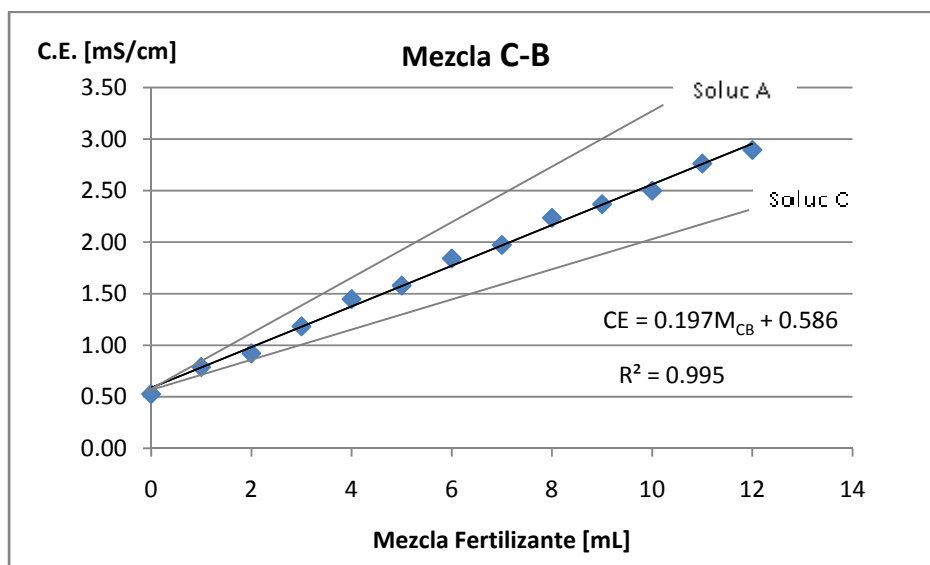


Figura 4.20 Incremento de la conductividad eléctrica en el agua al agregar la mezcla C-B.

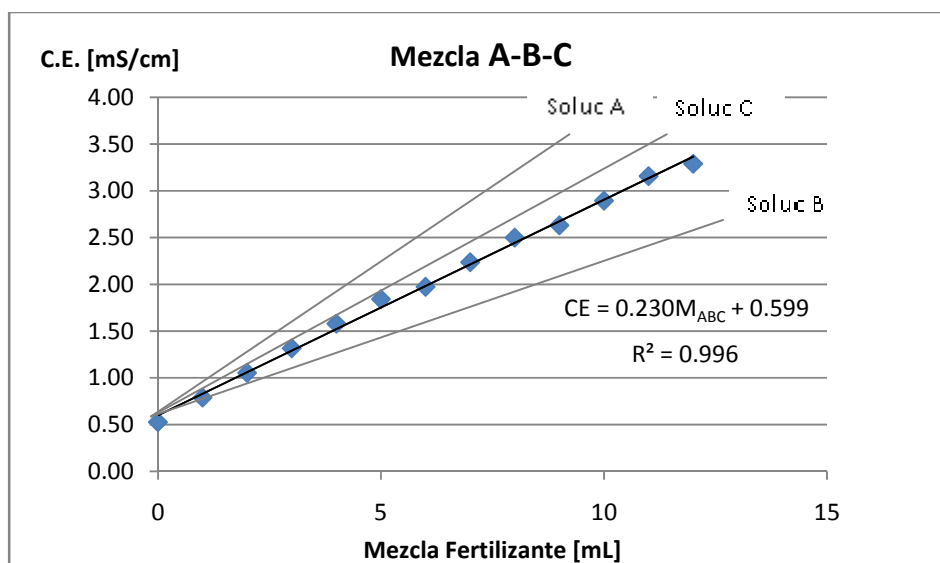


Figura 4.21 Incremento de la conductividad eléctrica en el agua al agregar la mezcla A-B-C.

Se observa que la conductividad eléctrica resultante de las mezclas tiene una pendiente media entre las pendientes de las soluciones, esto se comprueba al graficar las ecuaciones obtenidas de las relaciones entre las mezclas A-B, A-C, C-B y A-B-C donde las variables M_{AB} , M_{AC} , M_{CB} y M_{ABC} se refieren al volumen agregado de la mezcla al agua.

La comparación del incremento en la C.E. en las mezclas se ve en la figura 4.22 donde CE se refiere a la conductividad eléctrica y x el valor del volumen agregado al agua de la mezcla que se use.

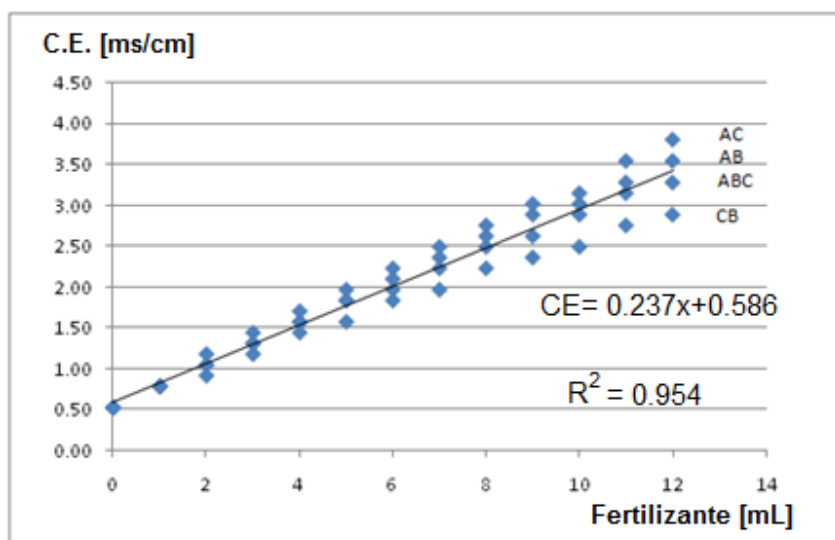


Figura 4.22 Tendencia de la conductividad al comparar las tres pruebas.

De acuerdo a la figura 4.22, se debe suministrar la relación aproximada de 3:100, tres partes de fertilizante por 100 de agua, para obtener la conductividad en el rango de 2.5 a 3 [mS/cm] por ejemplo, al suministrar 3 [L/min] de fertilizante se deben agregar 100 [L/min] de agua y al agregar solamente la solución A que posee una conductividad aproximada de 70 [mS/cm], debe aplicarse la relación 1:100 para obtener una C.E. de 1.5 [mS/cm], y una relación 2:100 para tener una conductividad entre 2.5 y 3 [mS/cm]. Para los sistemas hidropónicos, Urrestarazu (1997) recomienda aplicar dosis de micronutrientes junto con los demás fertilizantes en cada riego debido a las propiedades del sustrato que es un material sólido, inerte y libre de nutrientes. Por lo tanto para un cultivo en invernadero con sustrato se deben aplicar riegos con una mezcla ABC misma que alcanza una conductividad entre los 50 a 55 [mS/cm]. De acuerdo a la gráfica de la figura 4.22, al aplicar dosis de 9 [L/min] de la mezcla ABC con un flujo de 300 [L/min] se obtiene una conductividad que oscila entre los 2.5 [mS/cm].

4.7 Resultados al evaluar el sensor de C.E.

La relación entre la conductividad eléctrica de la solución y la señal de la sonda es de tipo lineal. La ecuación de esta gráfica se utiliza para obtener el voltaje de la sonda con una conductividad de 90 [mS/cm] obteniendo el valor de 106.87 [mV] la diferencia entre el resultado de la ecuación y el resultado real (106.45) es de 0.42 [mV] por lo tanto la ecuación es confiable. La figura 4.23 muestra la relación de los [mV] del sensor con la conductividad eléctrica en [mS/cm] de la solución.

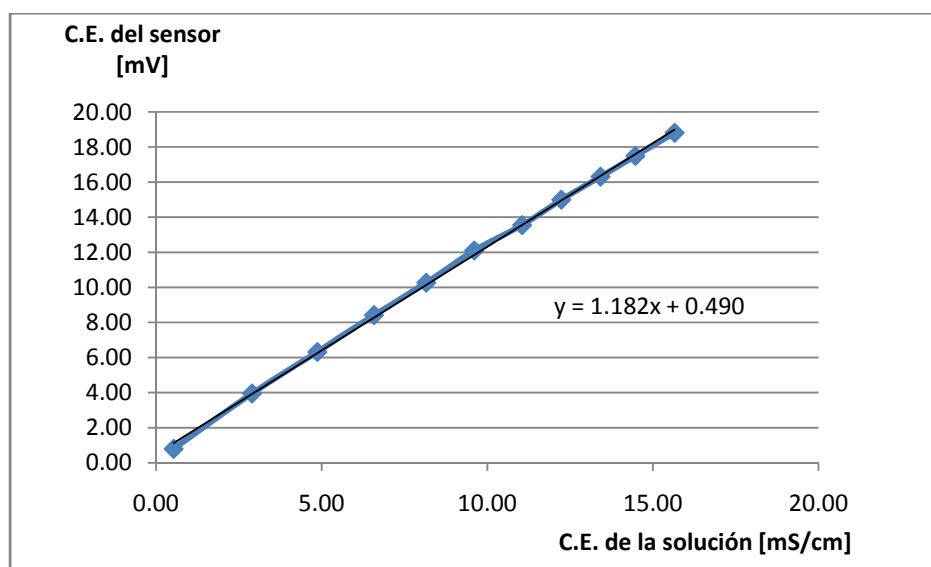


Figura 4.23 Comportamiento al evaluar el sensor de C.E.

Calibración del Sensor de C.E.

El PLC trabaja en un rango de 0 a 10 [V] para señales analógicas, el valor máximo de 10 [V] es dividido entre 1024 para obtener una señal digital de 10 bits. La señal proveniente de la sonda es amplificada 50 veces obteniéndose los valores del cuadro 4.6.

El parámetro a controlar se encuentra en el rango de 410 a 563. Hasta aquí, se ha resuelto la calibración del sensor, el siguiente paso es programar el PLC para controlar a las bombas de inyección.

Cuadro 4.6 Relación de voltaje con los Bits del PLC Millenium II.

C.E. de la solución [mS/cm]	Voltaje de la sonda [mV]	Voltaje Amplificado [V]	Valor de salida del ADC
7.9	9.8	0.5	51
16.2	19.6	1.0	102
24.5	29.4	1.5	154
32.7	39.2	2.0	205
41	49	2.5	256
49.3	58.8	3.0	307
57.6	68.6	3.5	358
66	78.4	4.0	410
74.2	88.2	4.5	461
82.5	98	5.0	512
90.8	107.8	5.5	563
99	117.6	6.0	614

4.8 Diseño del programa en el PLC Millenium II

Diagrama de tiempo en el proceso de fertirrigación de siete minutos (figura 4.24) utilizando la mezcla ABC y con una sección de 3600 goteros con gasto de 5 [L/hora] por emisor. El tiempo total que dura el programa es de 10 minutos ya que el programa inicia con la agitación de las soluciones en los tinacos. La alimentación del sensor se mantiene constante con la finalidad de comprobar la conductividad en las soluciones constantemente.

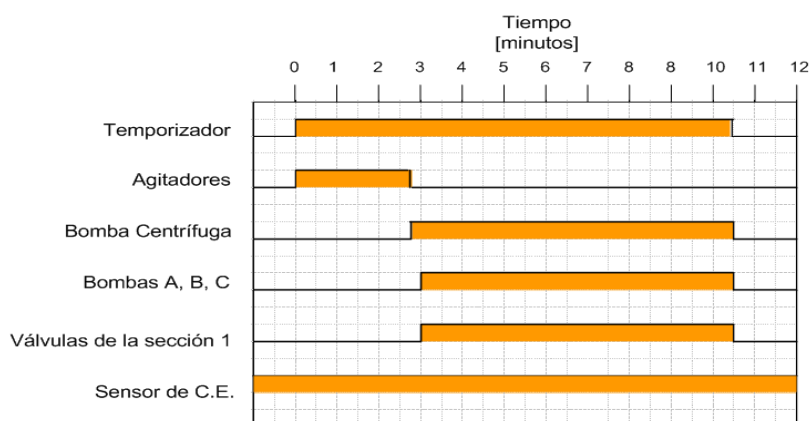
**Figura 4.24** Diagrama de tiempos del proceso de fertirrigación en un riego.

Diagrama de tiempo en el proceso de fertirrigación para un día (figura 4.25) utilizando la mezcla ABC y con secciones de 3600 goteros con gasto de 5 [L/hora] por emisor.

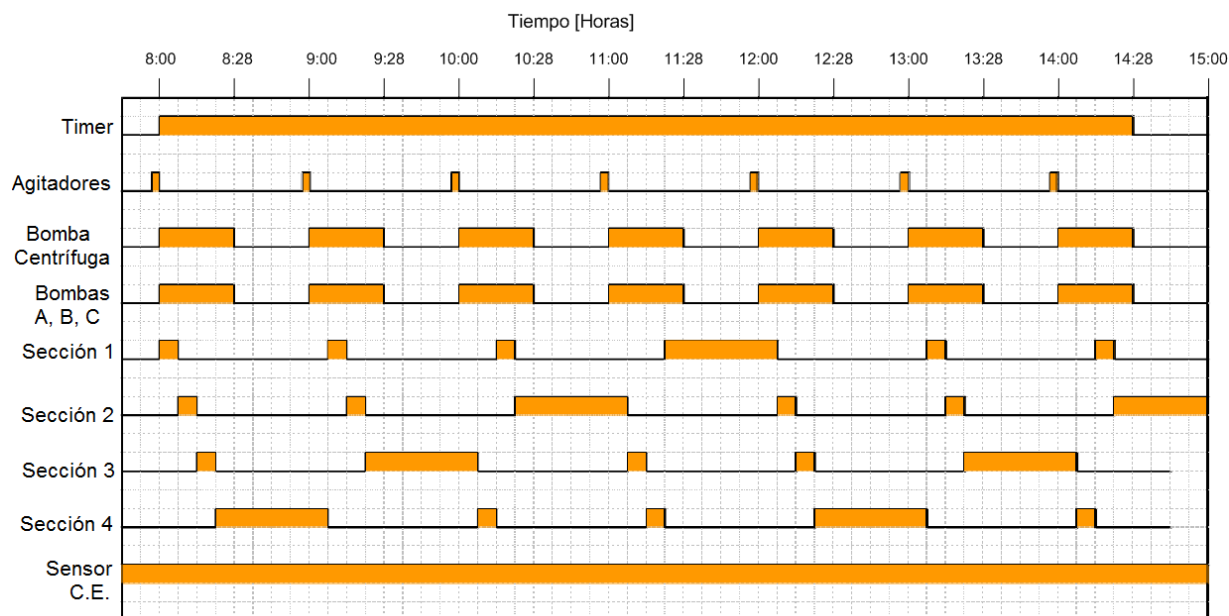


Figura 4.25 Diagrama de tiempo del proceso de fertirrigación en un día.

Como se muestra en el diagrama el temporizador se mantiene activo todo el tiempo y a cada hora se realiza la activación de los agitadores, bombas de paletas rotatorias, bomba centrífuga y válvulas de sección. En el caso de las válvulas de sección la última válvula accionada será la primera del siguiente riego y así sucesivamente. Los sensores de conductividad se mantienen activos todo el tiempo para mantener una medición constante del contenido de los tinacos.

Después de realizar los diagramas de tiempo para el proceso de fertirrigación con la mezcla ABC se realiza el programa en el PLC el cual queda de la forma como se muestra en la figura 4.26. Se tomó como ejemplo la mezcla ABC porque es la que se ocupa en riegos normales con las concentraciones preparadas experimentalmente para que todas se acaben al mismo tiempo.

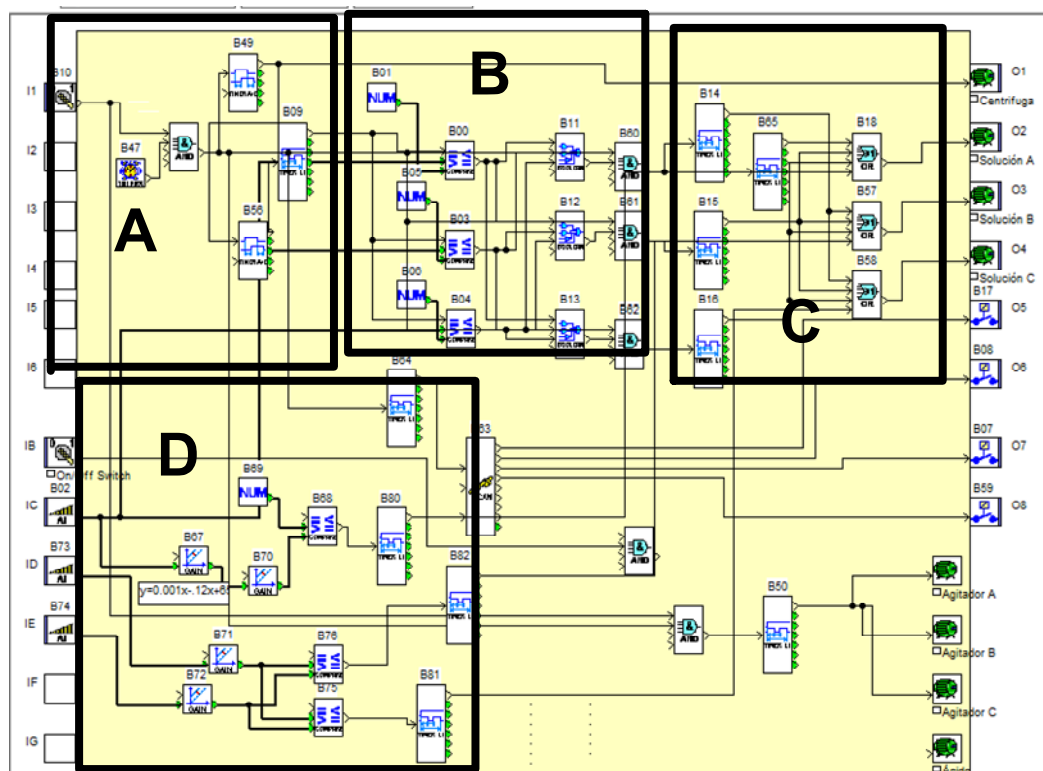


Figura 4.26 Diagrama del programa realizado en el PLC.

En el bloque A se encuentran los temporizadores que controlan los tiempos de activación para cada sección del programa y los tiempos establecidos para el riego. En el bloque B se encuentra la secuencia lógica del programa cuando las conductividades se encuentran dentro de los valores estudiados en las soluciones madre esta secuencia se realiza con funciones que comparan los valores de las señales de los sensores de C.E. con un rango de valores establecidos.

En el bloque C Se encuentran los timer de activación y las puertas lógicas or que dan entrada a la secuencia en funcionamiento y salida a los motores controlados. En el bloque D Se encuentran programadas las funciones de ganancia $y = \frac{a}{b}x + c$ donde a, b y c son valores que se definen con base ecuaciones de comportamiento de la conductividad eléctrica de cada solución, el valor de x es la señal de entrada del sensor de conductividad eléctrica. El valor de y es el tiempo de activación para cada bomba de paletas rotatorias.

4.9 Pruebas con el equipo de fertirriego

Prueba de presión en el sistema de fertirriego

El sistema Venturi causa caídas de presión en los sistemas de riego presurizado. Los dispositivos utilizados eliminan ese problema porque la presión de las bombas de inyección es independiente de la presión del sistema de riego. Este equipo se comparó con el sistema del campo Tlapeaxco, para observar las diferencias en caídas de presión tal como se muestran en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.7 Comparación del equipo diseñado con el sistema del campo Tlapeaxco en relación a las presiones de trabajo.

Sistema	Presión a la salida de la bomba	Presión después de la inyección	Presión a la salida de los goteros
Tlapeaxco	180 [kPa]	145 [kPa]	124 [kPa]
Prototipo con bomba de paletas	180 [kPa]	186 [kPa]	166 [kPa]

La mayor pérdida de presión en el sistema del campo Tlapeaxco se genera en la inyección del fertilizante por el uso de tubos Venturi. Esta pérdida se acentúa cuando el nivel de los tinacos disminuye. En el caso del equipo diseñado no existe disminución de la presión al inyectar el fertilizante y por el contrario hay un pequeño incremento debido a que el fertilizante se inyecta a una mayor presión.

Prueba de homogeneidad en los goteros

El diagrama que se presenta en la figura 4.27, representa la ubicación aproximada de las muestras tomadas del líquido desalojado por los goteros. Se tomaron 13 muestras de una sección de 15 x 30 [m] que aloja a 1250 goteros con gasto de 5 [L/hora]. Se inyectó únicamente la solución A por 7 minutos a la línea de riego. Los valores de conductividad se encuentran en [mS/cm]

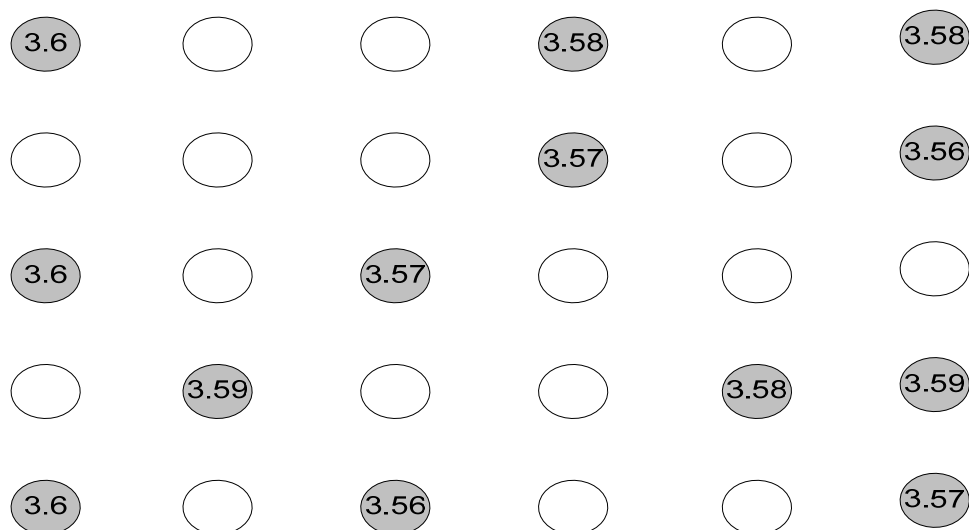


Figura 4.27 Posición de los goteros que componen la muestra tomada para medición de la C.E.

El valor promedio de conductividad que se obtuvo en esta prueba fue de 3.58 [mS/cm] con una desviación estándar de 0.0144. En esta prueba se utilizó una bomba de paletas rotatorias que suministra 3 [L/min] de fertilizante y una sección de 1250 goteros con gasto de 5[L/h] por gotero, haciendo los cálculos necesarios se obtiene un consumo de 104.2 [L/min] de agua, manteniendo una relación 3:100, fertilizante-agua. Con base a los datos del cuadro A-7, para obtener una conductividad de 3.68 [mS/cm] utilizando la solución A debe suministrarse una relación de 3:100 del fertilizante-agua. Por lo tanto el resultado obtenido se aproxima muy bien con una diferencia del valor medio de 0.10 [mS/cm].

Monitoreo de los tiempos de activación

El programa se hizo funcionar por un ciclo completo de fertirrigación para observar su funcionamiento. El tiempo de accionamiento para cada componente se llevó a cabo sin problemas. Los tiempos de desactivación no presentaron problemas salvo el accionamiento de las válvulas de sección que se hacía cada tres minutos y no cada siete como se esperaba, al revisar el programa se observó un error en los tiempos de activación para las válvulas, se corrigió y funcionó normalmente.

4.10 Resultados de las mediciones con sustrato

Al insertar la sonda de C.E. en el sustrato dio una lectura máxima de 0.06 [mS/cm] y una mínima de 0.01 [mS/cm] estabilizándose en 0.03 [mS/cm], figura 4.28.

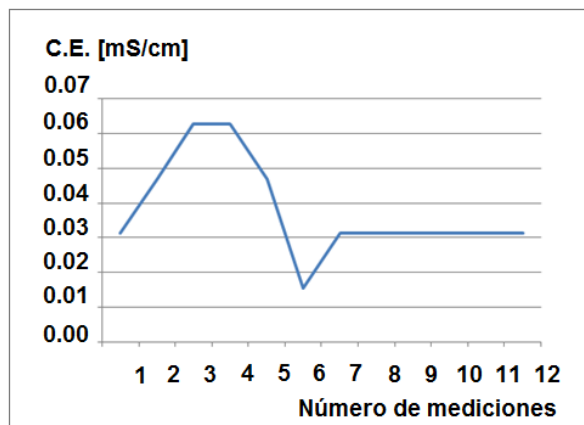


Figura 4.28 Conductividad del sustrato de tezontle en estado virgen.

Al agregar agua destilada al sustrato y medir nuevamente la C.E. se obtuvo el comportamiento de la figura 4.29. La conductividad se estabilizó en 0.09 [mS/cm]. Con esta prueba se pudo observar que la conductividad solo tuvo un incremento de 0.06 [mS] así se sustenta que el sustrato es inerte.

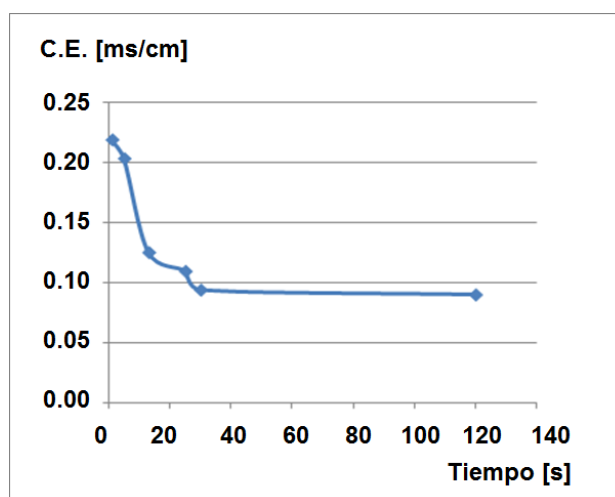


Figura 4.29 Conductividad eléctrica del tezontle.

Resultados obtenidos al medir un día de riego normal en sustrato

Los valores promedio obtenidos fueron de 2.82 [mS/cm] al terminar el último riego del día y de 1,77 [mS/cm] antes de iniciar los riegos en la mañana.

El valor de C.E. registrado en los goteros fue de 2.5 [mS/cm]. Con los datos de la prueba en fertirriego con sustrato se obtuvo la gráfica de la figura 4.30.

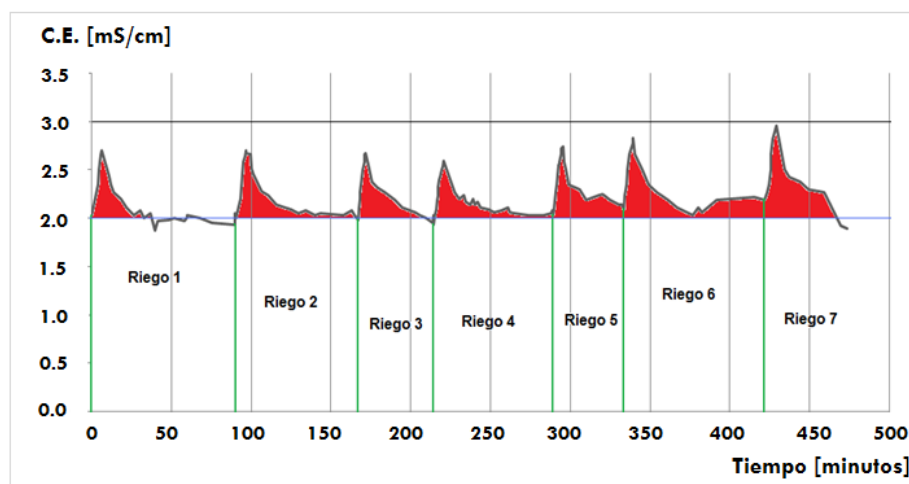


Figura 4.30 Comportamiento de la conductividad eléctrica durante los riegos con fertilizante.

La gráfica 4.30 muestra que la conductividad eléctrica adquiere un ascenso con los fertirriegos en el transcurso del día, sin rebasar los 3 [mS/cm]. Los picos que se observan se originan antes de finalizar el riego y se mantienen hasta que finaliza totalmente. Al término del riego la conductividad disminuye un promedio de 0.5 [mS/cm] durante los próximos tres minutos, después de este tiempo el descenso de la conductividad continúa pero en menor grado hasta descender a los 2[mS/cm] llevándose un tiempo de 45 minutos aproximadamente.

Con esta prueba puede concluirse que si la conductividad eléctrica del fertirriego rebasa la máxima recomendada el sustrato actúa como un regulador porque no retiene la máxima conductividad por mucho tiempo y la planta tendría su momento crítico sólo al momento del riego por lo que puede suponerse que la planta podría soportar algunos riegos con la C.E. ligeramente mayor. No obstante lo mejor es hacer revisiones frecuentes en la conductividad del riego.

Resultados al cambiar los riegos con fertilizante por riegos con agua simple

Los valores promedio obtenidos fueron de 2.82 [mS/cm] al terminar el último riego del día y de 1,77 [mS/cm] antes de iniciar los riegos en la mañana.

El valor de conductividad registrado en los goteros fue de 2.5 [mS/cm]. Al regar con Con los datos de la prueba en fertirriego con sustrato se obtuvo la gráfica de la figura 4.31.

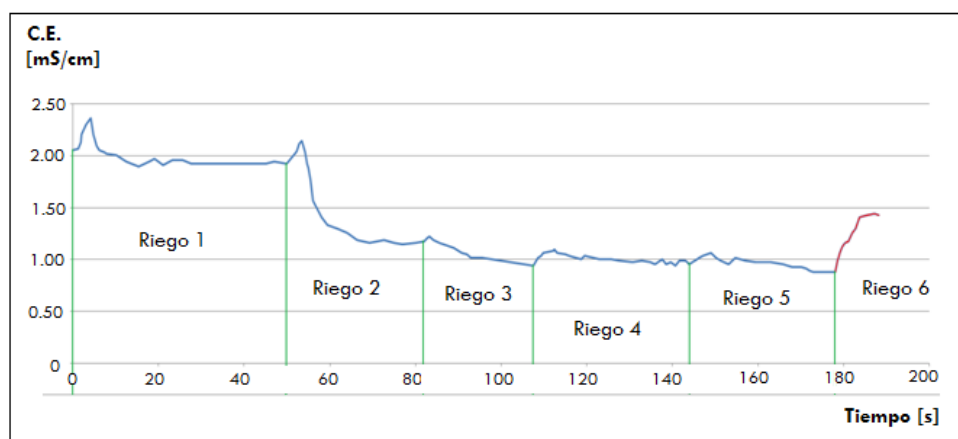


Figura 4.31 Comportamiento de la conductividad eléctrica durante los riegos sin fertilizante.

En esta gráfica se observa que la conductividad se mantiene a pesar de recibir solamente agua en el primer riego. Para el segundo riego la conductividad comienza a descender hasta 1[mS/cm] en el quinto riego. En el sexto riego se vuelve a agregar fertilizante y se nota como inmediatamente la conductividad aumenta.

Con estas pruebas se concluye que en caso de fallar el sistema de riego unas horas no se ve afectada la C.E. del sustrato en forma agravante. Al igual en caso de suministrar una concentración ligeramente mayor, el sustrato logra regular la conductividad después de aplicar el riego.

V CONCLUSIONES

1.- Se diseñó, construyó y evaluó un sistema de fertirriego con inyección de fertilizantes controlado por PLC. El equipo consta de tres bombas de paletas rotatorias con inyector en cada salida y un PLC Millenium II con sensores de conductividad eléctrica instalados en los tanques de fertilizantes. Se evaluaron dos tipos de bombas de presión para su aplicación en la inyección de fertilizante, una de tipo paletas rotatorias y otra tipo peristáltica, en esta evaluación la bomba peristáltica presentó problemas de operación por el tipo de mangueras utilizadas, principalmente caídas de presión en la inyección y fugas por retorno ocasionados por el maltrato de la manguera por consecuencia el uso de esta bomba para la inyección de fertilizantes fue descartado. La bomba de paletas presentó un desempeño adecuado manteniendo la entrega del caudal constante de 3 [L/min] a las presiones manejadas en las pruebas que oscilaron entre 170 a 280 [kPa].

Al realizar la inyección de fertilizantes con la bomba de paletas rotatorias no se observaron caídas de presión en la red de tuberías como sucede en los sistemas Venturi, esto se corroboró al comparar el equipo diseñado con el sistema Venturi del campo Tlapeaxco. Observándose una diferencia de 41 [kPa] a la salida de la inyección.

2.- Con las pruebas realizadas a las soluciones madre se obtuvieron gráficas y ecuaciones de comportamiento de la conductividad eléctrica en función de las mezclas y los volúmenes agregados de fertilizantes en el agua. Se determinó que ese comportamiento puede ajustarse al tipo lineal permitiendo predecir las variaciones en la conductividad eléctrica en función del volumen agregado de fertilizante en el agua. Se puede determinar para un cierto volumen de fertilizante agregado la conductividad eléctrica de la solución de salida e inversamente para una cierta CE se puede determinar el volumen agregado de fertilizante al agua, por ejemplo para una CE de 1.5 a 3 [mS/cm] debe suministrarse 3 partes de fertilizante por 100 partes de agua para el cultivo de jitomate.

Cabe aclarar que diferentes cultivos pueden requerir diferentes concentraciones y variar la CE de salida. De los datos obtenidos en las pruebas con fertilizantes se determinó que debe suministrarse una relación de una a tres partes de fertilizante por 100 de agua para obtener una conductividad final en el rango de 1.5 a 3 [mS/cm]

3.- Se desarrolló el programa de control para PLC Millenium II para la inyección de fertilizantes tomando en cuenta los datos de los sensores de CE ubicados en los tinacos de las soluciones madre y las gráficas de comportamiento buscando mantener la relación 3:100, utilizando la función gain que consiste en una relación inversa con la señal del sensor y el tiempo de inyección, a mayor conductividad menor tiempo de inyección, tomando en cuenta las restricciones como garantizar el flujo de agua constante durante la inyección y mantener el nivel de fertilizante en los tinacos.

Orientación del trabajo futuro

Como en muchos proyectos el trabajo debe continuar en busca de mejorar los diseños y tecnologías usadas en el desarrollo de los proyectos. Una vez terminado el trabajo siempre surgen nuevas ideas que pueden complementar o mejorar la labor realizada. Por esta razón se orienta, a los investigadores que deseen retomar la idea de este proyecto, con algunas propuestas de continuación y mejora de lo hecho hasta este momento con el sistema de fertirriego.

- La creación de una metodología en el uso adecuado del equipo de fertirriego que comprenda como instalar, conectar, y supervisar el funcionamiento.
- Extender el control que se lleva acabo por conductividad eléctrica con el monitoreo de nutrientes en cada inyección.
- La implementación del programa actual del PLC a circuitos de costo menor como los microcontroladores y avr's
- Instalar sistemas de filtrado con autolimpieza.

VI REFERENCIAS

-  Avidán, A.; Nathan, R.. 2004. Fertirrigación y Quimigación. In: memorias del X Curso Internacional de Sistemas de Riego. Volumen III, Fertirrigación y Nutrición Vegetal. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México. 12-45 p.
-  Cadahia L. C. 1998. Fertirrigación: Cultivos Hortícolas y Ornamentales. Mundiprensa. Madrid, España. 34-45 p.
-  Carreño S. J.; Magán C., J. J. 1999. El Riego por Goteo, Manejo, Cálculos de Fertirrigación y Otros Productos. Volumen 1 de la serie Técnicas de Producción de Frutas y Hortalizas en los Cultivos Protegidos del Sureste Español. Casa Rural de Almería. Madrid, España. 13-21 p.
-  Castañón, G. 2000. Ingeniería del Riego, Utilización Racional del Agua. ITES Paraninfo. Magallanes Madrid, España. 50 - 61 p.
-  Calderón S. F. 2002. Asistencia Técnica Agrícola AEMC Instruments. Ltda., Avda. 13 No. 87-81 Bogotá D.C., Colombia. p13
-  Imas, P. 2002. Manejo de Nutrientes por Fertirriego en Sistemas Frutihortícolas. Artículo presentado en el XXII Congreso Argentino de Horticultura. International Potash Institute. Coordination India. Buenos Aires, Argentina. 6-12p
-  Darwich N. 2006. Manual de Fertilidad de Suelos y Uso de Fertilizantes 3ra Ed. Buenos Aires Argentina. 24-52p.
-  Moya Talens, Jesús Antonio. 2002. Riego Localizado y Fertirrigación. 3ª. Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 7-65 p.

-  Fernández, D. P.; Fernández. 2002. Ingeniería Energética. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso Chile. 176 - 201p.
-  Peña P. E., y Montiel G. M. 1998. Manual Práctico de Fertirriego. 2ª. Edición. Colección Manuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Jiutepec, Morelos, México. 19 p.
-  Ramos L., C. 2001. Fertirrigación Nitrogenada y Aplicaciones de Estiércol Bovino en Tomate de Cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en Invernadero. Tesis de Maestría. Instituto de Recursos Naturales. Montecillo, Texcoco. p 20-21
-  Hanan J., J. 1998. Greenhouses. Advanced technology for protected horticulture. USA, 684 p.
-  Nelson P., V. 1998. Greenhouses operation and management. USA, 637 p.
-  Vera M., J., y De la Peña D. T. 1994. Fertiga: Programa de fertirrigación de árboles frutales. CSICCEBAS. Murcia, España. 69 p.
-  Urrestarazu, M. 1997. Manual De Cultivo Sin Suelo. Ed. Servicio de Publicaciones Universidad de Almería. Almería. 23p.
-  Handbook Crouzet Millenim II and Millenium III edition 2008
-  Crouzet logics equipament handbook grafsets
-  Crouzet-usa.com
-  <http://www.fertilizando.com/articulos/Fertilizantes/>
-  www.uaaan.mx/academic/Horticultura/Memhort02/Ponencia04.pdf
-  www.acomybombas.com.ar

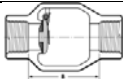
ANEXOS

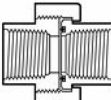
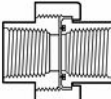
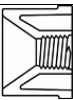
Cuadro A-1. Características de algunos fertilizantes macronutrientes más utilizados en fertirrigación.

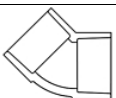
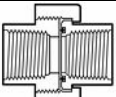
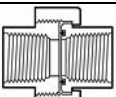
Fertilizante	Fórmula	Característica
Ácido nítrico	(HNO_3)	Se utiliza para acidificar el agua de riego, así como para la limpieza de las instalaciones. Su manejo es peligroso, ya que se trata de un ácido fuerte. También se utiliza como fertilizante.
Nitrato cálcico	$(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2)$	Fundamentalmente utilizado para aplicar Ca y como consecuencia nitrógeno.
Nitrato amónico	(NH_4NO_3)	Sal muy soluble, que contiene la mitad del nitrógeno como forma nítrica y la otra mitad como amoniacal. Reacción ligeramente ácida.
Nitrato magnésico	$(\text{Mg}(\text{NO}_3)_2)$	incorpora además del N correspondiente un 9.5% de Mg.
Sulfato amónico	$((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$	Suele emplearse en los casos en que es necesario aportar azufre, aunque es incompatible con sales cálcicas en disoluciones concentradas.
Fosfato monoamónico	$(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$	Da reacción ácida, lo que disminuye el riesgo de obturaciones.
Fosfato diamónico	$((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$	Da reacción alcalina por lo que se debe usar junto con un ácido.
Ácido fosfórico	(H_3PO_4)	Puede emplearse para aplicar P y como acidulante de la disolución. Manejo especial.
Sulfato potásico	(K_2SO_4)	Incorpora azufre, su solubilidad no es muy elevada es incompatible con sales cálcicas en disoluciones concentradas.
Nitrato potásico	(KNO_3)	Tiene reacción neutra e incorpora dos nutrientes. Muy utilizado en fertirrigación.
Fosfato monopotásico	(KH_2PO_4)	Tiene un alto contenido en P gran movilidad.

Fuente: Cadahía (1997).

Cuadro A-2. *Materiales utilizados para el ensamble de tuberías*

Pieza	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
 90° Codo roscado 3/4"	6	1.93	11.53
 90° Codo roscado 1/2"	6	1.30	7.8
 90° Codo roscado 1 1/2"	7	5.57	38.99
 Válvulas de 3/4" roscada	4	21.37	85.48
 Válvula check 3/4"	4	34.53	138.12
 Válvulas de 1 1/2" roscada	4	55.17	220.68
 Niple 1/2" x 2" largo	21	.93	19.53
 Niple 3/4" cuerda corrida	16	.99	15.84
 Niple 1/2" x 4"	6	1.26	7.56
 T- roscada 1/2"	3	2.46	7.38
 Bushing 1 1/2" x 3/4"	8	7.08	56.64
 T- roscada 1 1/2"	7	5.29	37.03

Pieza	Cantidad	Precio unitario	Total
 Cople roscado 3/4"	8	1.26	10.08
 Cople roscado 1/2"	8	.77	6.16
 unión roscada 1/2"	4	6.53	26.12
 unión roscada 3/4"	4	10.91	43.64
 T-Socket 1 1/2"	4	2.74	10.96
 Bushing 1/2" x 3/8"	6	2.56	15.36
 Bushing 3/4" x 3/8"	3	1.58	4.74
 Bushing 3/4" x 1/2"	6	1.58	9.48
 Niple 1 1/2" cuerda corr	12	2.09	25.08
 Niple 1 1/2" x 4"	3	2.91	8.73
 Bushing 1 1/2" x 3/4"	8	2.56	20.48
 Adaptador hembra 3/4"	16	.54	8.64

Pieza	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
 Codo a 45° 1 ½"	1	29.21	29.21
 Y filtro 1 ½"	3	301.66	904.98
 Manómetro	3	120	360
 unión roscada 1 ½"	2	26.13	52.26
 unión roscada 2"	1	32.09	32.09
 Válvulas industrial	5	125.21	626.05
 Válvulas antirretorno 3/4"	3	55	165
Tubo pvc 2"	2	76.24	152.48
Tubo pvc 1 ½"	2	66.78	133.56
Tubo pvc 3/4"	2	57.54	115.02
 Tinacos	3	1200	3600

Nota: Los precios de las conexiones, uniones y tuberías son obtenidos de las tablas de Spears Manufacturing Company. El valor de estos componentes debe multiplicarse por 2.1 que es el factor que incluye impuestos, transporte y ganancia de las tiendas distribuidoras en México. Para los demás accesorios el valor es el correcto al 20 de junio de 2008.

Cuadro A-3. *Materiales ocupados en la instalación eléctrica.*

Pieza	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
Cable 14 AWG doble conductor	100 [m]	15 metro	1500
Cable 10 AWG	5 [m]	15 metro	75
Cable 22 AWG	30 [m]	3 metro	90
Caja de control	1	300	300
Caja de fusibles	1	300	300
otros	---	200	200

Cuadro A-4 *Motores, bombas y materiales utilizados el sistema de fertirriego.*

Pieza	Cantidad	Precio unitario \$	Total \$
Agitador	3	350	1050
Bomba de paletas	4	550	2200
Bomba centrifuga	1	500	500
Turbinas	12	10	120
Barras de acero inoxidable 1.20 [m]	3	200	600
acopladores	3	100	300

Cuadro A-5 Materiales utilizados en la construcción del circuito de potencia.

Componente	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Total \$
THD-050L	Relevador electrónico	1	12	12
TDS-1202L	Relevador electrónico	1	17	17
2W005M	Conjunto rectificador	2	6	12
7805	Regulador de voltaje (+)	1	8	8
7905	Regulador de voltaje (-)	1	8	8
7812	Regulador de voltaje (+)	1	8	8
7912	Regulador de voltaje (-)	1	8	8
MOC3011M	Opto acoplador triac	4	6	24
555	Circuito integrado	1	10	10
BC-378	Amplificador	1	5	5
RAS-0610	Relevador	3	7	21
C1	Capacitor 1 μF	2	4	8
C2	Capacitor 2200 μF	2	2	4
C3	Capacitor 330 μF	1	4	4
C4	Capacitor 3300 μF	1	28	28
IN400	Diodo rectificador	8	1	8
R1	1 $\text{k}\Omega$	1	1	1
R2	Potenciómetro 5 $\text{M}\Omega$	1	1	1
R3	10 $\text{k}\Omega$	10	1	10
R4	2 $\text{k}\Omega$	16	1	16
MOD-400	Circuito impreso	2	49	98
MOD-700	Circuito impreso	1	59	59
PF-05	Porta fusible	2	6	12
137-500F	Triac	7	22	154
SS-001-SW	Interruptor	1	12	12
SS-003-SW	Interruptor	4	7	28
MDL-050	Relevador electrónico	2	17	34
Led's	Diodo Emisor de Luz	1	1	1
S8-RC	Swich rotor 8 salidas	1	30	30
BP-32	Perillas de baquelita	2	10	20
SS-005-SW	Interruptor	2	4	8
Pin	Botón interruptor abierto	1	3	3
Cable C-14	Cable conductor	8 m	4	32
Cable C-22	Cable conductor	5 m	1	5
Cable C-24	Cable conductor	3 m	1	3
El Costo Total en Moneda Mexicana es				712

Cuadro A-6 Medidas MESH de tamices - estándares ingleses y norteamericanos

Medidas MESH de tamices estándar - Estándares ingleses y norteamericanos		
Número MESH	Tamaño nominal del poro (mm)	
	BS410	ASTM E-11-61
3	5.60	-
3 ½	4.75	5.66
4	4.00	4.76
5	3.35	4.00
6	2.80	3.36
7	2.36	2.83
8	2.00	2.38
10	1.70	2.00
12	1.40	1.68
14	1.18	1.41
16	1.00	1.19
18	0.850	1.00
20	-	0.841
22	0.710	-
25	0.600	0.707
30	0.500	0.595
35	0.500	-
36	0.425	-
40	-	0.420
44	0.355	-
45	-	0.354
50	-	0.297
52	0.300	-
60	0.250	0.250
70	-	0.210
72	0.212	-
80	-	0.177
85	0.180	-
100	0.150	0.149
120	0.125	0.125
140	-	0.105
150	0.106	-
170	0.090	0.088
200	0.075	0.074
230	-	0.063
240	0.063	-
270	-	0.053
300	0.053	-
325	-	0.044
400	-	0.037

Spears® Tech. Info 2008.

Cuadro A-7 Datos obtenidos al diluir la solución A en agua.

Solución A C.E. 65.77 [mS/cm]			
Agua 300 [ml] C.E. 00.53 [mS/cm]			
Prueba	C.E.	Solución Fertilizante [ml]	% de Fertilizante con Relación al Agua
0	0.53	0	0
1	0.92	1	0.33
2	1.32	2	0.67
3	1.58	3	1.00
4	1.97	4	1.33
5	2.37	5	1.67
6	2.63	6	2.00
7	3.03	7	2.33
8	3.42	8	2.67
9	3.68	9	3.00
10	4.08	10	3.33
11	4.34	11	3.67

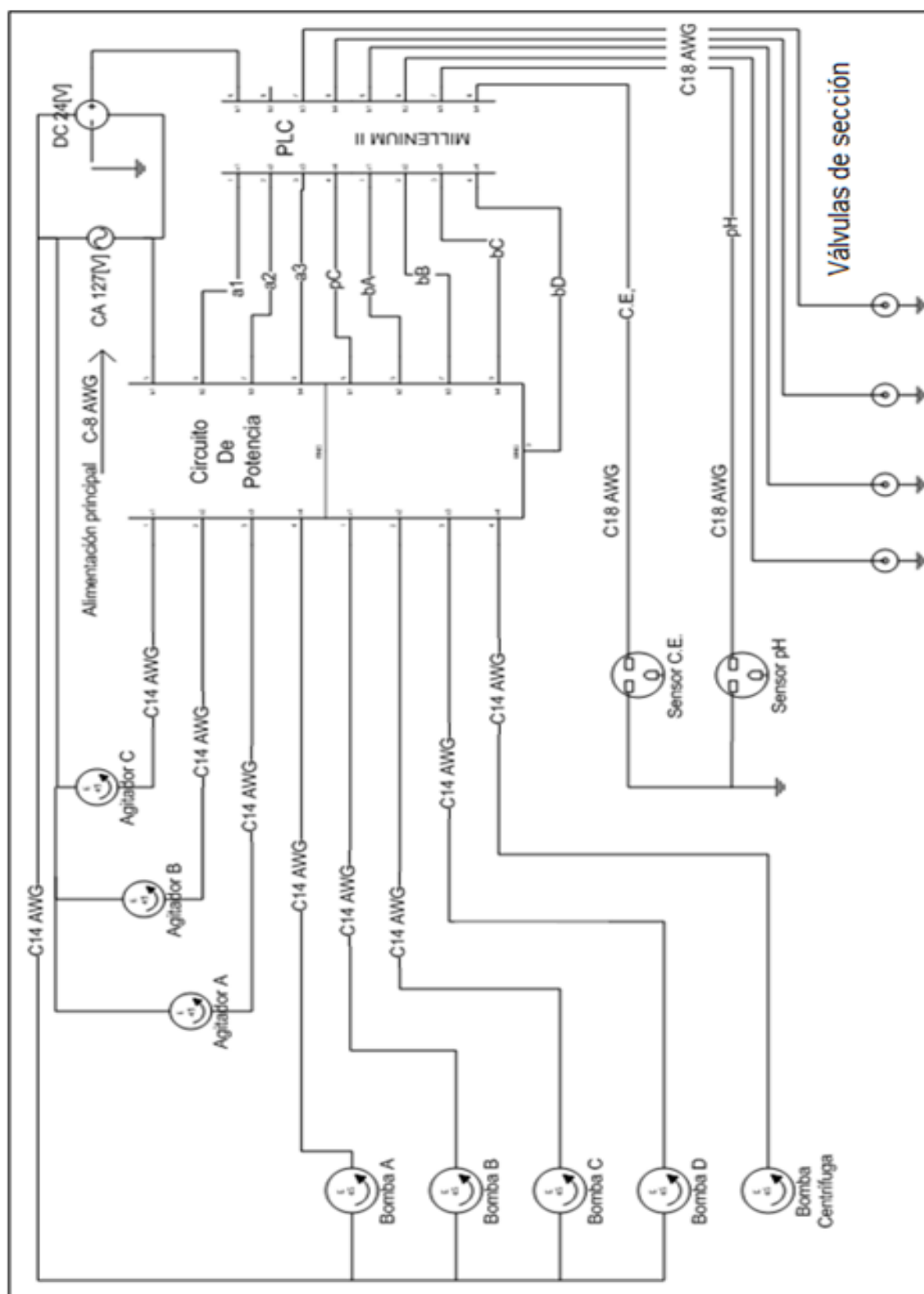


Figura A-1. Diagrama del cableado en el sistema de fertirriego.

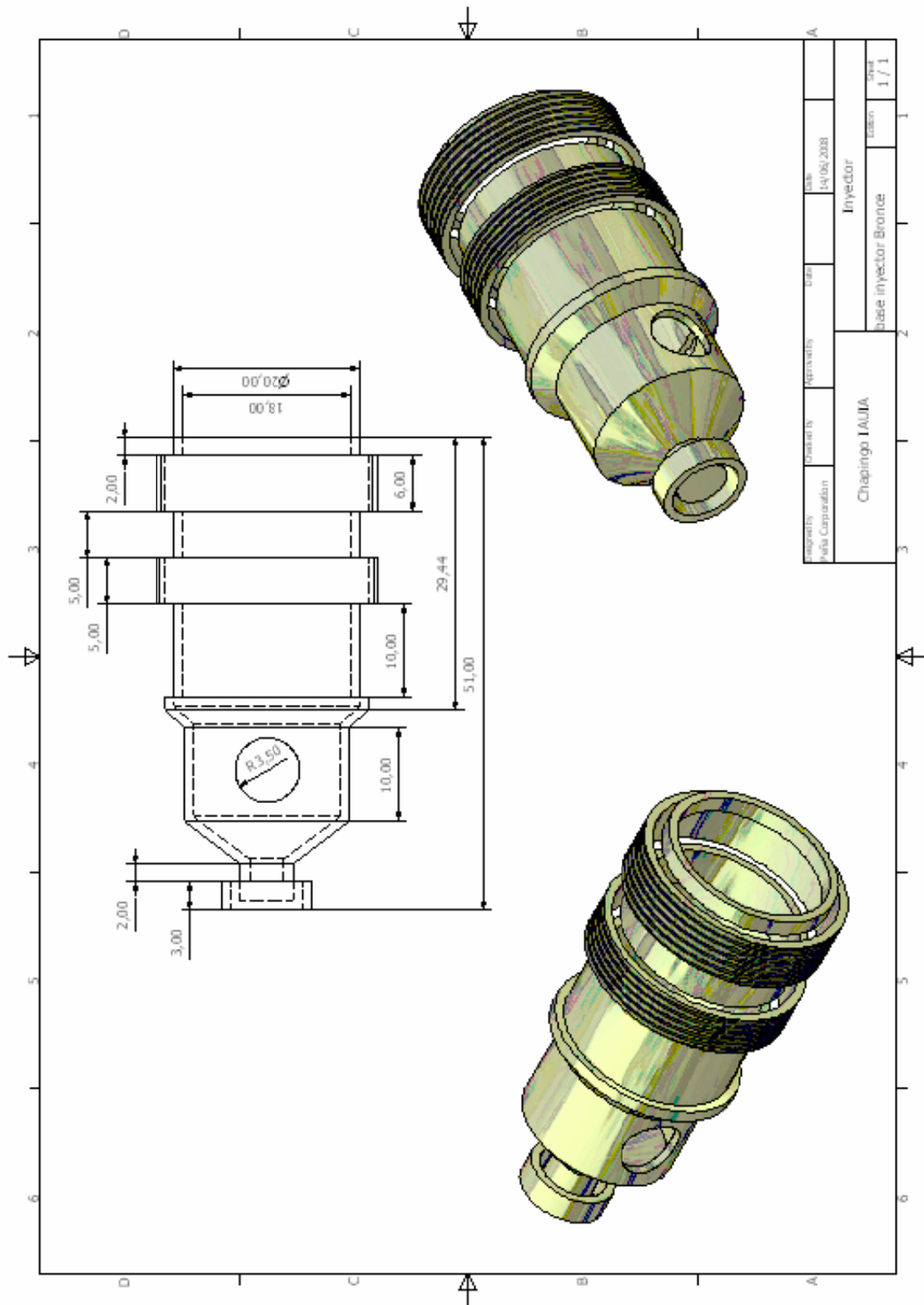


Figura A-2. Dibujo del inyector.

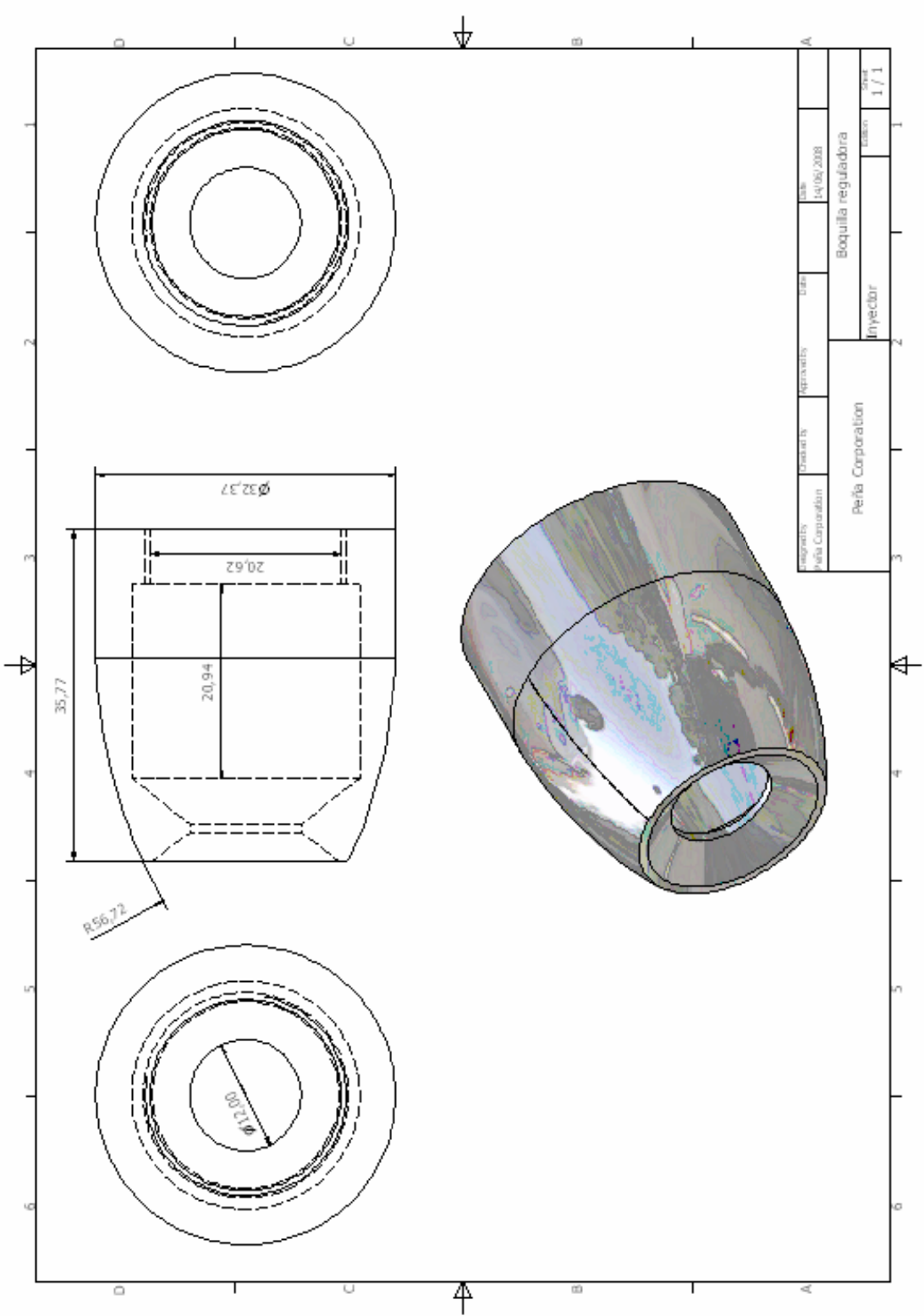


Figura A-3. Boquilla reguladora.

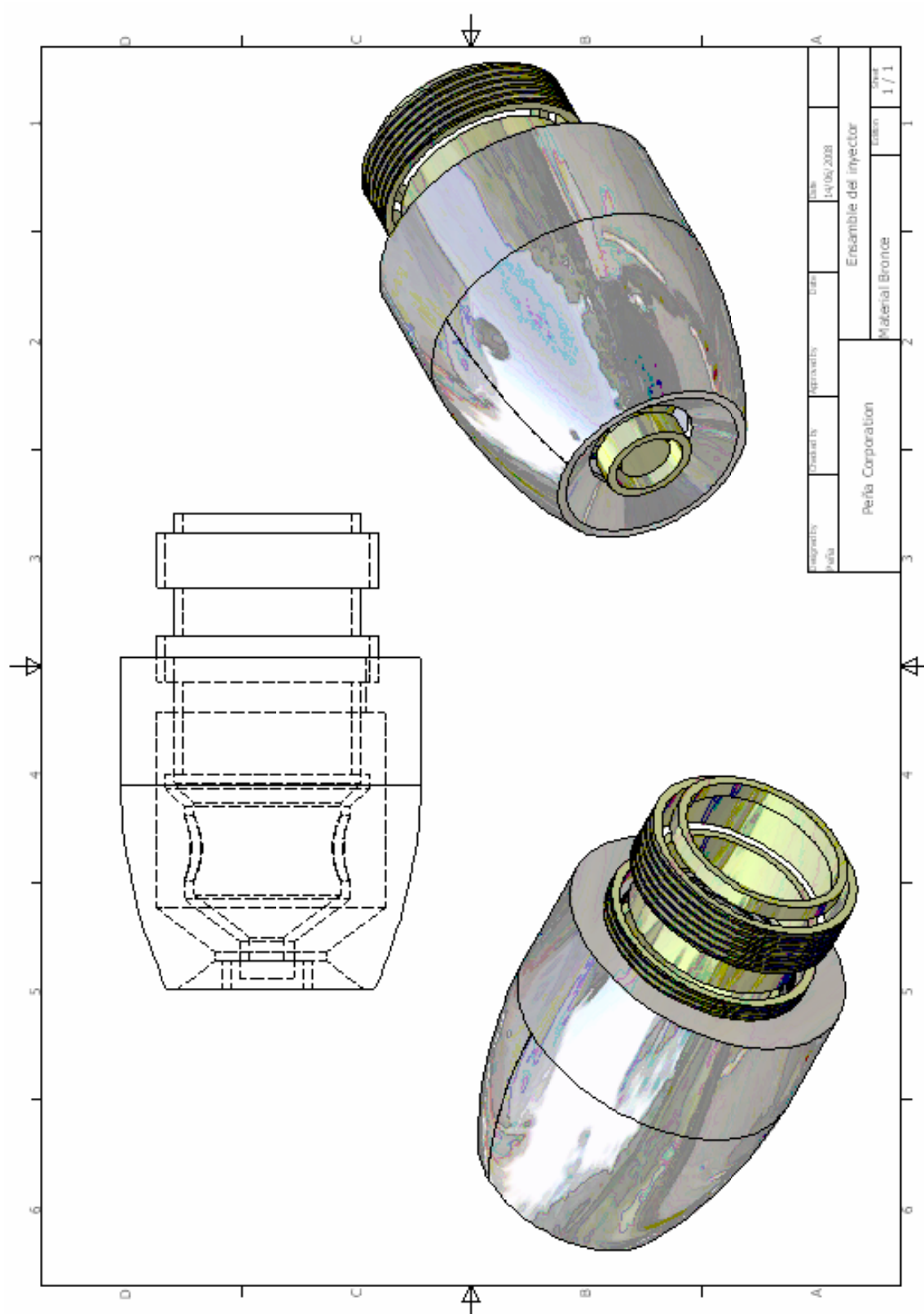


Figura A-4. Ensamble del inyector.