



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Instrumentación
y Control Automático

Control Fuzzy-PID Aplicado a un Sistema de Riego Localizado para Invernadero.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Domingo José Gómez Meléndez

Dirigido por:

M. en C. Rodrigo Castañeda Miranda.

SINODALES

M. en .C Rodrigo Castañeda Miranda
Presidente

Dr Gilberto Herrera Ruiz
Secretario

M. en .C Ruth Rico Hernández
Vocal

M. en . Sergio Cervantes Pérez
Suplente

Roberto Augusto Gómez Loenzo
Suplente

M. en .C Gerardo René Serrano Gutiérrez
Director de la Facultad de Ingeniería

Firma
Firma
Firma
Firma
Firma

Dr. Sergio Quesada Aldana
Director de Investigación y posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Enero de 2005
México

No. Adq. H69708

No. Título _____

Clas. TS

629.8

G633c

E.1

RESUMEN

Un control preciso de la nutrición del cultivo en un invernadero puede llevar a un incremento significativo de la producción y calidad de la cosecha (Howard M, 1992.). En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de control que se encarga de la inyección de fertilizantes en un sistema de riego y de la administración del riego de varios cultivos; el sistema se basa en un control difuso para lograr una mejora en la precisión de la inyección de los nutrientes. En los cultivos hidropónicos, todos los elementos esenciales se suministran a las plantas disolviendo las sales fertilizantes en agua; por esto el sistema se encarga de aplicar una solución concentrada de nutrientes a un volumen de agua que luego se inyectara al cultivo. El sistema de control de inyección de fertilizantes está basado en un control de lazo cerrado, donde las variables que mide y se retroalimentan son el pH y la conductividad eléctrica (EC); a través de los algoritmos de control se logra el ajuste de la soluciones de nutrientes si tenemos en cuenta la relación directa entre la cantidad de sales disueltas en la solución y el valor de la conductividad eléctrica de esta.

(Palabras clave: Nutrición, control difuso, instrumentación, hidroponia)

SUMMARY

A precise control of crop nutrition in a greenhouse can lead to a significant increase in production and the harvested product quality (Howard M, 1992.). This work presents the development of a control system for fertilizer injection in an irrigation system and irrigation administration for several crops; the system is based on fuzzy control methods in order to attain an improvement in the precision of nutrient injection. In hydroponic crops, each essential nutrient is provided to the crop by diluting fertilizers in a water solution; thus, the system takes care of dissolving the concentrated nutrients into the solution which is going to be used to irrigate the crop. The fertilizer injection control system is based on a closed-loop, where the feedback variables are pH and electric conductivity (EC); by means of control algorithms the nutrients solution is balanced along with its electric conductivity.

(Keywords: nutrition, fuzzy control, instrumentation, hydroponic)

A mis padres **Nurys Meléndez y Remberto Gómez.**
A mis hermanos **Zaida, Mara y Remberto.**
A mi esposa **Magdalena Berrio.**

Agradecimientos

Al Dr. Gilberto Herrera Ruiz por su confianza, apoyo y excelente enseñanza.

A los profesores de la Universidad Autónoma de Querétaro en especial al M.C. Roberto Gómez, M.C. Roque Alfredo Osornio, M.C. José Agustín Bravo, M.C. Rodrigo Castañeda, M.C. Pedro Daniel Alanis, M.C. Juan José García, M.C. Carlos Alberto Olvera, Dr. René Romero, M.C. Edgar Rivas.

A la Universidad Autónoma de Querétaro.

A mis amigos, Antonio, Maria, Sonia, Doris.

ÍNDICE GENERAL

1. Capítulo 1	1
1.1 Introducción	1
1.2 Estado del Arte.....	7
2. Capítulo 2	18
2.1 Fundamentos de Nutrición de las Plantas y Mecánica de Fluidos.....	18
2.1.1 Mecánica de Fluidos.....	18
2.1.2 Nutrición de las Plantas	26
3. Capítulo 3	37
3.1 Diseño y construcción del sistema de riego.....	37
3.1.1 Diseño y Construcción Hidráulica.....	37
3.1.2 Instrumentación.....	48
3.1.3 Automatización	54
4. Capítulo 4	78
4.1 Experimentos, análisis y conclusiones	78
4.1.1 Experimentos control difuso	78
4.1.2 Experimentos controlador ON-OFF de la válvula	80
4.2 Conclusiones.....	85
4.3 Trabajos Futuros.....	86
Bibliografía	87
A. Descripción de programas	90
A1. Programa en VHDL para el módulo activar válvula.....	90
A2. Programa en VHDL para el módulo cerosumadas.....	91
A3. Programa en VHDL para el módulo codificador	91
A4. Programa en VHDL para el módulo contador	92
A5. Programa en VHDL para el módulo contador pulso	93
A6. Programa en VHDL para el módulo detector de cero	95
A7. Programa en VHDL para el módulo máquina control.....	95
A8. Programa en VHDL para el módulo registro	98
A9. Programa en VHDL para el módulo retenedor cero.....	99
A10. Programa en VHDL para el módulo control flujo.....	100
B. Artículo sobre la investigación	104

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área bajo riego y porcentaje de escurrimiento.....	2
Figura 2. Ubicación de acuíferos sobre explotados.....	2
Figura 3. Porcentaje del consumo de agua por sector	3
Figura 4. Productividad del agua en le sector agrícola	3
Figura 5. Riego Automatizado	7
Figura 6. Administración y control de riego.	8
Figura 7. Arquitectura general del sistema de inteligente inteligente de ayuda a la decisión.....	12
Figura 8. Conservación de la energía en un sistema hidráulico.	20
Figura 9. Bomba centrífuga.....	22
Figura 10. Curva de funcionamiento para una bomba centrífuga.	23
Figura 11. Esquema del proceso de fertirrigación.....	35
Figura 12. Fuente de abastecimiento del Sistema de riego propuesto, Campo Amazcala Universidad Autónoma de Querétaro	36
Figura 13. Cabezal de riego	37
Figura 14. Sistema de bombeo	37
Figura 15. Filtros	39
Figura 16. Tanques para fertilizantes.....	39
Figura 17. Sistema de inyección.....	41
Figura 18. Sistema de distribución	41
Figura 19. Goteros	42
Figura 20. Medidor de flujo	43
Figura 21. Válvulas.....	44
Figura 22. Sensores en línea.....	45
Figura 23. Sensores de flujo.....	46
Figura 24. Instrumentación sensor de flujo.....	46
Figura 25. Diagrama de estado sensor de flujo	47
Figura 26. Sensor de pH y CE.....	48
Figura 27. Panel de control	48
Figura 28. Esquema de control de los actuadores	49
Figura 29. Propuesta de control del sistema de riego	45
Figura 30. Estructura de un control difuso.....	52
Figura 31. Comportamiento de la planta solución al 1%.....	57
Figura 32. Comportamiento de la planta solución al 3%.....	58
Figura 33. Comportamiento solución 5%	59
Figura 34. Comparación del comportamiento de la planta	59
Figura 35. Diseño del control difuso	60
Figura 36. Conjuntos difuso	61
Figura 37. Conjuntos difuso salida	61
Figura 38. Reglas del control difuso.....	62
Figura 39. Propuesta control ON-OFF	63
Figura 40. Máquina de estado sincronizador de pulso	67
Figura 41. Máquina de estado retenedor de cero.....	67
Figura 42. Máquina de estado activar válvulas	70
Figura 43. Máquina de estado control de flujo.....	72

Figura 44. Resultados de la simulación 1	73
Figura 45. Resultados de la simulación 2	74
Figura 46. Resultado de la simulación registro	75
Figura 47. Resultado de la simulación decrementador	75
Figura 48. Resultado de la simulación decodificador.....	76
Figura 49. Resultado de la simulación sincronizador de pulsos	76
Figura 50. Resultado de la simulación detector de cero	77
Figura 51. Resultado de la simulación retenedor de cero	77
Figura 52. Resultado de la simulación cero sumadas.....	77
Figura 53. Resultado de la simulación activar válvulas.....	78
Figura 54. Resultado de la simulación máquina de control	78
Figura 55. Resultado de la simulación general	79

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Rapidez de flujo de volúmenes típicos.....17
Tabla 2: Datos concentración madre 1%.....56
Tabla 3: Datos concentración madre 3%.....57
Tabla 4: Datos concentración madre 5%.....58

1. Capitulo 1

1.1 Introducción

La globalización ha producido la búsqueda de estrategias que requieran el aumento en la producción de los sistemas tradicionales agrícola respetando el medio ambiente, es a si como los cultivos bajo invernadero son una alternativa viable que se ha extendido en todo el mundo , donde el objetivo es proporcionar y mantener un ambiente que conlleve a la producción óptima de un cultivo y que permita producir en condiciones climáticas desfavorables, obteniéndose mayor cantidad y calidad de producción por unidad de superficie.

Otro punto de suma importancia es reducir el consumo de agua y de fertilizantes que se utilizan en la producción bajo invernadero.

El sistema de fertirrigación es, hoy por hoy, el método mas racional para realizar una fertilización optimizada, respetando el medio ambiente dentro de la denominada agricultura sostenible; esta agricultura sostenible es de vital importancia ya que la sostenibilidad de los recursos hídricos en México requiere una mayor producción agrícola con menos consumo de agua y fertilizantes.

En México como podemos observar (Figura 1), el 84 por ciento del P.I.B, el 77 por ciento de la población, el 92 por ciento del área bajo riego y donde se da el 28 por ciento del escurrimiento se encuentra en la parte noreste, norte y centro del país.

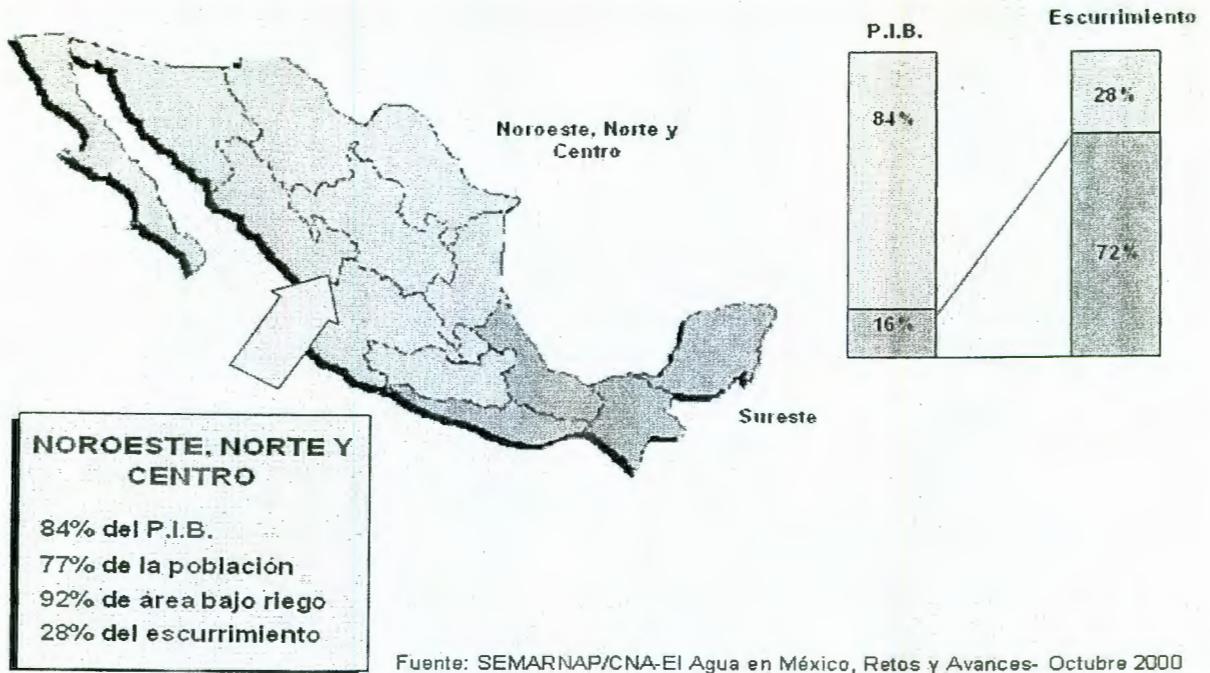


Figura 1 Área bajo riego y porcentaje de escurrimiento.

sin embargo esta área cuenta con el número mayor de acuíferos sobre explotados (Figura 2), y que afectan a polos estratégicos para el desarrollo del país.

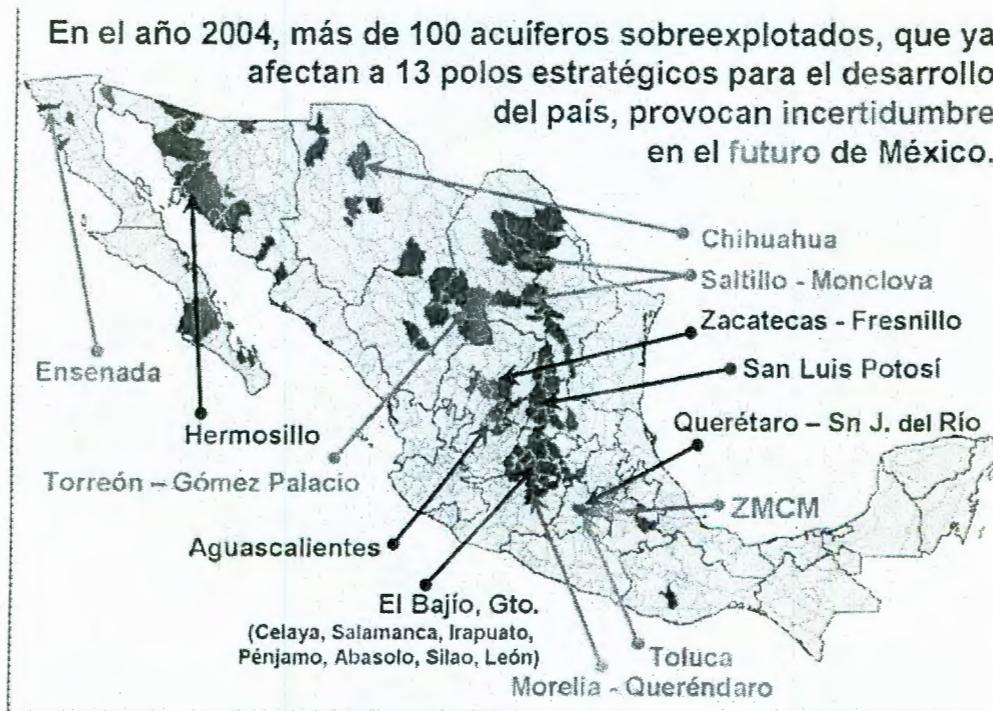


Figura 2 Ubicación de acuíferos sobre explotados

El mayor porcentaje del agua que se utiliza, se usa para la producción agrícola, donde el 70 por ciento del total de la extracción de los acuíferos es para este sector (Figura 3)

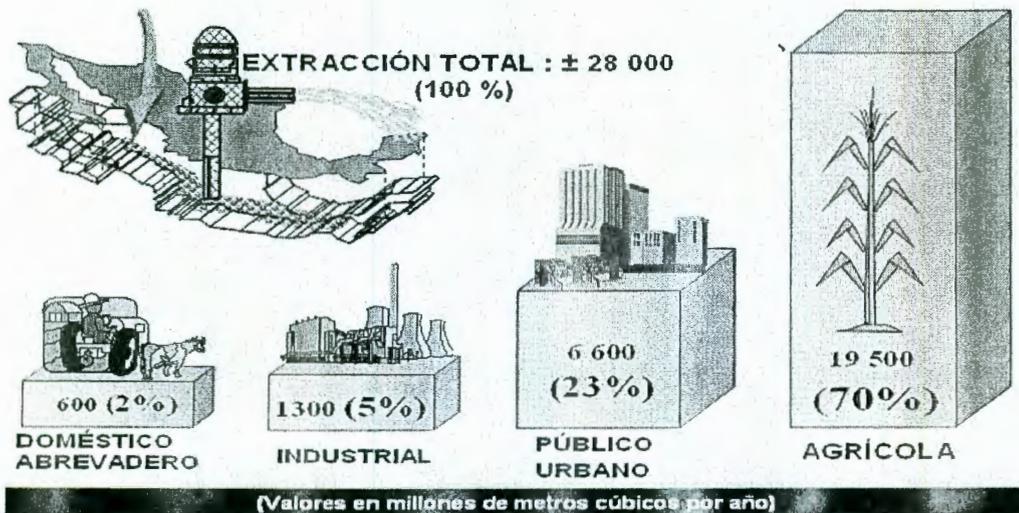
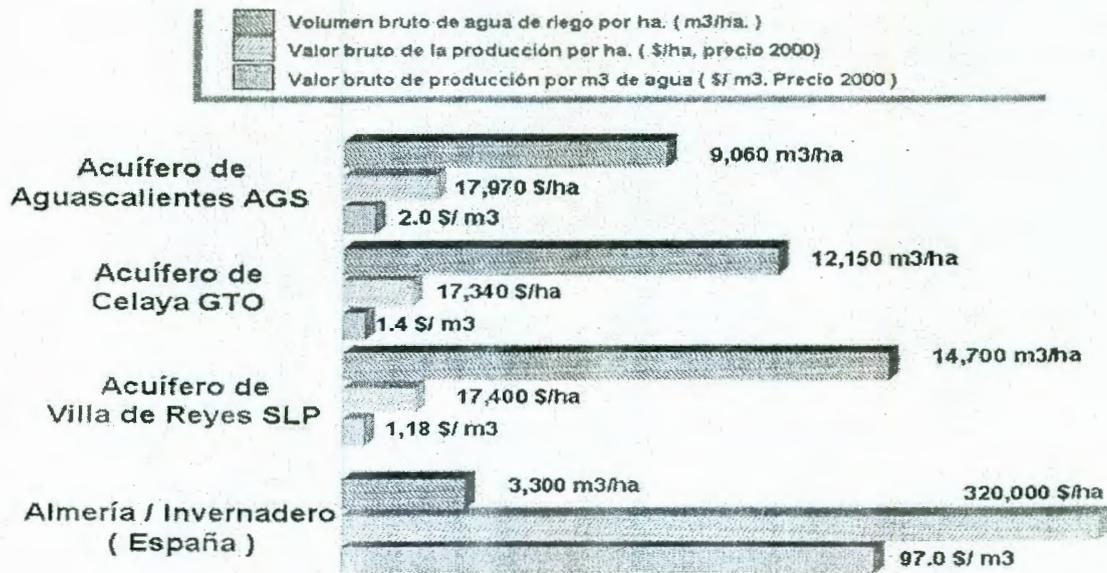


Figura 3 Porcentaje del consumo de agua por sector

Si se realiza una comparación (figura 4) del sector de riego tradicional mexicano y el sector de riego internacional, podemos observar la baja productividad por metro cúbico del agua usada en este sector; en este sentido, es necesario la aplicación de técnicas que nos permitan obtener alta productividad y calidad de los productos en el sector agrícola, lo cual es imperante en mercados globalizados y que efficienten el uso del agua y la preservación del medio ambiente.

El Sector Riego tradicional mexicano frente a la competencia Internacional



Fuente: CNA/OMM/Banco Mundial - PROMMA /MASAS & J.M. Naredo y J.Lopez-Galvez (España),

Figura 4 Productividad del agua en le sector agrícola.

El empleo racional de los fertilizantes ha sido importante para el aumento de las producciones agrícolas, aunque no de forma aislada, sino en conjunción con el desarrollo de otros medios de producción como la semilla, pesticidas y riego.

El riego localizado tiene muchas ventajas en comparación al sistema de riego tradicional con relación al ahorro de agua y al ahorro de nutrientes (Domínguez A, 1996); en las últimas décadas se ha detectado que la mayor competitividad de este sistema se basa en su utilización como una forma de dosificación racional de fertilizantes (Cadahia C, 2000).

Este sistema es hoy uno de los mejores métodos para realizar una fertilización adecuada, llevándonos a tener ventajas como: Dosificación racional de fertilizantes, ahorro considerable de agua, utilización de aguas de riego de baja calidad, nutrición optimizada del cultivo y por lo tanto aumento de rendimientos y calidad de frutos, Control de la contaminación, mayor eficacia y rentabilidad de los fertilizantes, alternativas en la utilización de diversos tipos de fertilizantes: simples y complejos cristalinos y disoluciones concentradas, fabricación de fertilizantes concentrados adaptados a un cultivo, sustrato, agua de riego y condiciones climáticas durante todos y cada uno de los días del ciclo del cultivo.

Se trata de calcular las aportaciones de nutrientes a las necesidades de las plantas y a los contenidos del suelo de forma que el balance este ajustado. Es sobre este concepto en donde se basa la evolución del consumo de fertilizantes, consumo que a nivel mundial ha venido creciendo (Cadahia C, 2000).

Con una fertirrigación adecuada la calidad y la cantidad de la cosechas pueden aumentar considerablemente (Domínguez A , 1996). La fertirrigación óptima es un proceso complejo; la cantidad de agua y de nutrientes debe ser suficiente para no detener el proceso de fotosíntesis y crecimiento. Sin embargo, si la cantidad de agua y de nutrientes es excesiva, el crecimiento vegetal puede llegar a ser excesivo produciendo un producto dañado entre otras consecuencias (Howard M, 1992.).

Actualmente en algunas regiones de México el incipiente uso de tecnología para el desarrollo de la agricultura, ha generado un consumo excesivo de agua, un uso ineficiente de nutrientes y la generación de tierras infértiles como se menciono anteriormente, implicando alto costo de operación para la producción de alimentos, así como una disminución constante de la disponibilidad de recursos naturales y la generación de problemas de cantidad y calidad del agua.

Por otra parte en mercados globalizados es imperante la producción con calidad y altos rendimientos, donde se hace necesario la utilización de técnicas que nos permitan un ahorro importante de agua, mano de obra, fertilizantes y productos fitosanitarios.

Es importante mencionar las dificultades del desarrollo de la agricultura en tierras no aptas, como terrenos accidentados, pobres en nutrientes y la existencia de aguas de mala calidad, esto hace de la producción agrícola un actividad poco rentable.

Por otra parte, la dosificación de fertilizantes distribuida durante todos los días del ciclo de cultivo permite hacer frente a los posibles problemas de contaminación que pueden originarse por exceso transitorio de fertilizantes en el suelo o sustrato.

El llevar a las plantas la cantidad precisa y suficiente de agua y nutrientes, requiere de un sistema de irrigación con los siguientes cuatro componentes: Sistema de aplicación de nutrientes y agua, mantener un registro, sensores y un método para la toma de decisiones. Si alguno de los cuatro componente falta, entonces la eficiencia del sistema se reduce y el rendimiento y la calidad de la producción disminuye (Waller 2004). Se requiere llevar registros para conocer cuanta agua y fertilizantes debe ser aplicado y el archivo de los datos para mejorar el manejo presente. Se requiere de un sistema para la toma de decisiones de manejo basado en la respuesta de la planta y la retroalimentación de los sensores. Se necesitan sensores y alarmas para garantizar que los sistemas de irrigación estén trabajando. El productor o responsable de producción es quien debe hacer las decisiones. Debido a la dificultad de leer sensores y mantener registro adecuados, muchos invernaderos modernos cuentan con un sistema computarizado para la lectura y control de los sensores y el registro de los mismos.

Los productores deben elegir un sistema de control automatizado que satisfaga los requerimientos de su manejo. La confiabilidad del sistema y el servicio a los clientes es extrémadamente importante dado que sistemas de operación pobres requieren mucha mano de obra y resultan en perdidas de cultivo.

Debido a esto se hace necesario el empleo de técnicas de control que implica el uso de herramientas de gran alcance, basadas en el desarrollo de hardware o de software.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de riego por goteo, y es básicamente la construcción e instrumentación de un equipo de mezcla y riego de fertilizantes por goteo, con un sistema de control para regular el PH y la conductividad eléctrica de la mezcla agua-nutrientes.

Con este desarrollo se pretende contribuir a aumentar la productividad del agua y a disminuir el impacto negativo en el medio ambiente del excesivo consumo de agua y fertilizantes para la producción agrícola, por que México requiere mayores inversiones para generar mas empleo, donde el agua no debe limitar la expansión económica, ya que un colapso a mediano o largo plazo frenaría la dinámica regional, por eso es un desafío revertir la situación y convertir una amenaza en una oportunidad, modernizando la agricultura de riego para obtener en el futuro una mayor producción agrícola con menos cantidad de agua.

1.2 Estado del Arte

Hace varios años la situación medio ambiental de nuestro planeta ha estado en consideración de muchos proyectos. El crecimiento continuo de la población humana es un hecho que parece conducir irremediablemente a un incremento paralelo en las demandas de alimentos. Para el año 2020 se estima un incremento de la población de 2,300 millones respecto a la existente en 1995. Esto supone un total de más de 8,000 millones de personas que alimentar. El crecimiento solo es sostenible si somos capaces de incrementar en un 56% la producción de alimentos básicos y fibras. La demanda ejercerá una mayor presión sobre los recursos hídricos y edáficos que solo puede considerarse sostenible si somos capaces de incrementar la eficiencia en el uso de los actuales sistemas productivos. En este sentido, la intensificación de la producción de las tierras actualmente utilizadas, es el único camino para liberar de la presión los recursos que permanecen aun sin utilizar (Alexandratos, 1995). Por las razones anteriores se han desarrollado técnicas que aumentan la producción agrícola, dentro de estas ha sido el desarrollo del sistema de riego, incluyendo mezclas, distribución, tiempos de riego etc.

El riego por goteo se empezó a probar en Alemania en los años 1899 y en los Estados Unidos en los años 1918, mediante tuberías porosas o perforadas. El sistema resulto muy caro, por el tipo de tuberías que empleaban, y presentaban problemas de obstrucción.

Experiencias de este tipo también se realizaron posteriormente en otros países, como Japón, Israel, Canadá, Holanda, etc , pero acabaron finalmente desechándose.

Puede afirmarse que el riego por goteo, como lo conocemos actualmente, empezó en Inglaterra, después de la segunda guerra mundial, en invernaderos; posteriormente se hicieron muchas investigaciones y aplicaciones de este sistema.

En la actualidad países como España, Francia, holanda, Israel ofrecen equipos industriales para la aplicación del riego por goteo con sistemas automatizados.

En los cultivos hidropónicos, todos lo elementos esenciales se suministran a las plantas disolviendo las sales fertilizantes en agua, de manera que sean ionizados y estén en disponibilidad para las plantas. Con este concepto inicialmente se utilizaban sistemas donde se preparaba la solución nutritiva en un deposito con una proporción de fertilizantes que estuviera en proporción de diversos factores tales como: La proporción relativa de iones que se deben de añadir a la solución, la solubilidad del fertilizante, su costo y su disponibilidad en el mercado entre otros. Poco a poco se fueron sofisticando los métodos de hacer la mezcla de fertilizantes con el agua y su distribución utilizando algunos dispositivos mecánicos, hidráulicos y electrónicos que condujeron a muchos equipos industriales para mezcla de fertilizantes y el surgimiento de muchas empresas dedicadas a este sector, como también al desarrollo de muchas investigaciones, que se plasmaron en patentes, la mayoría de los equipos de riego existentes en México son de tecnología extranjera; en la actualidad se encuentran en el mercado equipos de riego como el siguiente.

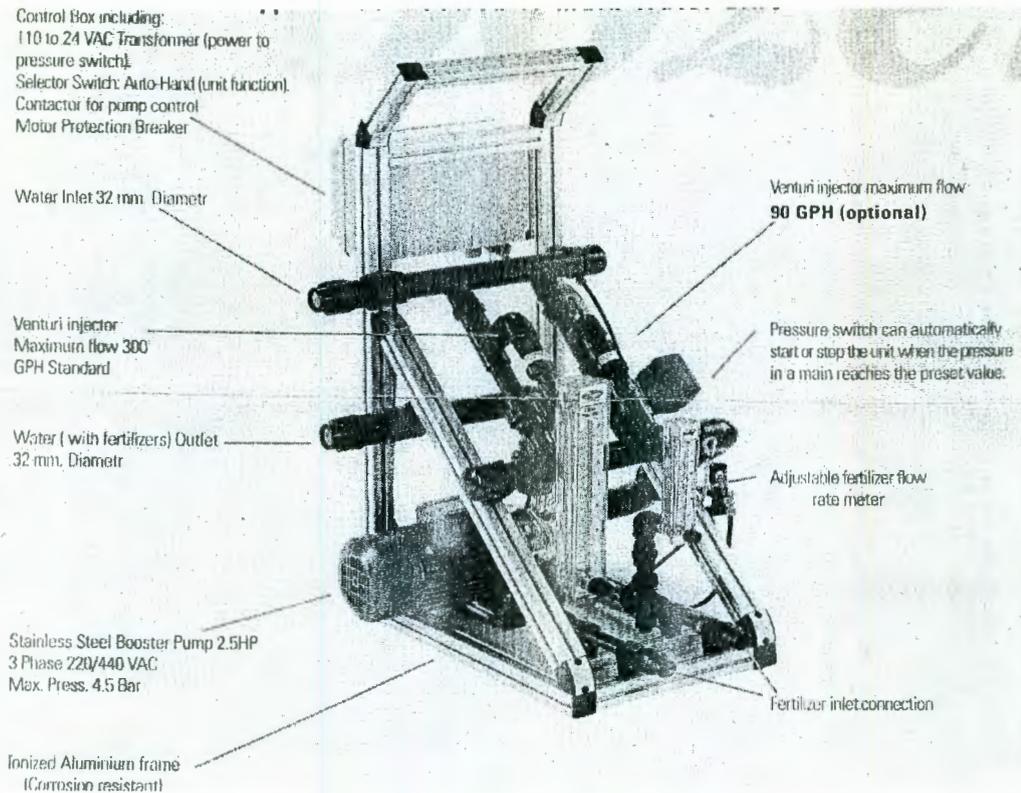


Figura 5 Riego Automatizado

Como observamos en la figura anterior el grado de automatización del equipo de riego es alto, lo que permite controlar la mezcla de fertilizante y agua, controlando el pH y la conductividad eléctrica.

Las concentraciones adecuadas para preparar una solución nutritiva se deben de conocer perfectamente, ya que las formulaciones deben ser ajustadas frecuentemente; no existe una solución nutritiva ideal, ya que esta depende de muchas variables ambientales que no pueden ser controladas en su totalidad.

En general se considera que para preparar adecuadamente una solución nutritiva, se depende, entre otras, de las siguientes variables: Especie y variedad de planta, estado y desarrollo de la planta, parte de la planta que interesa (fruto, flor, follaje, tallo, raíz)

Estación del año (principalmente por la duración del día), clima (principalmente temperatura, intensidad lumínica, y hora.). Por todas estas investigaciones, actualmente se han propuestos una variedad de equipos que incluyen desde la mezcla de fertilizantes hasta la administración y el control del riego como el siguiente.

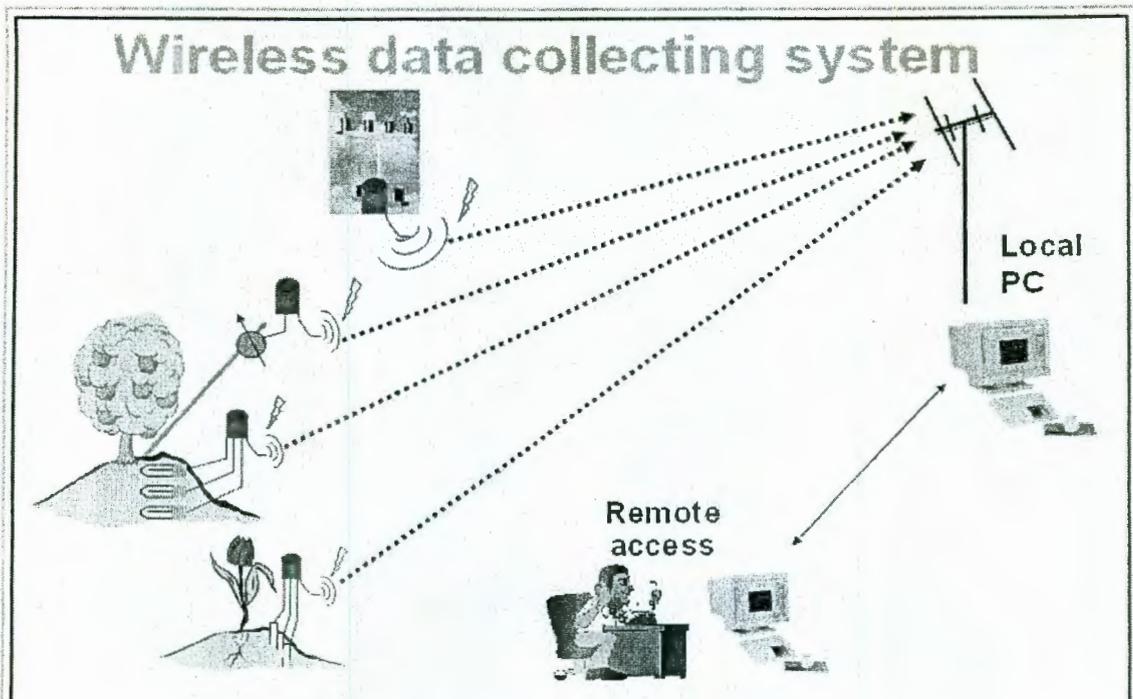


Figura 6 Administración y control de riego.

Este equipo consta de sensores de humedad del suelo, de sensores de flujo para medir la cantidad de agua-fertilizante, sensores de presión, electro válvulas tensiómetros, sistema de transmisión inalámbrico, software para la administración y el control, entre otros.

También se debe considerar que existen distintos requerimientos de las plantas, Por ejemplo las especies que se aprovechan por su follaje (lechuga, col, etc.) pueden requerir mayores cantidades de nitrógeno que las que son aprovechadas por sus frutos (tomate, pepino, etc.), mientras que estos últimos exigen mayor cantidad de fósforo, potasio, y calcio en la solución nutritiva por estas otras razones se han originado varias solicitud de patentes respecto a los sistemas de riego automatizados dentro de las cuales cabe mencionar:

1. Sistema de control y programación de riego en superficies ajardinadas, agrícolas y forestales mediante controladores teledirigidos.

En resumen esta patente se trata de un sistema de control y programación de riego en superficies ajardinadas, agrícolas y forestales mediante controladores teledirigidos.

Se propone un sistema de telecontrol de superficies ajardinadas, agrícolas y forestales, manejado por una aplicación de gestión integral residente en un ordenador servidor, caracterizado por el establecimiento automático de las frecuencias y dosis de riego optimas, y por un servicio de tele asistencia técnica de las zonas ajardinadas y agrícolas, que permite la transferencia de alarmas y mensajes desde los controladores distribuidos en campo y la comunicación desde el ordenador servidor de mensajes de información técnica relacionada con las labores propias de los cultivos. El sistema de gestión integral remoto también permitirá transferir a los controladores programas de acción demótica. La aplicación de este

sistema de gestión del riego se extiende a jardines públicos y privados, y a parcelas agrícolas y forestales.

En la actualidad el control de pequeñas superficies ajardinadas, agrícolas y forestales se realiza normalmente mediante controladores que son programados manualmente de forma local por los usuarios propietarios de dichas superficies. Las características generales de dichos controladores son: Programación local manual de la frecuencia y dosis de riego, programas de riego determinados por los usuarios, información local de alarmas y fallos de los controladores.

Las propiedades de estos controladores hacen que sean empleados solo para el control del riego, no incluyendo en ningún caso el servicio de tele asistencia relacionada con el asesoramiento técnico al usuario sobre las labores culturales a realizar para el correcto manejo de la superficie ajardinada o agrícola, ni servicios interactivos de comunicación de mensajes desde los usuarios, ni servicios adicionales de telecontrol domotico.

La situación cambia cuando se contemplan los sistemas de control del riego de grandes superficies ajardinadas, campos de golfo grandes extensiones de regadío agrícola o forestal. Para estos casos ya existen sistemas automáticos que, aunque con distintas configuraciones, se pueden caracterizar por los siguientes aspectos: Determinación automática de la frecuencia y dosis de riego, sistemas de control distribuido.

Cuando el sistema de control se constituye mediante una unidad central y controladores remotos, la transferencia de la programación de riegos generada por la unidad central a los controladores remotos puede realizarse mediante radio enlace, soporte físico de cable o a través de módulos auxiliares de memoria transportables.

La determinación de los programas de riego se puede realizar utilizando modelos de evapotranspiración potencial del cultivo (medida de parámetros ambientales) o por medida directa del estado hídrico del suelo. En estos casos el sistema se sigue empleando solo para el control del riego, no incluyendo tampoco en ningún caso el servicio de tele asistencia desde el servidor "central relacionada con el asesoramiento técnico al usuario sobre las labores culturales a realizar para el correcto manejo de la superficie ajardinada o agrícola, ni servicios interactivos de comunicación de mensajes desde los usuarios al servidor central, ni servicios adicionales de telecontrol demótico.

En conclusión la invención consiste en el desarrollo de un sistema de gestión integral remoto de controladores de riego para zonas ajardinadas, agrícolas y forestales, caracterizado básicamente por estos aspectos: Programación remota, automática y optimizada de la frecuencia y dosis de riego de cada jardín o parcela, en función de parámetros agrometeorológicos y de sus propiedades características concretas; gestión remota de alarmas y fallos del sistema de riego, servicio de teleasistencia desde el servidor central, para el manejo óptimo de las zonas ajardinadas, agrícolas y forestales, servicio interactivo de mensajes, desde los usuarios a la estación central de control integral, para la transmisión de notificaciones relativas al manejo del jardín y al control de labores culturales, posibilidad de introducir cuando se desee aplicaciones domóticas de control.

El sistema se compone de dos partes fundamentales:

1. Controladores remotos teleprogramados.

2. Ordenador servidor central encargado de la gestión completa del sistema. Respecto a los controladores remotos, se podrá utilizar cualquier controlador comercial.

Otras de la solicitud de patentes referente al tema de automatización de sistemas de riego es:

2. Unidad de control electrónico con programas preestablecidos modificables para el control de sistemas de riego automáticos con una pluralidad de líneas.

Esta patente se refiere a una unidad de control electrónico con programas preestablecidos modificables para el control de sistemas de riego automáticos que tienen una pluralidad de líneas.

Existe una demanda creciente de sistemas de riego capaces de activarse y desconectarse por si solos a intervalos programables fijados de antemano y durante determinados periodos de tiempo. Esto ha dado lugar a un correspondiente aumento en el diseño de unidades de control electrónico para el control de los mencionados sistemas. Entre las unidades de control de mas fácil manejo por el usuario, cabe mencionar la descrita en la solicitud de patente europea EP-A-0748584 del mismo solicitante, en la que se proporciona un selector rotativo que en el momento de su utilización puede situarse en una pluralidad de diferentes posiciones angulares, cada una de las cuales corresponde a la selección de un respectivo ciclo de riego.

Con este tipo de unidad de control, el usuario dispone de antemano de un cierto número de ciclos de riego, entre los cuales puede elegir el mas conveniente, colocando simplemente el selector rotativo en la posición angular correspondiente al ciclo que desea, indicado de forma oportuna por un índice numérico o una inscripción.

No obstante, esta unidad de control conocida solo es adecuada para el control de una línea de riego y mas particularmente, de una electro válvula u otro tipo de accionador.

Los ciclos preestablecidos son fijos y el usuario no tiene ninguna posibilidad de modificarlos. Por otra parte, existe un gran mercado en desarrollo de unidades de control capaces de controlar una pluralidad de líneas de riego y que proporcionan ciclos modificables según las necesidades de los usuarios individuales.

La presente invención proporciona una unidad de control electrónico que se adecuada para el control de una pluralidad de líneas de riego y que tiene un cierto numero de ciclos preestablecidos y que, sin embargo, permita modificar estos ciclos para ajustarlos a las necesidades concretas de los usuarios individuales. Dicho objetivo se consigue con una unidad de control electrónico que comprende un circuito electrónico con una unidad de procesamiento programable, y dicho circuito electrónico esta dispuesto de una forma que le permite controlar en secuencia una pluralidad de líneas de riego diferenciadas, caracterizada porque se proporciona un selector operable manualmente que puede colocarse en una diversidad de posiciones seleccionables, cada una de las cuales corresponde a un ciclo de riego específico, y porque se proporcionan medios para modificar la programación de dicha unidad de procesamiento y asociar un respectivo ciclo de riego, diferente de los otros que puede ser seleccionados también con el selector, a cada línea individual. De esta forma, el usuario puede sacar provecho de una unidad de control

que puede utilizarse para una pluralidad de líneas de riego y con la que puede seleccionar de una forma sumamente simple y rápida cualquier ciclo de riego comprendido en una pluralidad de ciclos preestablecidos. Además, es posible ignorar los ciclos preestablecidos a favor de los nuevos ciclos, posiblemente diferentes para las diferentes líneas, que son mas adecuados para las necesidades particulares del sistema que se esta controlando.

Algunos otros trabajos se han desarrollado en diversas universidades que tienen como objeto la asistencia a agricultores para mejorar en la operación de los sistemas de riego dentro de los cuales se destaca.

Herramientas informáticas de ayuda a la toma de decisiones y fertirriego

Este trabajo describe los sistemas de información agrarios integrados en Internet denominados SIFA (Servicio de Información Fitosanitario de Almería) y SIAM (Sistema de Información Agraria de Murcia). El objetivo principal de ambos sistemas es la ayuda a la toma de decisiones de técnicos y agricultores en diferentes aspectos de la agricultura del sudeste español. SIFA (<http://desaveal.ual.es>) se centra principalmente en el control fitosanitario. SIAM (<http://www.carm.es/cagr/cida/indexsiam.html>) se basa principalmente en el acceso a los datos agro climáticos para facilitar el proceso de toma de decisiones en la gestión del agua al nivel de parcela y usuario.

El proyecto de investigación "Un Sistema Inteligente para la Ayuda a la toma de Decisiones en Agricultura" Referencia: 1FD97-0255-C03-03 financiado por la CICYT y la CE y desarrollado durante el periodo 1999 - 2001, tuvo como finalidad la incorporación de las mas recientes innovaciones en el campo de las tecnologías de la información y comunicaciones al sector de la producción agrícola, para conseguir una modernización de la agricultura donde se produjo el manejo eficiente de los factores productivos, minimizando al mismo tiempo los impactos negativos. Este proyecto consta de tres subproyectos coordinados en las Universidades de Murcia, Granada y Almería, definiendo tres áreas de interés, que se corresponden, respectivamente, con los ámbitos de actuación de cada universidad y subproyecto:

- a) Optimización del uso conjunto de agua de riego y fertilizantes.
- b) Valoración de la aptitud de suelos para el cultivo mediante técnicas de evaluación de suelos.
- c) Planificación de terapia fitosanitaria en los cultivos producidos bajo la Norma Calidad Producción Integrada.

El objetivo central de este proyecto es el diseño, desarrollo e implementación de un conjunto de herramienta interactivas basadas en World Wide Web - WWW e integradas en tres sistemas de ayuda a la decisión (SAD). Estos SAD se encargaran de asesorar dentro de los ámbitos de actuación de cada subproyecto. La figura 7 muestra la visión general del sistema propuesto en el proyecto, donde disponemos de un conjunto de módulos encargados de funciones específicas en los siguientes niveles de descripción:

- 1) Un nivel de procesos y tareas, donde se sitúan los agentes que implementan las diferentes herramientas de los SAD.

2) Un nivel de interfaz, que permita el acceso de diferentes usuarios finales.

3) Un nivel de acceso a la información, que aborde los mecanismos de recuperación e interacción con las fuentes de información situadas en Bases de Datos y en Sistemas de Información Geográfica.

En los últimos años se han desarrollado diversos sistemas de información agro climáticas en España basados en el World Wide Web como soporte de acceso a la información, en el caso de la región de Murcia este servicio se inicio en 1996 con el SIAM. El cuanto al SIAM su objetivo es el de promover y facilitar la transferencia de información generada por la red agro climática regional para contribuir al uso racional y eficiente de los factores productivos, especialmente el agua, los fertilizantes y los productos fitosanitarios.

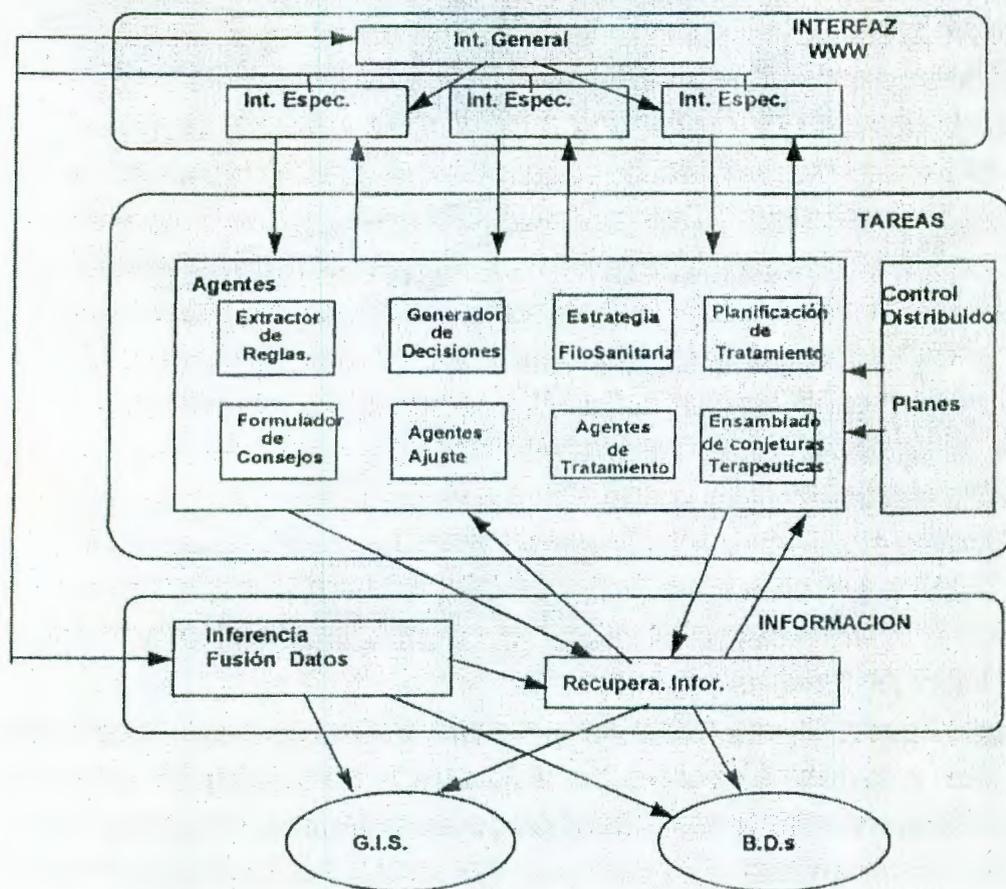


Figura 7. Arquitectura general del sistema de inteligente de ayuda a la decisión.

Las áreas de trabajo del SIAM se pueden resumir en: Climatología agrícola, Riegos, Fertilización, Materiales tecnología del riego, Producción Integrada y Sanidad Vegetal e Información General.

El servicio dispone de un total 48 estaciones agrometeorológicas repartidas por las principales zonas regables de la región de Murcia, las estaciones se componen de los siguientes sensores: Temperatura, Humedad relativa, Viento, Precipitación, Radiación y Evaporación de Cubeta Clase A. Para el cálculo de las necesidades de riego se ha desarrollado un módulo que permite a los usuarios del sistema disponer de asesoramiento adaptado a su explotación en función de una estación climática de referencia, tipo de cultivo, marco de plantación, tipo de emisor, conductividad eléctrica del agua, etc. La información facilitada por el sistema es: Necesidades totales de agua de riego para el cultivo, dosis, intervalo y tiempo de riego, se determinan sobre la base de la ETo calculada por el método de Penman-Monteith, Doorenbos J., Pruitt W.O. (1990).

Los cultivos contemplados actualmente son: Frutales de hueso (Melocotonero, Albaricoquero, Ciruelo, Cerezo), cítricos (Limón, Naranja, Pomelo), frutales de pepita, hortícola (Tomate, Pimiento, Melón, Lechuga, Brócoli, Alcachofa).

Para el cálculo de las necesidades totales de riego se han tenido en cuenta, además de las necesidades consuntivas, las cantidades adicionales de agua precisas para compensar las pérdidas producidas por las condiciones en que se desarrolla el cultivo como son: precolación, uniformidad de reparto del agua en la parcela de riego y requisitos de lavado de sales en condiciones de utilización de aguas salinas, Hoare et al, (1974).

El acceso al sistema se realiza una vez introducidos el nombre de usuario y la contraseña, para lo cual se puede emplear DEMO y SIAM, respectivamente. Como alternativa a lo anterior se puede emplear una clave personalizada, es decir, introducir un nombre y contraseña propios que pueden ser solicitados al sistema mediante la opción correspondiente del menú de mantenimiento de usuarios. Esta clave personalizada permite que cada usuario disponga de acceso privado a los parámetros que den de alta en la base de datos de parcelas, y su objetivo es facilitar el cálculo de informes de riego o fertilización. Los parámetros que se pueden automatizar son: estación climática de referencia, localización de la parcela, cultivo y variedad, marco de plantación, datos de la instalación de riego, análisis de agua y suelo asociados, y el método de cálculo de Eto a emplear. Para aumentar la difusión del servicio se cuenta con la colaboración de los técnicos de las 10 Oficinas Comarciales Agrarias (OCA) de la Región, que se encargan del envío por correo postal de los planes de fertirrigación a los pequeños agricultores que no disponen de ordenador. Otra fuente de difusión de los datos climáticos es los programas regionales de Radio FM, que frecuentemente difunden en los informativos de primera hora de la mañana (la información climática en Internet del SIAM se actualiza diariamente a las 7:30 de la mañana) sobre todo cuando hay lluvias generalizadas, localmente intensas o heladas en las diferentes zonas de cultivo.

Con estos trabajos se aprecia la diversidad de tecnologías que se utilizan para optimizar los sistemas de riego y desde luego la producción; otros trabajos con respecto al sistema de riego pero tomando en cuenta la recirculación del drenaje se han estado desarrollando y cabe mencionar.

Recirculación de lixiviados: Experiencia en Almería

En este trabajo se introducen los conceptos de reutilización y recirculación de los lixiviados procedentes de los sistemas de cultivo, como alternativa para incrementar la eficiencia de uso hídrico y nutritivo. Se analizan las necesidades adicionales de los sistemas cerrados respecto de los abiertos, con especial referencia a las necesidades estructurales de los sistemas, las necesidades de desinfección y las de ajuste de las soluciones lixiviadas.

La parte central de este trabajo se centrará en la presentación de los planteamientos experimentales abordados desde 1995 sobre recirculación de soluciones nutritivas. Los razonamientos por los cuales se ha decidido manejar los drenajes de una u otra forma se asientan sobre los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos planteados, con carácter cronológico.

Finalmente se expone la problemática detectada, referente a la composición química de los drenajes y las soluciones propuestas en cada caso. Los resultados obtenidos, abren nuevas líneas de investigación que pueden contribuir a mejorar el conocimiento sobre los procesos nutricionales y facilitar la aplicación práctica y directa de la recirculación, una técnica que tiene un indudable interés económico y ambiental.

La utilización mas intensa de las técnicas de protección ambiental, de irrigación tecnificada, del ferti-riego, junto a la utilización de los sistemas de cultivo sobre sustratos diferentes del suelo y finalmente la reutilización de los desechos de estos sistemas, parecen marcar una línea conducente a conseguir estos objetivos, dentro de un contexto de mayor eficiencia en el uso de los fertilizantes para los próximos 30 años (Daberkow et al. 2000).

Existen claras diferencias entre los diferentes sistemas de cultivo sin suelo; conceptualmente, cualquier sistema de cultivo hidropónico es cerrado. No es aceptable, ni desde el punto de vista económico ni desde el ambiental un sistema hidropónico abierto, por lo que su eficiencia hídrica deberá ser mayor.

Por el contrario los sistemas basados en sustrato (que imitan el cultivo sobre suelo) son conceptualmente abiertos lo que les confiere una menor eficiencia hídrica y nutritiva original ya que es necesario asumir una fracción de lavado para evitar la acumulación, al menos, de las sales no nutritivas presentes en el agua de riego. Esta menor eficiencia inicial de los sistemas de cultivo sobre sustratos puede ser parcial o totalmente compensada con la introducción en el sistema de técnicas que permitan la reutilización o recirculación de las soluciones que drenan del mismo como consecuencia de la necesidad de utilizar una fracción de lavado. Por otro lado, la aproximación mas racional a la resolución de este problema, consiste en reducir la fracción de lavado, a la mínima necesaria para eliminar los excesos de sales no nutritivas, y ajustar los aportes de elementos nutritivos a las necesidades reales y puntuales del cultivo, para evitar la acumulación de los elementos nutritivos. En otras palabras, adecuando las soluciones de aporte a las necesidades de la planta, que es por definición, el objetivo de la fertirrigación. La reutilización de lixiviados presenta dos variantes respecto a los sistemas abiertos. La reutilización de los drenajes en otro cultivo adyacente, o la reutilización en el mismo cultivo. De la primera variante se puede observar ejemplos claros en la reutilización de los drenajes procedentes de cultivos de tomate en campos de arroz en Corea, o la reutilización de drenajes procedentes de

cultivos de rosa en invernaderos de tomate. Esta solución no requiere ninguna modificación del sistema original. Por el contrario, la recirculación en sistemas cerrados, precisa de nuevas infraestructuras y equipos: sistema de recogida de lixiviados, depósito de almacenaje, dispositivo de desinfección y sistema de mezcla de los drenajes con el agua clara. Los elementos comunes a los sistemas abiertos se ven además aumentados en este tipo de instalaciones (filtros, bombas, válvulas, etc.).

El agua de lixiviación no es un agua limpia; lejos de ello, contiene altas concentraciones de sales, debido a la adición de fertilizantes previa al riego, así como a la propia composición del agua. Transporta además materia orgánica (algas, restos vegetales y microorganismos), arenas, restos de sustrato y otros elementos. La mayor parte de los organismos patógenos de las raíces, como enfermedades, virus y nematodos, también pueden aparecer en este exceso de solución nutritiva aplicada en el riego. Este hecho, supone un riesgo de transmisión de estos patógenos a través del agua, en estos sistemas cerrados. En consecuencia, la desinfección de los lixiviados producidos por el cultivo es un paso previo y necesario para su reutilización posterior en el riego.

De entre los diferentes métodos de diseño de soluciones nutritivas "ideales", el más adecuado para su utilización en soluciones recirculantes es el basado sobre los equilibrios del flujo de masas del sistema. La dotación de fertiriego aplicada al cultivo puede dividirse, por una parte en agua de uso no consuntivo que incluye el agua utilizada por el sistema para ETC y drenajes, y por otra en agua realmente utilizada por la planta y que forma parte de la biomasa generada. Esta biomasa seca está constituida por elementos químicos asimilados desde la solución por el cultivo. La composición elemental de esta materia seca, junto con la cantidad total de agua utilizada por el sistema (excluyendo los drenajes en los sistemas cerrados) constituye la base para diseñar una solución de fertiriego, que satisfaga las necesidades del cultivo durante el período estudiado. La composición de la solución de fertiriego recirculante debe determinarse a partir de la concentración deseada de cada elemento en la planta. Existen numerosos libros y manuales que recogen valores de referencia foliar para un gran número de cultivos, resulta recomendable recopilar la información de más de uno y comparar las recomendaciones de intervalo óptimo para cada elemento.

En Chihuahua (México) se presentó el trabajo **Sistema automatizado de control de riegos y de ambiente en invernaderos.**

Donde se diseñó el sistema automatizado de control el cual tiene capacidades muy amplias que permiten monitorear y controlar el ambiente del invernadero, siendo retroalimentado con la información de sensores de los distintos parámetros de interés, tanto físicos como químicos.

El sistema trabaja con una computadora del tipo "embedded" diseñada para aplicaciones industriales, la cual mediante un sistema de red del tipo RS232 recibe información de sensores los cuales pueden estar en un rango de hasta 1 km con capacidad de ampliarse mediante módulos repetidores.

El software que maneja las aplicaciones es versátil, permitiendo configurar los parámetros de actuación acordes al cultivo y etapa que se está trabajando.

En la universidad autónoma de Querétaro se desarrollo el trabajo de tesis **Control Difuso para el Sistema de Riego de un Invernadero** el sistema emplea un control difuso que emplea la ecuación de FAO-Penman-Monteith y datos de temperatura y humedad adquiridos en tiempo real para conocer las necesidades de agua por parte del cultivo durante el día, además incorpora los conocimientos y experiencia de expertos en el manejo de invernaderos hidropónicos.

Ochoa, meza (2000), publican, **Sistema automatizado de control de riegos y de ambiente en invernaderos**, en el cual se resume el trabajo de un diseño de un sistema automatizado para control del ambiente y del riego de un invernadero.

M. Qadir , J.D. Oster (2003), publican, **Crop and irrigation management strategies for saline sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture**. Esta publicación trata de estrategias tecnológicas para mejorar las cosechas, es decir mejorar la producción bajo una cultura de irrigación óptima minimizando los impactos medioambientales adversos.

N. Sigrimis , K.G. Arvanitis , G.D. Pasgianos, K. Ferentinos (2000), publican, **Hydroponics water management using adaptive scheduling with an on-line optimiser**. Esta publicación trata de una metodología de optimización para el control de la irrigación y el suministro de nutriente, usando el clima del invernadero.

2. Capitulo 2

2.1 Fundamentos de Nutrición de las Plantas y Mecánica de Fluidos.

2.1.1 Mecánica de Fluidos

El término mecánica de fluidos se refiere al estudio del comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento; los fluidos pueden ser líquidos (como agua, aceite, gasolina o glicerina) o gases (como aire, oxígeno, nitrógeno o helio).

El comportamiento de los fluidos afecta nuestra vida cotidiana de muchas maneras, cuando se abre un grifo, el agua llega a través de un sistema de distribución compuesto de bombas, válvulas y tubos; la fuente del agua puede ser un tanque de almacenamiento, una represa, un lago o un pozo.

El flujo del agua desde su fuente hasta el grifo está controlado por los principios de la mecánica de fluidos. Estos principios deben entenderse bien con el fin de elegir adecuadamente el tamaño y el tipo de bombas y tubos, para diseñar los tanques de almacenamiento, elegir las válvulas de control de flujo y verificar el desempeño del sistema, y en el caso de este trabajo el diseño de un sistema de riego por goteo.

Ecuación de Continuidad

El método para calcular la velocidad de flujo de un fluido en un sistema de conductos cerrado, depende del principio de continuidad. Que nos dice que la masa total que entra a un sistema es igual a la que sale si no existe almacenamiento, es decir.

$$M(\text{Entrada})=M(\text{Salida})$$

Velocidad de Flujo Recomendada en Conductos y Tuberías

Los factores que afectan la elección de una velocidad de flujo satisfactoria en los sistemas de fluidos son numerosos. Algunos de los más importantes son el tipo de fluido, la longitud del sistema de flujo, el tipo de conducto o de tubo, la caída de presión que se puede tolerar, los dispositivos (como bombas, válvulas, etc.), que pueden conectar al conducto o a la tubería, la temperatura, la presión y el ruido. Sabemos que la velocidad de flujo aumenta a medida que disminuye el área de la trayectoria de flujo; por consiguiente, los tubos más

pequeños producirán altas velocidades, y, al contrario, los tubos mas grandes proporcionaran bajas velocidades.

Las perdidas de energía y las correspondientes perdidas de presión aumentan drásticamente a medida que aumenta la velocidad de flujo, es por esta razón que se hace deseable mantener las velocidades bajas; debido a que los tubos y los conductos grandes son mas costosos, es necesario establecer algunas limitaciones.

Una velocidad de flujo razonable para un sistema de distribución de fluido es aproximadamente 3.0 m/s (alrededor de 10 pies/s), esto se puede aplicar en agua, aceite y otros líquidos de uso común en conductos.

Un desempeño apropiado de una bomba requiere velocidades más bajas en su entrada, aproximadamente 1.0 m/s (alrededor de 3 pies/s).

Tabla 1: Rapidez de flujo de volúmenes típicos.

RAPIDEZ DE FLUJO		RAPIDEZ DE FLUJO
L/min		Gal/min
10-100	Sistemas hidráulicos de aceite industrial	3-30
100-600	Sistemas hidráulicos para equipo móvil	30-150
40-4 500	Bombas centrifugas en procesos químicos	10-1200
15-125	Bombas alterativas para el manejo de fluidos y lechadas pesadas	4 – 33
200-4 000	Bombas de control de flujo y de drenaje	50-1 000
40-15 000	Bombas centrifugas para manejo de desperdicios mineros	10-4 000
1 800-9 500	Bombas centrifugas para combate de fuego	500-2 500

Conservación de la Energía ecuación de Bernoulli

Para el análisis de un sistema hidráulico se toma en cuenta toda la energía, la energía no puede ser creada ni destruida, sino que puede ser transformada de un tipo a otro. Este es el enunciado de la ley de Conservación de la energía.

Cuando se analizan problemas de flujo en conductos, existen tres formas de energía que siempre hay que tomar en consideración. Si tomamos un elemento de fluido que puede estar dentro de un conducto de un sistema de flujo, este puede estar localizado a una cierta

elevación z , tener una cierta velocidad u y una presión p ; entonces el elemento de fluido tendrá las siguientes formas de energía.

Energía potencial: Debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es: $PE=wz$, en la que w es el peso del elemento.

Energía cinética: Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es: $KE = \frac{wu^2}{2g}$; Donde u es la velocidad del flujo y g la gravedad.

Energía de flujo: En ocasiones conocida como energía de presión o trabajo de flujo, esta representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión p ; la energía de flujo se abrevia FE (Flow Energy) y se calcula a partir de la ecuación: $FE = \frac{wp}{\gamma}$; donde P es la presión en la sección de análisis y γ es el peso específico.

La cantidad total de energía de estas tres formas que posee el elemento de fluido será la suma, representada con E :

$$E = FE + PE + KE$$
$$= \frac{wp}{\gamma} + wz + \frac{wu^2}{2g}$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía, newton-metro en el Sistema Internacional o en pies-libra (pie/lb) en el Sistema Británico.

Restricciones a la Ecuación de Bernoulli

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a una gran cantidad de problemas prácticos, existen algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta con el fin de aplicar la ecuación de manera correcta.

1. Es válida solamente para fluidos incompresibles, puesto que el peso específico del fluido se toma como el mismo en las dos secciones de interés.
2. No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que pudieran agregar o eliminar energía del sistema, ya que la ecuación establece que la energía total del fluido es constante.
3. No puede haber transferencias de calor hacia dentro o fuera del fluido.
4. No puede haber pérdidas de energía debido a la fricción.

En realidad, ningún sistema satisface todas estas restricciones. Sin embargo, existen muchos sistemas para los cuales solamente se tendrá un error despreciable cuando se les aplica la ecuación de Bernoulli; por otro lado, el uso de tal ecuación puede permitir una rápida estimación de un resultado, cuando eso es todo lo que se necesita, todas estas restricciones se eliminan al expandir la ecuación de Bernoulli a la **Ecuación General de Energía**.

Procedimiento Para la Aplicación de la Ecuación de Bernoulli

1. Determine qué elementos son conocidos y que se va a encontrar.

2. Decida cuales dos secciones del sistema se utilizaran cuando se escriba la ecuación de Bernoulli. Se escoge una sección de la cual se conocen muchos datos. La segunda es, por lo general, la sección en la cual se debe calcular algo.
3. Escriba la ecuación de Bernoulli para las dos secciones elegidas en el sistema; Es importante que la ecuación se escriba en la dirección del flujo, es decir, el flujo debe ir de la sección de la parte izquierda de la ecuación a la de la parte derecha.
4. Simplifique la ecuación, si es posible, mediante la cancelación de los términos cuyo valor es cero o de aquellos que son los mismos en ambos lados de la ecuación.
5. Resuelva la ecuación algebraicamente para el término deseado.
6. Sustituya las cantidades conocidas y calcule el resultado

Ecuación General de la Energía

Algunas restricciones que se establecieron para la ecuación de Bernoulli, se pueden eliminar al expandir la ecuación, lo que se conoce como ecuación general de la energía.

En la ecuación de Bernoulli se suponen cuatro restricciones; sin embargo en sistemas reales si existen perdidas y adiciones de energía entre las dos secciones de interés, para sistemas como este, ya no es valida la ecuación de Bernoulli.

Los elementos que controlan la dirección o la rapidez de flujo de un fluido en un sistema, típicamente establecen turbulencias locales en el fluido, ocasionando que la energía se disipe en forma de calor, estas perdidas de energía se presentan siempre que haya una restricción, un cambio de velocidad de flujo o un cambio en su dirección; en un sistema grande, las perdidas debidas a la presencia de válvulas y conectores es, por lo general, pequeña en comparación con las perdidas por fricción en los conductos. Por consiguiente, a tales perdidas se les conoce como perdidas menores.

Explicaremos las perdidas y las adiciones de energía en un sistema en términos de energía por unidad de peso o de fluido que fluye en el sistema, esto también se le conoce como "cabeza".

H_a = Energía añadida o agregada al fluido mediante un dispositivo mecánico como puede ser una bomba.

H_r = Energía removida o retirada del fluido mediante un dispositivo mecánico como podría ser un motor de fluido.

H_l = Perdidas de energía por parte del sistema, debidas a fricción en los conductos o perdidas menores debidas a la presencia de válvulas y conectores.

La magnitud de las perdidas de energía producidas por muchos tipos de válvulas y de conectores es directamente proporcional a la velocidad del fluido.

La ecuación general de la energía es una expansión de la ecuación de Bernoulli, que hace posible resolver problemas en los que se presentan pérdidas y adiciones de energía. En un análisis los términos E_1 y E_2 denotan la energía que posee el fluido por unidad de peso en dos secciones distintas a lo largo de la tubería. También existen las adiciones, remociones y pérdidas de energía, H_a , H_r , H_l para tal sistema (figura 8), la expresión del principio de conservación de energía es:

$$E_1 + H_a - H_r - H_l = E_2$$

Esta es la forma de la ecuación de la energía.

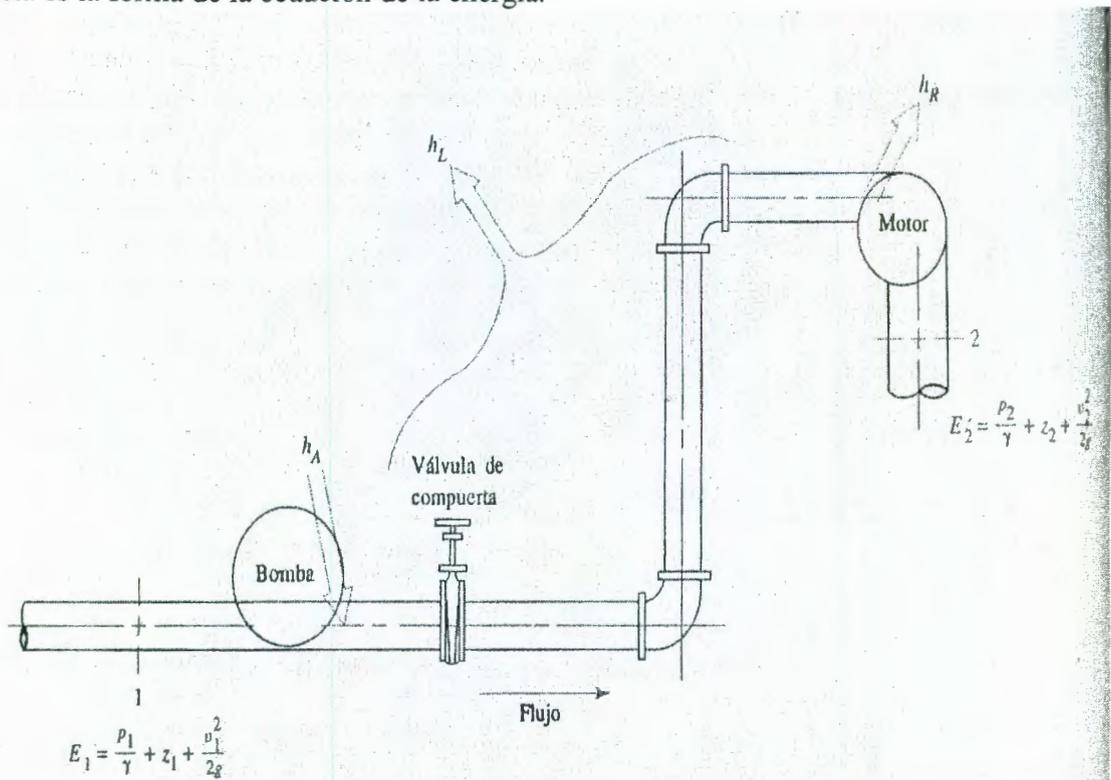


Figura 8 Conservación de la energía en un sistema hidráulico.

Es de suma importancia que la ecuación general de energía este escrita en la dirección de flujo, es decir, desde el punto de referencia, en la parte izquierda de la ecuación, al punto correspondiente, en el lado derecho; los signos algebraico juegan un papel crítico.

Por ejemplo, los puntos de referencias son 1 y 2, y en cada uno de estos se indican las cabezas de presión, de velocidad y de elevación; después de que el fluido abandona el punto 1, entra a la bomba, donde se le agrega energía, un movilizador principal, que podrá ser un motor eléctrico, hace funcionar la bomba y su movilizador transfiere la energía al fluido, entonces el fluido fluye por un sistema de conductos compuesto por una válvula, codos y tramos de conducto en los que la energía se disipa, es decir, el fluido pierde energía y antes de alcanzar el punto 2, el fluido fluye a través de un motor de fluido (Figura 8).

Parámetros Implicados en la Selección de una Bomba

Cuando se selecciona una bomba para una aplicación particular, se deben considerar los siguientes factores:

1. La naturaleza del líquido que se va a bombear.
2. La capacidad requerida (velocidad de flujo de volumen).
3. Las condiciones en el lado de la succión (entrada) de la bomba.
4. Las condiciones en el lado de la descarga (salida) de la bomba.
5. La cabeza total de la bomba
6. El tipo de sistema al que la bomba está entregando el fluido.
7. El tipo de fuente de alimentación (motor eléctrico, motor de diesel, etcétera).
8. Limitaciones de espacio, peso y posición.
9. Condiciones ambientales.
10. Costo de la bomba y de su instalación
11. Costo de la operación de la bomba
12. Códigos y estándares que rigen a las bombas.

La naturaleza del fluido está caracterizada por su temperatura en las condiciones de bombeo, gravedad específica, viscosidad, tendencia a generar corrosión o erosión en las diferentes partes de la bomba y presión de vapor a la temperatura de bombeo. El término presión de vapor se utiliza para definir la presión en la superficie libre de un fluido debido a la formación de un vapor.

La presión de vapor se eleva conforme la temperatura del líquido se eleva, y es esencial que la presión a la entrada de la bomba permanezca arriba de la presión de vapor del fluido. Después de la selección de la bomba, se deben especificar los siguientes puntos:

1. Tipo de bomba y fabricante.
2. Tamaño de la bomba.
3. Tamaño de la conexión de la succión y tipo (de borde, roscada, etc).
4. Tamaño y tipo de la conexión de la descarga.
5. Velocidad de operación.
6. Especificaciones de la alimentación (por ejemplo: para un motor, la potencia requerida, Velocidad, voltaje, fase, frecuencia, tamaño del armazón, tipo de estructura).
7. Tipo de acoplamiento, fabricante, número del modelo.
8. Características de montaje.
9. Materiales y accesorios especiales que se requieran si los hay.
10. Diseño del sellado de la flecha y materiales de sellado.

Los catálogos de las bombas y los representantes de los fabricantes proporcionarán la información necesaria para ayudar en la selección y especificación de las bombas y del equipamiento de los accesorios.

Clasificación de los Tipos de Bomba

Desplazamiento positivo:

Rotatorias:

- De engranes
- De paleta
- De tornillo
- De cavidad progresiva
- De lóbulo o alabe

Reciprocantes:

- De pistón
- De inmersión
- De diafragma

Cinéticas:

- De flujo radial (centrifuga)
- De flujo axial (de impulsor)
- De flujo mixto

Desplazamiento positivo:

Las bombas de desplazamiento positivo entregan una cantidad fija de fluido en cada revolución del rotor de la bomba, la entrega o capacidad de la bomba no se ve afectada por los cambios en la presión que esta debe desarrollar. La mayoría de las bombas de desplazamiento positivo puede manejar líquidos con alta viscosidad.

Bombas cinéticas:

Las bombas cinéticas adicionan energía al fluido acelerándolo a través de la acción de un impulsor giratorio. El fluido se alimenta hacia el centro del impulsor y después se lanza hacia afuera a través de las paletas; al dejar el impulsor, el fluido pasa a través de una voluta en forma de espiral en donde es frenado en forma gradual, provocando que parte de la energía cinética se convierta en presión de fluido; este tipo de bomba es el mas usado en los sistemas de riego (figura 9).

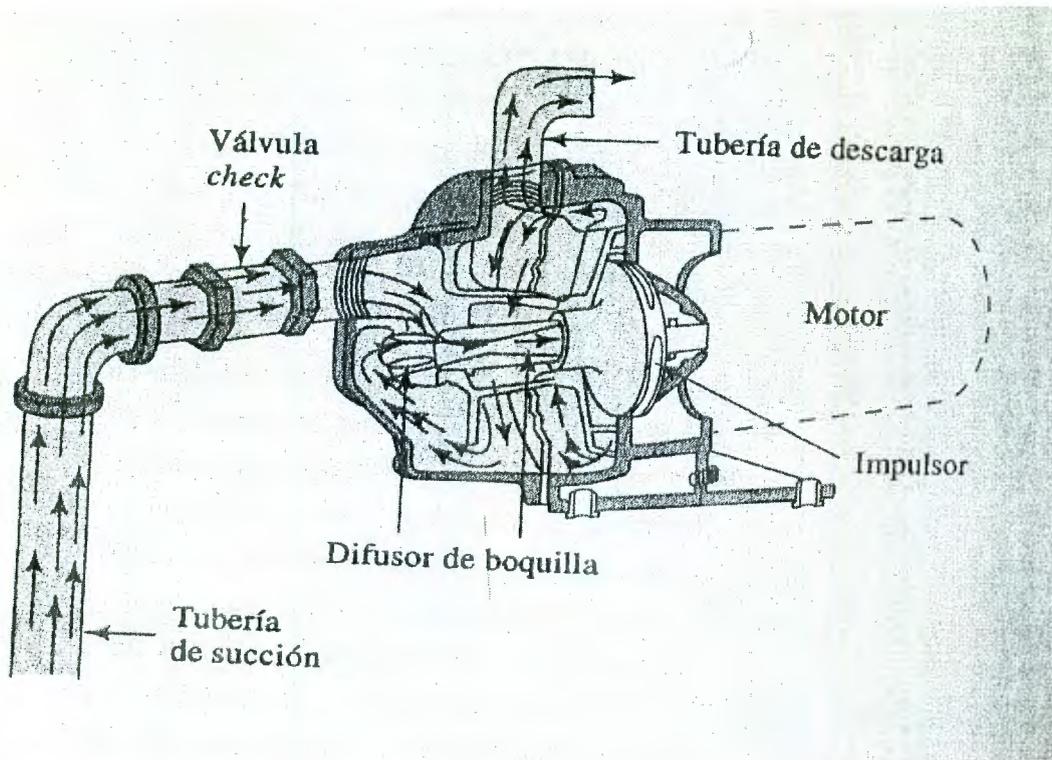


Figura 9. Bomba centrífuga

Datos de Funcionamiento de Bombas Centrifugas

Debido a que las bombas centrífugas no son del tipo de desplazamiento positivo, existe una gran dependencia entre la capacidad y la presión que debe desarrollar la bomba. Esto hace que su funcionamiento sea de alguna forma más complejo. La curva típica de funcionamiento muestra la cabeza total sobre la bomba versus la capacidad o descarga; existe un gran espacio libre entre el impulsor rotatorio y la cubierta de la bomba, este factor coopera en la disminución de la capacidad a medida que la cabeza total aumenta, en realidad, a un valor de corte en la cabeza, el flujo se detiene en forma total cuando toda la energía de entrada de la bomba se utiliza para mantener la cabeza, por supuesto, la cabeza típica de operación está muy abajo de la cabeza de corte; una curva típica de una bomba centrífuga se muestra en la figura 10.

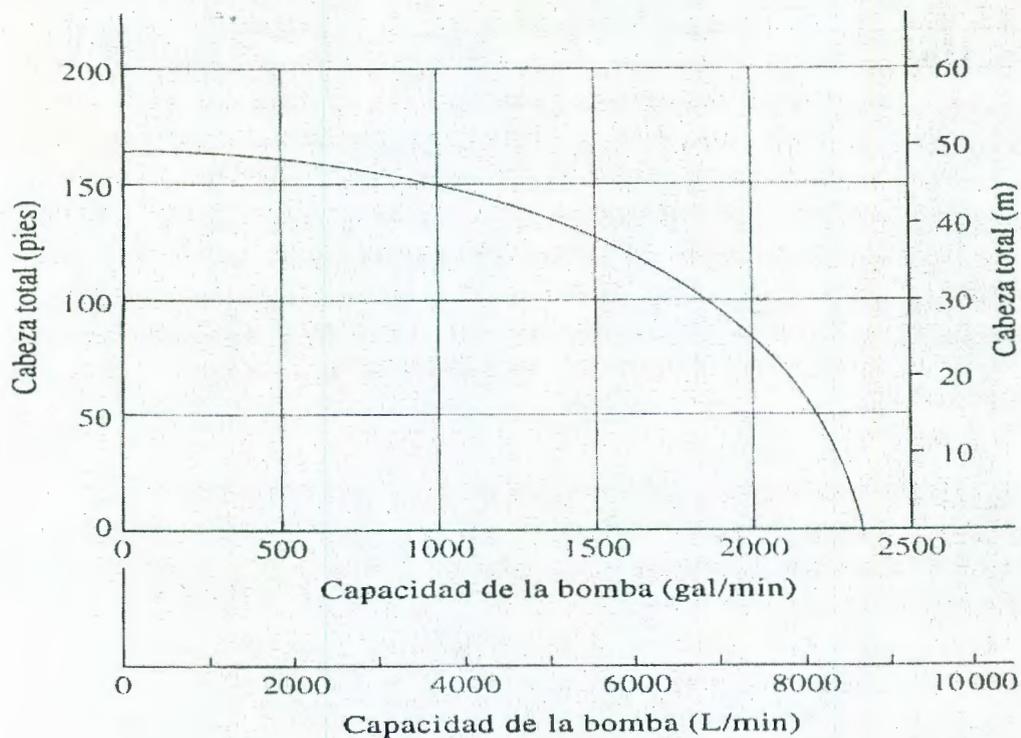


Figura 10. Curva de funcionamiento para una bomba centrífuga.

2.1.2 Nutrición de las Plantas

En los cultivos hidropónicos, todos los elementos esenciales se suministran a las plantas disolviendo las sales fertilizantes en agua, de manera que sean ionizados y estén en disponibilidad para las plantas. De tal manera que la selección de los fertilizantes está en función de diversos factores tales como: La proporción relativa de iones que se deben de añadir a la solución, la solubilidad del fertilizante, su costo y su disponibilidad en el mercado, las concentraciones adecuadas para preparar una solución nutritiva se deben de conocer perfectamente, ya que las formulaciones deben ser ajustadas frecuentemente; no existe una solución nutritiva ideal, ya que esta depende de muchas variables ambientales que no pueden ser controladas en su totalidad.

En general se considera que para preparar adecuadamente una solución nutritiva, se depende, entre otras, de las siguientes variables: Especie y variedad de planta, estado y desarrollo de la planta, parte de la planta que interesa (fruto, flor, follaje, tallo, raíz) Estación del año (principalmente por la duración del día), clima (principalmente temperatura, intensidad lumínica, y hora.). También se debe considerar que existen

distintos requerimientos de las plantas, Por ejemplo las especies que se aprovechan por su follaje (lechuga, col, etc.) pueden requerir mayores cantidades de nitrógeno que las que son aprovechadas por sus frutos (tomate, pepino, etc.), mientras que estos últimos exigen mayor cantidad de fósforo, potasio, y calcio en la solución nutritiva.

Se recomienda cuando menos incrementar en dos ocasiones durante el desarrollo del cultivo, las cantidades de nutrientes (principalmente macros).

Por ejemplo hasta plántula, la solución al 35 %, al 75% en desarrollo vegetativo y al 100% durante el desarrollo reproductivo; aunque esto depende de la especie y de su ciclo, entre otras circunstancias.

Es importante mantener balanceada la solución nutritiva ya que de lo contrario le puede ocasionar daños serios al cultivo ya sea por deficiencia o por toxicidad.

Constituyentes

La composición de la materia fresca de las plantas incluye cerca de un 80 a 95 por 100 de agua. El exacto porcentaje de esta dependerá de su especie, así como de la turgencia de la planta en el momento de la toma de la muestra, lo cual será el resultado de la hora del día, de la cantidad de humedad existente en el suelo, de la temperatura, de la velocidad del viento y de otros factores.

Aproximadamente el 90 por 100 del peso en seco de la mayoría de las plantas esta formado por tres elementos: carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H).

El agua proporciona hidrógeno y oxígeno, el cual también proviene del dióxido de carbono de la atmósfera, al igual que el carbono.

Si solamente el 15 por 100 del peso en fresco de una planta es la materia seca, y el 90 por 100 de esta esta representado por carbono, oxígeno e hidrógeno, entonces todos los otros elementos que existen en la planta serán aproximadamente un 1,5 por 100 del peso en fresco de ella ($0,15 \times 0,10 = 0,015$).

Elementos Minerales y Esenciales

De los 92 elementos naturales que se conocen, solamente 60 de ellos han sido encontrados en diversas plantas; no obstante, muchos de estos no se consideran esenciales para su crecimiento, y su existencia probablemente se debe a que las raíces de las plantas absorben en su entorno algunos elementos que existen en forma soluble. Las plantas, no obstante, tienen la habilidad de poder seleccionar la cantidad de los diversos iones que absorben.

Con el avance actual de los conocimientos sobre la nutrición vegetal, se sabe que de los 118 elementos, mas de 60 se han encontrado en las plantas, considerándose solo 16 esenciales para su desarrollo.

Un elemento deberá cumplir cada uno de los tres criterios que expondremos a continuación para ser considerado esencial en el crecimiento de las plantas (Arnon y Stout, 1939).

- a). La planta no completa su ciclo de vida en su ausencia.
- b). Tiene una acción específica que es insustituible.
- c). Están directamente implicados en el metabolismo de las plantas.

Los elementos están divididos entre macronutrientes (macroelementos), aquellos requeridos en relativamente gran cantidad por las plantas, y los micronutrientes, aquellos que son necesitados en menor cantidad.

Los macroelementos incluyen carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), azufre (S) y magnesio (Mg). Los microelementos incluyen hierro (Fe), cloro (Cl), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), Cobre (Cu) y molibdeno (Mo); (Resh, 1996.).

Composición mineral de las plantas(% en materia seca).

Elemento	Simbolo	Forma	Ppm :	%
Hidrogeno	H	H ₂ O	60,000	6.00
Carbono	C	CO ₂	450,000	44.00
Oxigeno	O	O ₂ , H ₂ O	450,000	44.00
Elemento	Simbolo	Forma	Ppm	%
Nitrogeno	N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	25,000	2.5
Potasio	K	K ⁺	20,000	2.0
Calcio	Ca	Ca ²⁺	5,000	0.5
Magnesio	Mg	Mg ²⁺	2,000	0.2
Fosforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻	2,000	0.2
Azufre	S	SO ₄ ²⁻	1,000	0.1
Cloro	Cl	Cl ⁻	100	0.01
Hierro	Fe	Fe ³⁺ , Fe ²⁺	100	0.01
Manganeso	Mn	Mn ²⁺	50	0.005
Boro	B	H ₂ BO ₃	40	0.004
Zinc	Zn	Zn ²⁺	30	0.003
Cobre	Cu	Cu ²⁺	6	0.0006
Molibdeno	Mo	MoO ₄ ²⁻	0.3	0.00003

Fuente: Sanchez, 2002

Formas en que las Plantas Absorben los Nutrientes

Los fertilizantes que se disuelven en agua, se disocian en iones positivos y negativos. Los nutrientes solo son absorbidos por las plantas en forma iónica, cualquier otra forma química en que estén los nutrientes no son asimilables por la planta.

Un ion es una partícula con carga eléctrica; esta partícula puede ser un átomo o un grupo de ellos. Los iones con *carga* eléctrica positiva se llaman cationes y los iones con carga negativa se denominan aniones.

Forma de absorción de los elementos.

Elemento	Forma de absorcion	Elemento	Forma de absorcion
Nitrógeno	NO_3^- , NH_4^+	Calcio	Ca^{2+}
Fósforo	$\text{H}_2\text{P}_04^{3-}$, HP_04^3	Magnesio	Mg^{2+}
Pótasio	K^-	Azufre	S_04^{2-}
Cóbre	Cu^+ , Cu^{2+}	Manganeso	Mn^{2+}
Zinc	Zn^{2+}	Boro	BO_3^{3-} , $\text{H}_3\text{BO}_3^{3-}$
Hierro	Fe^{3+} , Fe^{2+}	Molibdeno	Mo_04^2
Oxígeno	O_2 , H_2O	Cloro	Cl^1
Carbono	CO_2	Hidrogeno	H_2O

Funciones de los elementos

La función de cada elemento en las plantas es:

Nitrógeno: Forma parte de un gran número de compuestos orgánicos necesarios incluyendo aminoácidos, proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos y clorofila.

Fósforo: Forma parte también de muchos compuestos orgánicos importantes, donde se incluyen la glucosa, ATP, ácidos nucleicos, fosfolípidos y ciertas coenzimas.

Potasio: Actúa como coenzima o activador de coenzimas. La síntesis de proteínas requiere altos niveles de potasio. El potasio no forma parte estable en la estructura de ninguna de las moléculas que se encuentran dentro de las células vegetales.

Azufre: Esta incorporado dentro de diversos compuestos orgánicos que incluyen aminoácidos y proteínas. La coenzima A y las vitaminas Tiamina y Biotina contienen también azufre.

Magnesio: Es la parte esencial de la molécula de clorofila y es necesario para la actividad de muchas enzimas incluyendo aquellos pasos más importantes en la actuación del ATP. Es esencial para mantener la estructura del ribosoma.

Calcio: Se encuentra a menudo precipitado como cristales de oxalato calcico en las vacuolas. Se encuentra también en las paredes de la célula como pectato calcico, el cual une las paredes primarias de las células adyacentes. Mantiene la integridad de la membrana y forma parte de la enzima α -amilasa. Algunas veces interfiere la capacidad del Magnesio para activar las enzimas.

Hierro: Es necesario para la síntesis de la clorofila y es una parte esencial del citocromo, el cual actúa como portador de electrones en la fotosíntesis y la respiración. Forma también parte esencial de la ferredoxina y, posiblemente, de la nitrato reductasa, activando también algunas otras enzimas.

Cloro: Necesario para la fotosíntesis donde actúa como activador de enzimas para la producción de oxígeno a partir del agua. Se le suponen otras funciones adicionales ya que se ven claros los efectos de su deficiencia en las raíces.

Manganeso: Activa una o más enzimas en la síntesis de los ácidos grasos. Activa también la enzima responsable de la formación del DNA y RNA. Participa directamente en la producción fotosintética de oxígeno molecular O₂ a partir de H₂O y puede tomar parte en la formación de la clorofila.

Boro: Su papel en las plantas no es bien conocido. Puede ser preciso para el transporte de los carbohidratos en el floema.

Zinc: Es preciso para la formación de la hormona Ácido Indolacético activa las enzimas alcohol deshidrogenasa, ácido láctico deshidrogenasa, ácido glutámico deshidrogenasa y carbopeptidasa.

Cobre: Actúa como un portador de electrones y es parte de algunas enzimas. Forma parte de la plastocianina, la cual actúa en la fotosíntesis y también de oxidasa polifenol y, posiblemente, de la nitrato reductasa. Puede tomar parte de la fijación de N₂.

Molibdeno: Actúa como portador de electrones en la conversión del nitrato de amonio, también es esencial en la fijación de N₂.

Carbono: Constituyente de todos los compuestos orgánicos encontrados en las plantas.

Hidrógeno: Constituyente de todos los compuestos orgánicos en los cuales el carbono también se encuentra formando parte. Es muy importante su acción en el intercambio de cationes en la relación planta suelo.

Oxígeno: Forma parte de la mayoría de los compuestos orgánicos de las plantas. Solamente unos pocos de estos compuestos orgánicos, como, por ejemplo, el caroteno, no contiene oxígeno.

Síntomas de Deficiencia y Toxicidad en los Elementos Esenciales

A continuación se explican las principales deficiencias y toxicidades de los elementos en las plantas, según Resh, (1996).

1.- Nitrógeno

Síntomas de deficiencia. Se reduce el crecimiento y las plantas generalmente se vuelven amarillas (cloróticas) a causa de la pérdida de clorofila especialmente las hojas más viejas. Las hojas más jóvenes permanecen verdes más tiempo que el indicado para las más viejas. El tallo, los pecíolos y las superficies de las hojas del maíz y del tomate pueden volverse púrpuras.

Síntomas de toxicidad. Las plantas normalmente toman un color verde oscuro. Con follaje abundante pero a menudo con un sistema muy reducido de raíces, Las patatas forman solamente pequeños tubérculos y se les retarda la floración y producción de semillas.

2.- Fósforo

Síntomas de deficiencia. Las plantas suelen parar su desarrollo y a menudo toman un color verde oscuro. Existe una acumulación de pigmentos de Antociana, los síntomas de deficiencia aparecen en primer lugar en las hojas más maduras. A menudo se atrasa la madurez de las plantas.

Síntomas de toxicidad. Al principio no se notan los síntomas, algunas veces, las deficiencias de cobre o zinc ocurren ante un exceso de fósforo.

3.- Potasio

Síntomas de deficiencia. Los síntomas son primero visibles en las hojas más viejas. En las dicotiledóneas. Estas hojas se vuelven inicialmente cloróticas, pero pronto aparecen lesiones necróticas esparcidas por toda su superficie. En muchas monocotiledóneas, los vértices y márgenes de las hojas se secan rápidamente. La deficiencia en potasio desarrolla tallos débiles en el maíz y es fácilmente localizable.

Síntomas de toxicidad. Normalmente no existe demasiada absorción de este elemento por las plantas. Las naranjas desarrollan frutos de piel vasta ante niveles altos de potasio. El exceso de potasio puede dar lugar a una deficiencia en magnesio y posiblemente a deficiencia en manganeso, zinc o hierro.

4.- Azufre

Síntomas de deficiencia. No suele encontrarse a menudo. Generalmente aparece un amarilleo de las hojas que suele ser visible, en primer lugar, en las más jóvenes.

Síntomas de toxicidad. Existe una gran reducción en el crecimiento y tamaño de las hojas. Estos síntomas en las hojas a menudo son difíciles de observar. Algunas veces, las zonas entre los nervios amarillean y acaban por secarse.

5.- Magnesio

Síntomas de deficiencia. Aparece una clorosis en las hojas en la zona entre las nervaduras desarrollándose en primer lugar en las más viejas. La clorosis puede empezar en los márgenes de las hojas o en los vértices y progresar a su parte interior en la zona entre las nervaduras.

Síntomas de toxicidad. Existe muy poca información disponible sobre los síntomas visuales.

6.- Calcio

Síntomas de deficiencia. El desarrollo de los tallos suele quedar inhibido y los extremos de las raíces pueden morir. Las hojas jóvenes se ven afectadas antes que las más viejas volviéndose irregulares y pequeñas con márgenes del mismo tipo y moteado de zonas necroticas.

Síntomas de toxicidad. No existen Síntomas visibles. Normalmente suelen estar asociado con exceso de carbono.

7.- Hierro

Síntomas de deficiencia. Aparece una clorosis entre las nervaduras muy pronunciada parecida a la causada por la deficiencia de magnesio con la diferencia de estar situada en las hojas más jóvenes.

Síntomas de toxicidad. En las condiciones naturales no se evidencia a menudo. Después de pulverizaciones han aparecido algunas veces puntos necroticos.

8.- Cloro

Síntomas de deficiencia. Hojas marchitas que posteriormente se vuelven cloroticas y necroticas: Algunas veces aparece un color pronunciado. El desarrollo de la raíz es pobre y esta se engruesa cerca de sus extremos.

Síntomas de toxicidad. Quemado de los bordes y extremos de las hojas. Bronceado, amarilleo y algunas veces clorosis de las hojas que a su vez pueden dividirse. Se reduce el tamaño de las hojas y el desarrollo general es muy bajo.

9.- Manganeso

Síntomas de deficiencia. Los síntomas iniciales son a menudo una clorosis de la zona entre las nervaduras de las hojas tanto jóvenes como viejas según la especie. Con posterioridad pueden aparecer lesiones necroticas y caída de las propias hojas. Desorganización del cloroplasto.

Síntomas de toxicidad. Algunas veces aparece clorosis existiendo una distribución irregular de la clorofila y provocándose una deficiencia en Hierro(pina). Reducción en el crecimiento

10.- Boro

Síntomas de deficiencia. Los síntomas varían según la especie. A menudo suelen morir los tallos y la zona meristemática especial de las raíces. Los vértices de las raíces a menudo se vuelven descoloridos y se hinchan. Las hojas muestran síntomas variados, incluyendo engrosamiento, brillantes, rizado, marchites y moteado clorótico.

Síntomas de toxicidad. El amarilleo de los vértices de las hojas es seguido por una necrosis progresiva de estas desde la zona basal hasta los márgenes y vértices.

11.-Zinc

Síntomas de deficiencia. Reducción de la longitud de los entrenudos y del tamaño de las hojas. Los bordes de las hojas se distorsionan a menudo. Algunas veces aparece una clorosis entre las nervaduras.

Síntomas de toxicidad. El exceso de zinc produce comúnmente clorosis ferrica en las plantas.

12.- Cobre

Síntomas de deficiencia. Esta deficiencia es rara de forma natural. Las hojas más jóvenes se vuelven comúnmente verde oscuro y se enrollan. Frecuente mente aparece un moteado neurótico.

Síntomas de toxicidad. Desarrollo reducido seguido por síntomas de clorosis ferrica achaparramiento se reduce la formación de las ramas engrosamiento anormal de la zona de las raíces.

13.- Molibdeno

Síntomas de deficiencia. A menudo se desarrolla una clorosis entre las nervaduras primero en las hojas más viejas y después de forma progresiva en las más jóvenes (semejante a la deficiencia en nitrógeno) A veces las hojas se ahuecan y aparecen quemaduras en sus bordes.

Síntomas de toxicidad. Se observan raramente. Las hojas de tomate pueden volverse amarillo brillante. Las plantas de coliflor en su primer estado pueden aparecer con un color púrpura brillante.

Localización de los Síntomas de Deficiencia en las Plantas.

Los elementos móviles como su nombre lo indica, se mueven o translocan de las hojas u otros órganos donde se hayan acumulado, hacia las partes de nuevo crecimiento (hojas y ramas). Este movimiento de los nutrientes es más notorio, cuando la planta no absorbe suficientes iones del suelo. En la medida que la carencia de nutrientes se agudiza en el suelo o en una solución nutritiva, en esa medida también transloca a las porciones nuevas de la planta más nutrientes para tratar de asegurar su desarrollo. Como efecto de rebote, las hojas u otros órganos suministradores temporales de elementos nutritivos a las zonas activas del crecimiento, empiezan a mostrar síntomas de deficiencia nutritiva.

En tal caso, los síntomas de deficiencia de nutrientes se van a mostrar en las hojas maduras y viejas. Los elementos inmóviles son aquellos que una vez acumulados en las hojas u otros órganos ya no se translocan a los puntos de nuevo crecimiento, por lo tanto, los síntomas de deficiencia de estos elementos, se observaran en las hojas tiernas y en frutos que apenas están en su desarrollo inicial.

Movilidad de los elementos en el floema

Móvil	Intermedio	Inmóvil
Nitrógeno	Hierro	Calcio
Fósforo	Manganeso	Boro
Potasio	Cobre	
Sodio	Zinc	
Magnesio	Molibdeno	
Azufre		
Cloro		

Interacción Entre los Elementos Nutritivos

Las interacciones pueden ser **positivas o negativas**. Las interacciones positivas se conocen como "SINERGISMO" y las interacciones negativas se les denominan "ANTAGONISMO".

Ejemplos de sinergismo

N y P : estando los dos elementos presentes mejora la absorción de cada uno de ellos.

Ca y P: a mayor absorción del Ca hay mas absorción del P en leguminosas.

B y Ca: la presencia de boro capacita a la planta para absorber mejor el Calcio.

Ejemplos de antagonismo

Mg y K: un exceso de magnesio induce deficiencia de potasio, o viceversa.

Fosfatos - Zn, Fe: Un exceso de fosfato produce precipitación del Zn y Fe, esto puede conducir a una clorosis ferrica o una deficiencia de zinc.

Un exceso de N produce deficiencia de Zinc

Cloro y nitratos: Cuando aumenta la concentración de Cloro en la savia de la planta, baja la acumulación de nitratos.

Corrección de Deficiencias Nutrimientales

- 1.- Mantener el pH de la solución nutritiva en valores de 5.5 a 6.5 para que haya buena asimilabilidad de los nutrientes.
- 2.- Detección visual de los síntomas de deficiencia, con base a la descripción de ellas anteriormente.
- 2.- Análisis químico de la solución nutritiva, para determinar la cantidad exacta de elementos nutritivos presentes en ella.
- 3.- Análisis foliar, para determinar si la cantidad de nutrientes, esta en niveles máximos, óptimos o deficientes en las hojas de la planta.
- 4.- Análisis de la solución nutritiva y análisis foliar, para hacer una correlación entre los elementos que se añadieron a la solución y la cantidad que la planta realmente absorbió.
- 5.- Regulación de la temperatura en el invernadero: uso de calefacción en invierno, doble capa, etc.
- 6.- En periodos de frío, aumentar la temperatura de la solución nutritiva.

Fuentes de Nutrientes

1.- fertilizantes nitrogenados

	%N
Sulfato de amonio.....(NN ₄) ₂ S ₀₄	20.5
Nitrato de calcio.....Ca(N ₀₃) ₂	15.5
Nitrato de amonio.....NH ₄ N ₀₃	33.5
Nitrato de potasio.....KNO ₃	13.0
Urea.....(NH ₂) ₂ CO.....	46.0
Fosfato monoamonico.....NH ₄ H ₂ P ₀₄	11.0
Fosfatodiamonico.....(NH ₄) ₂ H ₂ P ₀₄	18.0

2.- fertilizantes fosfatados

	%P ₂₀₅
Superfosfato simple.....Ca ₂ (H ₂ P ₀₄) ₂ .H ₂ O.....	19.5
Superfosfato de calcio triple... ..CaH ₄ (PO ₄) ₂ H ₂ O.....	46.0
Fosfato monoamonico.....NH ₄ H ₂ P ₀₄	48.0

Fosfatodiamonico.....	...(NH ₄) ₂ HP04.....	46.0
Ácido fosfórico.....	...H ₃ P04(80-85%).....	54.0

3.- fertilizantes potasicos

		%K ₂ O
Cloruro de potasio.....	KCL.....	48-60
Sulfato de potasio.....	K ₂ S04.....	50
Nitrato de potasio.....	KNO ₃	25-30

4.-fertilizantes calcicos

%Calcio

Nitrato de Calcio.....	Ca(N03) ₂	24
Super fosfato simple.....	Ca(H ₂ P04) ₂	20
Super fosfatos concentrados.....	Ca(H ₂ P04) ₂	46

5.- fertilizantes con magnesio

%Magnesio

Sulfato de magnesio.....	MgS04.....	9
(Sal Epsom)		
Oxido de magnesio.....	MgO.....	54
Nitrato de magnesio.....	MgNO ₃	11%
N		
(MAGNISAL)		16% Mg

6.- fertilizantes con azufre

... % Azufre

Sulfato de amonio.....	(NH ₄) ₂ S04.....	24.0
Sulfato de potasio.....	K ₂ S04.....	18
Superfosfato simple.....	Ca(H ₂ P04) ₂	12
Superfosfato concentrado.....	CaH ₄ (P04) ₂	10
Fosfato monoamonico.....	NH ₄ H ₂ P04.....	26
sulfato de calcio.....	CaS04.....	20

7.- fertilizantes con micro nutrientes

% de Micronutriente

Sulfato de cobre.....	CuS04.....	25-35
Sulfato de zinc.....	ZnS04.....	25-35
Sulfato de Manganeso.....	MnS04.....	23
Ácido bórico.....	H ₃ BO ₃	34-44
Sulfato ferroso.....	FeS04.....	20
Molibdato de sodio.....	Na ₂ Mo04.....	37-39

3. Capítulo 3

3.1 Diseño y construcción del sistema de riego

3.1.1 Diseño y Construcción Hidráulica

El diseño del sistema de riego incluye una parte de diseño agronómico, otra parte de diseños hidráulico de las instalaciones y una de instrumentación y control. En el diseño agronómico esta en función de las necesidades de agua de los cultivos y las características de los suelos y la evapotranspiración que se presente, para determinar la dosis de riego a aplicar de acuerdo a los cultivos.

En el diseño hidráulico se calculan las presiones requeridas por emisor, se aseguran que el gasto de los goteros sea uniforme y se diseñan las tuberías y equipos de acuerdo con las necesidades del riego a aplicar.

El diseño de un sistema de fertiriego tiene por finalidad aprovechar de forma eficiente los recursos económicos e hidráulicos con que cuentan los productores, de tal forma que se asegure la satisfacción operacional del sistema para la producción óptima de las cosechas. Para ello es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos (García y Briones, 1997): elaborar un inventario de recursos con que cuenta la unidad agrícola, determinar los requerimientos de agua de los cultivos a establecer, diseñar el sistema de fertiriego de acuerdo a las condiciones del terreno.

Cultivos y sus requerimientos de agua

Determinar que cultivos se van a establecer y sus requerimientos de agua. En muchos casos es posible que se establezcan varios cultivos durante la vida útil del sistema de fertiriego, para ello los sistemas deberán diseñarse considerando los cultivos que requieran mayor cantidad de agua. En este punto se requiere conocer si los cultivos son en hileras o surcos y su separación, duración del ciclo y la densidad de plantación.

Diseños del sistema

- El diseño de un sistema de fertiriego considera los siguientes pasos:
- Cálculo de los factores preliminares del diseño.
- Selección de emisores (goteros o aspersores).
- Selección del número y trazo de las unidades.
- Diseño de las líneas distribuidoras y las líneas laterales.

- Diseño de las líneas de conducción principales y secundarias.
- Diseño o elección del sistema de fertilización.
- Diseño y selección del sistema de filtración.
- Necesidades de bombeo.

Componentes del Sistema de Riego Propuesto.

A continuación se presenta un esquema general de un sistema de riego, figura (11), en donde se aprecian sus componentes, tomado como base para el diseño propuesto.

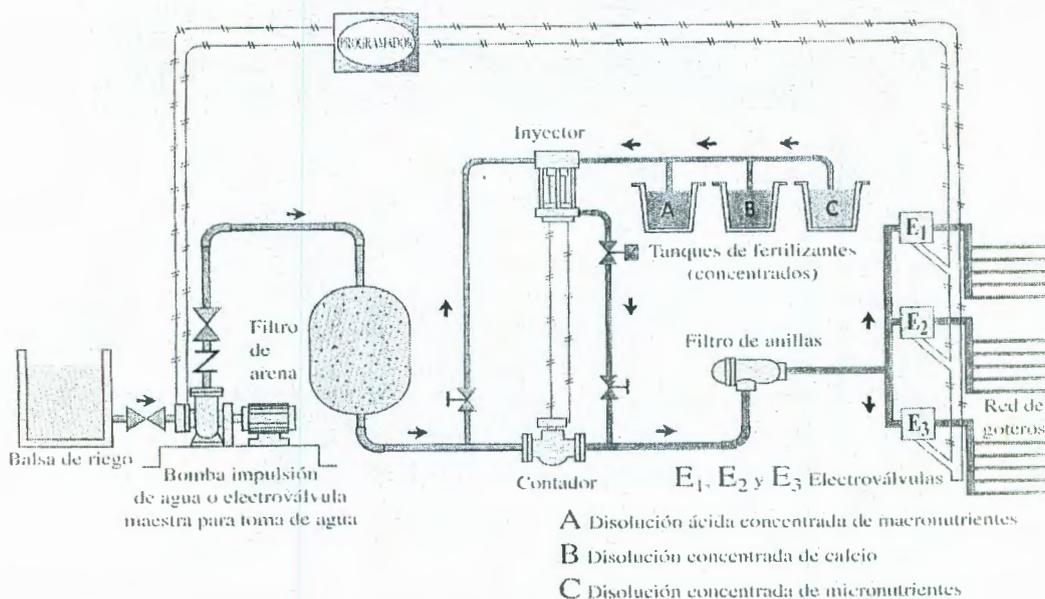


Figura 11. Esquema del proceso de fertirrigación (Cadahia, 2000)

En términos generales los componentes de un sistema de fertiriego completo son los siguientes (López y col. 1997; Medina, 2000; Lizárraga y Díaz, 2001):

- Fuente de abastecimiento de agua
- Equipo de bombeo
- Sistema de filtros
- Depósitos de fertilizantes
- Línea de distribución principal

Línea de distribución secundaria
Dispositivos de regulación y control de agua
Dispositivos de control y automatización

Fuente de Abastecimiento de Agua

Es la parte de donde se toma el agua para operar el sistema de riego. El agua puede ser de diferentes orígenes, agua de un arroyo, de un canal, de un pozo profundo, de un lago, de una represa, de bordo o de una cisterna de almacenamiento ver figura (12). Las características del agua, para preparar la solución fertilizante a inyectar en el sistema, son importantes: baja alcalinidad, pH neutro, baja conductividad eléctrica, bajo contenido mineral, y baja concentración de componentes orgánicos.



Figura 12 Fuente de abastecimiento del Sistema de riego propuesto, Campo Amazcala Universidad Autónoma de Querétaro

Cabezal

Se llama cabezal al conjunto de dispositivos que se emplean para filtrar, bombear el agua y preparar los fertilizantes que se van a inyectar al sistema de riego, figura (13).

Este es una de las partes más importante del sistema. En el cabezal propuesto se encuentran los siguientes elementos: equipo de bombeo, filtración, equipo de fertilización, medidores de gasto y de presión, válvulas de admisión y expulsión de aire, válvula check , válvulas de control de flujo, bomba de aire y válvula de seguridad o de alivio.

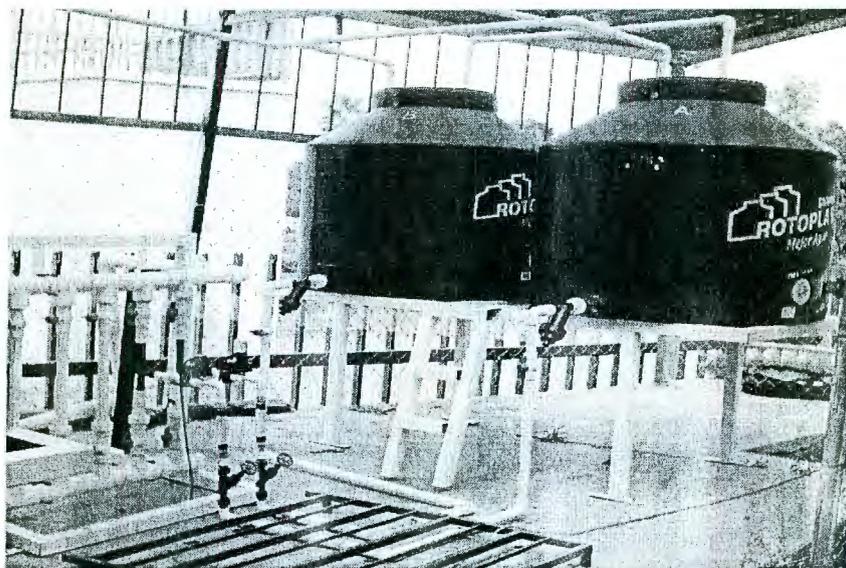


Figura 13 Cabezal de riego

Equipo de Bombeo

Tienen la función de Impulsar el flujo de agua y fertilizantes por el sistema de riego, figura (14). Existen diferentes tipos de bombas, pueden ser centrífugas o de turbina y la fuente de energía puede ser un motor de combustión interna, con gasolina o diesel, o un motor eléctrico. El tamaño de la unidad de bombeo depende del número y tamaño de las secciones de riego, de la densidad y tipo de cultivo, del clima de la zona, del volumen y tipo medio de cultivo, y de la frecuencia y duración del riego.

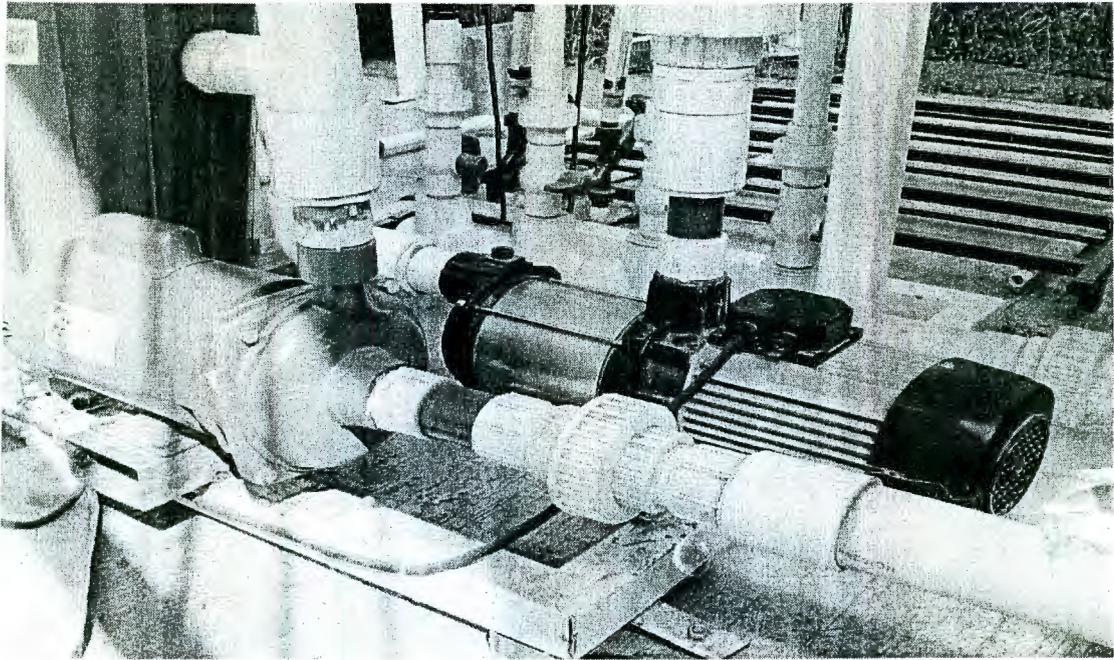


Figura 14 Sistema de bombeo

Sistema de Filtros

Los filtros tienen como función eliminar impurezas y sólidos que puedan dañar el sistema de riego. Existen diferentes tipos; filtros de arena y grava, filtros de mallas y filtros de anillas, figura (15).

Prefiltrado

Se emplea cuando la fuente de abastecimiento es un conducto a cielo abierto, un canal, o cualquier otra fuente de abastecimiento de agua que lleve basura, hojas secas o muchos sedimentos. Para evitar que esos sólidos dañen el sistema es necesario, ubicar el prefiltro antes del cabezal de control, cuyo objetivo es dar una primera limpieza de los sólidos en suspensión o arrastre que pueda traer el agua de riego.

Cuando la fuente de agua es un pozo profundo que aportan demasiada arena, la solución es la instalación de un desarenador. Posteriormente al sistema de prefiltro se coloca el sistema de filtración propiamente dicho como seguridad para retener las impurezas que puedan originar obstrucciones de los emisores.

Filtros de arena.

Consisten de unos tanques generalmente metálicos (de acero galvanizado, inoxidable o con protección de pintura antioxidante) o de plástico reforzado (poliéster bobinado con fibra de vidrio o poliéster laminado) capaces de resistir las presiones del agua, rellenos de arena o

grava tamizada de un determinado tamaño. El filtrado se realiza cuando el agua atraviesa la arena.

Dentro del centro de control o cabezal vendrán situados a la entrada del agua, y antes de los filtros de malla. Los filtros de arena se utilizan principalmente cuando la fuente de agua es superficial y trae en suspensión materia orgánica, son los indicados para retener algas, restos orgánicos y pequeños partículas minerales. Los filtros de grava son muy efectivos para retener sustancias orgánicas, pues pueden filtrar a través de todo el espesor de arena, acumulando grandes cantidades de contaminantes antes de que sea necesaria su limpieza. Es importante señalar que estos filtros no sustituyen a los de malla, sino que los complementan. Filtros de malla Consiste en un tubo metálico en cuyo interior se coloca la malla sobre un soporte cilíndrico, las impurezas quedan en la parte interna de la malla y el agua filtrada sale hacia las tuberías. La retención de las impurezas es superficial, por lo que su taponamiento es mas rápido que los filtros de arena.

No se suelen utilizar donde las aguas sean muy sucias y que contengan partículas de origen orgánico.

Las mallas pueden ser de acero inoxidable o plástico. Cada malla se define por el número de aberturas por pulgada lineal, a lo que se denomina número de mesh o número de mallas.

Filtro de discos o anillos

Tienen forma cilíndrica y suelen ir situados en posición horizontal en la línea de riego. El filtro lo compone un conjunto de anillas de plástico con ranuras impresas, sobre un soporte central cilíndrico y perforado. El agua es filtrada al pasar por los pequeños conductos formado entre dos anillas consecutivos.

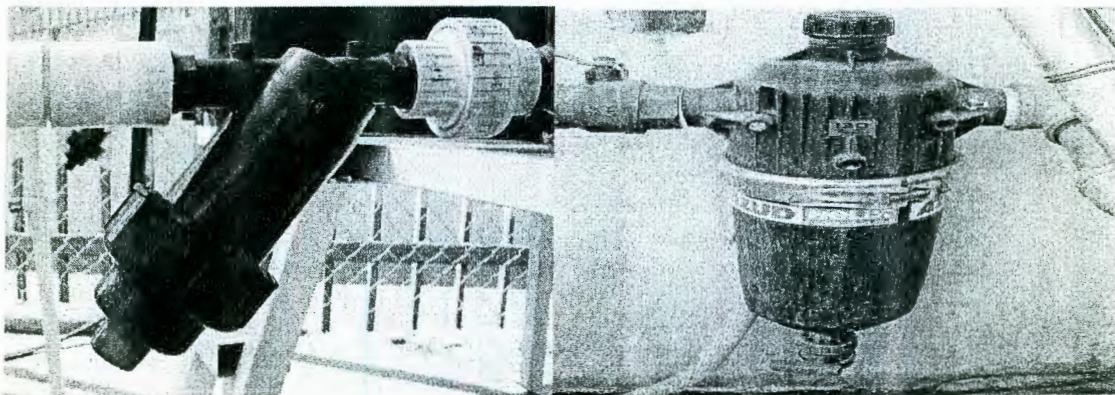


Figura 15. Filtros

Depósitos para Fertilizantes

Sirven para preparar la solución nutritiva necesaria para los cultivos. Puede ser uno o varios tanques, desde los cuales se inyectan los fertilizantes al sistema de riego, figura (16).



Figura 16 Tanques para fertilizantes

Equipo Inyector

Se emplea para inyectar y dosificar los fertilizantes a la red, figura (17). Existen diferentes formas de inyectar la solución, desde tanques de fertilización, inyectoros tipo venturi o bombas inyectoras. La proporción de mezclado, unidad de solución por unidades de agua de riego, debe ser calculada en función de la calidad del agua de riego y las necesidades nutrimentales del cultivo. Se calcula el volumen de la solución por pulso de inyección. La frecuencia de los pulsos y la duración del riego definen la cantidad total del riego y de los fertilizantes aplicados.

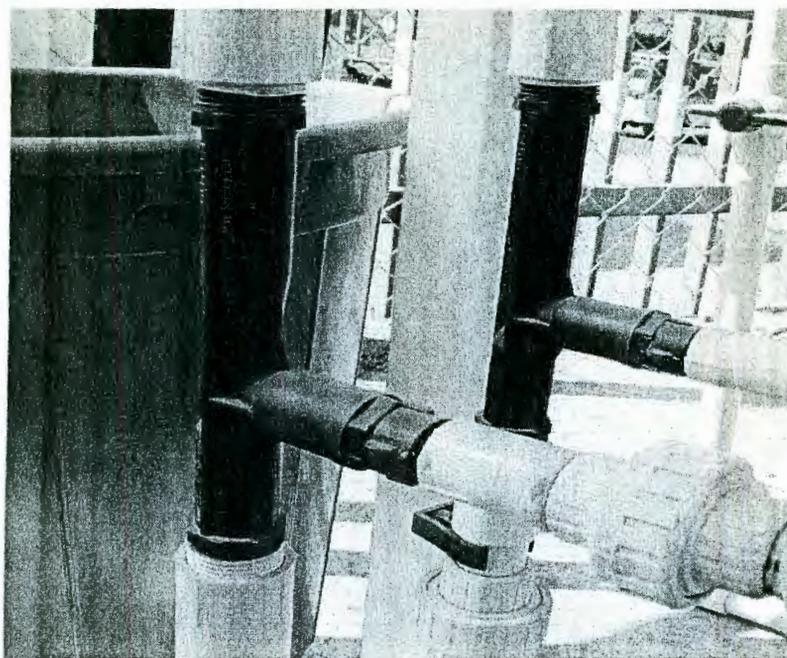


Figura 17 Sistema de inyección

Línea o Red de Distribución

Esta compuesta por una tubería principal, tuberías secundarias y líneas finales, conduce el agua o solución nutritiva a las líneas de distribución finales donde se distribuye el líquido mediante los emisores o goteros. Dentro de la red de distribución se encuentran válvulas de seccionamiento, válvulas de aire, tomas de presión, válvulas de purgas para limpieza, ver figura (18).

La tubería principal es la que conduce el agua del cabezal de control hasta cada uno de los sectores de riego. La línea principal es de mayor diámetro que las secundarias. Las líneas secundarias parten de la principal y a ellas se conectan líneas distribuidoras, laterales o regantes sobre las que van colocados los goteros o emisores. Las tuberías secundarias parten de las principales y a partir de ellas se conectan las líneas regantes. Al inicio llevan válvulas reguladoras de caudal y presión.



Figura 18 Sistema de distribución

Pérdida de Presión en Tubos de Polietileno y la Presión Requerida.

La mayoría de los productores en invernadero, usan emisores de compensación de presión, así que el emisor puesto en aguas hacia arriba en el tubo de polietileno tiene la misma proporción de flujo que el emisor colocado aguas abajo de la tubería con más baja presión. Sin embargo, la tubería debe tener un diámetro lo bastante grande para entregar la presión mínima requerida al último emisor en el tubo. La meta en el diseño lateral, es mantener una variación de presión aceptable de un extremo del lateral al otro.

Los diseñadores de sistemas de riego por goteo deben tener la habilidad de calcular la capacidad de flujo máximo de laterales de irrigación por goteo.

Emisores o Goteros

Se encargan de disipar la energía del sistema a través de conductos de diámetro pequeño y sinuosos, hasta valores cercanos a cero para lograr que la emisión sea verdaderamente a goteo, ver figura (19).

Dosifican la cantidad de agua en forma homogénea a cada planta. Se encargan de disipar la energía del sistema a través de conductos de diámetro pequeño y sinuoso, hasta valores cercanos a cero para lograr que la emisión sea por goteo.

Existen en el mercado una gran variedad de emisores, que de acuerdo a sus características, se clasifican principalmente en:

a) Por su funcionamiento hidráulico. Goteros de flujo laminar y de flujo turbulento. Los goteros de flujo laminar son mas sensibles a los taponamientos y a los cambios de temperatura que los de flujo turbulento.

b) Por grado de compensación de la presión. Se clasifican en goteros normales y autocompensados.

c) Por su ubicación: goteros integrados y goteros individuales



Figura 19 Goteros

Dispositivos de Regulación y Control de agua

Integrados por un sistema de válvulas que controla y regula el paso del agua por los distintos sectores dispositivos de control y automatización como sensores, temporizadores, ordenadores y programas.

Medidores depresión

Un buen sistema deberá tener manómetros en buen estado. En los sistemas de riego es indispensable mantener un manómetro antes y otro después del sistema de filtración. Un diferencial alto nos indicará que el filtro ha atrapado demasiadas partículas y se ha incrementado la resistencia al reducirse el área de paso del agua; un diferencial de presión bajo indicará que el filtro está limpio, o bien que se encuentra algún agujero en los filtros.

Cuando se utiliza inyector vénturi se requieren dos manómetros adicionales, uno a la entrada y otro a la salida para la calibración respectiva. En los sistemas grandes se debe conocer la presión de operación a lo largo de las tuberías principales y secundarias por seguridad de la red y, en las líneas laterales se debe vigilar continuamente la presión de operación para asegurarse que el sistema está funcionando adecuadamente.

Medidor volumétrico

Es de gran importancia en fertirrigación mantener un control de los volúmenes de agua aplicados, ver figura (20), debido a que en los riegos es un valor más constante que los volúmenes calculados de manera indirecta con los tiempos de riego, ya que utilizando éste último como base se tienen errores debido a la variación en la presión originados por el tiempo de retrolavado de filtros, fugas, tiempo de llenado y vaciado de tuberías, dificultad para mantener la presión de operación constante en los emisores, etcétera. En el sistema de inyección de fertilizantes también es importante contar con un medidor de flujo para mantener la concentración deseada y controlar los volúmenes de aplicación de la solución nutritiva.

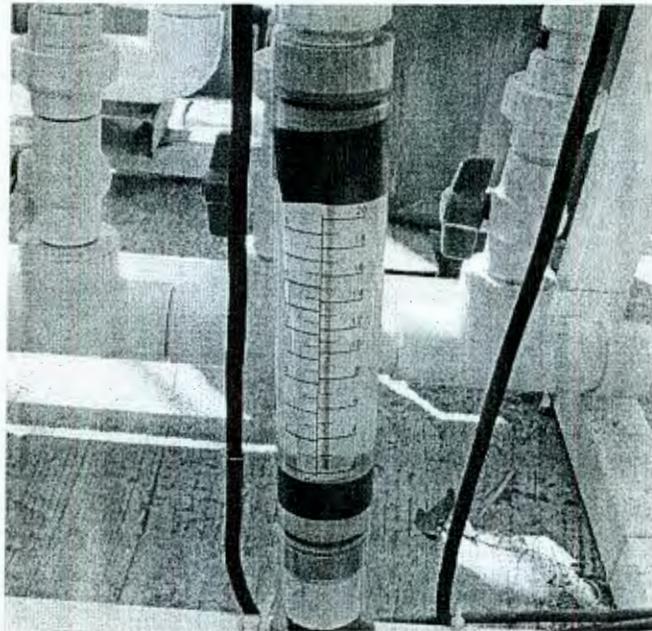


Figura 20. Medidor de flujo

Válvulas

Permiten el paso o no del flujo de fluido, ver figura (21).

Válvula de admisión y expulsión de aire

Permiten la salida del aire en aquellos puntos especiales de la instalación en que puede acumularse, como codos, partes elevadas de tuberías, filtros, etcétera, así como durante el llenado y vaciado de las tuberías. Es importante su colocación porque la presencia de aire en las tuberías distorsiona la presión y caudales de funcionamiento de la instalación y, en ocasiones puede provocar la ruptura.

Están formadas por un cuerpo metálico o plástico en cuyo interior existe una boya. Cuando circula agua a presión en las tuberías, empuja la boya tapando la salida; al disminuir la presión, la boya desciende y deja escapar el aire, al recuperarse la presión levanta la boya y vuelve a tapar la salida.

Válvula check

Tienen una doble misión en el sistema, primero romper con la columna de agua y reducir, por tanto, el golpe de ariete que se produce al abrir o cerrar la instalación y, segundo, evitar el retroceso del agua. Se coloca en la tubería principal cuando el punto de captación es elevado o en el cabezal para evitar el retorno de agua con elementos nutritivos.

Válvulas de seguridad

Permiten la salida de agua cuando se producen fuertes presiones, evitándose la posible ruptura de las tuberías y conexiones. Generalmente son de acero y la salida está cerrada con un resorte calibrado para una presión máxima de trabajo, de tal modo que al superar esta presión el resorte se comprime y deja libre la salida.

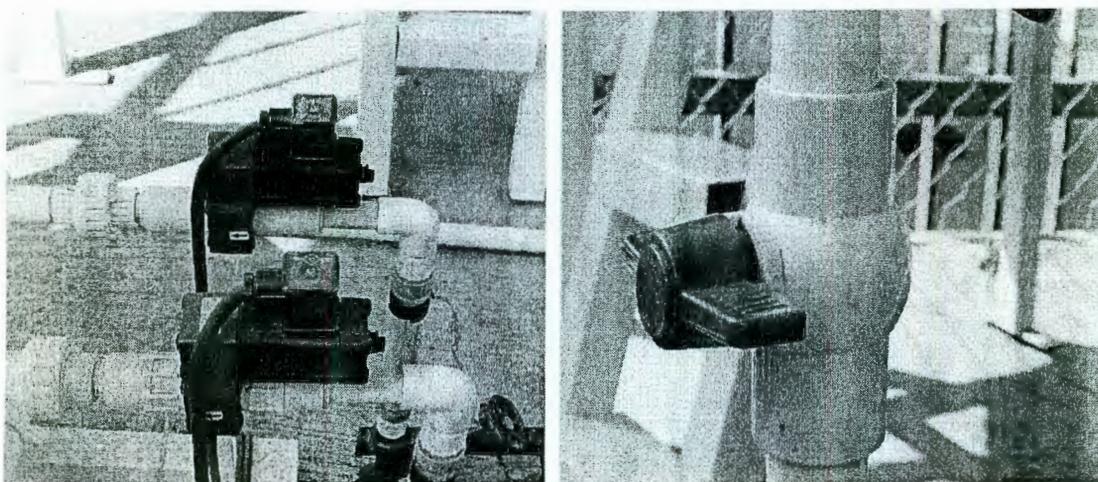


Figura 21. Válvulas

3.1.2 Instrumentación.

Un sistema altamente productivo como los invernaderos demanda un control automático de los procesos involucrados, en especial la aplicación de agua y fertilizantes. La frecuencia y duración del fertirriego debiera ser precisa.

Monitorización del pH, la Conductividad Eléctrica y el Flujo en la Línea Principal.

El diseño para la monitorización del pH, la conductividad eléctrica y el flujo en la línea principal de riego; se desarrollo usando una PC IBM 486 a 100 Mh , una tarjeta de

adquisición de datos, convertidores analógico digital, lenguaje de programación C, lenguaje de programación de hardware VHDL.

Se instalaron los sensores en la tubería principal y en el tanque de homogenización como lo muestra la figura 22.

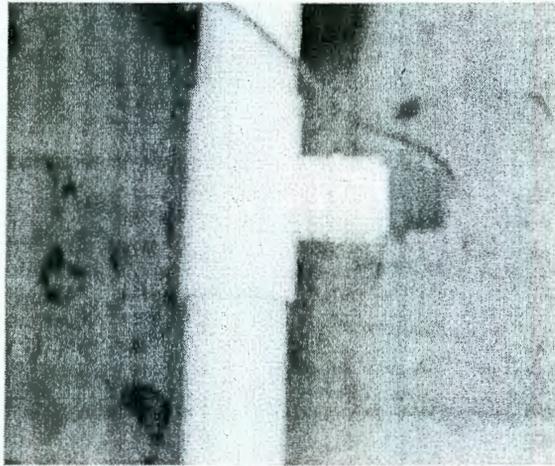


Figura 22. Sensores en línea

Adquisición de datos

Para la adquisición de los datos se utilizó una tarjeta de adquisición DAQ-801 compatible con el bus ISA de la PC, la cual provee 12 bit de resolución para entradas analógicas y 32 bit para entradas o salidas digitales, tres temporizadores programables de 16 bit, y ganancias programables por software de 1,10,100 o 1000, un tiempo máximo de muestreo de 40KHz.

Esta tarjeta se utilizó para adquirir los datos de pH, conductividad eléctrica y flujo del sistema con el fin de almacenarlos en un archivo para la identificación de la planta.

Sensores

Flujo: en el control del proceso de este sistema, el éxito de una operación depende en gran medida de la medición y control del flujo.

Para la medición del flujo de solución madre y del flujo de la línea principal se usó un Fluxómetro de turbina y se caracteriza por que el fluido provoca que el rotor de la turbina gire a una velocidad que depende de la velocidad de flujo.

Conforme cada una de las aspas del rotor pasa a través de una bobina magnética, se genera un pulso de voltaje que puede alimentarse de un medidor de frecuencia, un contador electrónico u otro dispositivo similar cuyas lecturas pueden convertirse en velocidad de flujo.

El medidor de flujo utilizado para la línea de la solución madre es un FTB2001 con las siguientes características: presión de operación de 200 psi, temperatura de operación de 20 hasta 100 grados centígrados, entrada de voltaje continuo de 5- 24 v a 8 mili amper, exactitud de 3%, flujo de operación de 0.5-5 litros por minutos, la salida es de 6900 pulsos por litro con una frecuencia de salida de 58-575 Hz, ver figura (23)

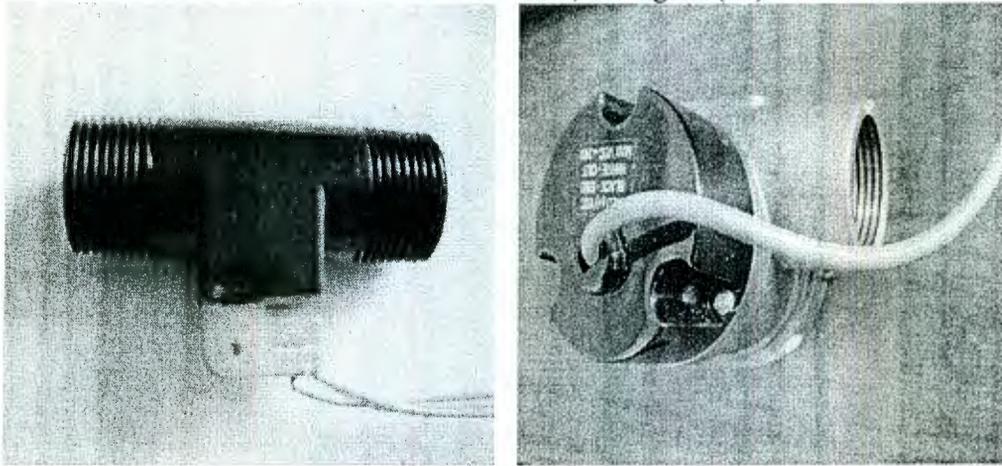


Figura 23 Sensores de flujo

El diagrama de instrumentación se muestra en la figura 24.

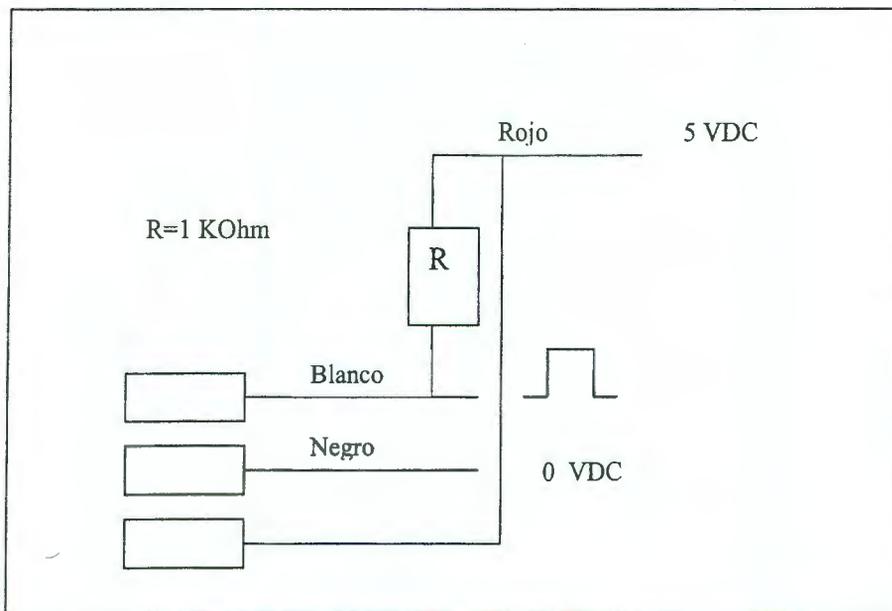


Figura 24 Instrumentación sensor de flujo

El diagrama de estado para el diseño electrónico de la sincronización de los pulsos que envía el sensor se muestra en la figura 25, este sistema electrónico es implementado en el CPLD y su programa en VHDL se muestra en el apéndice A.

El objetivo de este circuito es sincronizar la señal de reloj del sistema electrónico CPLD con los pulsos asíncronos del sensor.

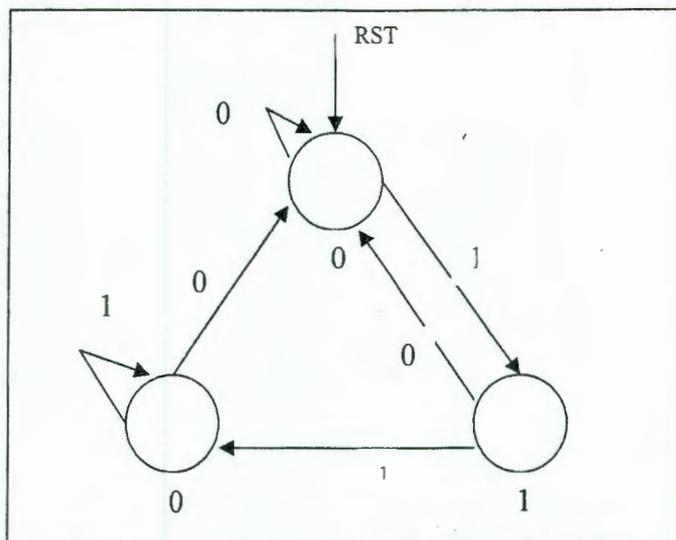


Figura 25 Diagrama de estado sensor de flujo

Para la medición del flujo de la línea principal se usa un Medidor de turbina de salida continua tipo RFO-2500 con una entrada y salida de una pulgada, flujo de 5-60 galones por minuto y una señal de salida digital para la cual se usa la misma instrumentación que para el sensor anterior.

Sensor de pH y Conductividad Eléctrica

Son sensores de tipo CDTX-300 diseñados para medir pH y conductividad eléctrica a largas distancias, con sensor de temperatura para la compensación de la señal cuando existan cambios de temperatura, la temperatura de operación puede ser hasta 80 grados centígrados y 90 psi, con un rango de 0 a 14 de pH y de 0 a 10 mS/cm de conductividad, una precisión de 0.5% y salidas de 4 a 20 miliampers y una alimentación de 12 a 24 VDC, ver figura 26.

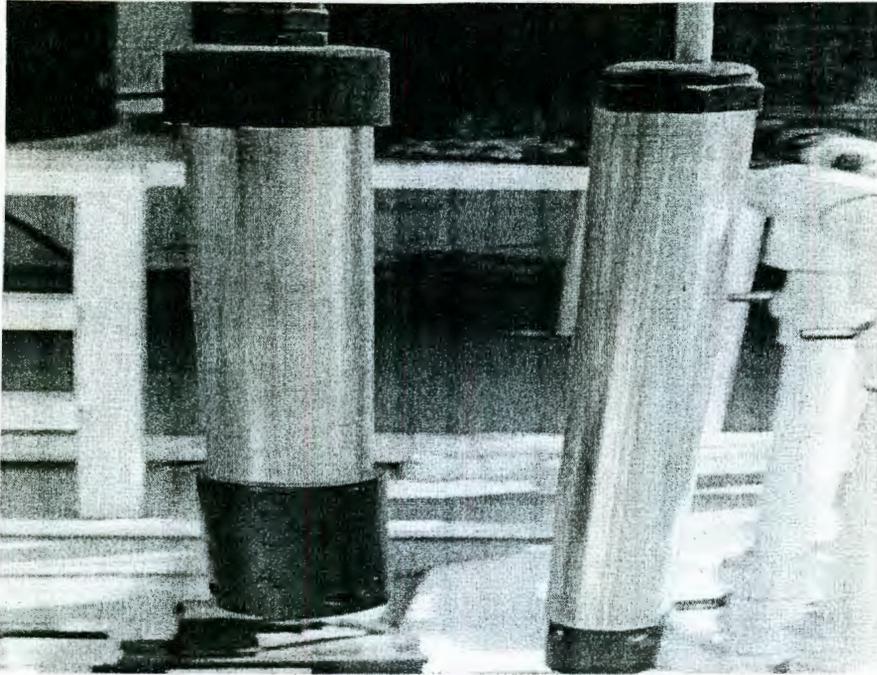


Figura 26 Sensor de pH y CE

Control de los Actuadores en el Invernadero

La operación de los actuadores del sistema de fertiriego: Bombas, válvulas, bomba de aire, puede realizarse de forma manual o automática.

La operación manual se puede realizar desde un panel de control el cual consta de interruptores, relevadores, fuente de poder, protecciones eléctricas y otros, como lo muestra la figura 27.

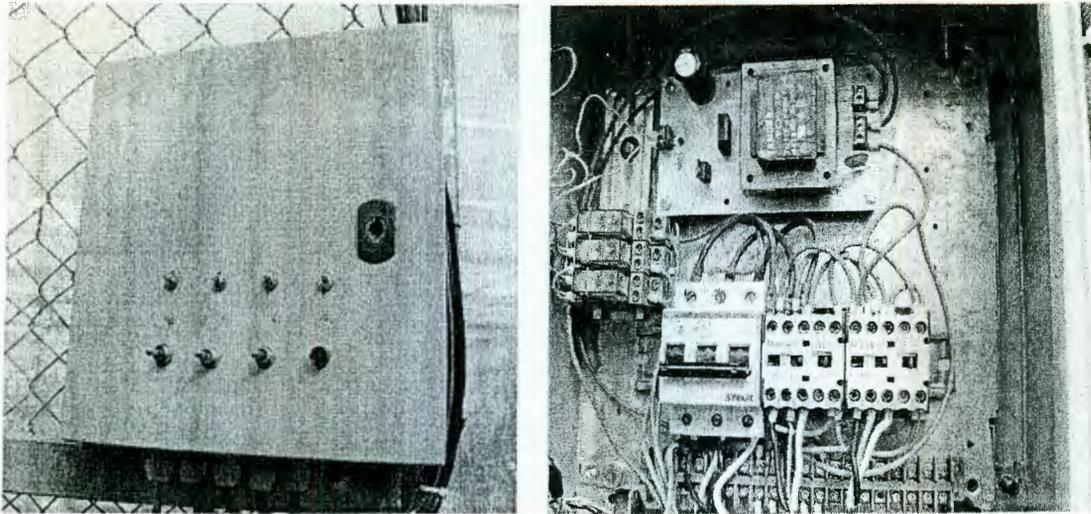


Figura 27. Panel de control

desde el mismo panel se puede inferir el modo automático que funciona con un programa en lenguaje C y hardware desarrollado bajo tecnología de lógica programable e implementado en un CPLD, el esquema de control de los actuadores se muestra en la figura 28

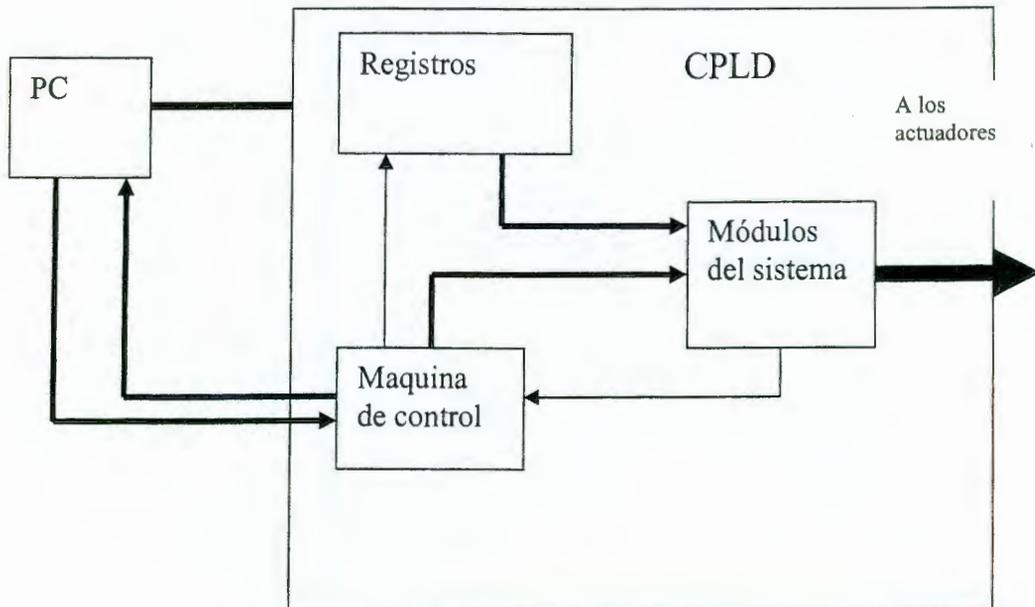


Figura 28. Esquema de control de los actuadores

3.1.3 Automatización

Las variables que se tienen en cuenta para el control del fertirriego de un invernadero son el pH y la conductividad eléctrica, para el control de estas variables en el sistema se propone el siguiente control, ver figura 29

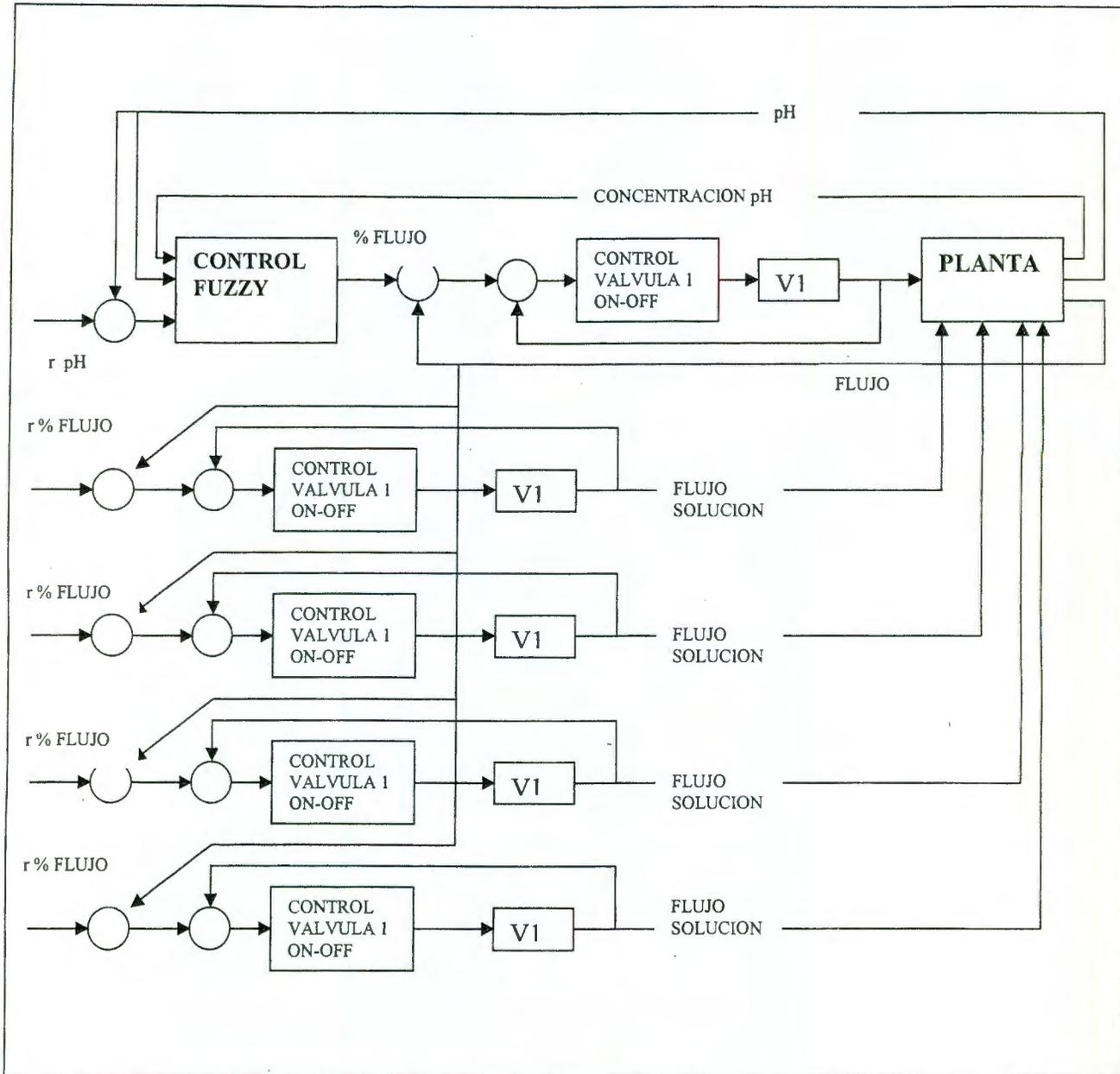


Figura 29. Propuesta de control del sistema de riego

El controlador del riego tiene la capacidad de controlar el pH y la conductividad eléctrica de la solución de riego, donde el operador se encarga de dar los valores de referencia de la conductividad eléctrica y del pH que desea, para lograr los objetivos se propuso un control de riego que consta de un control difuso que tiene como variable de entrada el pH de la planta, el error del pH y la concentración de la solución madre y como salida el porcentaje

de la solución madre con respecto al flujo de riego que se va a añadir; cuenta además con controles ON-OFF para las válvulas, este control tiene como entrada el error entre el valor de referencia enviado por el control difuso y la señal de flujo de solución madre, y como salida la apertura o cierre de las válvulas.

Cada diseño y análisis de los componentes principales del controlador se explican a continuación.

Control difuso

A la mayoría de los sistemas basados en el conocimiento que se utilizan en problemas de control se les aplica la siguiente definición: "Los sistemas basados en el conocimiento (KBS, knowledge based systems) aplicados a problemas de control, son sistemas de control que mejoran el desempeño, confiabilidad y robustez de un control, incorporando conocimientos que no pueden ser incluidos en el modelo analítico sobre el cual el diseño de los algoritmos de control están basados. Estos conocimientos generalmente son tomados de los modos manuales de operación ó por otros mecanismos lógicos más seguros" [Driankov 1996]

Según menciona Zadeh (1988) en su planteamiento de la lógica difusa. "La lógica, según el diccionario Webster, es la ciencia de los principios formales normativos del razonamiento. En este sentido, la lógica difusa trata con principios formales para aproximar el razonamiento, considerando el razonamiento como una limitante." En términos más específicos el punto central de la lógica difusa es, a diferencia de los sistemas lógicos clásicos, dirigida a modelar los modos imprecisos del razonamiento los cuales juegan un papel importante en la habilidad humana para tomar decisiones racionales en medio de incertidumbres e imprecisión. Esta habilidad depende, de la habilidad del ser humano para inferir una respuesta aproximada a una pregunta, basándose, en el conocimiento acumulado que es inexacto, incompleto ó no totalmente confiable.

Hay dos principales razones por las cuales los sistemas lógicos clásicos no pueden resolver problemas de este tipo.

No proporcionan un sistema para representar el significado de las proposiciones expresadas en lenguaje natural cuando el significado es impreciso.

Cuando el significado de las proposiciones puede ser representado simbólicamente en un lenguaje de representación de significado, como redes semánticas ó grafos de dependencias conceptuales, no existe un mecanismo de inferencia.

La lógica difusa trata estos problemas de la siguiente manera: el significado de una proposición léxica imprecisa es representado como una acotación elástica sobre una variable y la respuesta a una pregunta se deduce a través de la propagación de restricciones elásticas.

Estructura de un Controlador Difuso

La estructura de un control difuso es la siguiente, figura (30)

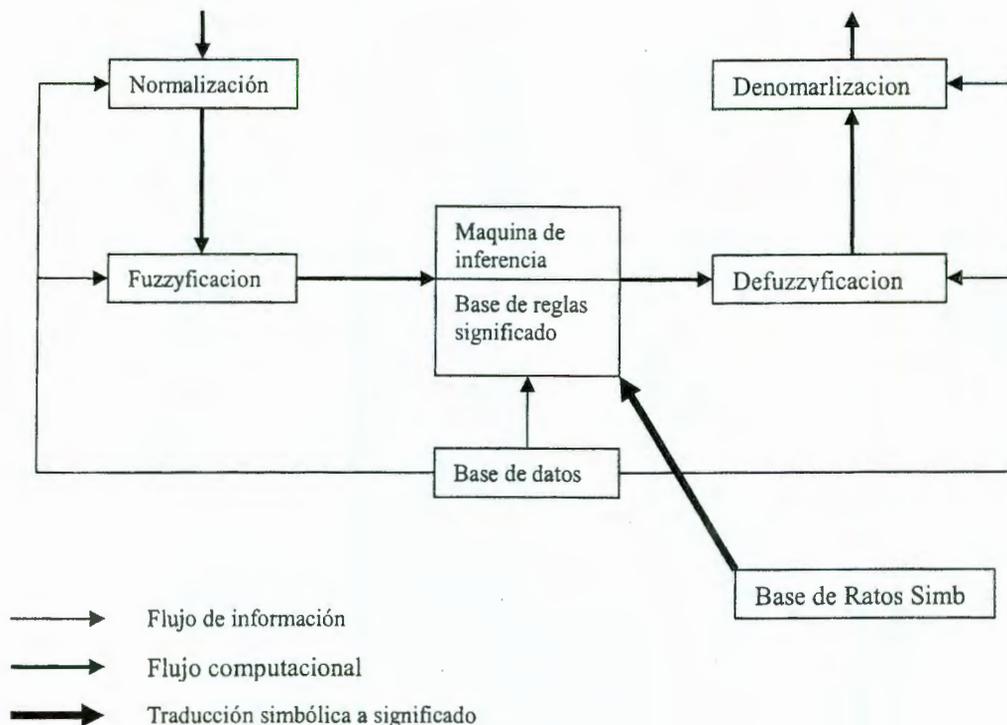


Figura 30 Estructura de un control difuso

Modulo de Fusificación

Función de normalización La función normalización efectúa una transformación de escala, la cual mapea los valores de las variables de estado del sistema a un universo normalizado (dominio normalizado). También efectúa un mapeo de los valores normalizados de las variables de salida del sistema a su dominio físico (denormalización de la salida). Cuando se emplea un dominio no normalizado no se requiere de esta función.

Función de Fusificación La función de fusificación convierte el valor bien definido de una variable de estado del sistema a un valor perteneciente a un conjunto difuso, con la finalidad de hacerlo compatible con la representación de conjuntos difusos de variables de estado que se emplean en la base de reglas y que constituye parte fundamental del control difuso.

El parámetro de diseño del módulo de fusificación es la elección de la estrategia de fusificación. Este parámetro está determinado por el tipo de máquina de inferencia empleado en la aplicación en particular.

Base del Conocimiento La base del conocimiento de un controlador difuso basado en el conocimiento (fuzzy knowledge based controller,FKBC) consiste en una base de datos y una base de reglas.

La función básica de la base de datos (conocimiento difuso) es proporcionar la información necesaria para el funcionamiento del módulo de fusificación, la base de reglas y el módulo de defusificación. La información de la base de datos incluye a: los conjuntos difusos (funciones de membresía) que representan el significado de los valores lingüísticos de los estados del sistema y las variables de salida del control y los dominios físicos y su contrapartes normalizadas junto con los factores de normalización y denormalización.

Si los dominios continuos del estado del sistema y las variables de salida del control han sido discretizados entonces la base de datos debe de contener información sobre la política de discretización.

Para el caso en el que prevalezca el caso de continuo, los dominios normalizados de los parámetros de diseño de la base de datos incluyen: la selección de las funciones de membresía, la selección de los factores de escala, la función básica de la base de reglas es representar en un modo estructurado, la política de control de un operador del sistema experimentado y/o un ingeniero de control en forma de un conjunto de reglas tales como: *if* (estado del proceso) *then* (salida de control).

La parte *if de* tal regla se conoce como *antecedente* y es una descripción del estado del sistema en términos de una combinación lógica de proposiciones difusas más sencillas.

La parte *then* de la regla se llama *consecuencia* y también es una descripción de la salida de control en términos de una combinación lógica de proposiciones difusas. Estas proposiciones establecen los valores lingüísticos que las variables de salida del control toman siempre que el estado del sistema corresponde (al menos en cierto grado) a la descripción del estado del sistema que se presenta en el *antecedente*.

Máquina de Inferencias

La máquina de inferencias simula el proceso de toma de decisiones del experto, teniendo en cuenta la base de reglas y la base de datos (conocimiento difuso) del proceso

Modulo de Defusificación

Las funciones del módulo de defusificación son: el desarrollo de la llamada defusificación la cual convierte el conjunto de los valores de salida en un valor sencillo, la denormalización de salida la cuál mapea este a su dominio físico, esta función no se requiere si se utilizan dominios no normalizados.

El parámetro de diseño del módulo de defusificación es la elección de los operadores de defusificación.

Base de Reglas

Los parámetros de diseño de una base de reglas incluye: la elección de las variables de estado del sistema, así como las variables de salida del control, la elección del contenido de

los antecedentes y consecuencias de las reglas, la elección de los términos de los conjuntos para las variables de estado del sistema y las variables de salida del control, la derivación del conjunto de reglas.

Elección de las Variables y Contenidos de las Reglas

La unidad fundamental de la representación del conocimiento para la aproximación del razonamiento es la noción de *variable lingüística*. Zadeh establece: "Por *variable lingüística* se quiere significar una variable cuyos valores son palabras ú oraciones en un lenguaje natural o artificial

Una vez que se han elegido las variable lingüísticas apropiadas al proceso, se deben establecer el significado operacional de las reglas *if-then*. Principalmente hay tres formas de derivar las reglas de un FKBC. Cada una se complementa con la otra y es seguro que una combinación de ellas sea necesaria para construir una aproximación efectiva de la derivación de las reglas.

Aproximación 1.- Esta aproximación es la que se utiliza con mayor frecuencia. Y se basa en la derivación de las reglas a partir del conocimiento y experiencia del operador del proceso y/o el ingeniero de control. Esta aproximación se realiza utilizando dos tipos de técnicas:

- 1.- Efectuando una verbalización introspectiva del conocimiento basado en la experiencia.
- 2.- Efectuando una encuesta al operador del proceso y/o el ingeniero de control usando un cuestionario organizado cuidadosamente.

Ambas técnicas proporcionan un prototipo inicial de la base de reglas. Posteriormente sera necesario efectuar un ajuste de las funciones de membresía y de las reglas si fuera necesario.

Aproximación 2.- Esta aproximación, no esta muy difundida, y utiliza una descripción lingüística considerando un modelo difuso del proceso bajo control para derivar el conjunto de reglas del FKBC.

Aproximación 3.- Esta aproximación, tampoco esta muy difundida y considera la existencia de un modelo convencional de un proceso, usualmente un modelo no lineal, y desarrolla una técnica formal para obtener una versión difusa de dicho modelo.

Base de Datos

Los dos parámetros de diseño que se involucran en la construcción de una base de datos son: selección de las funciones de membresía y selección de la escala de factorización

Selección de las Funciones de Membresía

Para efectos de obtener eficiencia en el uso de los recursos de la computadora, así como para poder efectuar un análisis del desempeño del controlador, se requiere una

representación uniforme de las funciones de membresía. Esta se puede obtener utilizando funciones de membresía con formas y definiciones paramétricas uniformes.

La selección más popular de las funciones de membresía incluyen funciones trapezoidales, triangulares y en forma de campana. La selección de estas tres funciones se debe a la facilidad con que se pueden obtener la descripción funcional y paramétrica de éstas, además de que en términos de requerimientos en tiempo real hacen uso de un mínimo de memoria y se pueden manipular eficientemente.

Máquina de Inferencias

Hay dos tipos básicos de vertientes en el diseño de la máquina de inferencia de un FKBC

1. Inferencia basada en la composición
2. Inferencia basada en las reglas individuales

En el primer diseño se obtiene un compuesto de las reglas del sistema, como una relación difusa y sobre esta se valora el antecedente. Como resultado de la composición se obtiene un conjunto difuso que describe el valor difuso de todas las salidas de control. En el segundo diseño, cada regla que se activa se valora individualmente y después se concatenan los aportes individuales en una conclusión final.

El proceso de inferencia generalmente incluye dos pasos:

1. Las premisas de todas las reglas son comparadas con las entradas del controlador a fin de determinar cuáles reglas se aplican a la situación actual. Este proceso de comparación incluye la determinación del grado de certeza con que una regla determinada se aplica y en general, se le da más peso a las recomendaciones de aquellas reglas de las que estamos más seguros que son aplicables a la situación actual.
2. Las conclusiones (o sea, que acción de control tomar) se determinan usando las reglas activas y se caracterizan mediante conjuntos difusos que representan el grado de certeza con el que la entrada al proceso debe tomar determinados valores de salida.

Procedimiento de Defusificación

Existen varios métodos de defusificación entre los más utilizados tenemos: defusificación por el centro de gravedad de área, defusificación por el centro de las sumas, defusificación por el centro del área mayor, defusificación por el primero de los máximos, defusificación por el promedio de los máximos, defusificación por alturas.

Diseño del Control Difuso

Para poder diseñar el control difuso se analizo la planta a controlar, con el objetivo de poder definir las variables de entrada y salida, así como los conjuntos difuso y las reglas que deben existir junto con sus acotaciones; para esto se hizo necesario poner en operación

la planta, accionar sus actuadores y observar su respuesta; en nuestro caso teniendo en cuenta el posible uso del sistema y las condiciones de operación como las de mantenimiento que el usuario le daría, se propuso como entada al sistema la inyección de solución madre a diferentes concentraciones, como también diferentes niveles de pH del agua de riego y como salida diferentes cantidades de solución madre. Se realizaron pruebas con solución de 1%, 3% y 5% como lo muestran las siguientes tablas y figuras 31, 32, 33.

Tabla 2: Datos concentración madre 1%

Vólumen de Agua	Vólumen de Solución Madre	pH	Conductividad Eléctrica
10	0	7,68	0,69
10	10	7,16	0,7
10	20	6,88	0,7
10	30	6,88	0,71
10	40	6,53	0,71
10	50	6,42	0,72
10	60	6,31	0,73
10	70	6,18	0,74
10	80	6,07	0,75
10	90	5,94	0,76
10	100	5,82	0,76
10	110	5,65	0,77
10	130	5,19	0,78
10	140	4,29	0,8
10	160	3,44	0,93
10	170	3,21	1,08
10	180	3,09	1,21
10	190	3,01	1,34
10	200	2,92	1,49
10	210	2,88	1,62
10	220	2,61	1,82
10	230	2,57	1,9
10	240	2,53	2,05
10	250	2,49	2,15
10	260	2,46	2,32
10	270	2,44	2,43
10	280	2,42	2,59
10	300	2,39	2,8
10	320	2,37	3,09
10	360	2,34	3,59
10	400	2,32	4,14
10	440	2,31	4,61
10	540	2,27	5,7
10	680	2,21	7,22

10	750	2,14	7,91
10	900	2,01	9,39
10	1050	1,96	10,77
10	1200	1,94	12,07
10	1360	1,93	12,89
10	1610	1,93	14,07
10	1860	1,94	15,14

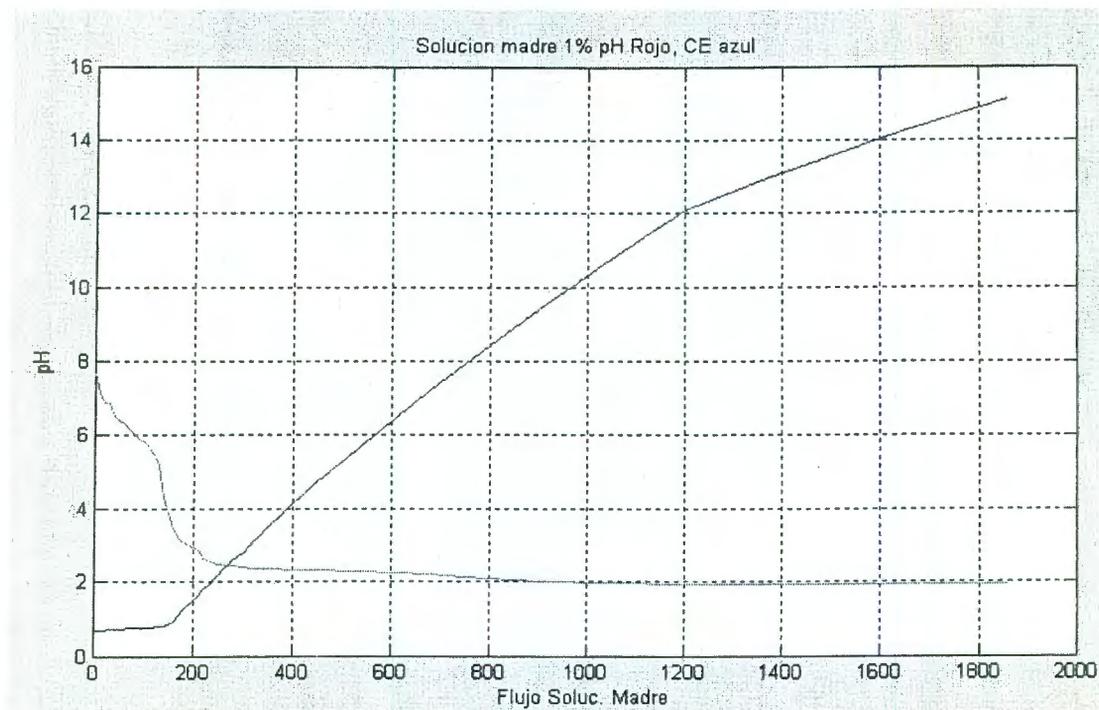


Figura 31 Comportamiento de la planta solución al 1%

Tabla 3: Datos concentración madre 3%

Volumen de Agua	Volumen de Solución Madre	pH	Conductividad Eléctrica
10	0	7.62	0.70
10	10	7.04	0.72
10	20	6.52	0.74
10	30	5.97	0.77
10	40	4.02	0.91
10	50	3.57	1.26
10	60	3.39	1.7
10	70	3.30	1.09
10	80	3.24	2.55

10	90	3.2	3.0
10	100	3.16	3.29
10	110	3.15	3.57
10	130	3.12	4.26
10	160	3.07	5.3
10	190	3.05	6.3
10	250	3	8.1
10	310	2.96	12.18

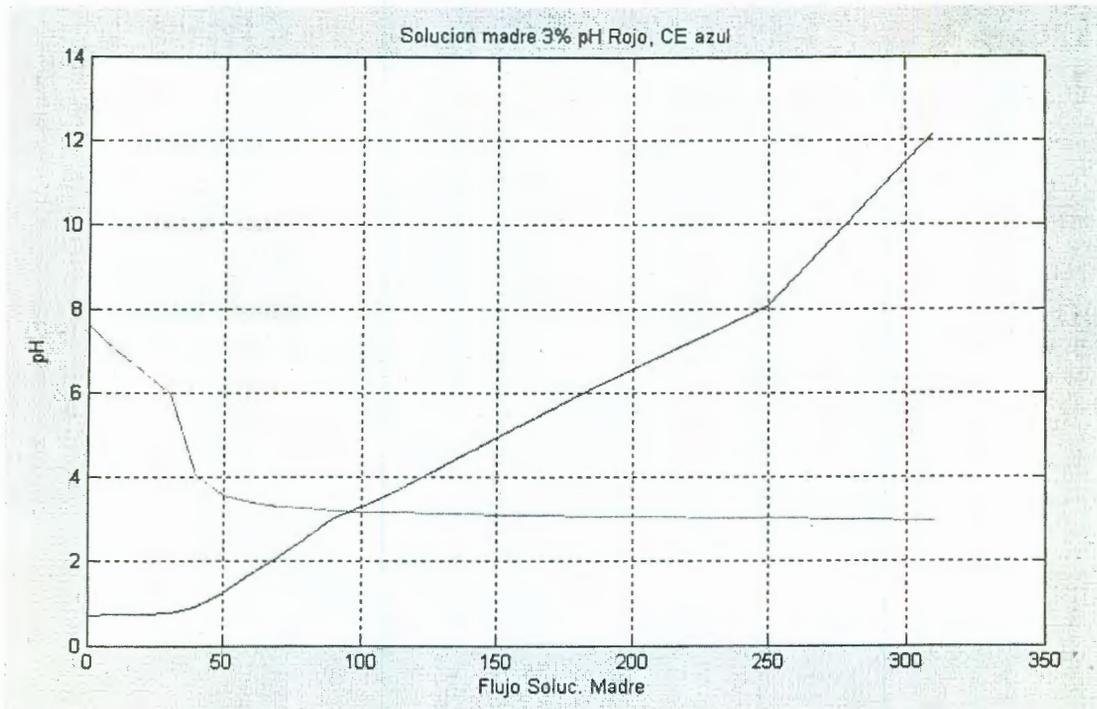


Figura 32 Comportamiento de la planta solución al 3%

Tabla 4: Datos concentración madre 5%

Volumen de Agua	Volumen de Solución Madre	pH	Conductividad Eléctrica
10	0	7.35	0.68
10	10	6.13	0.72
10	20	5.45	0.75
10	30	2.9	0.99
10	40	2.46	1.59
10	50	2.29	2.20
10	60	2.20	2.8
10	70	2.14	3.46
10	80	2.11	3.98
10	90	2.08	4.51
10	100	2.03	5.07

10	110	1.96	5.65
10	120	1.93	6.15
10	130	1.91	6.68
10	230	1.83	10.95
10	480	1.77	19.8

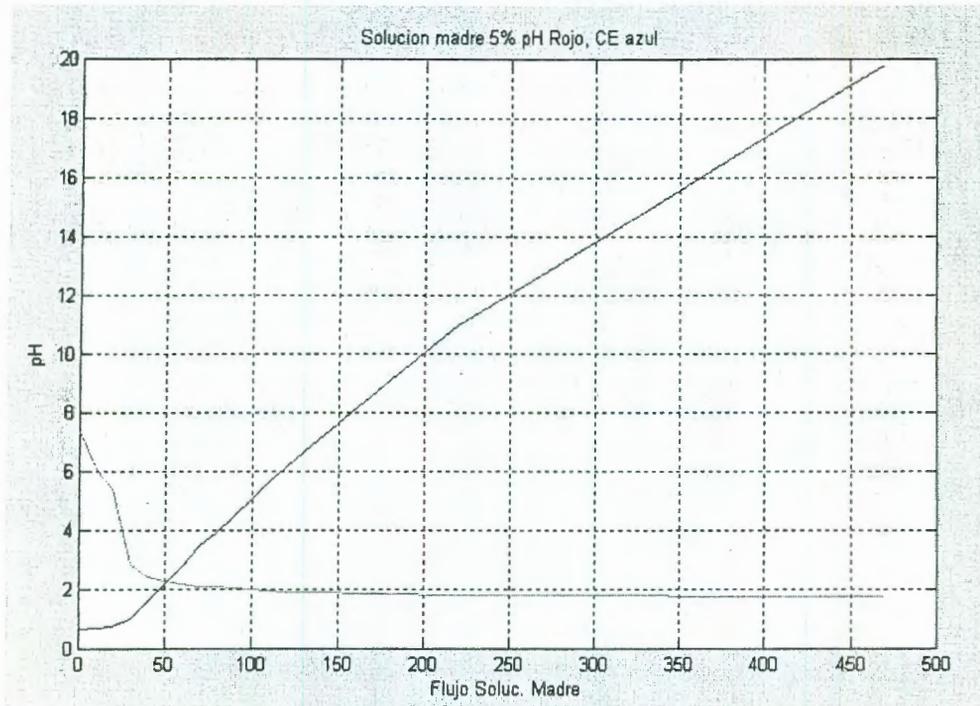


Figura 33. Comportamiento solución 5%

Para el análisis de la respuesta de la planta se grafico el comportamiento con diferentes concentraciones, figura 34

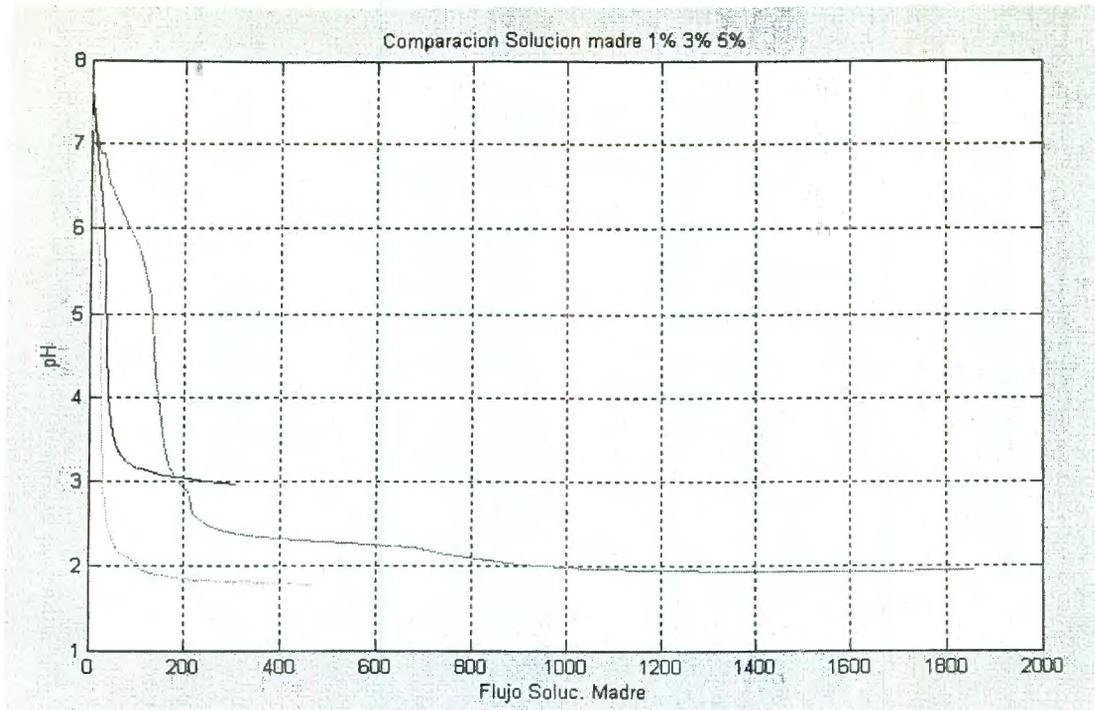


Figura 34. Comparación del comportamiento de la planta

Con el análisis de las graficas anteriores podemos observar que la planta es no lineal en una región muy amplia y que el pH y la conductividad eléctrica varían de forma diferente cuando la operamos de distintas maneras, entre las mas importante tenemos utilizando diferentes niveles de concentración madre y diferentes niveles de pH del agua de riego.

Para el diseño del control difuso se propone teniendo en cuenta las graficas anteriores, tres entradas (concentración de la solución madre, pH del agua, error entre el pH del agua y la referencia del operador) y una salida, porcentaje de solución madre a inyectar en el agua.

Nuestro control difuso utilizando el software Matlab queda de la siguiente forma ver Figura 35

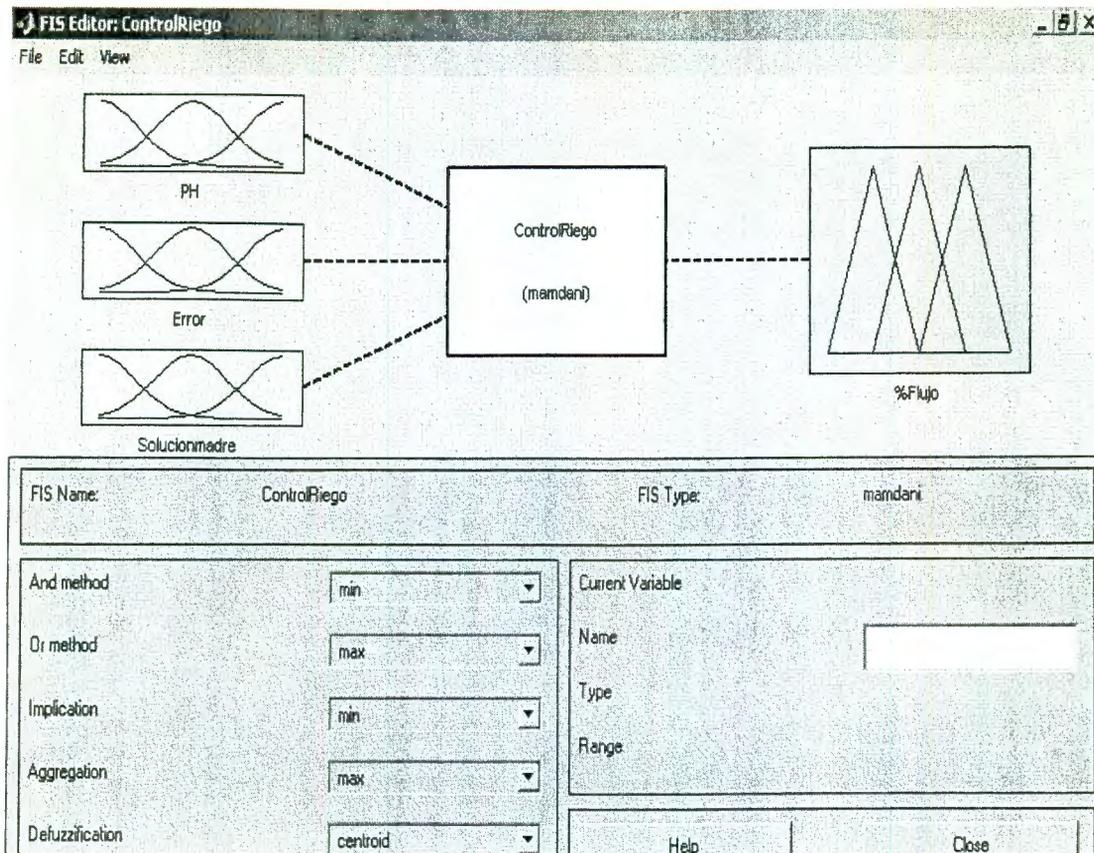


Figura 35. Diseño del control difuso

Cada variable de entrada tiene tres conjuntos difuso que son los niveles bajo, medio y alto y la variable de salida tiene 5 conjuntos difuso que son: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, las acotaciones se muestran en las siguientes figuras.

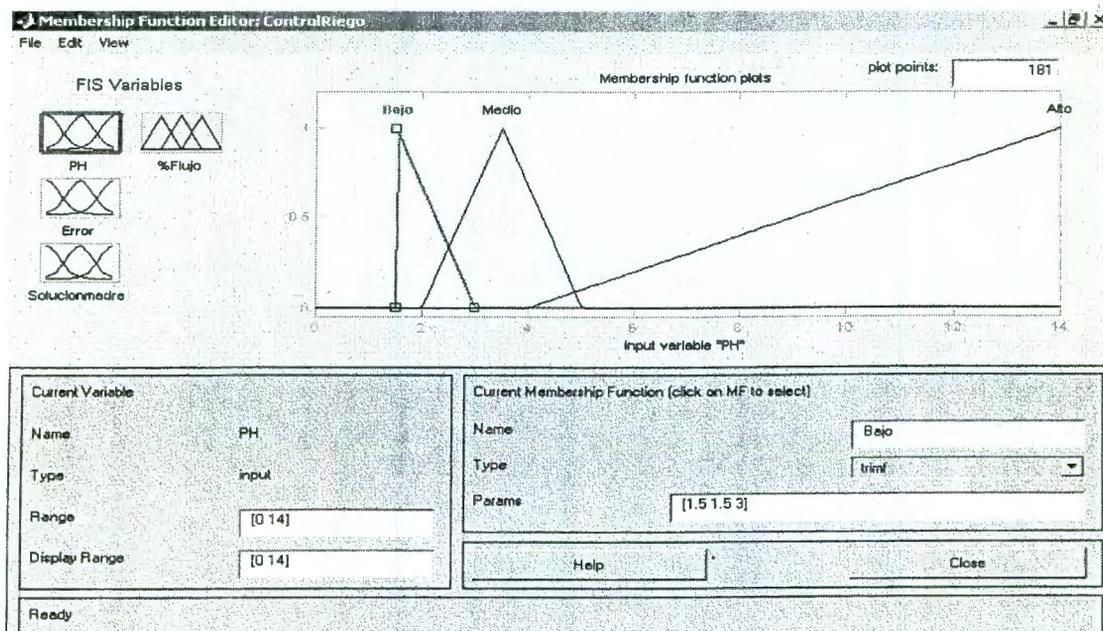


Figura 36. Conjuntos difuso

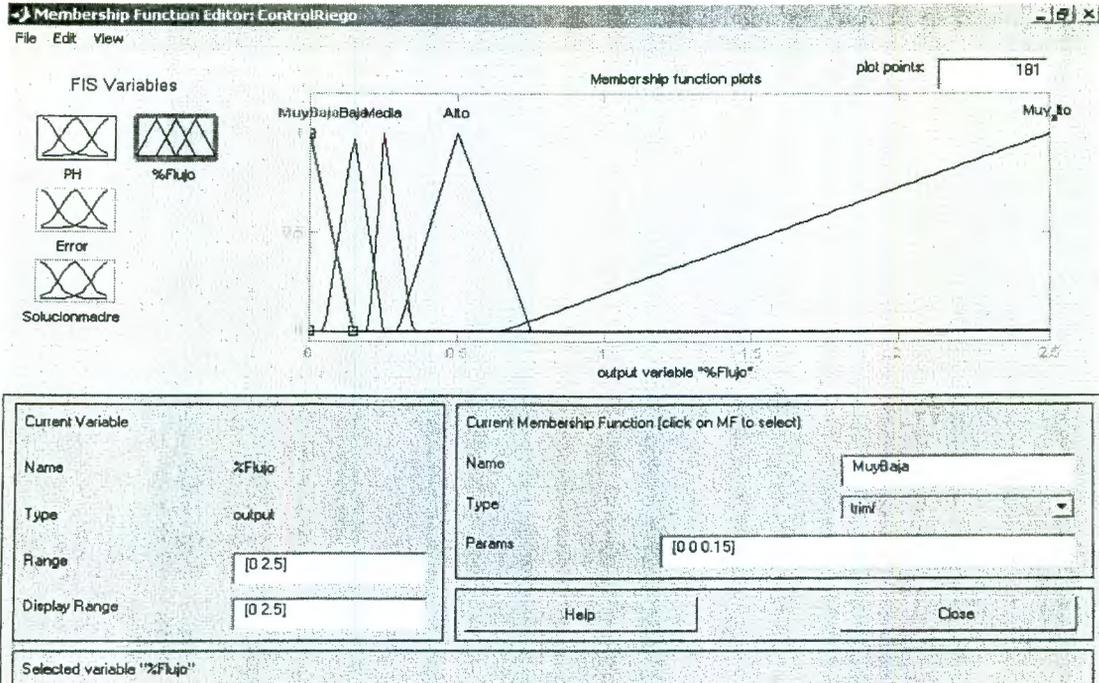


Figura 37. Conjuntos difuso salida

Las reglas del control se muestran en la siguiente Figura.

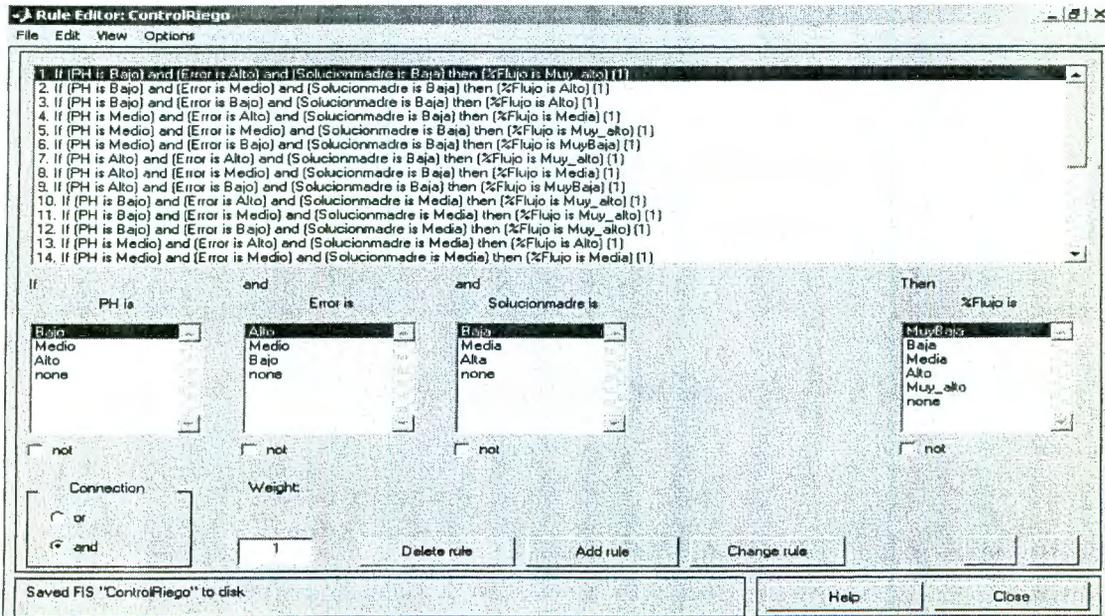


Figura 38. Reglas del control difuso

En conclusión el control difuso es de tres entradas una salida, cada entrada de tres conjuntos difuso, la salida es de cinco conjuntos y el control posee 27 reglas.

Control ON-OFF

La salida del control difuso va a la entrada del controlador ON-OFF de las válvulas, la propuesta del controlador es la siguiente.

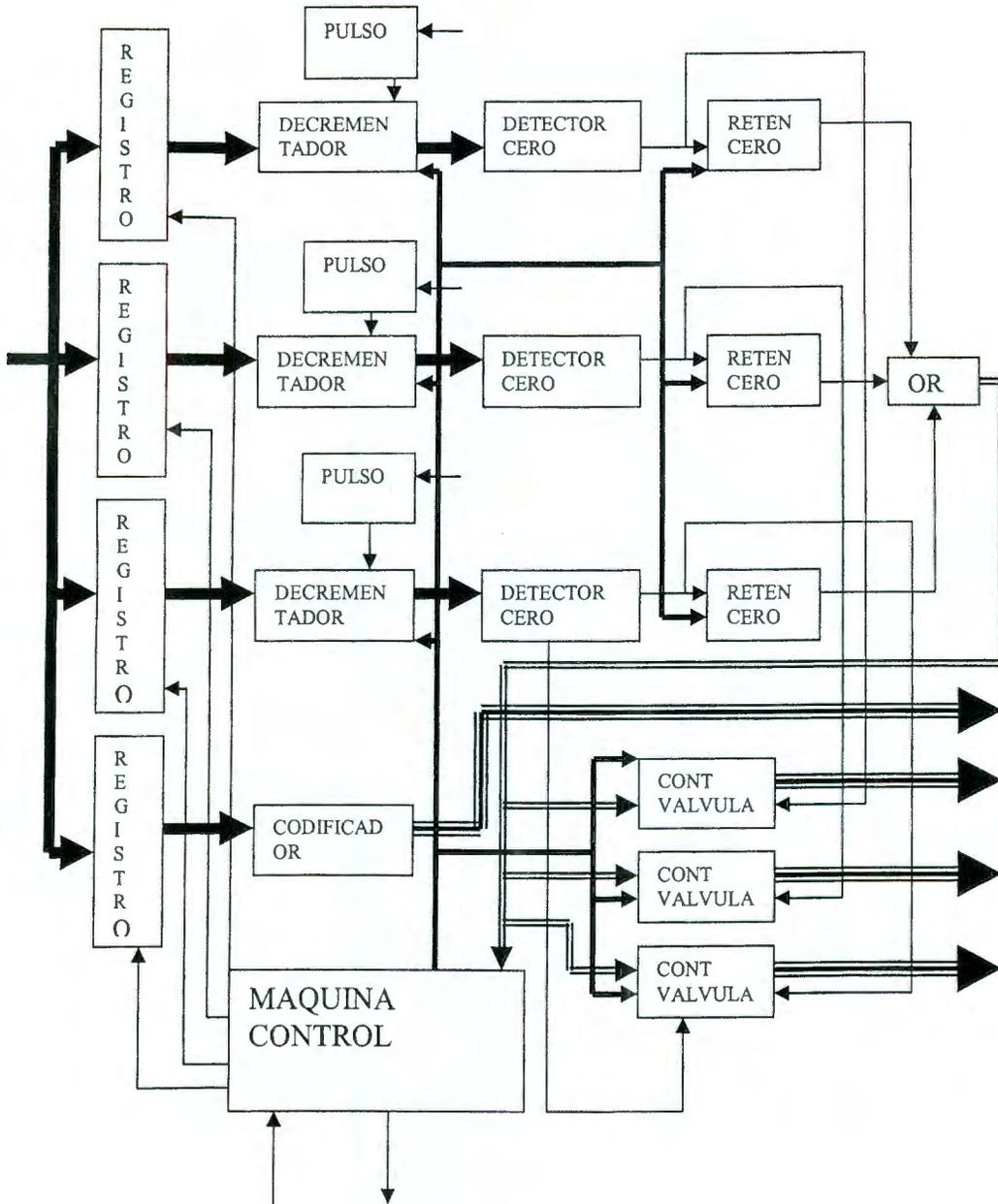


Figura 39. Propuesta control ON-OFF

Este control se implemento en hardware utilizando tecnología de lógica programable y el lenguaje de programación VHDL.

El control se encarga de controlar el flujo de la solución madre, y tiene como entrada el volumen que debe dejar pasar por las válvulas, cada uno de los módulos utilizado para el diseño del sistema se describe a continuación.

REGISTROS

Se encarga de guardar los datos que vienen del puerto paralelo.



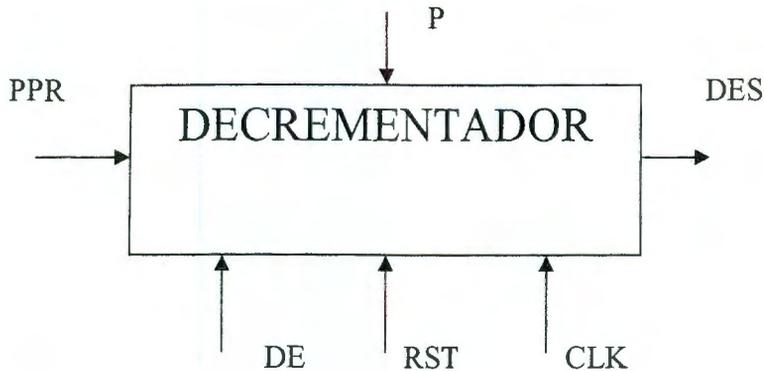
DESCRIPCION DE TERMINALES

Nombre	Ancho	Tipo	Descripción
RST	1	entrada	reset maestro.
CLK	1	entrada	reloj maestro.
PP	8	entrada	puerto paralelo.
C	1	entrada	maquina de control, (1)cargar dato, (0)mantener el dato.
PPR	8	salida	registro.

La programación de este modulo en VHDL se encuentra en el apéndice A

DECREMENTADOR

Se encarga de decrementar el valor que fue cargado de los registros hasta que llegue a cero.

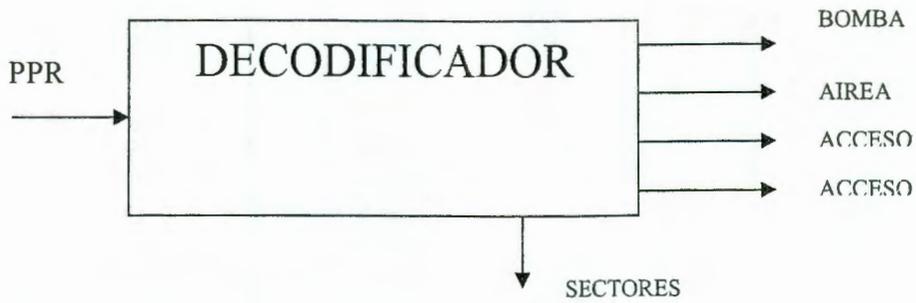


DESCRIPCION DE LAS TERMINALES

Nombre	Ancho	Descripción
RST	1	Reset maestro activo en bajo.
CLK	1	Reloj maestro de borde positivo.
PPR	8	Valor cargado de los registros.
P	1	viene del contador de pulso sensor
DE	2	(00) indica cuando cargar PPR de los registros.
DES	8	Salida del decrementador.

DECODIFICADOR

Se encarga de decodificar la información proveniente del registro para detectar cual accesorio se va a activar (bombas, válvulas etc).

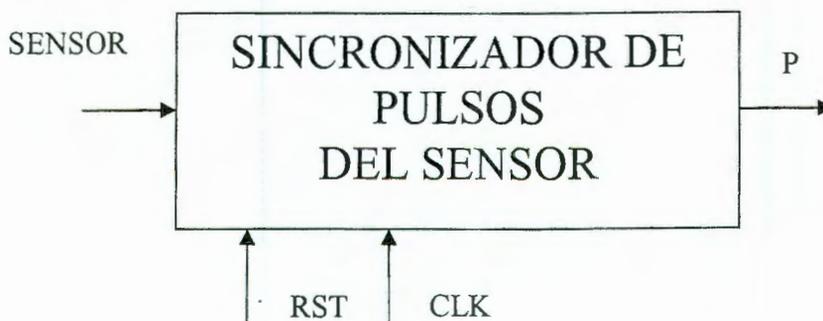


DESCRIPCION DE TERMINALES

Nombre	Ancho	Descripción
PPR	8	viene de los registros
BOMBA	1	va a la electrónica de potencia activa las bombas.
AIREADOR	1	va a la electrónica de potencia activa el aireador.
ACCESO1	1	va a la electrónica de potencia activa un accesorio.
ACCESO2	1	va a la electrónica de potencia activa un accesorio.
SALIDAS	16	va a la electrónica de potencia

SINCRONIZADOR DE PULSOS

Se encarga de sincronizar los pulsos del sensor de flujo con el reloj maestro



DESCRIPCION DE TERMINALES

-- Nombre	Ancho	Descripción
-- RST	1	reset maestro.
-- CLK	1	reloj maestro.
-- SENSOR	1	viene del sensor es asíncrona y de frecuencia diferente
-- P	1	va hacia el contador decrementador.

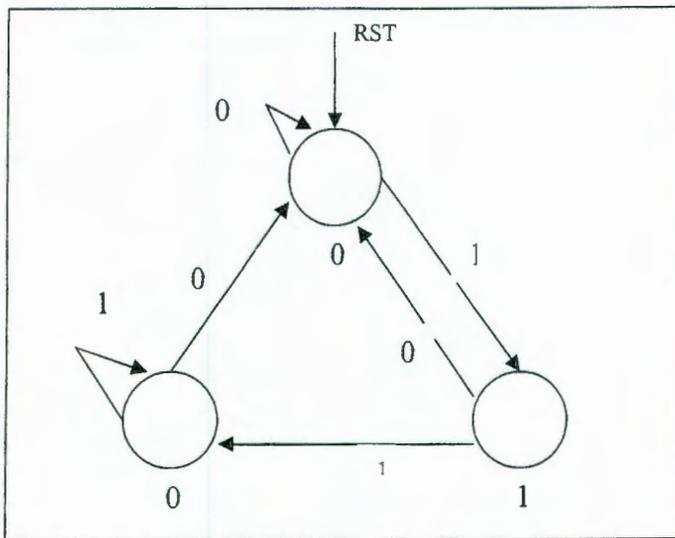
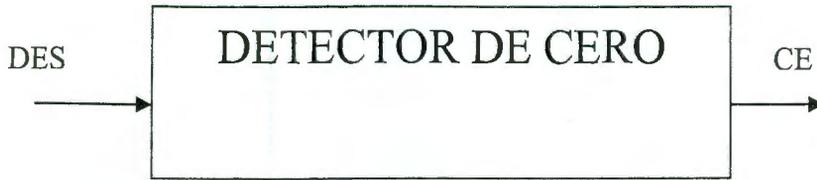


Figura 40 Máquina de estado sincronizador de pulso

DETECTOR DE CERO

Se encarga de detectar cuando el decrementador llegó a cero.

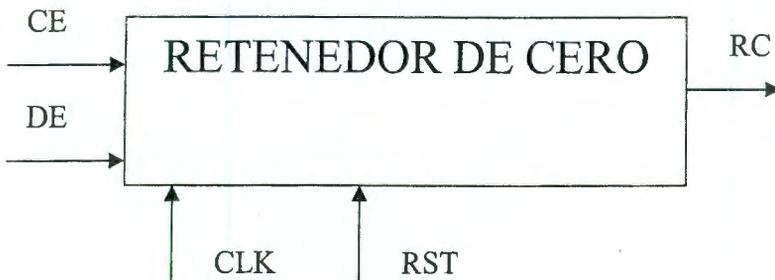


DESCRIPCION DE TERMINALES

-- Nombre	Ancho	Descripción
-- DES	7	vine del decrementador.
-- CE	1	indica cuando llego a cero el

RETENEDOR DE CERO

Se encarga de retener el cero que envía el decrementador.



DESCRIPCION DE TERMINALES

-- Nombre	Ancho	Descripción
-- RST	1	reset maestro.
-- CLK	1	entrada reloj maestro.
-- CE	1	viene del decrementador, es el cero que se retiene.
-- DE	2	viene de la máquina de control
-- RC	1	cero retenido que viene del decrementador

MAQUINA DE ESTADO

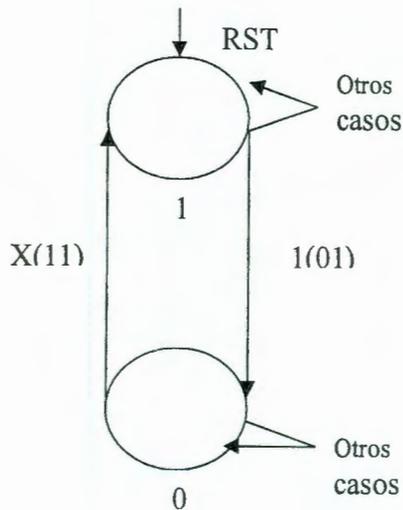
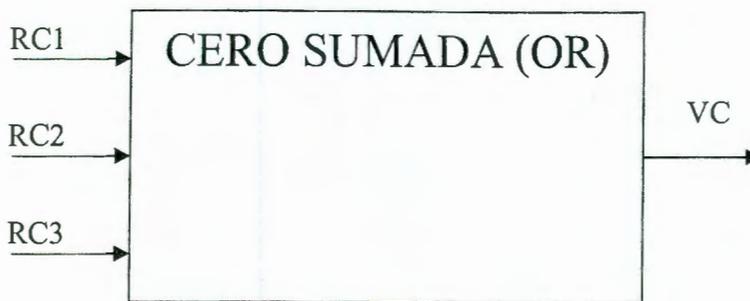


Figura 41 Maquina de estado retenedor de cero.

CERO SUMADAS (OR)

Se encarga de sumar las señales que vienen del retenedor de cero.



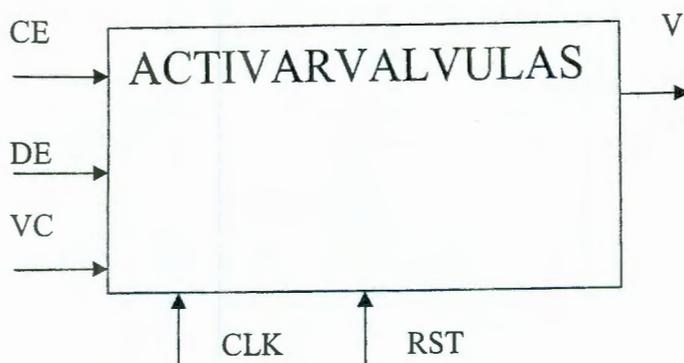
DESCRIPCION DEL PROTOTIPO

-- Nombre	Ancho	Descripción
-- RC1	1	viene del retenedor de cero

- RC2 1 viene del retenedor de cero
- RC1 1 viene del retenedor de cero
- VC 1 determina cuando todas las válvulas están apagadas.

ACTIVAR VALVULAS

Se encarga de activar y desactivar las válvulas del sistema de inyección.



DESCRIPCION DE TERMINALES

-- Nombre	Ancho	Descripción
-- RST	1	reset maestro.
-- CLK	1	reloj maestro.
-- VC	1	viene de todas las válvulas.
-- DE	2	viene de la máquina controlador.
-- CE	1	viene de el detector de cero.
-- V	1	va hacia la electrónica de potencia.

MAQUINA DE ESTADO

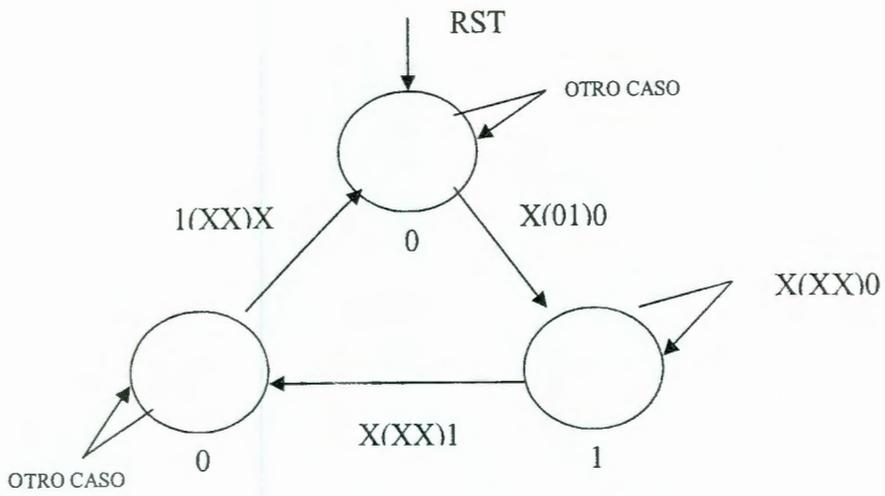
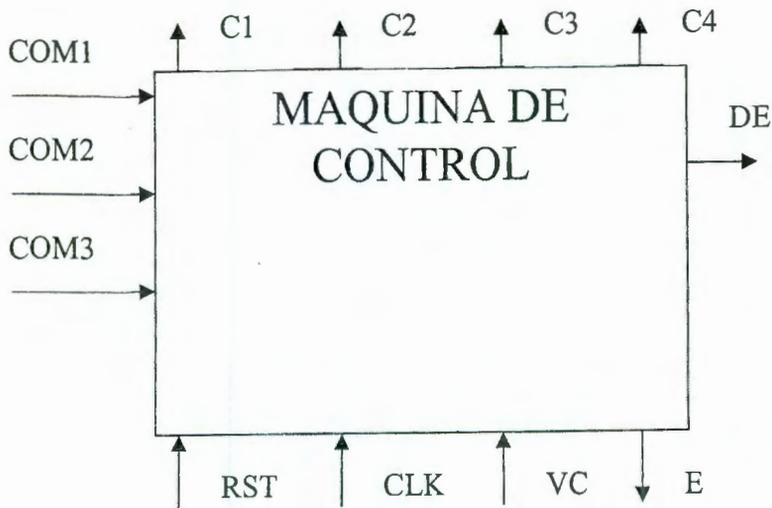


Figura 42 Máquina de estado activar válvulas

MAQUINA DE CONTROL

Se encarga controlar todo el proceso de control de flujo.



DESCRIPCION DE TERMINALES

-- Nombre	Ancho	Descripción
-- RST	1	reset maestro.
-- CLK	1	reloj maestro.
-- COM1	1	viene del puerto paralelo, (1) lee, (0) no leas.
-- COM2	1	viene del puerto paralelo, (1) lee, (0) no leas.
-- COM3	2	viene del puerto paralelo.
-- VC	1	viene de sumadordecero
-- E	1	va hacia la computadora, (1) ocupado, (0) no ocupado
-- C1	1	va hacia los registros, (1) carga, (0) mantén el valor.
-- C2	1	va hacia los registros, (1) carga, (0) mantén el valor.
-- C3	1	va hacia los registros, (1) carga, (0) mantén el valor.
-- C4	1	va hacia los registros, (1) carga, (0) mantén el valor.
-- DE	2	va hacia el decrementador.

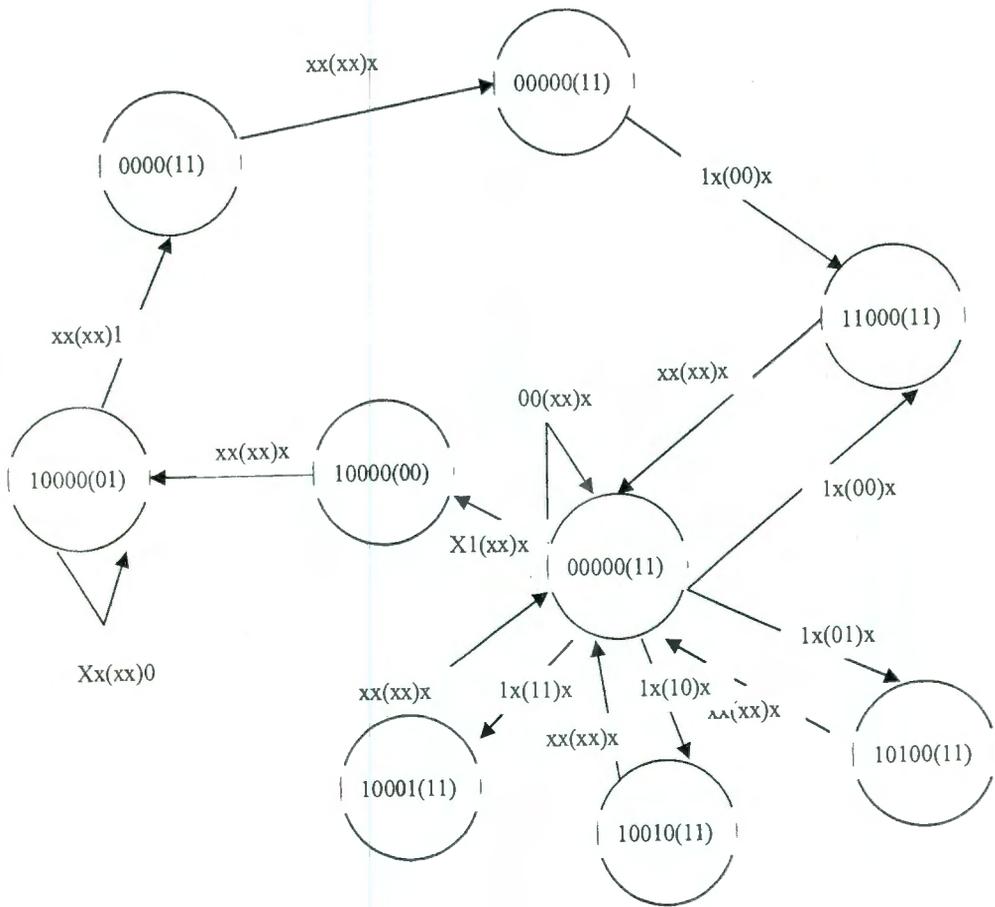


Figura 43 Máquina de estado control de flujo

4. Capitulo 4

4.1 Experimentos, análisis y conclusiones

4.1.1 Experimentos control difuso

Para comprobar el diseño del controlador difuso se realizaron varios experimentos utilizando la siguiente metodología; colocar una referencia de pH a la cual el operador quiere llegar; esta referencia se introduce al controlador, que arroja los resultados que posteriormente se aplican a la planta, se finaliza al verificar que el pH llego a la referencia.

En el primer experimento se colocó como entrada al controlador un pH de 8.19 del agua, una referencia de pH igual a 7.15 y una concentración madre del 2%, los resultados se muestran en la siguiente figura.

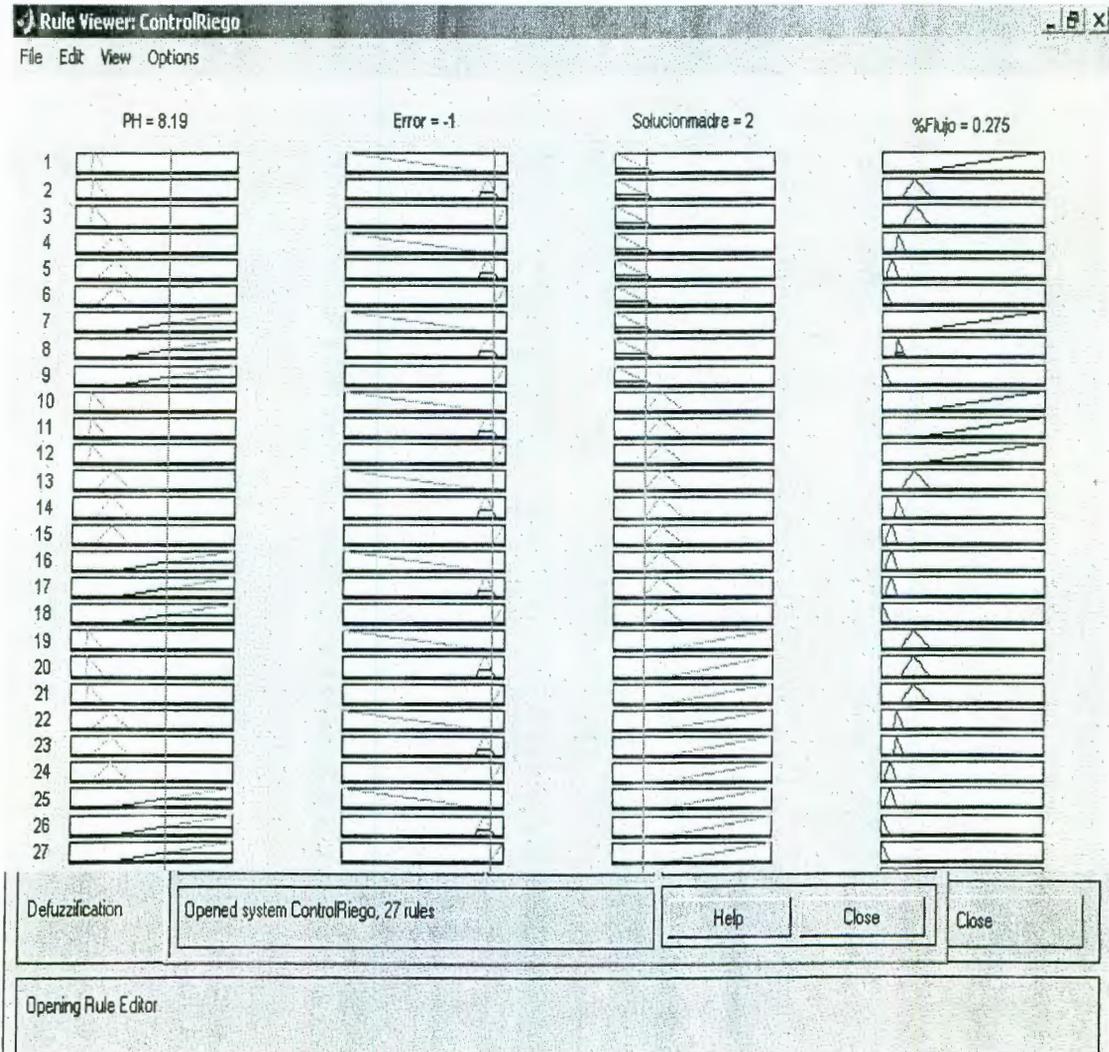


Figura 44. Resultados de la simulación 1

El resultado de la simulación es de 0.275 % del volumen de riego, que en este caso es de 10 litros, el 0.275% de este volumen equivale a 27.5 mililitros de solución madre al 2%, que al ser introducidos al volumen de 10 litros arroja como resultado un pH de 7.22.

Al observar los resultados podemos ver que el controlador difuso estima la cantidad de solución madre con su correspondiente concentración, para acercarnos al pH de referencia con un error inicial de 0.07, resultado que es satisfactorio si tenemos en cuenta que el requerimiento de un operador esta en el orden de un solo dígito después del punto decimal y recordando que el pH óptimo de una solución se encuentra entre 5.5 y 6.5.

Otras experimento se desarrollo con entradas de pH del agua igual a 7, pH deseado igual a 2 y una concentración de la solución madre de 2%, los resultados que arroja la simulación se muestra en la siguiente figura.

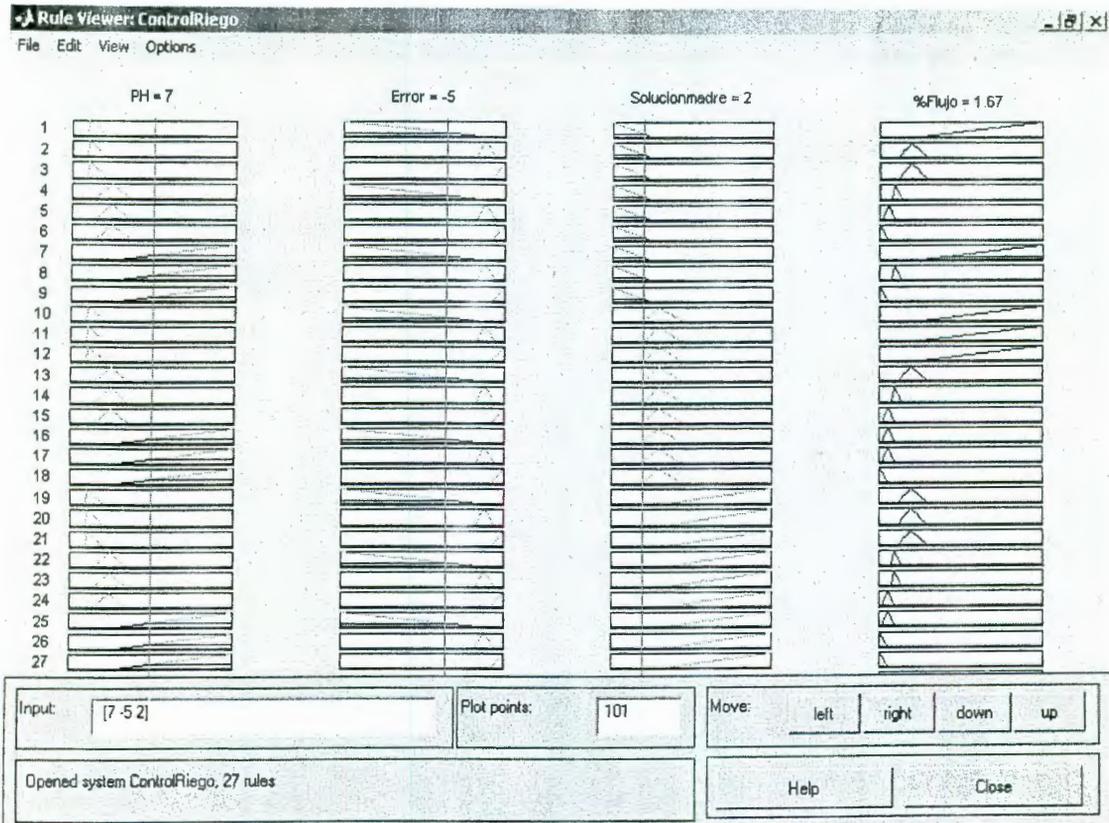


Figura 45 Resultados de la simulación 2

La respuesta es de 1.67% del flujo que equivale a 167 mililitros de solución madre al 2%, al inyectar esta cantidad de solución al agua nos resulto un pH de 2.1, con un error de 0.1, resultado satisfactorio, si tenemos en cuenta que el controlador opera en lazo cerrado y que hace iteraciones hasta llegar al valor de referencia.

4.1.2 Simulaciones del controlador ON-OFF de la válvula

A continuación se muestra cada una de la simulación de los bloques que componen el controlador; estas fueron desarrolladas en el software Active-vhdl, y nos permite simular antes de la implementación.

REGISTROS

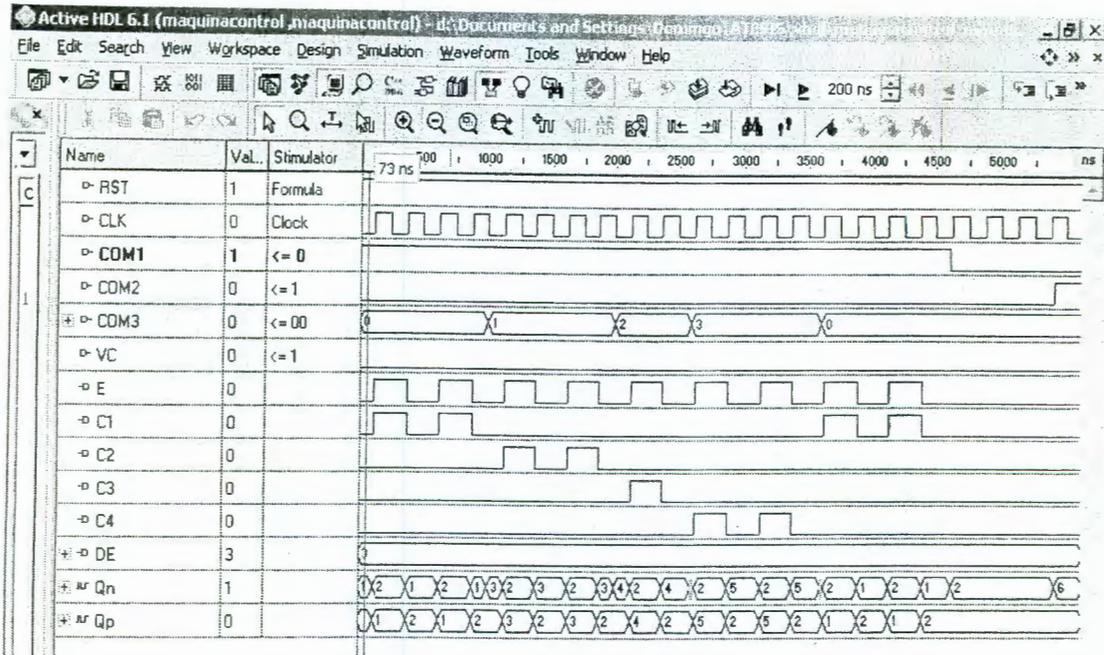


Figura 46. Resultado de la simulación registro

DECREMENTADOR

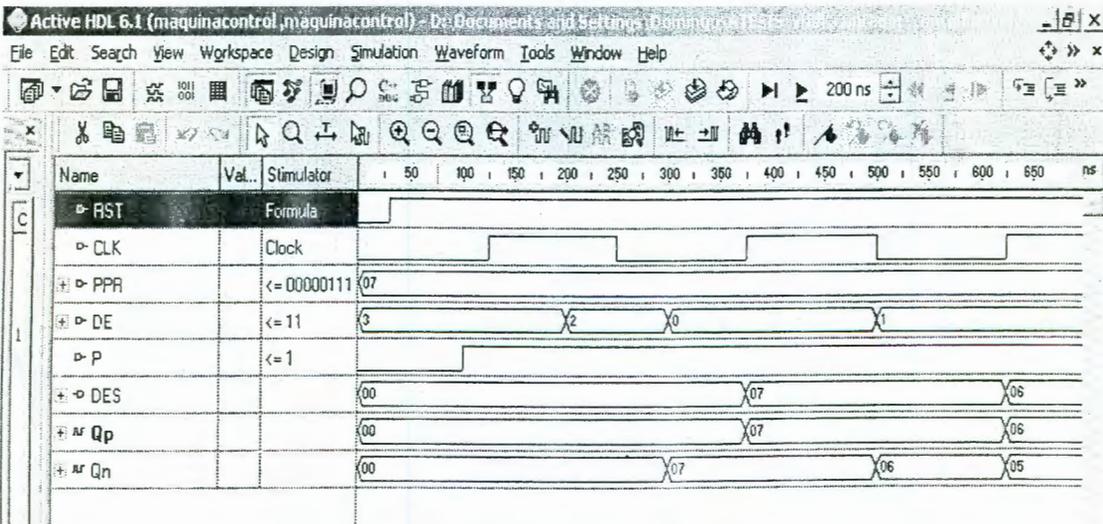


Figura 47. Resultado de la simulación decrementador

DECODIFICADOR

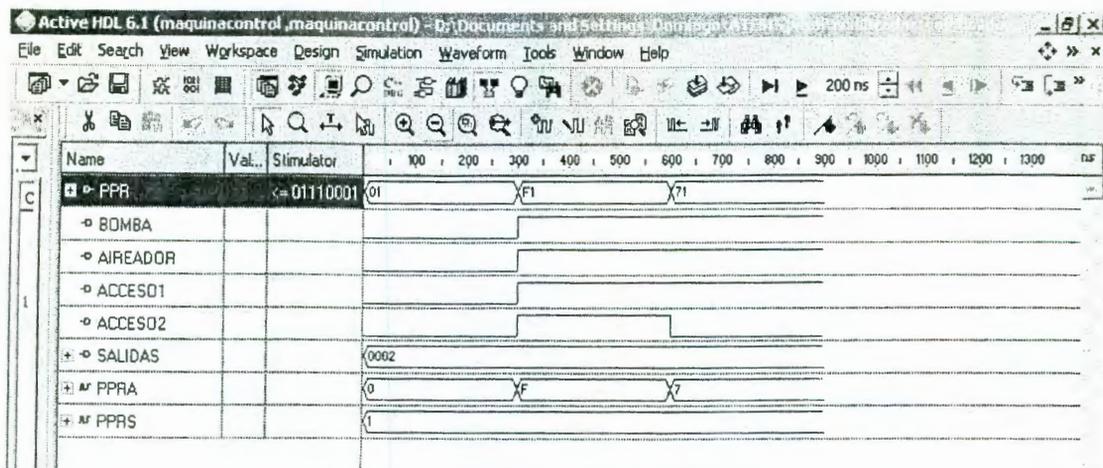


Figura 48. Resultado de la simulación decodificador

SINCRONIZADOR DE PULSOS

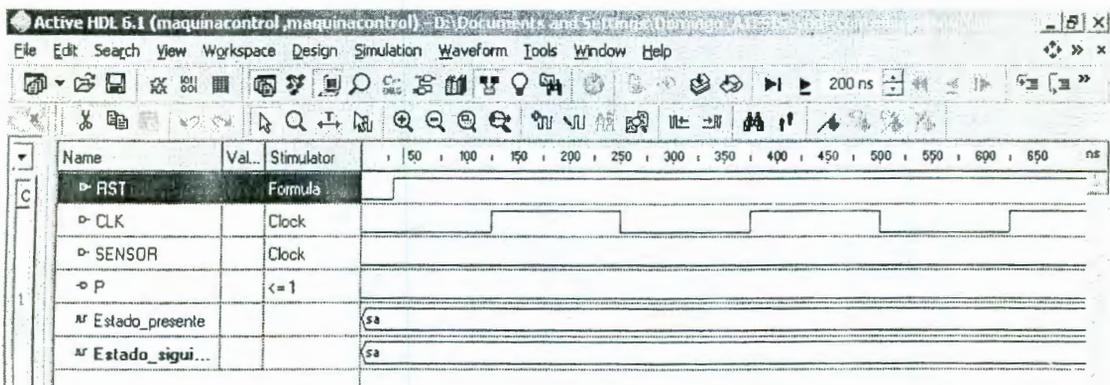


Figura 49. Resultado de la simulación sincronizador de pulsos

DETECTOR DE CERO

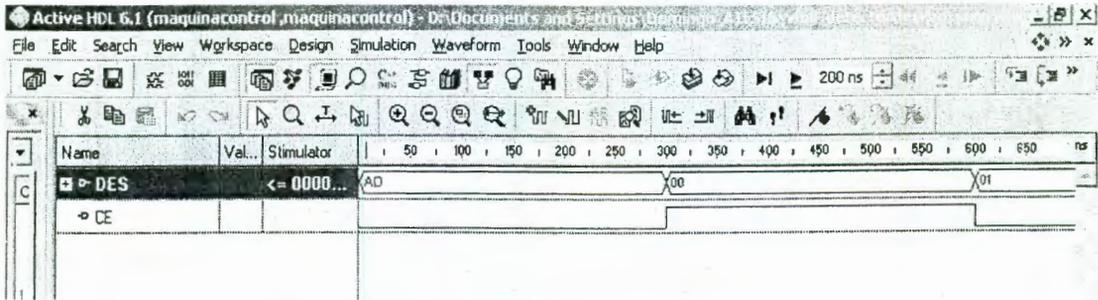


Figura 50. Resultado de la simulación detector de cero

RETENEDOR DE CERO

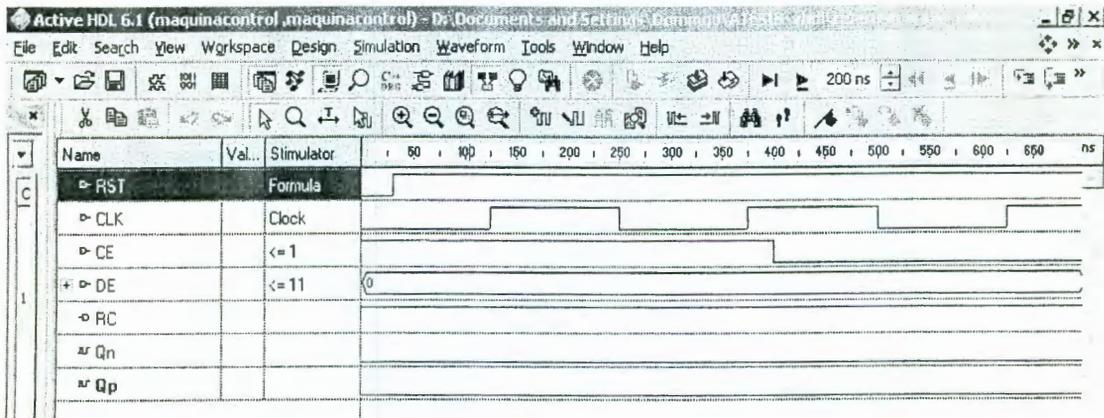


Figura 51. Resultado de la simulación retenedor de cero

CERO SUMADAS (OR)

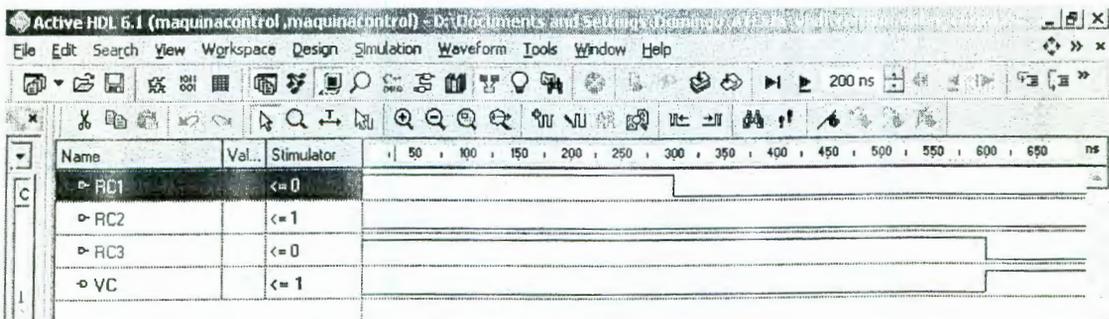


Figura 52. Resultado de la simulación cero sumadas

ACTIVAR VALVULAS

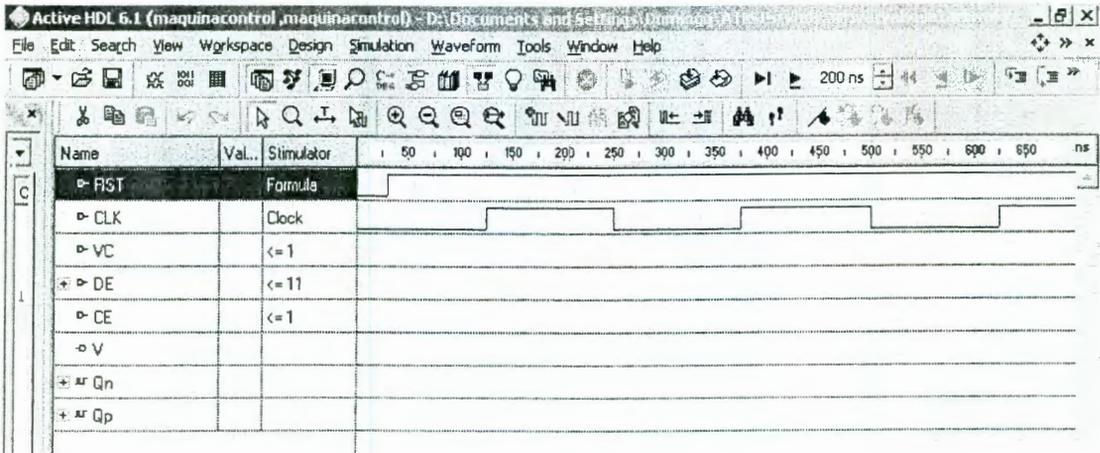


Figura 53. Resultado de la simulación activar válvulas

MÁQUINA DE CONTROL

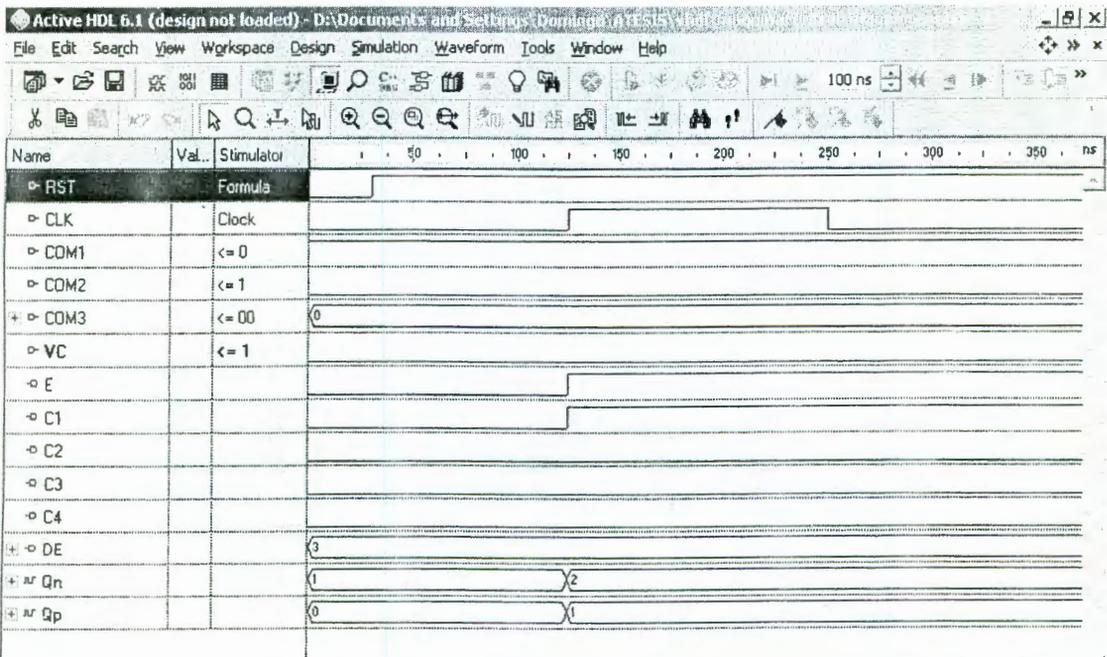


Figura 54. Resultado de la simulación máquina de control

El proceso general de control dio como resultado la siguiente simulación.

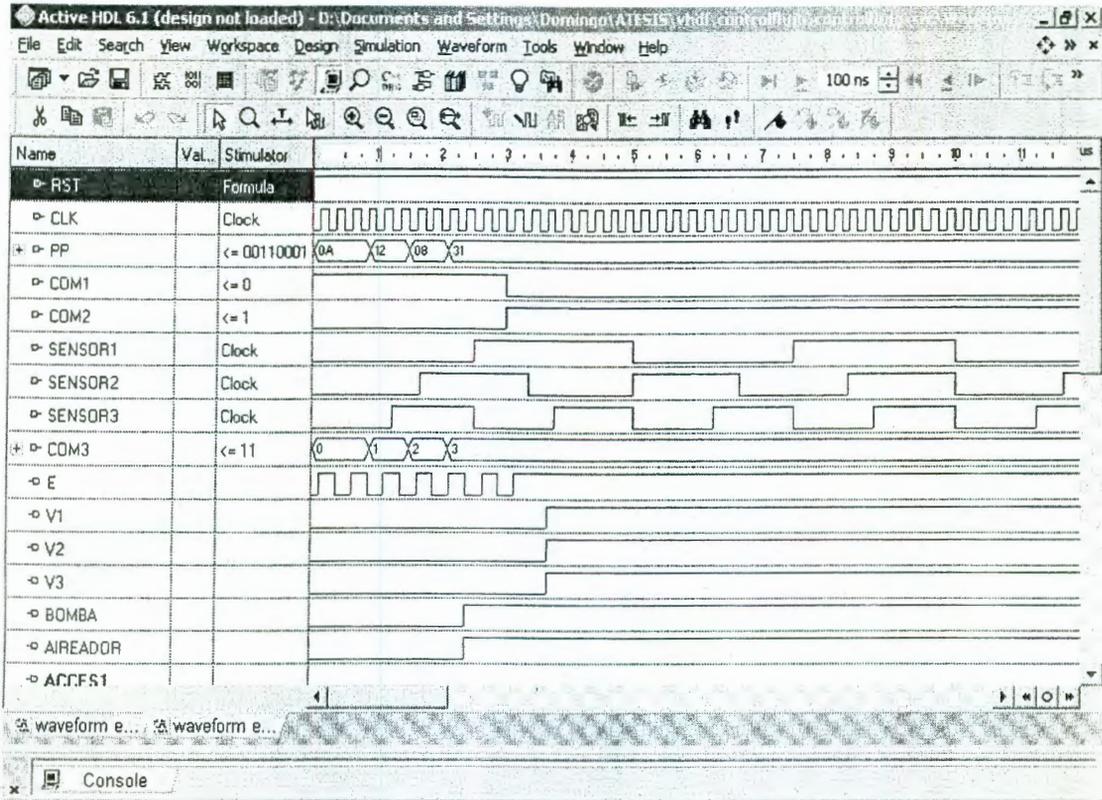


Figura 55. Resultado de la simulación general

Este diseño fue implementado en un CPLD (CY37000A160), dando resultados como lo muestra la figura 55. Se realizaron prueba con un sensor de flujo tipo turbina llegando a tener precisión de 0.144 milímetros lo cual nos indica que podemos hacer un control preciso de la inyección de solución mádre al agua de riego.

4.2 Conclusiones

Con este trabajo pretendemos contribuir a la generación de una independencia tecnológica en el área de sistemas de riego automatizados en México, que contribuya a reducir el consumo de agua y de fertilizantes que se utilizan en la producción bajo invernadero y que nos lleve a una agricultura sostenible, ya que México requiere mayores inversiones para generar más empleo, donde el agua no debe limitar la expansión económica; por eso es un desafío revertir la situación, modernizando la agricultura de riego para obtener en el futuro una mayor producción agrícola con menos cantidad de agua.

Podemos realizar una fertilización adecuada, llevándonos a tener ventajas como: dosificación racional de fertilizantes, ahorro considerable de agua, utilización de aguas de riego de baja calidad, nutrición optimizada del cultivo y por lo tanto aumento de rendimientos y calidad de frutos, control de la contaminación, mayor eficacia y rentabilidad de los fertilizantes y alternativas en la utilización de diversos tipos de fertilizantes.

El uso de tecnologías de programación de hardware (FPGAs y lenguajes de descripción de hardware), nos da la oportunidad de diseñar controladores que permitan satisfacer las necesidades de nuestros cultivos y que se adapten al grado de automatización requerido con costos accesibles para los pequeños y medianos productores.

Con este sistema podemos desarrollar la agricultura en tierras no aptas, como terrenos accidentados, pobres en nutrientes y con la existencia de aguas de mala calidad, debido a que podemos llevar a las plantas la cantidad precisa y suficiente de agua y nutrientes.

Con el controlador difuso propuesto en este trabajo se obtuvieron buenos resultados en la regulación del pH y la conductividad eléctrica, este nos permitió a su vez operar el sistema en diferentes condiciones, tales como concentración de solución madre diferente, aguas de riego con diferente pH y diferentes fertilizantes entre otros.

Una de las limitantes del equipo es no poder medir la cantidad de los iones presentes de cada elemento en la solución, lo que nos llevaría a programar la cantidad precisa de la solución madre de cada uno de los fertilizantes a diferencia de la solución madre del ácido, donde su inyección es controlada por el sistema de control.

4.3 Trabajos Futuros

Realizar algunos experimentos que nos permitan ajustar y optimizar el controlador difuso, sus conjuntos y acotaciones así como las reglas de operación.

Validar el sistema en varios cultivos que nos permitan observar y mejorar algunos inconvenientes que se puedan presentar en la operación y mantenimiento del equipo.

Implementar otros desarrollos al equipo que tengan en cuenta el pH y la conductividad eléctrica justo en el sustrato que soporta a la planta.

Sensar la cantidad de iones presentes en la solución para hacer un control más preciso de la inyección de cada uno de los elementos.

Aplicación de técnicas de control avanzado para la aplicación de fertilizantes.

Bibliografía

- [Aaslyng et al., 1999] Aaslyng, J. M., Rosenqvist, E., and Schmit, K. H. (1999). A sensor for microclimatic measurement for photosynthetically active radiation in a plant canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96(3):189–197.
- [ACI, 1995] ACI (1995). Reglamento para las construcciones de concreto estructural y comentarios. aci 318-95 y aci 318r-95.
- [AMPHI, 2002] AMPHI (2002). 3er congreso internacional de producción de hortalizas bajo invernadero.
- [Anderson, 1971] Anderson, T. (1971). New approaches to data-acquisition system design. *Analog Dialogue*, 5:45–47.
- [Armstrong and Gray, 2000] Armstrong, J. R. and Gray, F. G. (2000). *VHDL Design, Representation and Synthesis*. Prentice Hall, second edition.
- [Atkinson and Atkinson, 1990] Atkinson, L. and Atkinson, M. (1990). *Using C. QUE*.
- [Bailey and Richardson, 1990] Bailey, B. J. and Richardson, G. M. (1990). A rational approach to greenhouse design. *Acta Horticulturae*, 281:11–117.
- [Bakker, 1991] Bakker, J. (1991). Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables. *Wageningen Agricultural University*.
- [Bakker, 1995] Bakker, J. (1995). *GREENHOUSE CLIMATE CONTROL an integrated approach*, volume 1, chapter Physics of greenhouse climate, pages 125–159. Wageningen Pers, first edition.
- [Bakker et al., 1995] Bakker, J., Bot, G., Challa, H., and de Braak, N. V. (1995). *GREENHOUSE CLIMATE CONTROL: an integrated approach*. Wageningen Pers.
- [Bot, 1983] Bot, G. (1983). *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*. PhD thesis, Wageningen.
- [Boulard and Baille, 1993a] Boulard, T. and Baille, A. (1993a). A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65:145–157.
- [Boulard and Baille, 1993b] Boulard, T. and Baille, A. (1993b). A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65:145–157. 58

- [Boulard and Baille, 1995] Boulard, T. and Baille, A. (1995). Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61:37–48.
- [Boulard and Wang, 2000] Boulard, T. and Wang, S. (2000). Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and forest meteorology*, 100:25–34.
- [Castilla and Cols, 1990] Castilla, N. and Cols (1990). New greenhouse structures for the south of Spain. *Acta Horticulturae*, 281:153–158.
- [Castilla et al., 1988] Castilla, N., Lorenzo, P., Montero, J., and Ferreres, E. (1988). Alternative greenhouses for mild winter areas of Spain. *Acta Horticulturae*, 245:63–70.
- [Cate, 1989] Cate, A. U. T. (1989). Analysis and synthesis of greenhouse climate controllers. Technical report, Agricultural University, Wageningen, Netherlands.
- [CEA, 1998] CEA (1998). Resumen del estudio geohidrológico para la disponibilidad del agua en el acuífero regional del valle de Querétaro. Technical report, Reporte interno.
- [C.F.E., 1993] C.F.E. (1993). Manual de diseño de obras civiles, diseño por viento.
- [Challa, 1990] Challa (1990). Crop growth models for greenhouse climate control. *Theoretical production ecology*, pages 125–145.
- [Cox, 1997] Cox, S. W. (1997). *Measurement and Control in Agriculture*. Blackwell Science.
- [Cunba et al., 1992] Cunba, J. B., Ruano, A., and Couta, C. (1992). Identification of greenhouse climate dynamic models. *Computer in Agriculture*, 43:1–10.
- [De Sanden and Veen, 1992] de Sanden, P. V. and Veen, B. (1992). Effects of air humidity and nutrient solution concentration on growth, water potential and stomatal conductance of cucumber seedlings. *Scientia Horticulture*, 50:173–186.
- [DeFelice, 1998] DeFelice, T. P. (1998). *An Introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement*. Prentice Hall.
- [Dewey, 1999] Dewey, A. (1999). *Analysis and Design of Digital Systems with VHDL*. PWS.
- [Domínguez et al., 1998a] Domínguez, M., Ocampo, R., and Herrera, G. (1998a). La producción hortícola bajo invernadero, una alternativa a la escasez del agua. *XV Congreso Nacional de hidráulica*.

[Domínguez et al., 1998b] Domínguez, M., Ocampo, R., and Herrera, G. (1998b). La producción hortícola bajo invernadero, una alternativa a la escasez del agua. Technical report, Universidad Autónoma de Querétaro.

[Fang, 1994] Fang, W. (1994). Greenhouse cooling in subtropical regions. 59

[FAO, 1990] FAO (1990). Expert consultation on revision of fao methodologies for crop water requirements. Technical report.

[Fernandez and Bailey, 1992] Fernandez, J. and Bailey, B. (1992). Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural Forest and Meteorology*, 58:229–245.

[Hanan, 1998] Hanan, J. (1998). *GREENHOUSES: Advanced Technology for Protected Horticulture*, volume 1. CRC, first edition.

[Incropera and DeWitt, 1996] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P. (1996). *Fundamentos de transferencia de calor*. Prentice Hall, cuarta edición.

[INEGI, 1986] INEGI (1986). Anexo cartográfico. Technical report, INEGI.

[INEGI, 1995] INEGI (1995). El sector alimentario en México. Technical report, INEGI.

[Jensen and Collins, 1976] Jensen, M. and Collins, W. (1976). Hydroponic vegetable production. *Hort. Rev.*, 7:483–558.

A. Descripción de programas

A1. Programa en VHDL para el módulo activar válvula

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity activarvalvula is
    port (
        RST : in std_logic;
        CLK : in std_logic;
        VC : in std_logic;
        DE : in std_logic_vector (1 downto 0);
        CE : in std_logic;
        V : out std_logic
    );
end activarvalvula;

architecture cuerpoactivarvalvula of activarvalvula is
    signal Qn, Qp : std_logic_vector(1 downto 0);
begin
    process (VC,DE,CE,Qp)
    begin
        case Qp is
            when "00" => V <= '0';
                if ((DE = "01") and (CE = '0'))then
                    Qn <= "01";
                else Qn <= "00";
                end if;
            when "01" => V <= '1';
                if (CE = '0')then
                    Qn <= "01";
                else Qn <= "10";
                end if;
            when others => V <= '0';
                if (VC = '1')then
                    Qn <= "00";
                else Qn <= "10";
                end if;
        end case;
    end process;
end process;
```

```

process (RST,CLK)
begin
    if (RST = '0') then
        Qp <= "00";
    elsif(CLK'event and CLK = '1') then
        Qp <= Qn;
    end if;
end process;
end cuerpoactivarvalvula;

```

A2. Programa en VHDL para el módulo cerosumadas

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

```

```

entity cerosumadas is
    port(
        RC1 : in std_logic;
        RC2 : in std_logic;
        RC3 : in std_logic;
        VC : out std_logic
    );
end cerosumadas;

```

```

architecture cuerpocerosumadas of cerosumadas is
begin
    VC <= not (RC1 or RC2 or RC3);
end cuerpocerosumadas;

```

A3. Programa en VHDL para el módulo codificador

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

```

```

entity codificador is
    port(
        PPR : in std_logic_vector(7 downto 0);
        BOMBA : out std_logic;
        AIREADOR: out std_logic;
        ACCESO1 : out std_logic;
    );
end codificador;

```

```

        ACCESO2 : out std_logic;
        SALIDAS : out std_logic_vector(15 downto 0)
    );
end codificador;

architecture cuerpo codificador of codificador is
    signal PPRA,PPRS : std_logic_vector(3 downto 0);
begin
    process (PPRS,PPRA,PPR)
    begin
        case PPRS is
            when "0000" => SALIDAS <= "0000000000000001";
            when "0001" => SALIDAS <= "0000000000000010";
            when "0010" => SALIDAS <= "0000000000000100";
            when "0011" => SALIDAS <= "0000000000001000";
            when "0100" => SALIDAS <= "0000000000010000";
            when "0101" => SALIDAS <= "0000000000100000";
            when "0110" => SALIDAS <= "0000000001000000";
            when "0111" => SALIDAS <= "0000000010000000";
            when "1000" => SALIDAS <= "0000000100000000";
            when "1001" => SALIDAS <= "0000001000000000";
            when "1010" => SALIDAS <= "0000010000000000";
            when "1011" => SALIDAS <= "0000100000000000";

            when "1100" => SALIDAS <= "0001000000000000";
            when "1101" => SALIDAS <= "0010000000000000";
            when "1110" => SALIDAS <= "0100000000000000";
            when others => SALIDAS <= "1000000000000000";

        end case;
        PPRS <= PPR(3 downto 0);
        PPRA <= PPR(7 downto 4);
        BOMBA <= PPRA(0);
        AIREADOR <= PPRA(1);
        ACCESO1 <= PPRA(2);
        ACCESO2 <= PPRA(3);
    end process;
end cuerpo codificador;

```

A4. Programa en VHDL para el módulo contador

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use IEEE.std_logic_arith.all;

```

```

use IEEE.std_logic_unsigned.all;
entity contador is
    port(
        RST: in std_logic;
        CLK: in std_logic;
        PPR: in std_logic_vector(7 downto 0);
        DE : in std_logic_vector(2 downto 0);
        P : in Std_logic;
        DES: out std_logic_vector(7 downto 0)
    );
end contador;

architecture cuerpocontador of contador is
    signal Qp,Qn:std_logic_vector(7 downto 0);
begin
    process(DE,Qp,PPR,P)
    begin
        if (DE= "00") then
            Qn <= PPR;
        elsif ((DE = "01") and (P = '1')) then
            Qn <= Qp-1;
        else Qn <= Qp;
        end if;
        DES <= Qp;
    end process;

    process(RST,CLK,Qn)
    begin
        if (RST = '0') then
            Qp <= (others => '0');
        elsif (CLK'event and CLK = '1') then
            Qp <= Qn;
        end if;
    end process;
end cuerpocontador;

```

A5. Programa en VHDL para el módulo contador pulso

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity contadorpulsos is
    port (

```

```

    RST : in std_logic;
    CLK  : in std_logic;
    SENSOR : in std_logic;
    P    : out std_logic
        );
end contadorpulsos;

architecture cuerpocontadorpulsos of contadorpulsos is
type Estados is (SA , SB , SC);
signal Estado_presente, Estado_siguiete : Estados;
begin
    process(SENSOR, Estado_presente)
    begin
        case Estado_presente is
            when SA => P <= '0';
                if (SENSOR = '0') then
                    Estado_siguiete <= SA;
                else
                    Estado_siguiete <= SB;
                end if;
            when SB => P <= '1';
                if (SENSOR = '0') then
                    Estado_siguiete <= SA;
                else
                    Estado_siguiete <= SC;
                end if;
            when SC => P <= '0';
                if (SENSOR = '0') then
                    Estado_siguiete <= SA;
                else
                    Estado_siguiete <= SC;
                end if;
        end case;
    end process;

    process (RST,CLK)
    begin
        if (RST = '0') then
            Estado_presente <= SA;
        elsif (CLK'event and CLK = '1') then
            Estado_Presente <= Estado_siguiete;
        end if;
    end process;
end cuerpocontadorpulsos;

```

A6. Programa en VHDL para el módulo detector de cero

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity cero is
    port(
        DES : in std_logic_vector(7 downto 0);
        CE : out std_logic
    );
end cero;
architecture cuerpocero of cero is
begin

    CE <= not(DES(7) or DES(6) or DES(5) or DES(4) or DES(3)
        or DES(2) or DES(1) or DES(0));

end cuerpocero;
```

A7. Programa en VHDL para el módulo máquina control

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity maquinacontrol is
    port (
        RST      : in std_logic;
        CLK      : in std_logic;
        COM1     : in std_logic;
        COM2     : in std_logic;
        COM3     : in std_logic_vector(1 downto 0);
        VC       : in std_logic;
        E        : out std_logic;
        C1,C2,C3,C4 : out std_logic;
        DE       : out std_logic_vector(1 downto 0)
    );
```

```
end maquinacontrol;
```

```
architecture cuerpomaquinacontrol of maquinacontrol is
```

```
signal Qn, Qp : std_logic_vector(3 downto 0);
```

```
begin
```

```
process (COM1,COM2,COM3,VC,Qp)
```

```
begin
```

```
case Qp is
```

```
when "0000" =>E <= '0';
```

```
    C1 <= '0';
```

```
        C2 <= '0';
```

```
        C3 <= '0';
```

```
        C4 <= '0';
```

```
        DE <= "11";
```

```
    if((COM1 = '1') and (COM3 = "00"))then
```

```
        Qn <= "0001";
```

```
    else Qn <= "0000";
```

```
    end if;
```

```
when "0001" =>E <= '1';
```

```
    C1 <= '1';
```

```
        C2 <= '0';
```

```
        C3 <= '0';
```

```
        C4 <= '0';
```

```
        DE <= "11";
```

```
        Qn <= "0010";
```

```
when "0010" =>E <= '0';
```

```
    C1 <= '0';
```

```
        C2 <= '0';
```

```
        C3 <= '0';
```

```
        C4 <= '0';
```

```
        DE <= "11";
```

```
    if((COM1 = '1') and (COM3 = "00"))then
```

```
        Qn <= "0001";
```

```
    elsif((COM1 = '1') and (COM3 = "01"))then
```

```
        Qn <= "0011";
```

```
    elsif((COM1 = '1') and (COM3 = "10"))then
```

```
        Qn <= "0100";
```

```
    elsif((COM1 = '1') and (COM3 = "11"))then
```

```
        Qn <= "0101";
```

```
    elsif(COM2 = '1')then
```

```
        Qn <= "0110";
```

```
    else Qn <= "0010";
```

```
    end if;
```

```
when "0011" => E <= '1';
```

```
    C1 <= '0';
```

```
        C2 <= '1';
```

```
        C3 <= '0';
```

```
        C4 <= '0';
```

```

        DE <= "11";
        Qn <= "0010";

when "0100" => E <= '1';
    C1 <= '0';
        C2 <= '0';
        C3 <= '1';
        C4 <= '0';
        DE <= "11";
        Qn <= "0010";

when "0101" => E <= '1';
    C1 <= '0';
        C2 <= '0';
        C3 <= '0';
        C4 <= '1';
        DE <= "11";
        Qn <= "0010";

when "0110" => E <= '1';
    C1 <= '0';
        C2 <= '0';
        C3 <= '0';
        C4 <= '0';
        DE <= "00";
        Qn <= "0111";

when "0111" => E <= '1';
    C1 <= '0';
        C2 <= '0';
        C3 <= '0';
        C4 <= '0';
        DE <= "01";
        if(VC = '1')then
            Qn <= "1000";
        else Qn <= "0111";
        end if;

when others => E <= '0';
    C1 <= '0';
        C2 <= '0';
        C3 <= '0';
        C4 <= '0';
        DE <= "11";
        Qn <= "0000";

end case;
end process;
process (RST,CLK)
begin
    if (RST = '0') then
        Qp <= "0000";
    elsif(CLK'event and CLK = '1') then

```

```

        Qp <= Qn;
    end if;
end process;
end cuerpomaquinacontrol;

```

A8. Programa en VHDL para el módulo registro

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity registro is
    port(
        RST : in std_logic;
        CLK : in std_logic;
        C   : in std_logic;
        PP  : in std_logic_vector(7 downto 0);
        PPR : out std_logic_vector(7 downto 0)
    );
end registro;
architecture cuerporegistro of registro is
    signal Qp,Qn : std_logic_vector(7 downto 0);
begin
    process(C,PP,Qp)
    begin
        if (C = '1') then
            Qn <= PP;
        else Qn <= Qp;
        end if;
        PPR <= Qp;
    end process;
    process (RST, CLK)
    begin
        if (RST = '0') then
            Qp <= (others => '0');
        elsif (CLK'event and CLK = '1') then
            Qp <= Qn;
        end if;
    end process;
end cuerporegistro;

```

A9. Programa en VHDL para el módulo retenedor cero

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity retenedorcero is
    port(
        RST : in std_logic;
        CLK : in std_logic;
        CE : in std_logic;
        DE : in std_logic_vector(1 downto 0);
        RC : out std_logic
    );
end retenedorcero;

architecture cuerporetenedorcero of retenedorcero is
    signal Qn,Qp: std_logic;
begin
    process (Qp,CE,DE)
    begin
        case Qp is
            when '0' => RC <= '1';
                if (CE = '1' and DE = "01")then
                    Qn <= '1';
                else Qn <= '0';
                end if;

            when others => RC <= '0';
                if (DE = "11") then
                    Qn <= '0';
                else Qn <= '1';
                end if;

        end case;
    end process;
    process (RST,CLK)
    begin
        if (RST = '0') then
            Qp <= '0';
        elsif (CLK'event and CLK = '1') then
            Qp <= Qn;
        end if;
    end process;
end cuerporetenedorcero;
```

A10. Programa en VHDL para el módulo control flujo

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity controlflujo is
    port(
        RST          : in std_logic;
        CLK          : in std_logic;
        PP           : in std_logic_vector(7downto 0);
        COM1,COM2    : in std_logic;
        SENSOR1      : in std_logic;
        SENSOR2      : in std_logic;
        SENSOR3      : in std_logic;
        COM3         : in std_logic_vector(1 downto 0);
        E            : out std_logic;
        V1,V2,V3     : out std_logic;
        BOMBA        : out std_logic;
        AIREADOR     : out std_logic;
        ACCES1,ACCES2 : out std_logic;
        SALIDAS      : out std_logic_vector(15 downto 0)

    );
end controlflujo;

architecture cuerpocontrolflujo of controlflujo is
-----
component maquinacontrol
    port (
        RST    : in std_logic;
        CLK    : in std_logic;
        COM1   : in std_logic;
        COM2   : in std_logic;
        COM3   : in std_logic_vector(1downto 0);
        VC     : in std_logic;
        E      : out std_logic;
        C1,C2,C3,C4 : out std_logic;
        DE     : out std_logic_vector(1 downto 0)

    );
end component;
-----
component registro
```

```

    port(
      RST : in std_logic;
      CLK : in std_logic;
      C   : in std_logic;
      PP  : in std_logic_vector(7 downto 0);
      PPR : out std_logic_vector(7 downto 0)

    );
end component;
-----
component contadorpulsos
  port (
    RST  : in std_logic;
    CLK  : in std_logic;
    SENSOR : in std_logic;
    P    : out std_logic
  );
end component;
-----
component contador
  port(
    RST: in std_logic;
    CLK: in std_logic;
    PPR: in std_logic_vector(7 downto 0);
    DE : in std_logic_vector(1 downto 0);
    P  : in Std_logic;
    DES: out std_logic_vector(7 downto 0)
  );
end component;
-----
component codificador
  port(
    PPR  : in std_logic_vector(7 downto 0);
    BOMBA : out std_logic;
    AIREADOR: out std_logic;
    ACCESO1 : out std_logic;
    ACCESO2 : out std_logic;
    SALIDAS : out std_logic_vector(15 downto 0)
  );
end component;
-----
component cero
  port(
    DES : in std_logic_vector(7 downto 0);
    CE  : out std_logic
  );
end component;
-----
component retenedorcero
  port(
    RST : in std_logic;

```

```

    CLK : in std_logic;
    CE : in std_logic;
    DE : in std_logic_vector(1 downto 0);
    RC : out std_logic
  );
end component;
-----
component cerosumadas
  port(
    RC1 : in std_logic;
    RC2 : in std_logic;
    RC3 : in std_logic;
    VC : out std_logic
  );
end component;
-----
component activarvalvula
  port (
    RST : in std_logic;
    CLK : in std_logic;
    VC : in std_logic;
    DE : in std_logic_vector (1 downto 0);
    CE : in std_logic;
    V : out std_logic
  );
end component;
-----
signal HPPR1,HPPR2,HPPR3,HPPR4 : std_logic_vector(7 downto 0);
signal HDES1,HDES2,HDES3 : std_logic_vector(7 downto 0);
signal HC1,HC2,HC3,HC4,HP1,HP2,HP3 : std_logic;
signal HDE : std_logic_vector(1 downto 0);
signal HCE1,HCE2,HCE3 : std_logic;
signal HRC1,HRC2,HRC3 : std_logic;
signal HVC : std_logic;
begin

Maquina : maquinacontrol port map (RST,CLK,COM1,COM2,COM3,HVC,E,
HC1,HC2,HC3,HC4,HDE);
Registro1: registro port map (RST,CLK,HC1,PP,HPPR1);
Registro2: registro port map (RST,CLK,HC2,PP,HPPR2);
Registro3: registro port map (RST,CLK,HC3,PP,HPPR3);
Registro4: registro port map (RST,CLK,HC4,PP,HPPR4);
Pulsos1 : contadorpulsos port map (RST,CLK,SENSOR1,HP1);
Pulsos2 : contadorpulsos port map (RST,CLK,SENSOR2,HP2);
Pulsos3 : contadorpulsos port map (RST,CLK,SENSOR3,HP3);
Contador1: contador port map (RST,CLK,HPPR1,HDE,HP1,HDES1);
Contador2: contador port map (RST,CLK,HPPR2,HDE,HP2,HDES2);
Contador3: contador port map (RST,CLK,HPPR3,HDE,HP3,HDES3);
Codificador1: codificador port map (HPPR4,BOMBA,AIREADOR,ACCES1,

```

ACCES2,SALIDAS);

Detector1: cero port map (HDES1,HCE1);
Detector2: cero port map (HDES2,HCE2);
Detector3: cero port map (HDES3,HCE3);
Retenedor1: retenedorcero port map (RST,CLK,HCE1,HDE,HRC1);
Retenedor2: retenedorcero port map (RST,CLK,HCE2,HDE,HRC2);
Retenedor3: retenedorcero port map (RST,CLK,HCE3,HDE,HRC3);
Sumacero : cerosumadas port map (HRC1,HRC2,HRC3,HVC);
Activacion1 : activarvalvula port map (RST,CLK,HVC,HDE,HCE1,V1);
Activacion2 : activarvalvula port map (RST,CLK,HVC,HDE,HCE2,V2);
Activacion3 : activarvalvula port map (RST,CLK,HVC,HDE,HCE3,V3);

end cuerpocontrolflujo;

B. Artículo sobre la investigación

CONTROL PID APLICADO A UN SISTEMA DE RIEGO HIDROPÓNICO PARA INVERNADERO

Domingo j. Gómez- Meléndez, Rodrigo Castañeda-Miranda, Ruth Rico-García
Sergio Cervantes-Pérez

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de
las campanas s/n, Querétaro, Querétaro México

RESUMEN

Un control preciso de la nutrición del cultivo en un invernadero puede llevar a un incremento significativo de la producción y calidad de la cosecha (Howard M, 1992.). En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema inteligente que se encarga de la inyección de fertilizantes en un sistema de riego y de la administración del riego de varios cultivos; el sistema se basa en un control PID para lograr una mejora en la precisión de la inyección de los nutrientes respecto a controladores clásicos utilizados comúnmente en los sistemas comerciales de inyección de fertilizantes. En los cultivos hidropónicos, todos los elementos esenciales se suministran a las plantas disolviendo las sales fertilizantes en agua; por esto el sistema se encarga de aplicar una solución concentrada de nutrientes a un volumen de agua que luego se inyectara al cultivo. El sistema de control de inyección de fertilizantes está basado en un control de lazo cerrado, donde las variables que mide y se retroalimentan son el pH y la conductividad eléctrica (EC); a través de los algoritmos de control se logra el ajuste de la soluciones de nutrientes si tenemos en cuenta la relación directa entre la cantidad de sales disueltas en la solución y el valor de la conductividad eléctrica de esta.

INTRODUCCION:

El riego localizado tiene muchas ventajas en comparación al sistema de riego tradicional con relación al ahorro de agua y al ahorro de nutrientes (Domínguez A, 1996); en las últimas décadas se ha detectado que la mayor competitividad de este sistema se basan en su utilización como una forma de dosificación racional de fertilizantes (Cadahia C, 2000).

Este sistema es hoy uno de los mejores métodos para realizar una fertilización adecuada, llevándonos a tener ventajas como ahorro de agua, utilización de agua con baja calidad, dosificación de fertilizantes, aumento de rendimiento y calidad de los frutos entre otras.

Se trata de calcular las aportaciones de nutrientes a las necesidades de las plantas y a los contenidos del suelo de forma que el balance este ajustado. Es sobre este concepto en donde se basa la evolución del consumo de fertilizantes, consumo que a nivel mundial ha venido creciendo (Cadahia C, 2000).

Por todo se considera a la fertirrigación como una de las operaciones más importantes de la agricultura. Con una fertirrigación adecuada la calidad y la cantidad de la cosechas pueden aumentar considerablemente (Domínguez A, 1996). La fertirrigación óptima es un proceso complejo; la cantidad de agua y de nutrientes debe ser suficiente para no detener el proceso

de fotosíntesis y crecimiento. Sin embargo, si la cantidad de agua y de nutrientes es excesiva, el crecimiento vegetal puede llegar a ser excesivo produciendo un producto dañado entre otras consecuencias(Howard M, 1992.).

Debido a esto se hace necesario el empleo de técnicas de control inteligente que implica el uso de herramientas de gran alcance, basadas en el desarrollo de hardware o de software.

El presente trabajo trata sobre la aplicación de estas técnicas al control de la fertirrigación, como también de la administración del sistema de riego de varios cultivos, donde podemos controlar la cantidad de agua de la irrigación, la cantidad de nutrientes basada en tiempo o volumen, así mismo podemos irrigar diversos sectores a diferentes horas durante el día con diversas cantidades de agua y de nutrientes de tal forma que nos podamos ajustar a los diferentes cultivos, tamaños y condiciones climáticas entre otros factores.

Estas técnicas de control nos permiten un control de PH y conductividad mas preciso con respecto a estrategias clásicas. Cuando es necesario, un programa específico realiza una corrección del pH por la introducción de un ácido o de una base en el agua de la irrigación. El control del pH se basa en entrada múltiple del sensor y un punto de ajuste especificado, mientras que el control de la conductividad se relaciona directamente con el nivel de la fertilización.

DESCRIPCION DEL SISTEMA:

El equipo es un complejo sistema de control y administración del riego para cultivos ya sean estos bajo invernadero o a cielo abierto, se trata de un control distribuido en el cual cada cultivo tiene su propio sistema de adquisición y control; la información adquirida en cada cultivo se procesa generando señales de control que se transmiten al control central por vía inalámbrica; el control central procesa esta señal generando señales de control para el mezclador y la administración de recursos compartidos como bombas válvulas etc (figura 1).

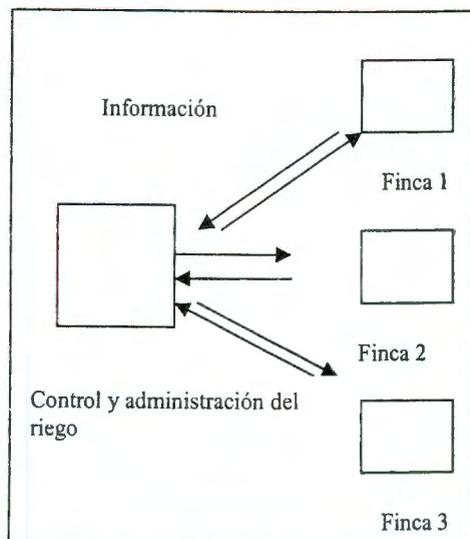


Figura 1 Esquema de la transferencia de la información

El sistema tiene la capacidad de controlar hasta 64 sectores; cada sector tiene su propia adquisición de señales como radiación, presión en tuberías, filtros etc, además cuenta con un control de filtros auto lavables, control de apertura y cierre de válvulas y detección de falla en el sistema hidráulico; para el desarrollo de Esta parte del sistema se utilizo un un sensor de radiación o de humedad en el suelo y un microcontrolador motorola MC68HC908QY4 con las siguientes características :

- Memoria FLASH 4096 bytes
- 128 bytes (RAM)
- 2-canales, 16-bit (TIM)
- 4-canales, 8-bit analogico-convertidor digital (ADC)
- 5-V y 3-V voltaje de operación
- 8-MHz operacion del bus interno a 5 V, 4-MHz at 3 V.

Las señales de control que cada sector necesita enviarle al control central se envía utilizando un equipo de radio frecuencia de LINK TECHNOLOGIES de la serie LR con las siguientes características :

- Velocidad de transferencia 10,000 bps.
- 1 km aproximado de radio
- No necesita compone externo.

El control central controla el pH, la CE y administra el riego de cada cultivo según la información obtenida de cada una de estos; teniendo en cuenta variables como acidez, conductividad, humedad y radiación solar entre otras. El regulador de Fertigation es capaz de ejecutar las funciones siguientes:

- Control de la irrigación por tiempo o por el volumen.
- control del pH
- control de la conductividad
- control de la fertilización

- ajuste de la irrigación debido a la radiación solar
 - ajuste de la irrigación debido a la humedad del suelo.
 - corrección manual
 - control del mezclador
 - control del filtro
 - control del abastecimiento de agua
 - control principal de la bomba
 - control de la finca a regar.
 - comunicación vía inalámbrica
 - función de alarma.
- entre otras.

Equipo hidráulico:

consta de válvulas, cinco tanques, venturis bomba de aire, bomba centrífuga, sensores de pH y CE (Figura 2) .

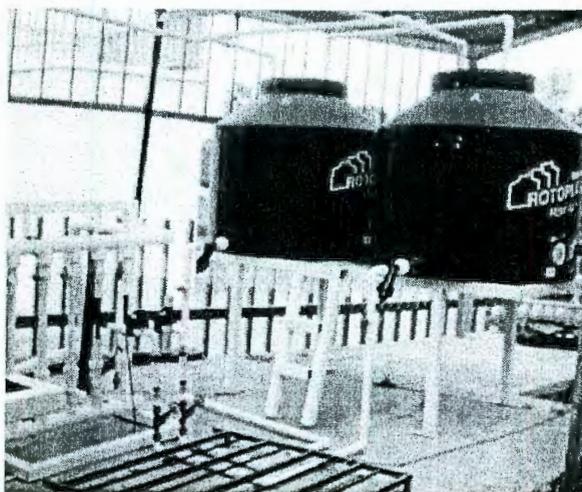


Figura 2 Equipo Hidráulico

Control de la irrigación: El regulador de fertirrigación puede controlar hasta 64 fincas (una válvula por finca) El tiempo de riego es proporcionado ya sea por un programa donde se fija la hora en la cual comienza y termina el riego así como el día y el mes del año como también puede ser proporcionado de acuerdo a la radiación acumulada o la humedad del suelo; un punto de ajuste de la radiación solar se puede establecer para comenzar cada programa o de nivel de humedad; el nivel de energía acumulado debido a la radiación solar se puede utilizar como condición que comienza para cada programa o el nivel de humedad en el suelo. Cada programa de la irrigación tiene un nivel de prioridad, esto debido a que el sistema hidráulico no tiene la capacidad de irrigar todas las fincas al mismo; este control puede utilizar hasta 5 tanques del fertilizante; Cada programa de la irrigación puede especificar el porcentaje para cada tipo de fertilizante; la fertilización se hace de acuerdo con el control de la conductividad.

Control de la conductividad: se utiliza automáticamente para controlar la fertilización, una lectura se puede obtener con dos sensores de conductividad; un sensor primario y uno secundario para confirmar. El control de la conductividad se hace preestableciendo el valor de referencia de la conductividad, específico para cada programa de la irrigación; Además la referencia de la conductividad tiene un mínimo compensado y compensación del máximo. Cuando la conductividad no está dentro de la gama especificada por un período del tiempo o la diferencia entre los 2 sensores de la conductividad es mayor que la diferencia especificada, el control de la conductividad generará un alarmar de la conductividad.

Control de pH: Es necesario corregir y mantener el pH del agua de la irrigación dentro de los valores especificados (mínimos y valores compensados máximos). La corrección del pH se hace de acuerdo con valor de referencia del pH para cada programa de la irrigación. el control del pH se hace con dos sensores del pH el segundo para la seguridad y la exactitud adicionales. cuando el pH no está dentro del rango especificado por un período del tiempo o la diferencia entre los 2 sensores del pH (principales y secundarios)(Figura 3) es mayor que la diferencia especificada el control del pH generará un alarmar del Ph El control del pH y CE se realiza usando un sistema de control de lazo cerrado. El sistema de control esta basado en un controlador fuzzy-PID (proporcional, integral y derivado). El papel de este regulador es mantener el sistema con un valor de pH y CE dentro de los rango programados. El control del pH y de la EC se hace por separado; Los componentes son como sigue:

- los tanque (aditivo) de la solución que contiene un ácido, una base o un fertilizante
- las válvula para introducir la solución aditiva, estas estan accionadas por el regulador de PID
- Regulador de PID
- la fuente de agua de la entrada
- la bomba para el agua de bombeo del sistema a las fincas.

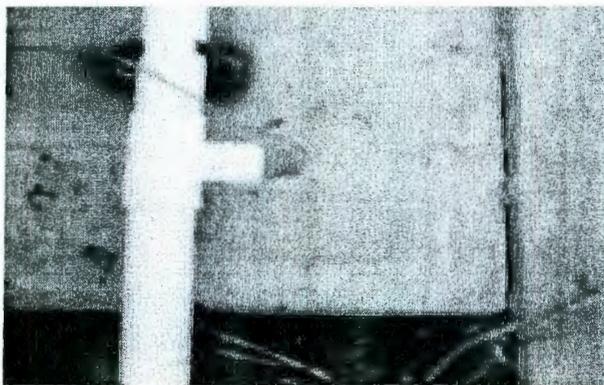


Figura 3 Sensor de PH

El control del pH implica un ajuste complejo; la relación entre el reactivo agregado y el proceso es logarítmica. Hay la posibilidad para introducir errores grandes en el proceso debido al excedente que dosifica o bajo dosificación del reactivo que crea un efecto de la oscilación. El control de PID se puede utilizar para reducir la posibilidad de llegar más allá y reducir las oscilaciones grandes en el proceso. creando una señal proporcional al error , al integral el tiempo del error , al índice del cambio del error.

El control proporcional, integral, y derivado (PID) se puede utilizar individualmente (control típicamente proporcional solamente) o en la combinación tal como PI o PID. La forma de cómo se utilicen estas acciones del control depende de los requisitos del proceso. El punto de ajuste (valor de referencia) es el valor deseado de la medida. El error se define como la diferencia entre el punto de ajuste y la medida: $\text{Error} = \text{referencia} - \text{medida}$.

Las descripciones y las definiciones de las acciones del control individual son como sigue: ACCIÓN PROPORCIONAL (p): El modo continuo más simple del control es el control proporcional, la salida del regulador es proporcional a la magnitud del error. El aumento de la sensibilidad del regulador (aumento del regulador) puede reducir el estado constante compensado pero solamente con procesos lentos. Por esta razón el control proporcional por sí mismo se utiliza sobre todo para los procesos lentos que pueden tolerar el alto aumento del regulador; Por otro lado la alta acción del control

puede lanzar al proceso a una oscilación. ACCIÓN INTEGRAL (i): Para eliminar las oscilación y hacer un control mas preciso se introduce conjuntamente con el control proporcional (PI). El control integral produce la acción del control proporcional a la integral del tiempo del error. Mientras existe el error (desviación constante del punto de ajuste), el término integral continuará aumentando, agregando más acción del control, conduciendo el error hacia cero. ACCIÓN DERIVADA (d): Con la acción derivada, la salida de regulador es proporcional al índice del cambio del error; la acción derivada puede compensar para los cambios en el variable de proceso (medida) y es particularmente bueno para lentamente mover procesos. Cuando un cambio ocurre en el proceso la acción derivada hace el aumento del regulador.

EI CONTROL DEL MEZCLADOR

Los 5 tanques tiene agitador; un agitador se puede activar en un tanque específico antes de la selección del tanque por un programa de la irrigación y su objetivo es agitar y disolver los nutrientes de la solución madre; la pre-agitación ocurre solamente cuando se fija el tiempo de la irrigación. Durante el programa de la irrigación, los agitadores se pueden parar(Figura 4)



Figura 4. Agitador

CONTROL del FILTRO tiene la capacidad para comprobar y para limpiar automáticamente los filtros controlados por programas de la filtro-limpieza.

ALARMA el regulador de Fertirrigacion tiene la capacidad para supervisar y para generar un alarmer para las condiciones siguientes .

- sensor de la conductividad fuera de la referencia
- sensor del pH fuera de la referencia
- filtros sucios
- Cuando el nivel es bajo en los tanques del fertilizante y del acido El sistema tiene la capacidad para registrar los acontecimientos y los valores ocurridos más importantes de diversos parámetros que puedan ofrecer una descripción de la evolución del proceso entero; Los valores más importantes son: - número y período de cada activación del programa
- limpieza del filtro
- promedios de pH y de conductividad
- acumulaciones
- modificaciones a la radiación preestablecida de los valores de la fertilización
- alarma

LITERATURA CITADA:

- Howard M, 1992. Cultivos Hidropónicos. Ediciones Mundi-Prensa, cuarta edición.
- Domínguez A, 1996. Fertirrigacion Ediciones Mundi-Prensa, segunda edición.
- Cadahia C, 2000. Fertirrigacion Cultivos Hortícola y Ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa, segunda edición.