



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Control difuso para el sistema de riego de un invernadero

TESIS

Que para obtener el GRADO de:

Maestría en Ciencias
Línea terminal en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

ADRIANA ROJAS MOLINA

Dirigida por:
M.en C. Alfonso Noriega Ponce

Querétaro, Qro., Mayo de 2003

No. Adq. H 68192

No. Título _____

Clas TS

629.8

R741C

EJ.1



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias

Control difuso para un sistema de riego en invernadero

TESIS

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

Presenta:
Adriana Rojas Molina

Dirigido por:
M. en C. Alfonso Noriega Ponce

SINODALES

M. en C. Alfonso Noriega Ponce
Presidente

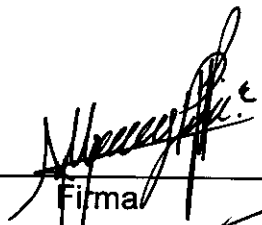
Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Secretario

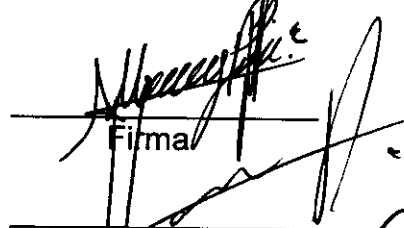
Dr. Vladimir Rauch Sitar
Vocal

Dr. Eusebio Ventura Ramos
Suplente

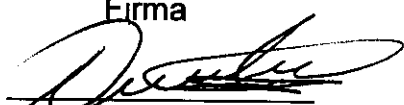
M. en C. José Juan Rivera Ramírez
Suplente



Ing. Jorge Martínez Carrillo
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Sergio Quesada Aldana
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo 2003
México

RESUMEN

Durante los últimos 50 años se ha incrementado considerablemente la productividad agrícola en el mundo, lo que ha permitido eliminar el peligro de escasez de alimentos y hambrunas de masas. La gestión del agua, además de las técnicas de la revolución verde que abarcan la aplicación de fertilizantes y la utilización de variedades de gran rendimiento ha contribuido de manera muy importante a incrementar dicha productividad – también conocida como “producción por gota”- alrededor del 100 por ciento desde 1960.

Para obtener una mayor productividad del agua se ha requerido, y se requiere todavía, modificar la gestión de los cultivos, el suelo y el agua. Las posibles estrategias para realizar esta gestión son: la selección de cultivos y la utilización de métodos mejorados de siembra. Dentro de ésta última se encuentra el empleo de invernaderos hidropónicos. En este tipo de invernaderos es muy importante mantener el balance de sustancias químicas en la solución de irrigación que proporciona los nutrientes necesarios a la planta, así como un correcto suministro de dicha solución, por ejemplo, el malfuncionamiento en el sistema de riego puede resultar en estrés hídrico, rápido marchitamiento y muerte de la planta. En este trabajo se presenta un control difuso para el sistema de riego en un invernadero hidropónico. La idea fundamental consiste en incorporar dentro del sistema de control los conocimientos que los expertos analizan en el momento de tomar la decisión sobre cuánto y cuándo regar los cultivos. Existen varios trabajos sobre este tema, la mayoría de ellos utilizan el modelo de transpiración de la canopía derivada de la ecuación Penman-Monteith para determinar las necesidades hídricas de los cultivos, algunos efectúan una estimación de parámetros para evitar el uso de las variables climáticas que se involucran en dicha ecuación; otros utilizan la ecuación original pero requieren de equipamiento que los hace costosos para implementarlos a gran escala en nuestra región. El objetivo fundamental de este trabajo es diseñar un control difuso para un sistema de riego en un invernadero hidropónico de bajo costo que permita:

- tener un manejo óptimo del agua de riego, evitando las pérdidas de solución nutritiva por drenaje, percolación o escorrentía, el estrés hídrico en las plantas y la fracturación del fruto y
- satisfacer las necesidades hídricas de la planta favoreciendo su desarrollo y la producción.

El control difuso propuesto emplea la ecuación 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, por lo que el sistema de riego así obtenido se considera muy adecuado desde el punto de vista de la productividad del agua.

(Palabras clave: hidropónico, estrés hídrico, control difuso, transpiración)

SUMMARY

Over the last half-century, significant productivity gains in agriculture have eliminated the threat of food shortages and mass starvation. Water management, and the Green Revolution technologies based on fertilizer application and the use of high yield varieties have greatly improved this productivity – or output of “produce per drop”- by an estimated 100% since 1960.

Improving water productivity has required, and requires, more effective management of water, crops and soil. The strategies to make this possible are the selection of appropriate crops and the use of improved planting methods. The latter includes the use of hydroponic greenhouses, which require a strict control to maintain the balance of chemicals in the irrigation solution that furnishes the necessary nutrients to the plant, as well as a correct supply of solution; for example, a malfunction in the irrigation system could result in hydric stress, quick wilting and finally death of the plant. This work presents a fuzzy control for the irrigation system in a hydroponic greenhouse. The main proposal consists in the incorporation in the control system of the knowledge used by the experts to make the decision on how much and when supply water to the crop. There are several works on this topic, most of them use a transpiration canopy model derived from the Penman-Monteith equation to establish the hydric requirements of the crop, some of them carry out a parameter estimation to avoid the use of the climatic variables involved in the equation; other works use the original equation but require equipment that increase the cost of implementation in our region.

The main objective of this work is to design a low cost fuzzy control for an irrigation system in a hydroponic greenhouse to:

- Obtain an optimal handling of the irrigation water, avoiding the losses of nutritive solution via drainage, percolation or run-off, the hydric stress in crop and fruit break-up and
- Satisfy the hydric requirements of the crop favoring its development and production.

The proposed fuzzy control employs the FAO-Penman-Monteith equation and temperature and humidity data acquired in real time, to assess crop water requirements during the daytime and incorporates expert knowledge in the management of the hydroponic greenhouse. The irrigation system thus obtained is considered adequate from the viewpoint of water productivity.

(Keywords: hydroponic, hydric stress, fuzzy control, transpiration)

AGRADECIMIENTOS

- A **CONACYT** por el otorgamiento de la beca de estudios de maestría que me fue asignada, así como el apoyo financiero otorgado para presentar este trabajo.
- A la **Universidad Autónoma de Querétaro** por el apoyo brindado durante mis estudios.
- A mi asesor porque a pesar de la tardía de este trabajo tuvo la paciencia para apoyarme y lograr que esto culminará.
- Al Ing. **Joel Ramírez Tavares** por permitirme poner en práctica el control difuso presentado en este trabajo en el invernadero El Pueblito.
- Al Agr. **Jesús Ramírez Romero** ya que sin sus valiosos comentarios y conocimientos no hubiera sido posible realizar este trabajo.
- A **CIATEQ** por el apoyo recibido durante mi formación.

En especial a

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Dr. Vladimir Rauch Sitar
Dr. Eusebio Ventura Ramos
M. C. José Juan Rivera Ramírez

Por la revisión y comentarios que realizaron a éste trabajo.

A mis padres

Índice General

I ANTECEDENTES	6
1 Introducción	7
1.1 Importancia	7
1.2 Propósito	12
2 Estado del arte	14
2.1 Desarrollo histórico	14
3 Planteamiento del problema	20
3.1 Necesidades de agua de los cultivos bajo invernadero	20
3.1.1 Transpiración	20
3.1.2 Relación entre absorción y transpiración	21
3.1.3 Evaporación	21
3.1.4 Consumo de agua por las plantas	21
3.1.5 Riego	22
3.2 Programación de riego	22
3.2.1 Medición del contenido de agua en el suelo	22
3.2.2 Medición del estado hídrico del cultivo	23
3.2.3 Estimación de la evapotranspiración	24
3.2.4 Modelos para determinar la ETc (evapotranspiración) en un invernadero	29
3.2.5 Programas de riego de cultivos hortícolas en invernadero	33
II SOLUCION DEL PROBLEMA	39
4 Propuestas de solución para programación del riego	40
4.1 Método de programación de riego	40
4.2 Cálculo de la evapotranspiración y riego a aplicar	41
4.2.1 Radiación neta en la superficie del cultivo, R_n	42
4.2.2 Flujo termal del suelo	43
4.2.3 Déficit de presión de vapor ($e_a - e_d$)	43
4.2.4 Curva presión del vapor (Δ)	43
4.2.5 Constante psicrométrica (γ)	44

4.3	Calculo del riego a aplicar	45
5	Propuesta de ajuste del riego	48
5.1	Control difuso	48
5.1.1	Estructura de un controlador difuso	49
5.1.2	Base de reglas	52
5.1.3	Base de datos	54
5.1.4	Máquina de inferencias	54
5.1.5	Procedimiento de defusificación	55
III	RESULTADOS	57
6	Implementación del sistema de control difuso	58
6.1	Control difuso propuesto	58
6.2	Resultados	64
7	Conclusiones y trabajo futuro	70
7.1	Conclusiones	70
7.2	Trabajo futuro	71
IV	ANEXO	73
7.3	Artículo	74
7.4	Formula FAO Penman-Monteith	75
7.5	Notación	90
7.6	Tabla de abreviaturas	91

Índice de Figuras

1.1	Disponibilidad relativa de agua superficial, CNA. Cálculo del índice de disponibilidad, como cociente entre la oferta real y el total de las extracciones y volúmenes reservados para aguas abajo. (Escasa < 1.4, Baja entre 1.4 y 3, Media entre 3 y 9 y Alta >9)	8
1.2	Disponibilidad relativa de agua subterránea. Para su cálculo se ha empleado el mismo procedimiento detallado en la figura 1.1	9
1.3	Superficie potencial de riego y porcentaje de dicha superficie bajo riego por entidad federativa	10
1.4	Superficie cosechada respecto a la superficie total bajo riego.	11
4.1	Comparación de evapotranspiración obtenida aplicando metodo FAO-Penman-Monteith y FAO-Radiación (Makkink)	45
4.2	Clasificación de las variables de temperatura y edad de las plantas	46
4.3	Relación temperatura-edad del cultivo- % de ajuste en riego	47
5.1	Estructura de un sistema difuso basado en el conocimiento	50
5.2	Procedimientos del control de riego	56
6.1	Tabla de riego programado	59
6.2	Función de membresía para la variable temperatura	61
6.3	Función de membresía para la variable edad	62
6.4	Función de membresía para la variable de gasto	63
6.5	Módulos de programa riegofuzz.vi	64
6.6	Interfaz de labview	65
6.7	Parte de código de labview que incluye programas de matlab	65
6.8	Tabla de datos para el día 20 de Enero	67
6.9	Valores de temperatura y humedad del invernadero de El Pueblito del 20 de Enero	67
6.10	Comparación entre riego programado, riego ajustado y riego aplicado	68
6.11	Cantidad de agua distribuida en 10 plantas de muestra durante 9:00 a 16:00 hrs.	69

Prefacio

El propósito principal de este trabajo es desarrollar e implementar un control difuso de bajo costo que efectúe una administración óptima de un sistema de riego en invernaderos hidropónicos, en comparación con los métodos de riego programados por tiempo.

Los expertos han observado que el requerimiento de agua de los cultivos esta relacionado directamente con la edad del cultivo, de manera que incluso existen tablas que indican la cantidad de agua que se debe proporcionar a un cultivo específico de determinada edad. Posteriormente se efectúa una observación sobre el estado físico de los cultivos, es decir si éste tiene un aspecto decaído (marchito) entonces es el momento de regar, se ha observado que los cultivos presentan este aspecto cuando la temperatura es elevada, lo cual ocurre a mediodía. De esta forma se puede efectuar el ajuste de riego programado, según la edad de la planta y el cultivo específico, con la observación de su aspecto físico. Sin embargo este método no garantiza que realmente se cubran las necesidades hídricas del cultivo y difícilmente se hace una gestión adecuada del agua. En este trabajo se presenta un control difuso que permite calcular los requerimientos hídricos de los cultivos con base en el conocimiento de expertos.

El trabajo se divide en tres partes, la primera parte esta dividida en tres capítulos que presenta los antecedentes que contienen el objetivo, justificación y propósito de este trabajo; posteriormente en la parte II se analizan las ideas fundamentales que constituyen el control difuso propuesto mostrando con detalle los conocimientos aportados por los expertos y la propuesta de ajuste de riego con base en un controlador difuso. Finalmente en la parte III se presentan los resultados obtenidos en los experimentos llevados a cabo en un invernadero y las conclusiones.

En el capítulo 1, presenta la importancia y propósito del trabajo y se plantean las ideas fundamentales de una gestión adecuada del agua para uso agropecuario. La relevancia del trabajo permite establecer su aplicación en el entorno agropecuario de nuestra región.

En el capítulo 2, presenta el desarrollo histórico o estado del arte sobre los diversos métodos que se emplean para determinar la cantidad de agua que requieren los cultivos, analizando sus ventajas y desventajas.

En el capítulo 3, se explica a detalle el método basado en el cálculo de la evapotranspiración para determinar la cantidad de agua aplicar en los cultivos, efectuando una extrapolación de los resultados obtenido a invernaderos hidropónicos.

A continuación, en la segunda parte, se desarrolla la propuesta de solución, en el cual una vez determinado, con base en datos climáticos históricos, la cantidad de agua a aplicar; se pretende efectuar un ajuste de dicha cantidad adecuándola a las condiciones

en tiempo real de un invernadero. Dentro de esta parte en el capítulo 4 se efectúan los cálculos para obtener la cantidad de riego aplicar y en el capítulo 5 se analizan los elementos que constituyen un controlador difuso.

Por último en la parte III de trabajo en el capítulo 6 se muestra el controlador difuso obtenido a partir del diseño obtenido del capítulo 5 y los resultados obtenidos al aplicar dicho controlador en un invernadero hidropónico. En el capítulo 7 se muestran las conclusiones y los anexos que incluyen la presentación de un artículo publicado con este tema en particular.

Parte I
ANTECEDENTES

Capítulo 1

Introducción

1.1 Importancia

De acuerdo con la FAO [FAO, 1990] los recursos hídricos de México se encuentran repartidos de forma desigual en el territorio mexicano, lo que da lugar a variaciones significativas de las disponibilidades de agua según la regiones. Por ejemplo, se puede observar que el 50 por ciento del escurrimiento superficial se genera en el sureste en tan solo el 20% del territorio nacional, mientras que el norte, que abarca el 30 por ciento del territorio, genera sólo el 4% de dicho escurrimiento. Ver figura 1.1

En lo relativo a las aguas subterráneas, se han identificado en el país 459 acuíferos, para los que se estima una extracción total de 24 km³ anuales a través de aproximadamente 140 000 aprovechamientos subterráneos. Se han detectado problemas de sobreexplotación en 80 acuíferos ubicados principalmente en las regiones noroeste, norte y centro-oeste. La disponibilidad relativa de agua subterránea y la ubicación de los acuíferos sobreexplotados se muestra en la figura 1.2

En lo que respecta a lagos y embalses, en México se han construido presas y obras de almacenamiento con una capacidad cercana a los 180 km³, equivalente a cerca del 44 por ciento del escurrimiento anual. En las regiones áridas las presas se utilizan principalmente para riego y en las zonas húmedas para la generación de energía eléctrica. Los lagos y lagunas del país representan una capacidad de almacenamiento de 14 km³.

Se estima que en 1998 la extracción total fue de 198 km³. De éstos 79.4 km³ se destinaron a uso consuntivo, distribuido de la siguiente manera: agrícola 76 %, doméstico 17%, industrial 5 % ,otros usos (acuicultura intensiva) 2%. Los 119 km³ restantes se utilizaron con fines hidroeléctricos.

Como se puede observar, el porcentaje más grande del agua que se destina a usos consuntivos, es canalizado al sector agrícola. La superficie potencial de riego en función de la aptitud de la tierra es de 13.5 millones de ha, que se reducen a 9.8 millones de ha si se tiene en cuenta la disponibilidad de agua. Dicha superficie se muestra por entidad



Figura 1.1: Disponibilidad relativa de agua superficial, CNA. Cálculo del índice de disponibilidad, como cociente entre la oferta real y el total de las extracciones y volúmenes reservados para aguas abajo. (Escasa < 1.4 , Baja entre 1.4 y 3, Media entre 3 y 9 y Alta >9)



Figura 1.2: Disponibilidad relativa de agua subterránea. Para su cálculo se ha empleado el mismo procedimiento detallado en la figura 1.1



Figura 1.3: Superficie potencial de riego y porcentaje de dicha superficie bajo riego por entidad federativa

federativa en la figura 1.3, también se puede observar que la mayor parte de las tierras subutilizadas se localizan en el trópico húmedo.

El desarrollo del sector del riego en México, durante los últimos años, no se ha concentrado en incrementar la superficie de riego sino en optimizar el uso de la superficie existente. En la figura 1.4 se muestra los porcentajes de superficie cosechada respecto a la superficie total bajo riego, es importante destacar que más de una cuarta parte de la superficie bajo riego se concentra en Sinaloa (15 por ciento) y Sonora (11 por ciento) [Aquastat, 2000]

En cuanto al origen del agua de riego, tradicionalmente los grandes sistemas de riego han estado constituidos por embalses o derivaciones de ríos y canales de gravedad, empleándose como técnica de riego el riego por superficie. Iniciada la utilización de las aguas subterráneas, sólo cuando se establecieron zonas de veda de asignaciones y de volúmenes de extracción (especialmente en la zona central del país: Guanajuato, Querétaro, Distrito Federal, etc.) *debido a la sobreexplotación de acuíferos, se empezaron a modificar los sistemas de riego y a mejorar su eficiencia* (zonas centro,



Figura 1.4: Superficie cosechada respecto a la superficie total bajo riego.

noroeste y norte), mientras que en aquellas donde el agua es más abundante esta mejora se ha producido de una forma más lenta.

De los 61,2 km³ de agua extraídos en 1995 para uso agrícola, el 67 por ciento provenía de aguas superficiales y el 33 por ciento de aguas subterráneas. Se estima que realmente sólo se utilizaban 40 km³ por año en riego, constituyendo los 21,2 km³ restantes, pérdidas en conducciones y evaporación. [Aquastat, 2000]

Las mejoras en la eficiencia del riego, también ha repercutido en las técnicas para llevarlo a cabo. En este contexto la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural del Gobierno de México impulsa un programa de ferti-irrigación, que tiene como *objetivo incrementar la productividad de las superficies bajo riego y reducir el consumo de agua.*

Según la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) la población mundial aumentará para el año 2030, de 6 mil millones de habitantes que somos actualmente a 8 100 millones, por lo supone también que la demanda de alimentos aumentará, aunque en un ritmo menos acelerado. Por lo que anticipa que los países en desarrollo deberían estar en condiciones de aumentar significativamente su producción de alimentos con un incremento de apenas 12% de agua.

El crecimiento de esta demanda puede atenderse de tres formas: aumentar los rendimientos agrícolas; ampliar la superficie agrícola; e incrementar la intensidad de explotación agrícola (el número de cosechas anuales). Una de las técnicas de cultivo

que permite un aumento de los rendimientos agrícolas, así como un incremento en la intensidad de explotación agrícola es: *la hidroponia*, que es un sistema de producción en el que las raíces de las plantas se irrigan con una mezcla de elementos nutritivos esenciales disueltos en agua y en el que en vez de suelo, se utiliza como sustrato un material generalmente inerte y estéril, con el objeto de proporcionar las condiciones físicas, químicas y sanitarias más adecuadas para el desarrollo vegetal.

La hidroponia como un sistema comercial de producción de hortalizas y flores es, desde hace más de una década, una realidad a escala mundial. Existen empresas en países como Holanda, España, Italia, Nueva Zelanda y Japón que obtienen elevadas utilidades económicas. Tan sólo en Holanda, aproximadamente el 70% de los cultivos bajo invernadero (unas 7000 hectáreas) son manejados con sistemas hidropónicos y se proyecta que para el año 2005 toda la superficie sea de este tipo. El interés por esta técnica obedece fundamentalmente a los altísimos rendimientos que por unidad de superficie se pueden obtener (100 a 3000 % superiores al cultivo convencional en el suelo) y a la mejor calidad de los productos obtenidos (lo que significa mejor mercado y precio de venta). Además de lo anterior otras ventajas que son dignas de mención son: mayor precocidad en los cultivos, *ahorro de agua* y fertilizantes y en el caso del invernadero la obtención de varias cosechas al año. En los cultivos hidropónicos la planeación de la frecuencia y duración de los ciclos de riego son muy importantes de cara al éxito del sistema, ya que cada ciclo de riego deberá proveer agua, nutrientes y aireación adecuada para las raíces de las plantas. Una de las metas de este trabajo es contribuir al desarrollo de tecnologías encaminadas a mejorar la producción de alimentos reduciendo el consumo de agua para riego.

1.2 Propósito

El propósito principal de este trabajo es desarrollar e implementar un algoritmo de control difuso para un sistema de riego en invernaderos hidropónicos, que ante la creciente escasez del agua, optimice el empleo del agua de riego mediante riegos adecuados y eficientes, de tal manera que se obtengan los máximos beneficios que proporcionan los cultivos en invernaderos hidropónicos.

En los cultivos hidropónicos (sin suelo) la frecuencia de riego es de varias veces al día, de manera que se fraccionan las necesidades diarias de la planta en función de la demanda evaporativa y de las características del sustrato. Con frecuencia, la evolución de la radiación solar (que determina la demanda evaporativa) a lo largo del día, se emplea para programar los riegos de los cultivos. Existen diversos métodos para fijar el momento de riego y la cantidad de agua a aportar; unos están basados en mantener un nivel mínimo de agua en el sustrato empleado; mientras que otros emplean una balanza (sobre la que están colocadas varias plantas representativas) para reponer el agua evapotranspirada, el método más simple es programar la frecuencia y el tiempo (volumen) de riego.

Este trabajo se centra en resolver la problemática de establecer un sistema de control de riego eficiente, de bajo costo y fácil implantación, de manera que los productores que deseen emplear la técnica de cultivo bajo invernadero hidropónico no se vean obligados a realizar grandes inversiones, ya que el método y algoritmos que se proponen están diseñados para que alcancen al mayor número de productores.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Desarrollo histórico

El determinar el momento del riego y la cantidad de agua a utilizar, es lo que habitualmente se expresa como **cuando y cuanto regar** y en ello consiste la **programación del riego**.

Por lo general la programación se basa en: la evolución de la humedad del suelo, diversos parámetros de la planta y/o microclima del medio circundante.

El seguimiento de la humedad del suelo ha sido, tradicionalmente, el método más empleado para programar los riegos. A este respecto en 1996 Zhang [Zhang, 1996] resalta el hecho de que para desarrollar un sistema de control de riego basado en la medición de sensores de humedad en el suelo, se tiene el problema de que éstos (los sensores) tienen una respuesta no lineal, lo que presenta un retardo significativo que puede repercutir en la cantidad de esfuerzo que se debe aplicar para obtener resultados satisfactorios en un control con retroalimentación. Por otro lado un operador humano experto puede administrar un sistema de irrigación eficiente usando sus dedos como sensores para determinar si es necesario irrigar o no. De esta forma dado que la lógica difusa tiene la habilidad de imitar el razonamiento humano, puede entonces ser una alternativa para un método de control tradicional. Zhang diseñó un sistema de control difuso cuyas entradas son las mediciones de los sensores de humedad, efectuó diversas pruebas en laboratorio y en un invernadero, obteniendo resultados satisfactorios, demostrando con ello que el control difuso puede ser una mejor y más sencilla solución para los problemas de control de irrigación.

No es sino a mediados de los 90's que los sistemas de control de riego propuestos, por varios investigadores, ingenieros y técnicos, contemplan las relaciones suelo-agua-planta como un sistema dinámico y unificado en el que todos los procesos son interdependientes. Tal sistema recibe el nombre de *continuo suelo-planta-atmósfera* donde, la disponibilidad de agua en el suelo no sólo es función de éste sino del conjunto suelo-planta-clima.

Dado que el agua de riego es un recurso crítico en todo el mundo, tanto por la baja tasa de lluvias que se registran en algunas zonas, así como la sobreexplotación de los recursos hídricos, es necesario diseñar un sistema de producción que permita a los agricultores mejorar la competitividad de sus productos así como reducir las agresiones al medio ambiente.

Con relación a lo expuesto anteriormente, se han experimentado recientemente mejoras tanto en las técnicas de la ingeniería civil como en con el control digital que proporcionan a los países nuevos medios para controlar eficientemente el recurso del agua. Entre los trabajos que se pueden citar a este respecto destacan los de Faye [Faye, 1998], Sanchez [Sanchez, 1999], Sawadogo [Sawadogo, 2000], Elfawal [Elfawal, 2000].

Por otro lado, los invernaderos hidropónicos se han llegado a considerar como parte de la solución, al problema del uso eficiente del agua en el sector agrícola. Sin embargo, según Medrano [Medrano, 1998], en este tipo de cultivos el manejo de riego requiere de un control preciso y dinámico del aporte hídrico, ya que debido a la baja capacidad de retención del sustrato y a su volumen reducido, las necesidades de las plantas son muy diferentes a las de las plantas cultivadas en suelo, tal como lo expone Johnson [Johnson, 2000] en su trabajo donde resalta la importancia que tienen algunos factores en la calidad de las uvas que se usan para fabricar vino y en última instancia en la calidad del vino. Entre estos factores se encuentran: la relación entre el fruto y el área foliar, la cantidad de luz solar que es directamente interceptada por los racimos de uvas y el *estrés hídrico* que sufre la planta (en otras palabras la cantidad de agua que se debe aportar a la planta).

En la década de 1970, la FAO desarrolló un procedimiento práctico para estimar los requerimientos de agua de los cultivos, el cual fue muy aceptado sobretodo en estudios de irrigación. Sin embargo, desde la publicación de la metodología nuevos conceptos y avances se fueron desarrollando con el tiempo, por lo que se hizo necesaria una revisión. En 1990 la FAO recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como un estándar para el cálculo de la evapotranspiración estándar, así como los procedimientos para el cálculo de varios parámetros.

Actualmente los sistemas de riego que se desarrollan calculan las necesidades hídricas de los cultivos a partir de la estimación de la evapotranspiración de los mismos. Para efectuar la estimación de la evapotranspiración se requieren de datos provenientes de estaciones climáticas y del uso del modelo ideal de la evapotranspiración. A partir de este modelo original se han desarrollado otros modelos muy similares, pero más cercanos a las características particulares de cultivos específicos.

Boulard [Boulard, 1993], propuso un modelo simplificado de la transpiración (TR) derivada de la ecuación FAO Penman-Monteith:

$$TR = A * RG_{abs} + B * D_a \quad (2.1)$$

donde:

- TR : Transpiración del cultivo [$mm\ d^{-1}$]
- A, B : parámetros de la ecuación [$J\ m^{-2}s^{-1}kPa^{-1}$]
- R : Índice de área foliar []
- G_{abs} : Radiación solar [$J\ m^{-2}s^{-1}$]
- D_a : Déficit de presión de vapor de agua [kPa]

Este modelo divide la evapotranspiración en dos partes: la parte radiativa (proporcional a la radiación absorbida por el cultivo RG_{abs}) y la parte advectiva (proporcional al déficit de presión de vapor D_a). Para mejorar la predicción de irrigación es necesario calcular A y B ya sea directamente mediante la aplicación del modelo completo de transpiración o por una identificación estadística para lo cual es necesario conocer diferentes variables climáticas. Boulard efectuó una comparación entre los cálculos de evapotranspiración utilizando la ecuación 2.1 y los valores de evapotranspiración medidos cada hora por un lísimetro encontrando que las diferencias entre ambos eran mínimas por lo que es justificable el uso del valor calculado de evapotranspiración para adaptarlo a un control de irrigación.

En 1998, Medrano [Medrano, 1998] propuso un modelo para estimar la transpiración en función de las variables climáticas con el objeto de utilizar dicho cálculo en el control de riego de un invernadero hidróponico en la zona mediterránea. En dicho trabajo presenta la validación de un modelo derivado de la ecuación de FAO Penman-Monteith desarrollado para un cultivo de pepino en sustrato de perlita el cual se basa, al igual que Boulard, en las medidas de las variables climáticas de radiación solar, déficit de presión de vapor y el desarrollo foliar del cultivo mediante el índice de área foliar (LAI). En este modelo también se requiere de la estimación de los parámetros A y B . La tasa de transpiración del cultivo fue estimada mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda E = A(1 - \exp(-K\ LAI))G + B\ LAI\ DPV \quad (2.2)$$

donde:

- G : radiación solar incidente en el interior del invernadero [$J\ m^{-2}s^{-1}$]
- DPV : déficit de presión de vapor del aire del invernadero [kPa]
- A, B : coeficientes de la ecuación, A adimensional, B [$J\ m^{-2}s^{-1}kPa^{-1}$]
- K : coeficiente de extinción de la radiación (K), [0.86]
- λ : calor latente de vaporización del agua [$2.44MJ\ kg^{-1}$] a $25^\circ C$

El método para efectuar las mediciones de evapotranspiración que Medrano utilizó, se basa en la utilización de una báscula lísimetro, sobre la cual se coloca una bandeja con un depósito de recogida de drenaje que soporta una unidad de cultivo con seis plantas. Se considera que la pérdida de peso que registra la báscula en un lapso de tiempo es igual a la transpiración de las plantas colocadas sobre ella durante ese mismo lapso de

tiempo. La comparación de la evapotranspiración así medida y la evapotranspiración calculada mediante el modelo 2.2 tuvo una coincidencia de entre el 91% y el 99% de acuerdo al periodo en el cual se realizaba la estimación, por lo que desde el punto de vista práctico dicho modelo puede ser utilizado para el control de riego en cultivos sin suelo.

La mayoría de los sistemas de riego propuestos por los estudiosos del tema, a partir de 1996 utilizan, ya sea el modelo de FAO Penman-Monteith o algún modelo simplificado del mismo. En España y en Holanda es donde se han hecho grandes avances en lo que respecta a aumentar la eficacia de la producción agraria y actualizar los sistemas productivos. España, por ejemplo, a través de la Caja Rural Intermediterránea creó en 1975 la estación experimental Las Palmerillas, cuyo objetivo principal es probar y desarrollar nuevas tecnologías, métodos y productos relacionados con la horticultura protegida y la fruticultura mediterránea y subtropical, en las condiciones locales de Almería, además de contrastar su viabilidad. Desde 1998, en la estación experimental de las Palmerillas, Fernández [Fernández, 2001] ha estado efectuando diversos ensayos con el objeto de obtener una programación de riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español, entre los resultados más importantes de dichos ensayos se encuentra la propuesta de una metodología para efectuar el cálculo de las necesidades de riego de cultivos en invernaderos, que es poco costosa y que funciona con mucho éxito. La metodología propuesta por Fernández es una de las bases principales de este trabajo, por lo que será presentada con más detalle en el capítulo 3 de este trabajo.

Las metodologías propuestas por Boulard, Medrano y Fernández, representan la mayoría de las metodologías propuestas para control de riego actualmente, es importante observar que todas tienen como base el cálculo de la evapotranspiración para conocer las necesidades hídricas de los cultivos. Según la experiencia de algunos expertos Fernández [Fernández, 2001] y Martínez [Suay, 2002], para cultivos hidropónicos se han observado varias reglas ó costumbres que a continuación se enlistan:

- En cultivos hidropónicos se debe regar todo el día.
- En invierno se inician los riegos mas tarde (sobre las 9-10 de la mañana) para evitar enfriar en exceso el sustrato y estresar las raíces, ya que un sustrato tiene mucha menor inercia térmica que el suelo. El riego se finaliza un par de horas antes de la puesta del sol (aproximadamente a las 4-5 de la tarde).
- En verano los riegos comienzan antes y tambien finalizan más tarde por la mayor duracion del día en esta estacion.
- En cultivo hidropónico el sustrato tiene normalmente una capacidad de almacenamiento o de retención de agua baja. Esta capacidad es diferente para cada tipo de material empleado como sustrato y hay muchos. Por ello es necesario conocer las características de retención del agua y la capacidad de aireación del sustrato para conseguir un buen manejo del riego.

- A la pregunta de ¿cuánto regar? se responde que depende de la capacidad de retención de agua del sustrato. Más de su capacidad de saturación no es posible regar porque el exceso se pierde en drenaje. Normalmente en cultivo hidropónico se usa el criterio de dar un exceso que va del 10 al 60% según un número de factores, para lavar excesos de sales y homogeneizar la distribución del agua y los minerales en el sustrato. Por lo tanto existen varias respuestas. Una, entre muchas otras, es que hay que regar cuando la capacidad máxima retenida disminuye en un tercio, entonces el riego debe activarse para reponer esa agua que se ha consumido por las plantas o por la evaporación.
- Otros criterios para decidir cuando regar, puede ser el uso de tensiómetros aunque en cultivos hidropónicos no son muy útiles ya que las tensiones son muy bajas y nada tienen que ver con las que se dan en el suelo o en un sustrato orgánico y los tensiómetros no aprecian esas variaciones tan pequeñas a niveles muy bajos. Se pueden usar entonces sensores volumétricos, por TDR (time domain reflectometry), pero son caros y deben ser calibrados para cada sustrato.
- En cultivo hidropónico es posible usar lo que llaman bandeja de demanda que es una canaleta de plástico que se intercala en la línea de cultivo y en la que se cultivan plantas de las del cultivo en el sustrato que se use en el invernadero de que se trate y que tiene una poceta con dos contactores a diferente nivel. El agua de la poceta está en contacto con el sustrato donde crecen las plantas por un tejido capilar; el agua va pasando por él desde la poceta al sustrato a medida que las plantas absorben agua. Al bajar el nivel del agua de la poceta por debajo del más alto de los contactores, se abre el circuito y la bomba de riego se dispara. Sin embargo esta forma de regar tiene el inconveniente de su representatividad, ya que se basa en suponer que unas pocas plantas representan a miles, lo cual no es real y pueden cometerse errores graves.
- La frecuencia y cantidad del riego la puede fijar el técnico o mediante la bandeja de demanda. Si la programación del riego la realiza el técnico, éstos suelen hacerlo siguiendo las recomendaciones estandar para cada cultivo y utilizando su experiencia y las observaciones del agua drenada. Si en cambio se hace con la bandeja de demanda es el propio cultivo el que determina la cantidad y el momento.
- Una manera empírica de hacer el control es la medida de la conductividad eléctrica (CE) de la solución del drenaje o del extracto del sustrato. Midiendo la CE a diario o cada dos días, se observa su evolución. Si va aumentando significa que se está regando poco, el cultivo absorbe el agua aportada en su mayor parte y las sales se van concentrando. Entonces hay que regar más veces. Así hasta que la CE se estabiliza o aumenta muy lentamente. Cuando la CE llega a un nivel limitante para el cultivo, se hace un lavado del sustrato con uno o dos riegos largos que arrastren las sales acumuladas. Si por el contrario, la evolución

de la CE es permanecer estable o incluso disminuir, es señal de que se riega en exceso. En todo esto hay que además suponer que la dosis de cada riego está bien establecida en función del sustrato. Se puede experimentar con la concentración de la solución nutritiva, podemos usar una solución más ligera, por ejemplo en condiciones de calor y sequedad del aire, y una más concentrada, por ejemplo en tiempo frío y húmedo, siempre satisfaciendo las necesidades del cultivo y los equilibrios entre los diversos minerales.

- El método de riego por programador de tiempo es un modo empírico de manejo de riego bastante extendido pero muy imperfecto, pues no tiene en cuenta las verdaderas necesidades del cultivo ni las condiciones climáticas. Este sistema puede mejorarse si se complementa con el seguimiento de la CE y también con un seguimiento de la fracción (%) de drenaje después de cada riego, de este modo se puede llegar a distanciar los riegos en las horas de menor consumo y concentrarlos en las horas centrales del día, pues se puede ver cuándo el drenaje es excesivo y cuándo es escaso. Haciendo esto durante un tiempo en cada estación climática, se puede llegar a aprender a hacer un riego mejor.

El método de medición de conductividad eléctrica CE y el método de la bandeja de demanda, son métodos muy exactos sin embargo son difíciles de implementar en invernaderos comerciales ya que requieren el manejo de un experto. Los tensiómetros no son útiles en invernaderos hidropónicos ya que las tensiones que se presentan en el sustrato del cultivo son muy bajas, usar otro tipo de sensores más adecuados elevan el costo del mantenimiento del invernadero, lo que limita a los productores el acceso al manejo de invernaderos hidropónicos. En este trabajo se presenta un método que permita determinar las necesidades hídricas del cultivo, de fácil mantenimiento y acceso por parte de los productores.

Capítulo 3

Planteamiento del problema

La mayor parte de los sistemas de riego que se desarrollan actualmente toman como base, para determinar la cantidad de agua a aplicar en los cultivos, el cálculo de la evapotranspiración.

Antes de realizar el trabajo de control sobre el sistema de riego se hace un análisis detallado de la metodología propuesta por Fernández [Fernández, 2001], para efectuar el cálculo de la evapotranspiración a proporcionar por medio del riego a cultivos que crecen bajo invernadero, con lo que se permitirá establecer con mayor claridad el trabajo y la solución propuesta.

3.1 Necesidades de agua de los cultivos bajo invernadero

3.1.1 Transpiración

Como ya es bien conocido, el agua es la substancia más abundante de los tejidos vegetales, pero la mayor parte del agua absorbida por las plantas se pierde ya sea en forma líquida ó en forma de vapor. Cuando el agua del suelo es abundante y la atmósfera esta saturada esencialmente con vapor de agua, con frecuencia se encuentran gotitas de agua en los bordes de las hojas. Estas gotas han sido forzadas hacia afuera del xilema de las venas de la hoja por presión, este fenómeno se conoce como gutación y produce parte del rocío que aparece en el pasto durante la noche.

Las plantas pierden agua en forma de vapor a través de un proceso llamado transpiración. Después de que las raíces extraen el agua del suelo, ésta pasa a lo largo del xilema hasta llegar a las células del mesófilo de las hojas. Una parte de la superficie epidérmica de la hoja está constituida por un gran número de poros llamados estomas. Los poros estomáticos se abren a los espacios intercelulares de la hoja y al medio externo. Aparte de la transpiración estomática existe otra en la que el agua se pierde también en forma de vapor a través de la epidermis.

Esta última recibe el nombre de transpiración cuticular y la cantidad de agua perdida a través de ésta, es insignificante en comparación con la cantidad perdida por transpiración estomática. Solamente en tiempo muy seco cuando los estomas se encuentran cerrados, la pérdida de agua a través de la epidermis puede alcanzar un nivel importante.

Realmente no se puede decir cuanta agua pierde una planta al día, pues depende por completo de las condiciones climáticas.

3.1.2 Relación entre absorción y transpiración

La absorción de agua no es un fenómeno independiente, sino que se relaciona con la transpiración cuando el agua está a disposición de las raíces. Es posible medir la tasa de absorción de agua por las raíces de una planta, al mismo tiempo que se mide la tasa de la pérdida de agua a través de las hojas. Por este medio se ha encontrado que la velocidad de transpiración es parecida a la velocidad de absorción. En realidad, los cambios en la velocidad de absorción van retrasados respecto los cambios en la velocidad de transpiración.

3.1.3 Evaporación

La evaporación es el agua pérdida en forma de vapor por el terreno o superficie de agua adyacente a la planta, o por la superficie de las hojas de las plantas. Los factores que afectan la evaporación de una superficie libre de agua son principalmente climáticos y de la naturaleza de la superficie evaporante.

Dado que la evaporación es un proceso de intercambio de energía, se puede decir que el factor más importante que influye sobre ella es la radiación solar. Por consiguiente la evaporación también variará de acuerdo a la latitud, estación del año, hora del día y condiciones de nubosidad. Otros factores que también influyen son: la temperatura del aire, la presión de vapor, el viento y posiblemente hasta la presión atmosférica.

3.1.4 Consumo de agua por las plantas

Existen dos conceptos que muchas veces se confunden: Evapotranspiración y Uso Consuntivo. La evapotranspiración (ETc), es la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones de *transpiración*, más el agua que se evapora de la superficie del suelo en el cual se desarrolla (*evaporación*). El uso consuntivo está formado por la evapotranspiración más el agua que utilizan las plantas en la formación de sus tejidos durante todo el ciclo vegetativo de los cultivos (uno por ciento del agua total utilizada, aproximadamente). La diferencia entre los dos términos es más bien de tipo académico porque es común emplear la evapotranspiración como uso consuntivo, el error que se comete cae dentro del rango del error de medición. En la mayoría de los trabajos que actualmente se realizan sobre el cálculo de los requerimientos hídricos de

los cultivos se utiliza el concepto de evapotranspiración como uso consuntivo. En este trabajo se hará lo mismo tomando el término evapotranspiración como uso consuntivo.

3.1.5 Riego

Con el riego se debe aplicar la cantidad justa para cubrir el consumo de agua del cultivo ó evapotranspiración ETc. Un exceso de agua de riego supone el lavado de fertilizantes, lo que puede acarrear problemas medioambientales por la contaminación de aguas subterráneas. Además, en suelos pesados es común la aparición de problemas de encharcamiento y asfixia radicular. Algunos cultivos son muy sensibles al exceso de agua y en algunos casos puede llegar a producir la muerte de la planta. Por el contrario una aportación inferior a la ETc puede llegar a provocar déficit hídrico y por tanto una reducción de la producción.

3.2 Programación de riego

Existen varios métodos de diseñar la programación del riego y que permiten predecir cuánto y cuándo regar, los métodos más comunes se basan en: la medición del contenido de agua en el suelo, la medición del estado hídrico de la planta y los métodos basados en la estimación de la evapotranspiración

3.2.1 Medición del contenido de agua en el suelo

La medición del contenido de agua en el suelo se lleva a cabo mediante el uso de sensores que permiten conocer cómo el cultivo va extrayendo el agua el suelo, de forma que el riego puede programarse para mantener un contenido de agua en el suelo entre dos niveles de humedad. Para evitar drenajes y en consecuencia el lavado de fertilizantes se establece un límite máximo de humedad de igual manera se establece un límite inferior que representa el punto a partir del cual el cultivo sufre estrés hídrico. Estos métodos se basan en la consideración de que el suelo almacena el agua del riego actuando como un depósito, para luego ser usada por las plantas. El agua almacenada en el suelo y que puede ser utilizada por el cultivo (*agua total disponible*), es la diferencia entre la cantidad de agua almacenada a capacidad de campo (CC; contenido de agua a una tensión de humedad del suelo de 1/3 atm) y punto de marchitez permanente (PMP; contenido de agua a una tensión de humedad en el suelo de 15 atm) [Allen, 1998]. CC es el contenido de agua de un suelo que se mide cuando ha sido regado abundantemente hasta el punto en que empieza a drenar, en el momento en que el drenaje es despreciable se realiza la medición. El PMP es el contenido de agua que hay en un suelo cuando la planta se marchita de forma permanente.

Si se parte de un suelo con un contenido de humedad próximo a su CC, el cultivo va extrayendo agua sin que se reduzca la ETc, sin embargo el valor de ETc empieza a disminuir antes de alcanzar el PMP. La reducción de la ETc por debajo de su valor

máximo se suele traducir en una reducción de la producción. La fracción del agua total disponible que un cultivo puede extraer del suelo sin que sufra estrés es el *agua realmente disponible*.

Entre los sensores más utilizados para la medida del contenido de agua en el suelo se encuentran los tensiómetros, los resistivos, los de disipación de calor, los psicrométricos, los de constante dieléctrica o TDR, a continuación se describen algunos de ellos:

Tensiómetros

La ventaja de los tensiómetros es su simplicidad. La cápsula de cerámica porosa que se inserta en el suelo establece un equilibrio con la tensión de agua del suelo. No necesita ser calibrado y proporciona información a cerca del esfuerzo que las raíces debe realizar para extraer agua del suelo. Además los tensiómetros no se ven afectados por las sales de los fertilizantes. Sin embargo se ven afectados por suelos muy secos (por ejemplo -70 centibares), su tiempo de reacción es bajo y hay que considerar que la relación entre contenido de agua y potencial matricial difiera para cada tipo de suelo.

Sensores resistivos

Estos sensores trabajan bajo el principio de la resistencia eléctrica. Entre mayor humedad haya en el suelo más baja resistencia eléctrica presentan los sensores, en un suelo seco la resistencia se incrementa. Utilizando un Ohmmetro de AC, muchos sensores de este tipo pueden leerse manualmente. Este tipo de sensores son muy baratos, pero responden muy lentamente a los cambios en nivel de humedad del suelo, presentan histéresis y tienen un rango muy bajo de medición de tensión del suelo, además de que se dañan fácilmente con los fertilizantes que aceleran su deterioro, no está indicado su uso en suelos con alta porosidad y la temperatura del suelo interfiere en la medida en un 2% por cada grado.

Sensores de constante dieléctrica

Básicamente hay dos métodos que miden directa ó indirectamente la constante dieléctrica del suelo: la reflectometría en el tiempo y la capacitancia.

El primero de ellos mide la velocidad de propagación de un pulso electromagnético que viaja a través del sensor. El segundo método mide la frecuencia de resonancia de un circuito. Ambos métodos son muy precisos, no necesitan calibración, pero tienen las desventajas de tener un alto costo y presentar problemas en suelos con alto contenido en materia orgánica.

3.2.2 Medición del estado hídrico del cultivo

Estos métodos incluyen técnicas que miden directamente las pérdidas de agua de una parte de la planta, de la planta entera o de un grupo de plantas, o miden características

relevantes de las plantas que facilitan la estimación de la transpiración.

Medición de diámetro de órganos de la planta

El estado hídrico del cultivo puede determinarse mediante la utilización de sensores como que miden variaciones muy pequeñas en el diámetro de los frutos y los tallos. Estas variaciones pueden tener su origen ya sea en el crecimiento del órgano ó por una pérdida de agua. Durante el transcurso del día los frutos y tallos pueden variar de tamaño de acuerdo al grado de hidratación que presenten, alcanzando el grado máximo de hidratación durante la noche y teniendo un grado mínimo generalmente a medio día. La diferencia entre estas variaciones determina la pérdida de agua que tiene la planta a través de la transpiración. Una variación anormal durante el día indica la presencia de estrés hídrico. Estos sensores tienen la desventaja de ser costosos además de requerir manejo y mantenimiento especializado

Medición del flujo de savia

Estos sensores aplican una fuente de calor constante en la corriente de savia bruta o en su proximidad. La temperatura en las proximidades de esta fuente se ve perturbada mas o menos, según la importancia del flujo de la savia, y la pérdida de calor es directamente proporcional a este flujo. El flujo de savia es una medida directa de la transpiración y presenta una evolución típica a lo largo del día, alcanzando el valor máximo al medio día, cuando la radiación es máxima, y un mínimo durante la noche. Una evolución anormal durante el día , por ejemplo una caída en el flujo de savia cuando los valores de radiación son máximos, indica una situación de estrés hídrico, para el buen uso de estos sensores es necesario contar con información sobre parámetros climáticos que influyen directamente en la tasa de transpiración: radiación solar y déficit de presión de vapor

3.2.3 Estimación de la evapotranspiración

Los procedimientos indirectos para estimar la evapotranspiración, pueden clasificarse en:

- Métodos basados en dispositivos evaporimétricos
- Métodos basados en datos climáticos

Métodos basados en dispositivos evaporimétricos

Varios autores han pretendido correlacionar la evapotranspiración con la evaporación en función de las lecturas de evaporímetros. Éstos son instrumentos de muy diversa forma, tamaño y modo de operar en los cuales se mide la lámina de agua evaporada. Esta puede ser convertida en valores de evapotranspiración mediante un factor de corrección.

El razonamiento principal bajo el cual se justifica el uso de este tipo de métodos consiste en la consideración de que las medidas de evaporación de una superficie libre de agua en el tanque evaporímetro, integra los efectos de los diferentes factores meteorológicos que influyen en la evapotranspiración, por tanto parece que la evapotranspiración potencial puede ser estimada con más precisión por los métodos que consideran la evaporación medida en el tanque.

Se supone que los fenómenos de evaporación y evapotranspiración son originados por las mismas causas y factores, por lo que se considera que son fenómenos cualitativamente semejantes, pero no se comportan de ese modo en forma cuantitativa.

Métodos basados en datos climáticos

Los métodos basados en datos climáticos, utilizan datos históricos, meteorológicos y de cultivo, para estimar los valores de la evapotranspiración y predecir sus valores en el futuro. Las predicciones dependen fundamentalmente de:

- las ecuaciones que están siendo utilizadas para describir las leyes físicas que gobiernan los procesos
- la confiabilidad de los datos climatológicos y de cultivo

En 1990 la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) convocó a expertos en el tema para efectuar una consulta. En esta consulta los expertos recomendaron la adopción del método combinado de Penman-Monteith como un nuevo estándar para el cálculo de la evapotranspiración. Asimismo, también recomiendan procedimientos para el cálculo de varios de los parámetros que son usados por dicho método.

La metodología propuesta por Fernández [Fernández, 2001] utiliza lo que se conoce como la evapotranspiración de referencia y que puede ser calculado como define el método propuesto por la FAO [FAO, 1990] de la siguiente manera:

Ecuación combinada para referencia de evapotranspiración Si se define la evapotranspiración como el promedio de evapotranspiración de un cultivo hipotético con una altura de 12 cm, una resistencia de canopía fija de 70 sm^{-1} y un albedo de 0.23, en una superficie de cultivo con altura uniforme que cubre totalmente el suelo y no tiene déficit de agua, la estimación de la evapotranspiración se puede determinar con la ecuación combinada de Penman-Monteith, la cual combina todas las derivaciones encontradas en los términos aerodinámicos y de radiación, se puede expresar como:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34U_2)} \quad (3.1)$$

donde:

- ET_o : evapotranspiración calculada para el cultivo [mm d^{-1}]
- R_n : radiación neta en la superficie en el cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
- G : flujo termal del suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
- T : temperatura promedio [$^{\circ}\text{C}$]
- U_2 : medición de la velocidad del viento a una altura de 2 m [m s^{-1}]
- $(e_a - e_d)$: déficit de presión de vapor [kPa]: ecuación 7.14
- Δ : curva presión del vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]: ecuación 7.2
- γ : constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]: ecuación 7.3
- 900: factor de conversión

Cuando los datos de radiación no estan disponibles, la radiación neta puede ser estimada como sigue:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_{ns} = 0.77(0.25 + 0.50 \frac{n}{N}) R_a$$

$$R_{nl} = 2.45 \cdot 10^{-9} (0.9 \frac{n}{N} + 0.1) (0.34 - 0.14 \sqrt{ed}) (T_{kx}^4 + T_{kn}^4)$$

$$G = 0.14(T_{mes n} - T_{mes n-1}) \approx 0$$

donde:

- R_n : radiación neta [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
- R_{ns} : radiación de onda corta que llega al suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
- R_{nl} : radiación neta de onda larga [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]
- R_a : radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]: ver ecuación 7.15
- n/N : fracción de luz solar relativa []
- T_{kx} : temperatura máxima en el día [K]
- T_{kn} : temperatura mínima en el día [K]
- e_d : presión de vapor actual [kPa]

La evapotranspiración de referencia también puede ser calculada con el método de radiación de la FAO (FAO Radiation (Makkink)), cuya diferencia con 3.1 consiste en que sólo se considera la radiación ignorando los términos aerodinámicos. Esté método igualmente es aceptado y reconocido por la FAO y puede ser calculado de la siguiente manera:

$$ET_o = A_r + B_r(WR_{se}) \quad (3.2)$$

$$A_r = -0.3 \quad (3.3)$$

$$B_r = B_1 + B_2 \quad (3.4)$$

$$B_1 = a_1 + a_2 RH_{mean} = a_3 U_d \quad (3.5)$$

$$B_2 = a_4 RH_{mean} U_d + a_5 RH_{mean}^2 + a_6 U_d^2 \quad (3.6)$$

donde:

- RH_{mean} : humedad relativa promedio (%)
- U_d : velocidad del viento promedio (m/s)
- a_1 : 1.0656
- a_2 : -0.0012795
- a_3 : 0.044953
- a_4 : -2.0033×10^{-4}
- a_5 : -3.1508×10^{-5}
- a_6 : -0.001026

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (3.7)$$

$$\Delta = 33.8639(0.05904(0.00738T + 0.8072)^7 - 0.0000342) \quad (3.8)$$

$$\gamma = 0.240P / (0.622\lambda) \quad (3.9)$$

$$P = 1013.0 - 0.1093E \quad (3.10)$$

$$\lambda = 595.0 - 0.51T \quad (3.11)$$

donde:

T : temperatura promedio ($^{\circ}C$)
 E : altura (m)
 P : presión atmosférica (mbar)
 λ : función de la temperatura promedio
 γ : constante psicrométrica
 Δ : curva de presión del vapor

R_{se} : radiación solar en evaporación equivalente (mm/día)

Una vez obtenida la evapotranspiración de referencia que se calcula utilizando la ecuación 3.1 ó la ecuación 3.2, la evapotranspiración para un cultivo bajo invernadero (ET_c) se calcula como el producto de dos términos

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (3.12)$$

donde K_c es el coeficiente de cultivo y representa la disponibilidad del cultivo y suelo para atender la demanda evaporativa de la atmósfera, y depende del cultivo en cuestión, su estado de desarrollo y la disponibilidad de agua en el suelo. Los valores de K_c deben determinarse experimentalmente.

ET_o es la evapotranspiración de referencia y cuantifica la demanda evaporativa de la atmósfera, y como ya vimos, representa la evapotranspiración de una pradera de gramíneas con una altura entre 8 y 10 cm. que crece sin limitaciones de agua y nutrientes en el suelo y sin incidencia de plagas y/o enfermedades. La estimación de la ET_o en una determinada zona se realiza a partir de datos climáticos recolectados de la misma y empleando la fórmula 3.1.

La gestión óptima del riego sería aquella en la que se pudiese medir con precisión el consumo de agua del cultivo. Sin embargo, a pesar de los avances en electrónica, tanto los sensores de medida del contenido de agua en el suelo, como los de la medida del estado hídrico del cultivo presentan un alto coste y requieren de personal especializado para su mantenimiento.

Los sensores de medida del estado hídrico del cultivo tienen una doble utilidad en la gestión del clima del invernadero, por lo que su implantación en invernaderos con cierto grado de tecnificación podría llevarse a cabo en un futuro inmediato. La utilización de estos sensores en la gestión del riego requiere que previamente se haya comprobado su adaptación al sistema de cultivo y elaborado un protocolo y recomendaciones de uso como: número de sensores que se deben instalar, cuál es la localización más idónea, que sensores se deben utilizar, cuáles son los umbrales para la gestión del riego, etc. Ya que, la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo y la distribución de las raíces dificulta la obtención de datos representativos del contenido hídrico del suelo. Por ello, a corto plazo este tipo de sensores no son fáciles de implantar como

medida de rutina en la gestión del riego de una mayoría de invernaderos. Por tanto, la programación de riego basada en parámetros climáticos podría ser adoptada más fácilmente por un gran número de agricultores.

En los últimos años, con el desarrollo de los ordenadores personales se han elaborado varios software para calcular las necesidades de riego de los cultivos a partir de datos climáticos, como el de USDA [Jensen, 1969], CIMIS [Snyder, 1985], CROPWAT [Smith, 1992]. Estos software no sólo permiten predecir las fechas y las dosis de riego a lo largo de la campaña, pueden ser muy útiles para evaluar el manejo del riego para planificar las actividades de finca desde el inicio de la campaña. Sin embargo, es necesario generar un software que permita estimar la ET_c bajo invernadero a partir de datos climáticos, así como la posibilidad de incorporarlo a algún ordenador de riego.

3.2.4 Modelos para determinar la ET_c (evapotranspiración) en un invernadero

Ecuación combinada de Penman-Monteith (modelo de radiación)

En los últimos años se han desarrollado numerosas expresiones matemáticas o modelos para estimar la ET_o a partir de datos climáticos, tal es el caso de la ecuación combinada de Penman-Monteith. En caso de no disponer de sensor de radiación, los valores de radiación dentro de invernadero pueden estimarse a partir de datos medidos en exterior y un valor de transmisividad, que es función del material de cubierta, tipo de cubierta, encalado, etc.

$$R_{s_{inv}} = R_{s_{ext}} * \tau \quad (3.13)$$

donde, $R_{s_{ext}}$ es la radiación solar medida en exterior y τ es la transmisividad de la cubierta.

Coefficientes de cultivo

El coeficiente de cultivo (K_c) integra los efectos de tres características primarias que diferencian un cultivo de una pradera de gramíneas: altura de cultivo, resistencia y albedo de la superficie suelo-cultivo. Es decir, los valores de K_c dependen sobre todo, del cultivo y su manejo. Los valores de K_c han sido determinados para numerosos cultivos herbáceos al aire libre. Sin embargo, en cultivos hortícolas bajo invernadero de plástico, el manejo (deshojado, destallado, entutorado, altura del cultivo, densidad de plantación, etc.) es muy distinto al realizado en los mismos cultivos al aire libre. Por tanto para conocer con precisión las necesidades hídricas de los cultivos hortícolas, es necesario conocer los valores de K_c en las condiciones de cultivo en el invernadero.

Variación en la fecha de plantación y su efecto en K_c

Con el crecimiento del cultivo se produce un aumento de la superficie foliar, provocando que el K_c se incremente desde valores bajo, alrededor de 0.2 hasta su valor máximo cuando el cultivo alcanza cobertura completa. La tasa de desarrollo de un cultivo y el tiempo transcurrido entre plantación y cobertura completa depende de las condiciones climáticas y en particular de la temperatura, y de la fecha de plantación. Así cuando se cambia de fecha de siembra o plantación, las condiciones climáticas también cambian, afectando el patrón de crecimiento y desarrollo del cultivo, lo que a su vez, tendrá repercusión sobre el patrón de K_c .

Resumiendo, el patrón K_c de los cultivos hortícolas bajo invernadero depende de la temperatura, por lo que es necesario relacionar los valores de K_c con el desarrollo y crecimiento del cultivo.

Método de cálculo del K_c a partir del tiempo térmico

Para abordar el problema del efecto de la fecha de plantación sobre el patrón de K_c se han desarrollado dos modelos que relacionan el K_c con el desarrollo del cultivo a través de la temperatura.

Modelo K_c -IAF(LAI) Para cultivos que se manejan sin podas de formación o deshojados, como ejotes, melón rastro, sandía y calabaza, se desarrolló un modelo para estimar el K_c , a partir del desarrollo del cultivo. Se consideró que los valores de K_c se incrementan linealmente con el desarrollo del cultivo hasta que éste alcanza cobertura completa (índice de área foliar, IAF=3). Una vez alcanzada cobertura completa el valor de K_c se mantiene en su valor máximo hasta el final del ciclo. La fecha de plantación, los efectos de la temperatura en el desarrollo del cultivo y densidad de plantación se incorporan en el cálculo del K_c a través del IAF.

$$K_{c_t} = K_{c_{\min}} + \frac{(K_{c_{\max}} - K_{c_{\min}})}{3} * IAF_t \quad (IAF_t < 3.0)$$

$$K_{c_t} = K_{c_{\max}} \quad (IAF_t \geq 3.0)$$

donde, $K_{c_{\min}}$, $K_{c_{\max}}$ son los valores de K_c mínimos y máximos, respectivamente, obtenidos experimentalmente e IAF_t es el índice de área foliar estimado. Los valores diarios de IAF en cobertura parcial ($IAF < 3.0$) se estiman en función de datos diarios de temperatura máxima y mínima según el modelo propuesto por Ritchie [Ritchie, 1990]:

$$A_t = A_0 e^{-be^{-kTTA}} \quad (3.14)$$

Este modelo se basa en la constancia de la relación entre la tasa de aparición de hoja y el tiempo térmico, y la dependencia del área foliar del número de hojas emergidas. El área foliar por planta (A_t) se calcula en función del número de hojas emergidas. El área foliar por planta (A_t) se calcula en función de tiempo térmico acumulado (TTA) desde emergencia o transplante utilizando una función de Gompertz, donde A_t representa el área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) es el área foliar máxima por planta, TTA es el tiempo térmico acumulado, que se obtiene a partir de valores de temperatura máxima y mínima, b y k son parámetros empíricos que deben ajustarse para cada especie linealizando la ecuación 3.14.

Modelo Kc-Tiempo térmico (TTA) En los cultivos con podas de formación frecuentes, deshojados y destallados, como pimiento, jitomate, berenjena y pepino, se establece una relación empírica entre el Kc y el tiempo térmico, que es función de la temperatura. La base para establecer esta relación es la dependencia de la evolución del Kc , hasta alcanzar cobertura completa, con el desarrollo del cultivo, y éste con la temperatura. En todos los casos, se consideró que el Kc aumentaba linealmente con el tiempo térmico desde un valor inicial de Kc de 0.2 hasta el valor máximo de Kc .

Expresiones para el cálculo del TTA El tiempo térmico acumulado desde emergencia (TTA) se obtiene a partir de temperaturas máxima (T_{max}) y mínima (T_{min}) diarias y de tres valores de temperatura, característicos de cada cultivo, y que definen su respuesta a la temperatura: T_b (temperatura base), T_{op} (temperatura óptima) y T_{us} (temperatura umbral superior).

Cultivo	T_b	T_{op}	T_{us}
Solanáceas	10	30	40
Cucurbitáceas	12	32	42

Las expresiones empleadas para calcular el tiempo térmico diario ($TT, ^\circ C \text{ día}$) fueron:

a) Si $T_{max} < T_{op}$ y $T_{min} < T_b$:

$$TT = \frac{(T_{max} - T_b)^2}{[2(T_{max} - T_{min})]}$$

b) Si $T_{max} < T_{op}$ y $T_{min} > T_b$:

$$TT = 0.5 * (T_{min} + T_{max}) - T_b$$

c) Si $T_{max} > T_{op}$:

$$TT = \frac{1}{(T_{\max} - T_{\min})} * \left[\frac{(T_{op} - T_{\min})^2}{2} + (T_{\min} - T_b) * (T_{op} - T_{\min}) + \right. \\ \left. \left((T_{\max} - T_{op}) * (T_{op} - T_b) * \left(0.5 + \frac{0.5 * (T_{us} - T_{\max})}{(T_{us} - T_{op})} \right) \right) \right] \quad (3.15)$$

Finalmente:

$$TTA = \sum_0^t TT \quad (3.16)$$

donde: el día 0 corresponde a la fecha de emergencia, considerando que la emergencia se produce cuando se alcanzan los 80°C día ó al día del tranplante, y t es el día actual.

El modelo $Kc - TTA$ para cultivos de pimiento, tomate, berenjena y pepino. Considera que el cultivo después del transplante tiene una pequeña fase de establecimiento, en la cual el valor de Kc se mantiene en 0.2 hasta que el TTA es superior a 180°C día en pepino, y 200°C día en el resto. Una vez superada la fase de establecimiento, el valor de Kc aumenta linealmente hasta un valor máximo cuando el TTA es de 880°C día en pimiento, 722°C día en tomate, 850°C día en berenjena y 460°C día en pepino.

En pepino, el valor de Kc máximo se mantiene constante hasta el final del ciclo de cultivo. Sin embargo, en los cultivos de ciclo largo: tomate, berenjena ó pimiento tardío, se observa una evolución distinta de los valores de Kc . Después de alcanzar un Kc máximo, suelen sufrir una parada vegetativa y un envejecimiento fisiológico con la llegada del período frío invernal, provocando una caída en el Kc que disminuye de manera lineal hasta llegar a valores de 0.9 para pimiento y berenjena y de 1.0 para tomate. A partir de marzo, las temperaturas mínimas comienzan a aumentar, y se produce nuevo crecimiento que mantiene los valores de Kc aproximadamente constantes hasta el final del ciclo de cultivo.

El modelo $Kc - TTA$ para el cultivo de tomate es:

Tomate

- Si $TTA < 200$

$$Kc = 0.2 \quad (3.17)$$

- Si $200 < TTA < 722$

$$Kc = Kc_{\min} + 0.00268 * (TTA - 200) \quad (3.18)$$

donde Kc_{\min} es el Kc mínimo

- Si $TTA > 722$ hasta el 1 de enero

$$Kc = Kc_{\max} \quad (3.19)$$

donde Kc_{\max} es el Kc máximo

- Desde 1 de enero a 1 de marzo

$$Kc = Kc_{t-1} - 0.01 \quad (3.20)$$

donde, $Kc_{t-1} - 0.01$

- A partir del 1 marzo

$$Kc = 1.0 \quad (3.21)$$

3.2.5 Programas de riego de cultivos hortícolas en invernadero

Programación de los riegos en invernadero

La programación de riegos permite decidir cuando regar y cuanta agua aplicar para cubrir las necesidades de los cultivos, y su importancia se pone de manifiesto cuando el agua es un recurso escaso y su costo es elevado. Ante la certeza de obtener una disminución en la producción con un riego deficitario, unido a la falta de información sobre las necesidades de agua de los cultivos, se obtienen riego excendentarios. Pero el regar en exceso puede conducir a problemas de asfixia radicular.

Las técnicas de programación del riego basadas en el balance de agua son las más extendidas en riego por surco y por aspersión.

El balance de agua en un invernadero, esta dado por: el caudal total destinado para riego, las pérdidas a nivel de finca ó parcela durante y tras la aplicación del riego. En el transporte del agua hasta la parcela se producen pérdidas por evaporación,

síes una canalización abierta, y por fugas de la conducción. Estas pérdidas pueden ser minimizadas mediante una conservación adecuada pero son difíciles de eliminar. Una vez que el agua llega a la parcela ésta sufre otra serie de pérdidas (percolación, escorrentía y evapotranspiración) y ganancia (lluvia). El balance de agua en la parcela queda definido por:

$$Rn + P = ETc + D + E \pm \Delta H \quad (3.22)$$

donde Rn es la dosis de riego neto, P es la precipitación, ETc es la evapotranspiración del cultivo, D es la percolación o drenaje, E es la escorrentía y ΔH es la variación en el contenido de agua en el suelo entre dos riegos.

El agua de lluvia que entra en el invernadero por las perforaciones de plástico tiene una distribución irregular y concentrada justo debajo de éstas, por lo que es de difícil cuantificación y específica de cada invernadero. Por tanto, a efectos de programación del riego no se considera la precipitación en el balance de agua. Las pérdidas que se producen por escorrentía también suelen ser nulas al emplearse sistemas de riego por goteo, y un correcto manejo permitirá evitar las pérdidas por percolación profunda o drenaje. Por tanto la ecuación 3.22 queda:

$$Rn = ETc \pm \Delta H \quad (3.23)$$

El agua de riego Rn es almacenada en el suelo ΔH para que sea utilizada por el cultivo ETc . El agua almacenada en el suelo puede sufrir variaciones por la diferencia entre la cantidad de agua añadida y el agua consumida por el cultivo. Si las ganancias exceden a las pérdidas la variación de humedad es positiva, y se produce la acumulación de agua en el suelo. En cambio, cuando las pérdidas exceden a las ganancias la variación de humedad es negativa, y el cultivo extrae agua del suelo para cubrir sus necesidades de agua.

Cuando se utilizan sistemas de riego por goteo, dada la elevada frecuencia de riegos se suele ignorar el papel del suelo como almacén de agua, y se considera que el contenido de agua en el suelo no varía con el tiempo. Por tanto, bajo invernadero la programación del riego se simplifica, ya que no hay que preocuparse por determinar el momento del riego y el proceso de programación se enfoca hacia cuanta agua hay que aplicar basándose en estimaciones de la ETc .

$$Rn = ETc \quad (3.24)$$

La programación de riegos puede hacerse en tiempo real ó tiempo medio, según los datos climáticos que se empleen para estimar la ETc .

Programación en tiempo real

En la programación en tiempo real las estimaciones de la ET_c se realizan a partir de los datos climáticos obtenidos el día anterior, y de la situación concreta del cultivo en ese momento. En este tipo de programación se necesitan buenas estimaciones diarias de la ET_c , obteniéndose ET_{cr} . Los valores diarios de K_c se estiman a partir de datos de temperatura máxima y mínima del día anterior mediante los modelos descritos anteriormente.

La programación de tiempo real se adapta a una programación individual para cada agricultor y puede llevarla a cabo si dispone de los datos climáticos necesarios, que pueden proceder de su invernadero ó bien de alguna estación agrometeorológica bajo invernadero próxima. Obligaría al agricultor a disponer de sensores climáticos o algún sistema de comunicación con la estación agrometeorológica.

Uso de un programa medio ó fijo

A pesar de la mayor precisión de un programa en tiempo real, el bajo costo del agua de riego dificulta que los agricultores adopten programas de riego complejos que requieran mucha tecnología. Un programa de riego medio puede ser más apropiado, al menos en las etapas iniciales. En etapas posteriores, el esfuerzo podría centrarse en aumentar la precisión de estos programas medios y encontrar un indicador ideal que permita automatizar la programación del riego. La aplicación de este tipo de programación requiere que la ET_o presente escasa variación interanual y que las precipitaciones sean muy escasas.

Variabilidad interanual de la ET_o dentro de un invernadero Si la ET_o oscila entre valores inferiores ó igual a 1 mm día^{-1} durante los meses de diciembre y enero, y valores próximos a 4 mm día^{-1} a finales de junio y julio. Se puede decir que la variabilidad interanual de ET_o es baja, ya que las variaciones climáticas de año a año dentro de invernadero quedan amortiguadas por la cubierta de plástico, por lo que a priori parece factible el uso de programas de riego.

Programación en tiempo medio ó fijo En la programación en tiempo medio la ET_c se estima a partir de datos climáticos medio y valores estándar de desarrollo del cultivo. Esta programación es de fácil uso, el agricultor no requiere el asesoramiento técnico y son fáciles de difundir. Este tipo de programación permite prever anticipadamente los volúmenes a emplear durante toda la campaña.

Según González [González, 2002] evaluó durante la campaña agrícola 1999/00 el uso de un programa de riego medio frente a un programa de riego en tiempo real en un cultivo de jitomate, no encontrando diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de riego en la producción de materia seca, ni en la producción de jitomate fresco, ni en los parámetros de calidad interna (sólidos solubles, acidez,

firmeza del fruto y contenido de la materia seca de los frutos). Sin embargo, reporta que el agua de riego aplicada al programa de riego a tiempo real fue mayor que en el programa de riego medio, sobre todo durante la primavera.

Consideraciones a tener en cuenta en el uso del programa de tiempo medio. Las estimaciones de la ET_c en tiempo medio (ET_{c_m}) es una información precisa sobre el consumo real de agua de los cultivos bajo invernadero, sin embargo su manejo requiere de las siguientes recomendaciones:

- la ET_{c_m} se ha calculado con medias de datos climáticos de varios años, por lo que el consumo de agua puede variar ligeramente de año a año.
- la radiación dentro de un invernadero se ha estimado a partir de valores de radiación solar medida en exterior y un valor medio de transmisividad. Este valor de transmisividad se ha obtenido como el cociente entre la radiación medida dentro de un invernadero simétrico (aprox. 10° de pendiente de la cubierta) y la radiación medida fuera de invernadero. No obstante la transmisividad varía con la inclinación solar, ángulo de la cubierta, envejecimiento y suciedad del material plástico. Por lo que se hace necesario el desarrollo o adaptación de un modelo de transmisividad que tenga en cuenta todos estos factores para mejorar la precisión de los programas de riego medios.
- la pendiente de la cubierta del invernadero tiene mayor influencia en la transmisividad de la radiación solar en los meses de invierno, mientras que en verano y primavera ésta disminuye. La información existente indica que el envejecimiento del plástico provoca aproximadamente un 5% de pérdida de luz.

Necesidades brutas de riego

Las dosis de riego calculadas a partir de ET_{c_m} y ET_{c_r} son dosis netas, por lo que hay que tener en cuenta la falta de uniformidad del sistema de riego.

Eficiencia del sistema de riego. Debido a varias causas los emisores de una instalación de riego por goteo arrojan caudales que no son exactamente iguales entre sí, lo que ocasiona que los cultivos reciban dosis de riego diferentes. El coeficiente de uniformidad (CU) nos permite medir la uniformidad del sistema de riego, y se define como el cociente entre el caudal medio descargado por los emisores de más bajo caudal y el caudal medio de todos los emisores. En los sistemas de riego por goteo es necesario contar con coeficientes de uniformidad superiores al 94%, al estar el volumen radicular más concentrado en las zonas húmedas y trabajar con bajas tensiones de humedad del suelo.

El CU puede disminuir de forma considerable con el uso continuado de la instalación, por tanto, se deberían evaluar todos los años las instalaciones de riego por goteo, y en función del CU calcular las necesidades brutas de riego.

Por tanto, las dosis brutas de riego (Rb) teniendo en cuenta la eficiencia del sistema de riego se calculan:

$$CU = \frac{\text{Caudal medio de emisores de mas bajo caudal}}{\text{Caudal medio de todos los emisores}} \quad (3.25)$$

$$Rb = \frac{ETc}{CU}; Rb = ETc * f \quad (3.26)$$

CU	f
100	1.00
95	1.05
90	1.11
85	1.18
80	1.25
75	1.33

En la tabla anterior se presentan los valores de mayoración en función del coeficiente de uniformidad de la instalación de riego por goteo, f .

En los invernaderos hidropónicos es imprescindible tener un adecuado manejo de lavado de sales, ya que la acumulación de sales, producto de mezclar los nutrientes requeridos por las plantas con el agua de riego, pueden causar problemas relacionados con el suelo y con el cultivo, provocando la reducción de rendimientos. Un alto contenido de sales disueltas en el suelo disminuye el potencial osmótico y exige a las raíces un esfuerzo adicional para absorber el agua. Para disolver y separar las sales se deberá aplicar una cantidad de agua adecuada que permita la infiltración a través de la totalidad del sistema radicular. A esta cantidad de agua se le denomina fracción de lavado FL y se define como la fracción del agua que penetra en el suelo y sobrepasa el sistema de raíces.

$$FL = \frac{CEi}{2 * MaxCEe} \quad (3.27)$$

donde

CEi : es la conductividad del agua de riego

$MaxCEe$: es la mínima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reducirá la cosecha a cero

En la siguiente tabla se dan los valores de CEi y $MaxCEe$ para algunos cultivos hortícolas

El *CU* puede disminuir de forma considerable con el uso continuado de la instalación, por tanto, se deberían evaluar todos los años las instalaciones de riego por goteo, y en función del *CU* calcular las necesidades brutas de riego.

Por tanto, las dosis brutas de riego (*Rb*) teniendo en cuenta la eficiencia del sistema de riego se calculan:

$$CU = \frac{\text{Caudal medio de emisores de mas bajo caudal}}{\text{Caudal medio de todos los emisores}} \quad (3.25)$$

$$Rb = \frac{ETc}{CU}; Rb = ETc * f \quad (3.26)$$

<i>CU</i>	<i>f</i>
100	1.00
95	1.05
90	1.11
85	1.18
80	1.25
75	1.33

En la tabla anterior se presentan los valores de mayoración en función del coeficiente de uniformidad de la instalación de riego por goteo, *f*.

En los invernaderos hidropónicos es imprescindible tener un adecuado manejo de lavado de sales, ya que la acumulación de sales, producto de mezclar los nutrientes requeridos por las plantas con el agua de riego, pueden causar problemas relacionados con el suelo y con el cultivo, provocando la reducción de rendimientos. Un alto contenido de sales disueltas en el suelo disminuye el potencial osmótico y exige a las raíces un esfuerzo adicional para absorber el agua. Para disolver y separar las sales se deberá aplicar una cantidad de agua adecuada que permita la infiltración a través de la totalidad del sistema radicular. A esta cantidad de agua se le denomina fracción de lavado *FL* y se define como la fracción del agua que penetra en el suelo y sobrepasa el sistema de raíces.

$$FL = \frac{CEi}{2 * MaxCEe} \quad (3.27)$$

donde

CEi : es la conductividad del agua de riego

MaxCEe : es la mínima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reducirá la cosecha a cero

En la siguiente tabla se dan los valores de *CEi* y *MaxCEe* para algunos cultivos hortícolas

Cultivo	MaxCEe(dS/m)	CEi (dS/m)
Ejote	6.5	0.7
Melón	16.0	1.5
Jitomate	12.5	1.7
Pimiento	8.5	1.0
Pepino	10.0	1.7

Las dosis brutas de riego, teniendo en cuenta las necesidades de lavado se calculan mediante la expresión:

$$Rb = \frac{ETc}{1 - FL}; Rb = ETc * f' \quad (3.28)$$

donde, f' es el factor de mayoración en función de la fracción de lavado según la conductividad eléctrica del agua de riego.

Teniendo en cuenta la uniformidad del sistema de riego y las necesidades de lavado de sales, las dosis brutas de riego se determinarían de la siguiente forma:

$$Rb = Rn * f * f' \quad (3.29)$$

Estas dosis brutas de riego asegurarían el control de sales en toda la superficie regada, pero aumentaría mucho las pérdidas medias por drenaje. Por tanto, se propone que se calcule Rb como el producto de Rn y el mayor de los valores f o f' . Nótese además que Rn es ETc

Parte II
SOLUCION DEL PROBLEMA

Capítulo 4

Propuestas de solución para programación del riego

Como se ha planteado en el capítulo 1, el objetivo de este trabajo es implementar un sistema de control de riego eficiente, de bajo costo y fácil implantación. Los puntos clave que constituyeron parte de la solución fueron los siguientes:

1. Elección del método de programación de riego
2. Cálculo de la evapotranspiración
3. Cálculo del riego a aplicar
4. Ajustes al riego calculado, por medio del uso de un control difuso

Cada uno de estos puntos tiene una meta establecida dentro del trabajo y el cumplimiento de cada uno nos lleva al resultado.

4.1 Método de programación de riego.

El método de programación de riego que se seleccionó, fue el método de estimación de la evapotranspiración por medio de medición de parámetros climáticos. Los criterios para la selección del método fueron :

1. La fórmula FAO Penman-Monteith es recomendada por la FAO como el método estándar para la estimación de la evapotranspiración para un cultivo estándar. Este método ha probado su validez global como una referencia estandarizada y ha sido reconocida por la Comisión Internacional para Irrigación y Drenaje (International Commission for Irrigation and Drainage) y por la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization)

2. De forma paralela se utiliza el modelo de radiación de la FAO (FAO Radiation (Makkink)), para efectuar un análisis comparativo y considerando además que dentro del invernadero el efecto de la acción del viento en la evapotranspiración es muy limitado.
3. El considerar una evapotranspiración de referencia (ET_o) para un cultivo hipotético con parámetros fijos, permite a la larga, eliminar problemas relacionados con los requerimientos a medir la evapotranspiración en sitio, además de que facilita la calibración de los coeficientes del cultivo para la estimación de los requerimientos de agua por parte del cultivo
4. Para permitir el uso de la formula FAO Penman-Monteith o el de FAO Radiación (Makkink), incluso en condiciones donde no estan disponibles todos los datos climáticos que la fórmula requiere, se han desarrollado y probado procedimientos para estimar los datos no disponibles. Estos procedimientos han probado ser más exactos que la adopción de otros métodos empíricos e incrementan la transparencia y consistencia de los cálculos de requerimiento de agua para un cultivo de referencia, además de que eliminan el uso de cualquier otro método de estimación de ET_o . [Smith, 2002]

4.2 Cálculo de la evapotranspiración y riego a aplicar

Retomando el análisis hecho en el capítulo anterior sobre el modelo para determinar la ET_c (evapotranspiración) y el programa de riego en un invernadero. La estimación de la evapotranspiración para el invernadero de prueba se llevará a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (4.1)$$

en donde:

ET_o : es la evapotranspiración para un cultivo de referencia

K_c : es el coeficiente del cultivo

La ET_o se calcula mediante la aplicación de la fórmulas FAO-Penman-Monteith 3.1, FAO Radiación (Makkink) 3.2, donde es claro que se requiere de datos climáticos.

El invernadero sobre el cual se tomaron los datos que permitieron establecer un riego bruto base se encuentra ubicado en la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Querétaro, cuenta con un sistema de captura y almacenamiento de información de sensores de humedad interna y externa, velocidad y dirección de viento, temperatura externa y cuatro sensores de temperatura interna colocados en diferentes lugares dentro del invernadero. Los sensores se encuentran conectados a una computadora que adquiere datos cada 5 minutos. Los datos han sido recolectados desde principios del año 2001 a la fecha.

Para efectivamente llevar a cabo el cálculo de la ET_o , según 3.1 es necesario efectuar el cálculo de: R_n , G , VPD , Δ , y γ . tal y como se muestra a continuación.

4.2.1 Radiación neta en la superficie del cultivo, R_n

R_n calcula de la siguiente forma:

$$R_n = R_{ns} \downarrow - R_{nl} \uparrow \quad (4.2)$$

donde:

R_n : radiación neta [$MJ\ m^{-2}d^{-1}$]

R_{ns} : radiación de onda corta que llega al suelo [$MJ\ m^{-2}d^{-1}$]

R_{nl} : radiación de onda larga que es reflejada [$MJ\ m^{-2}d^{-1}$]

A pesar de que en el invernadero no se cuenta con radiómetros ó piránómetros, si se cuenta con una estación climatológica situada a 300 mts. de éste operada por la facultad de ingeniería, por lo que la radiación solar es un dato disponible que debe adecuarse según la ecuación 3.13 que se vió en el capítulo anterior. De esta forma se esta en posibilidades de calcular la radiación de onda corta, que es la radiación efectiva recibida por la canopía del cultivo considerando las pérdidas por la reflexión, mediante la ecuación:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \approx 0.77R_s \quad (4.3)$$

donde:

α : albedo ó coeficiente de reflexión de la canopía, varía entre 0.20 y 0.25

R_s : radiación solar que llega [$MJ\ m^{-2}d^{-1}$]

Como se esta calculando la evapotranspiración de referencia dentro del invernadero, es necesario ajustar la radiación obtenida por los sensores de la estación climatológica externa, a la radiación dentro del invernadero mediante la ecuación 3.13, donde el valor de transmisividad es de 75%.

Aún y cuando no se tuviera las mediciones de radiación solar, la metodología propuesta por la FAO, proporciona ecuaciones alternativas que pueden utilizarse, con datos que estan disponibles para todos, como lo son las horas de luz solar y algunas constantes como las de Armstrong (ver anexo sección 6.1)

Para el cálculo de la radiación neta de onda larga R_{nl} , que es la radiación termal de la planta y el suelo hacia la atmósfera y la radiación reflejada desde la atmósfera y las nubes, para propositos generales y solo cuando los datos de humedad y horas de luz solar estan disponibles, se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_{nl} = 2.45 \times 10^{-9} \left(0.9 \frac{n}{N} + 0.1 \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_d}) (T_{kx}^4 + T_{kn}^4) \quad (4.4)$$

donde:

T_{kx} : temperatura máxima en el día [°K]

T_{kn} : temperatura mínima en el día [°K]

n : horas de luz solar por día [hr]

N : duración total del día [hr]

4.2.2 Flujo termal del suelo

El flujo termal del suelo es el calor almacenado y liberado desde el suelo. Para estimar el flujo de calor para un periodo determinado se puede emplear la ecuación:

$$G = c_s d_s \left(\frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} \right) \quad (4.5)$$

donde:

G : flujo termal del suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

T_n : temperatura [°C] en el día ó mes n

T_{n-1} : temperatura [°C] en el día ó mes precedente $n-1$

Δt : longitud de período n [d]

c_s : capacidad volumétrica de calor [$\text{MJ m}^{-3} \text{C}^{-1}$] ≈ 2.1 [$\text{MJ m}^{-3} \text{C}^{-1}$]
para humedad promedio del suelo

d_s : profundidad efectiva estimada del suelo [m]

Sin embargo dado que la magnitud del flujo diario termal del suelo sobre periodos de 10 a 30 días es relativamente pequeño se puede considera que $G = 0$. (ver anexo 7.1)

4.2.3 Déficit de presión de vapor ($e_a - e_d$)

El déficit de presión de vapor VPD consta de dos términos e_a saturación de presión de vapor y e_d la saturación de presión de vapor a punto de rocío.

La saturación de presión de vapor, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$e_a = 0.611 \exp \left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right) \quad (4.6)$$

e_a : presión de vapor a saturación [kPa]

T : temperatura [°C]

La saturación de presión de vapor a punto de rocío en condiciones promedio (clima templado) varía de 1 a 5 [kP] [FAO, 1990].

4.2.4 Curva presión del vapor (Δ)

La curva de presión del vapor se calcula de la forma siguiente:

$$\Delta = \frac{4098e_a}{(T + 237.3)^2} \quad (4.7)$$

donde:

Δ : pendiente de la curva presión del vapor [$\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$]

T : temperatura del aire [$^\circ\text{C}$]

e_a : presión del vapor a saturación a la temperatura T [kPa]

4.2.5 Constante psicrométrica (γ)

La constante psicrométrica se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} \times 10^{-3} = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \quad (4.8)$$

donde:

γ : constante psicrométrica [$\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$]

c_p : calor específico de aire húmedo = $1.013 \text{ [kJ kg}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$

P : presión atmosférica [kPa]

ϵ : porcentaje de peso molecular de vapor de agua/aire seco = 0.622

λ : calor latente de vaporización [MJ kg^{-1}]

donde λ , se obtiene a su vez de la ecuación: $\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3})T$, donde T es la temperatura del aire en $^\circ\text{C}$.

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ET_o según FAO Radiación (Makkink) se

aplican las ecuaciones 3.2 a 3.11.

La figura muestra la ET_o obtenida con cada uno de los métodos.

Una vez que se ha calculado la evapotranspiración de referencia ET_o , el paso siguiente es el cálculo del coeficiente de cultivo K_c , por medio del modelo K_c -térmico que se presentó en el capítulo anterior, para el que hay que tomar en cuenta que el cultivo con el que se trabaja en el invernadero es el de jitomate, a razón de 2.5 plantas por m^2 que corresponde a la familia de las solanáceas. Los cálculos de tiempo térmico TT y tiempo térmico acumulado desde emergencia TTA , se llevan a cabo por medio de las ecuaciones 3.15 y 3.16 respectivamente. Una vez obtenidos TT y TTA , se esta en posibilidad de calcular el K_c correspondiente de acuerdo a las ecuaciones 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21. De esta forma se puede efectuar el cálculo de la evapotranspiración por día.

Es importante señalar que las diferentes ET_o obtenidas al aplicar el método de FAO Penman-Monteith ó FAO Radiación nos llevan a obtener diferente evapotranspiración

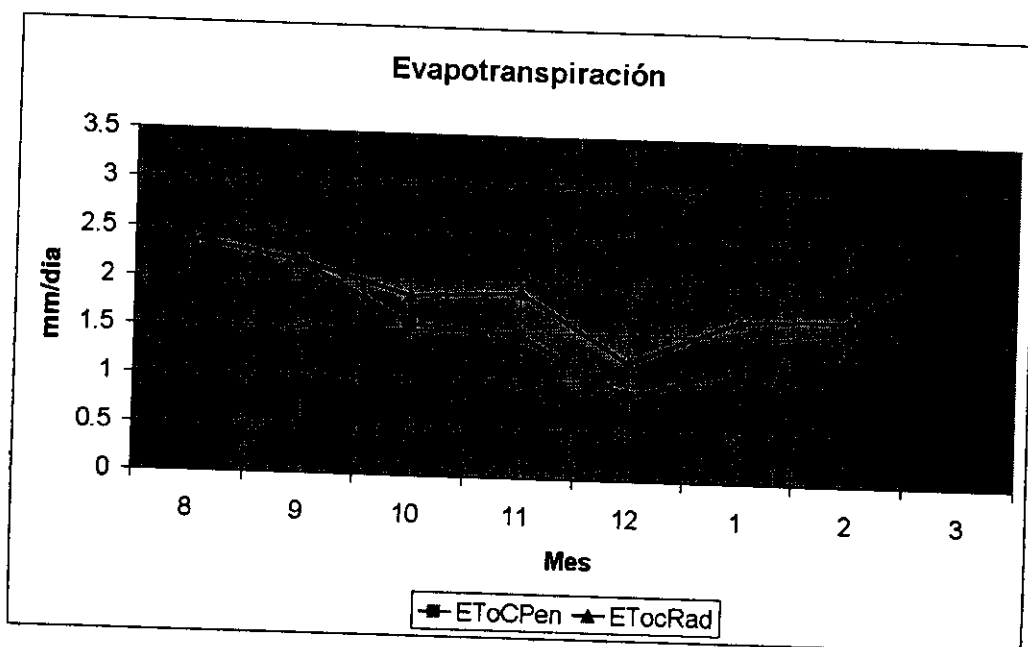


Figura 4.1: Comparación de evapotranspiración obtenida aplicando metodo FAO-Penman-Monteith y FAO-Radiación (Makkink)

por día, aún y cuando el K_c de cultivo no se modifique. En esta parte se recomienda utilizar la ET_o obtenida por el método de FAO Penman-Monteith por ser éste el método más documentado y por tanto con menos posibilidad de error y por ser éste el que nos acerca a lo que de manera manual y con experiencia de los expertos responsables del invernadero se ha estado trabajando.

4.3 Calculo del riego a aplicar

Para cálculo de riego a aplicar, se utilizó el método de programación de riego por tiempo medio ó fijo, que nos permite tener la opción de emplear datos que hayan sido recolectados en una estación hidroclimatológica cercana al sitio donde se encuentra el invernadero, con lo que se puede evitar el uso de sensores costosos en cada invernadero ó sitio donde se desee implantar esta técnica de riego.

En el invernadero de prueba, se tiene un sistema de riego abierto por goteo. De manera que el cálculo de las necesidades de riego, se lleva a cabo mediante el uso de la ecuación 3.25 donde en particular para el invernadero caso de estudio, el caudal medio descargado por los emisores de más bajo caudal es de 3.5 lit h^{-1} y el caudal medio de todos los emisores es de 3.9 lit h^{-1} de ahí que aplicando la ecuación 3.25 se obtiene un factor de mayoración en función del coeficiente de uniformidad f de 1.1147.

Para efectuar el cálculo de las necesidades de lavado, los valores de C_{Ei} que maneja el invernadero es aproximadamente de 2 ds/m, el valor $MaxC_{Ee}$ para cultivo de tomate es de 12.5 ds m^{-1} , por lo cual aplicando la ecuación 3.27, se obtiene una f' de: 1.1135

Una vez que se han obtenido f y f' es posible calcular el riego bruto que es necesario proporcionar a las plantas de tomate de acuerdo a la ecuación 3.29.

Es importante resaltar, que el cálculo del Rb , se hace por día con datos proporcionados por una estación hidroclimatológica cercana al invernadero, ó como en el caso de estudio en donde los datos climatológicos fueron recolectados durante el año 2001, sin embargo se están utilizando para calcular las necesidades de riego de un ciclo de cultivo en el año 2002. Es obvio que existen diferencias entre los valores climáticos de un año a otro, sin embargo estos cambios no son bruscos, por lo que los datos arrojados por el método pueden utilizarse como Rb programado. Sin embargo, es necesario efectuar algunos ajustes a los requerimientos de agua (Rb), para tal efecto se utilizaron los conocimientos y experiencia de el ingeniero agrónomo que labora en el invernadero, Fernández [Fernández, 2001] y Suay [Suay, 2002] sugieren aumentar ó disminuir el riego programado de acuerdo a: la edad de la planta y a la temperatura observada que puede diferir de la temperatura ideal (28 a 30 °C) para el crecimiento del tomate. Por ejemplo, en el caso de una temperatura alta, digamos 36 °C, no se aumentará en la misma magnitud el riego programado a una planta de 1 semana de edad que a una planta de 17 semanas a la misma temperatura.

A este respecto parte de la información proporcionada por los expertos que tienen a su cargo el invernadero de la Facultad de Ingeniería, se representa en la siguiente en la tabla de la figura 4.2:

Edad en semanas	ml de riego por día
1 a 3	250 a 300
5 a 8	500 a 1800
10 ó más	2400

Temperatura	Considerada
38°C a 48°C	Muy alta
31°C a 37°C	Alta
22°C a 30°C	Ideal
15°C a 22°C	Baja
-5°C a 15°C	Muy baja

Figura 4.2: Clasificación de las variables de temperatura y edad de las plantas

Una vez conocida la clasificación de las variables que el experto toma en consideración para estimar el riego a proporcionar para cada planta. Los expertos efectúan las siguientes observaciones:

”La temperatura se considera ”muy alta” si alcanza más de $37^{\circ}C$ para estas condiciones si una planta es muy joven al riego establecido para una planta joven se le proporciona un 20% de riego programado de forma adicional.”

La relación entre la edad de la planta y la variable de temperatura así como el % de ajuste en el riego se observa en la figura:

-0.08	-0.06	0	0.1	0.2
-0.1	-0.08	0	0.2	0.35
-0.12	-0.1	0	0.3	0.5

Figura 4.3: Relación temperatura-edad del cultivo- % de ajuste en riego

La frecuencia de los ciclos de riego son muy importantes de cara al éxito del sistema. La frecuencia mínima de los riegos dependerá de:

1. La naturaleza de la cosecha
2. El tamaño de la cosecha
3. Los factores climáticos
4. La hora del día.

Las cosechas de porte elevado y frutos necesitarán más frecuentemente los riego que las más bajas y con mayor superficie foliar, como por ejemplo las lechugas, ya que debido a su mayor superficie tienen más pérdidas por evapotranspiración. El tiempo seco y caluroso dará lugar a una rápida evaporación y por tanto será precisa una mayor frecuencia de los riegos. Al mediodía, cuando la intensidad de la luz y temperatura es más elevada, deberá reducirse el periodo entre los ciclos de riego.

Para la mayoría de las cosechas, el medio deberá regarse por lo menos de tres a cuatro veces por día durante los meses del invierno, mientras que en verano será necesario a menudo el regar al menos una vez por hora durante el día. El bombeo durante la noche no será necesario. En las zonas templadas, los riegos de la temporada de verano deberían efectuarse desde las 6:00 AM a las 7:00 AM, mientras que durante el invierno deberían tener lugar desde las 8:00 AM a las 4:00 PM.

Para implementar esta serie de consideraciones se optó por aplicar un control difuso, ya que no existen métodos analíticos que nos permitan calcular con exactitud, como debe ajustarse Rb y distribuirse a lo largo del día.

Capítulo 5

Propuesta de ajuste del riego

5.1 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 [[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, que esta 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. Por ejemplo:

1) La impresión de una página en una impresora láser se toma normalmente 0.25 seg., ¿cuánto tiempo tomará imprimir un documento de 100 páginas?

2) Casi siempre que hay un huracán en las costas del pacífico, la temperatura en la zona centro del país es baja. ¿Como será la temperatura el día de mañana, si esta a punto de entrar un huracán en la costas de Oaxaca?

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 siguientes maneras:

- El significado de una proposición léxica imprecisa es representada como una acotación elástica sobre una variable
- la respuesta a una pregunta se deduce a través de la propagación de restricciones elásticas.

La lógica difusa se concibió para su aplicación en procesos de control. La primera implementación de lógica difusa fue hecha por Mamdani y Assilian en 1974 [Mamdani, 1975] y se ha aplicado también en otras áreas, tales como en la operación de un tren automático (Hitachi), en el control de vehículos (Sugeno Laboratory at Tokio Institute of Technology), en el control de un robot (Hirota Laboratory at Hosei University), en el reconocimiento de voz (Ricoh), en un controlador universal (Fuji). En todas estas aplicaciones se considera que se aplicó un controlador difuso basado en el conocimiento (FKBC, fuzzy knowledge based controller).

La estructura principal de un FKBC se representa en la siguiente figura: cada uno de los componentes que se ilustran, se describen en la siguiente sección.

5.1.1 Estructura de un controlador difuso

Modulo de fusificación

Función de normalización La función de 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.

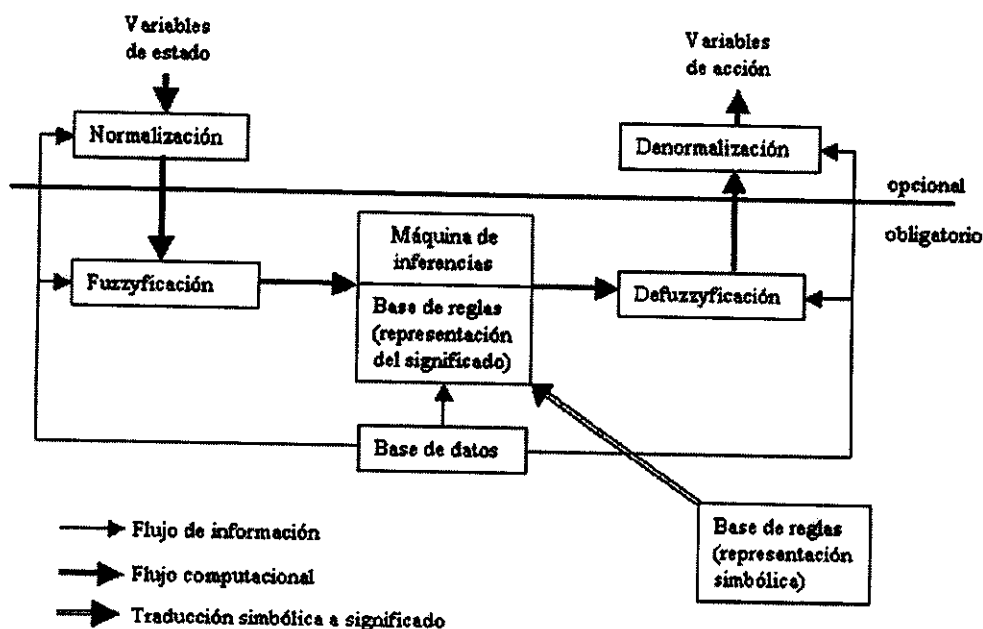


Figura 5.1: Estructura de un sistema difuso basado en el conocimiento

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.

- 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 modulo 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 cual mapea este punto 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.

5.1.2 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. Por ejemplo, *Edad* es una variable lingüística si sus valores son lingüísticos más que numéricos, i.e., *joven, no joven, muy joven, demasiado joven, viejo, no muy viejo y no muy joven, etc.*, mas que 20,21,22,23,...."

Es usual en la aproximación del razonamiento tener un marco asociado con la noción de una variable lingüística

$$\langle X, \mathcal{L}X, \mathfrak{X}, Mx \rangle$$

Aquí X denota el nombre simbólico de una variable lingüística, e.g., edad, altura, velocidad, temperatura, error, cambio del error, etc. $\mathcal{L}X$ es el conjunto de *valores lingüísticos* que X puede tomar. En el caso de la variable lingüística *temperatura* T se tiene que

$$\mathcal{L}T = \{\text{frío, fresco, confortable, tibio, caliente}\}$$

$\mathcal{L}X$ es conocido también como el conjunto de términos de X o el conjunto de referencias de X . A un elemento arbitrario de $\mathcal{L}X$ se le denota por LX . \mathfrak{X} es el dominio físico actual sobre el cual la variable lingüística X toma sus valores cuantitativos bien definidos. En el caso de la variable lingüística *temperatura* \mathfrak{X} puede ser el intervalo $[-10^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}]$. En el caso de *velocidad* puede ser $[0 \text{ km/h}, 200 \text{ km/h}]$. Por lo general es usual tener U (para un universo de discurso) en lugar de \mathfrak{X} . \mathfrak{X} puede ser discreta ó continua. Mx es una función semántica la cual da un "significado" (interpretación) de una variable lingüística en términos de los elementos cuantitativos de \mathfrak{X} , i.e.,

$$Mx : LX \longrightarrow \widetilde{LX}$$

donde \widetilde{LX} es una denotación para un conjunto difuso definido sobre \mathfrak{X} , i.e.,

$$\widetilde{LX} = \sum_{\mathfrak{x}} \mu_{LX}(x)/x$$

en el caso de que \mathfrak{X} sea discreto.

$$\widetilde{LX} = \int_{\mathfrak{x}} \mu_{LX}(x)/x$$

en el caso de que \mathfrak{X} sea continuo.

En otras palabras, M_X es una función que toma un símbolo como su argumento, e.g., *frío* y regresa el 'significado' o el *simbolo-frío* en términos de un conjunto difuso, recuerde que μ_{LX} es una función de membresía.

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.

5.1.3 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
- 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. Ésta 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.

5.1.4 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 la 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.

Debido a la dificultad de implementar en computadora, la inferencia basada en la composición, se usa con más frecuencia el segundo, en especial en aquellos FKBC que requieren un tiempo de respuesta menor. De acuerdo a la implicación que se utilice, los dos métodos de inferencia pueden resultar equivalentes ó no.

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.

5.1.5 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 area mayor
- defusificación por el primero de los máximos
- defusificación por el promedio de los máximos
- defusificación por alturas

El método de defusificación tiene mucha influencia sobre el desempeño del controlador. Los métodos que son utilizados con más frecuencia son: el centro de gravedad de área (CDG), el centro de sumas (COS) y el promedio de los máximos (MOM).

Método del centro de gravedad de área

En este método el valor u^* será el centro geométrico del valor de salida difuso $\mu_{out}(u)$, donde $\mu_{out}(u)$ es la unión de todas las contribuciones de las reglas cuyo grado de cumplimiento sea mayor de cero. El centro es el punto que divide el área bajo la curva de $\mu_{out}(u)$ en dos partes iguales. Se asume que el universo de discurso es discretizado entonces la salida fusificada se define como:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{out}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{out}(u_i)} \quad (5.1)$$

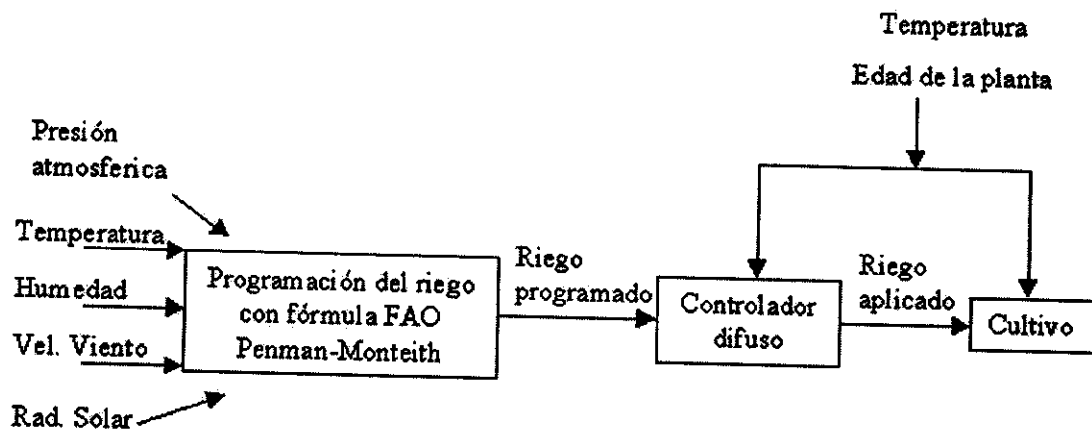


Figura 5.2: Procedimientos del control de riego

Donde la sumatoria (integración) se aplica sobre los valores del universo de discurso u_i muestreando N puntos. Éste método toma en cuenta el área de la función de membresía resultante de $\mu_{out}(u)$.

El modelo del sistema de control de riego propuesto se ilustra en la figura 5.2

Parte III
RESULTADOS

Capítulo 6

Implementación del sistema de control difuso

6.1 Control difuso propuesto

De acuerdo a la figura 5.2 el sistema de control de riego se divide en dos partes: la primera consiste en el cálculo del riego con base al procedimiento presentado en el capítulo 4, utilizando datos climáticos recolectados durante al año 2001. Con tal procedimiento se obtiene una tabla de riego programado en la que con base a la fecha de trasplante se puede obtener el riego que se tendrá que aplicar en un día determinado. Una porción de esta tabla se ilustra en la figura 6.1, en ésta se muestra por ejemplo que para una planta trasplantada el día 30 de septiembre, la cantidad de riego a aplicar para el día 28 de octubre es de 0.68 litros m^{-2} día

La segunda parte del sistema de control consiste en ajustar el valor obtenido de las tabla mediante un control difuso, el esquema de control que se plantea corresponde a un control *feedforward*.

Las variables de entrada para el control son T y E que corresponden a las variables lingüísticas de temperatura actual del invernadero y edad de la planta respectivamente, la variable de salida del control es G que es la variable lingüística de porcentaje de aumento al riego programado, los marcos asociados a dichas variables lingüísticas son: $\langle T, \mathcal{L}T, \mathcal{T}, M_T \rangle$, $\langle E, \mathcal{L}E, \mathcal{E}, M_E \rangle$ y $\langle G, \mathcal{L}G, \mathcal{G}, M_G \rangle$ donde:

$$\mathcal{L}T = \{\text{muy baja, baja, ideal, alta, muy alta}\}$$

$$\mathcal{L}E = \{\text{muy joven, joven, adulta}\}$$

$$\mathcal{L}G = \{\text{muy pequeño, pequeño, ideal, mediano, grande, muy grande}\}$$

	A	B	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN
1			Fecha de trasplante						
2			27-sep-01	28-sep-01	29-sep-01	30-sep-01	01-oct-01	02-oct-01	03-oct-01
126		16-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
127		17-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
128		20-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
129		21-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
130	F	22-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
131	e	23-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
132	c	25-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
133	h	26-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
134	a	27-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
135		28-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
136	a	29-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
137	c	30-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
138	t	31-oct-01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
139	u	01-nov-01	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
140	a	02-nov-01	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
141	l	03-nov-01	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
142		04-nov-01	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69

Figura 6.1: Tabla de riego programado

\mathfrak{T} es el intervalo $[-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}]$, \mathfrak{E} es el intervalo $[0\text{ semanas}$ a $25\text{ semanas}]$ y \mathfrak{G} es el intervalo $[-12\%$ a $60\%]$

Las funciones semánticas M_T , M_E y M_G para dar significado a las variables T , E y G en términos de los elementos de \mathfrak{T} , \mathfrak{E} y \mathfrak{G} son:

$$M_T : LT \longrightarrow \widetilde{LT}$$

$$\widetilde{LT} = \sum_{\mathfrak{T}} \mu_{LT}(t)/t \quad (6.1)$$

$$M_E : LE \longrightarrow \widetilde{LE}$$

$$\widetilde{LE} = \sum_{\mathfrak{E}} \mu_{LE}(e)/e \quad (6.2)$$

$$M_G : LG \longrightarrow \widetilde{LG}$$

$$\widetilde{LG} = \sum_{\mathfrak{g}} \mu_{LG}(g)/g \quad (6.3)$$

donde μ_{LT} , μ_{LE} y μ_{LG} son funciones de membresía.

Las funciones de membresía toman una forma trapezoidal de la forma:

$\Pi : U \rightarrow [0, 1]$ con cuatro parámetros definida como:

$$\Pi(u; \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \begin{cases} 0 & u < \alpha \\ (u - \alpha) / (\beta - \alpha) & \alpha \leq u < \beta \\ 1 & \beta \leq u \leq \gamma \\ (\delta - u) / (\delta - \gamma) & \gamma \leq u \leq \delta \\ 0 & u > \delta \end{cases} \quad (6.4)$$

Se define un conjunto de m reglas como:

if t is $LT^{(k)}$ and e is $LE^{(k)}$ then g is $LG^{(k)}$, $k = 1, \dots, m$.

Notése que $m = 13$.

Al aplicar estas reglas con variables de entrada definidas por t y e se obtienen m conjuntos difusos de la forma: $\widetilde{CLG}^{(1)}, \dots, \widetilde{CLG}^{(m)}$. Por lo que la salida del control total \widetilde{G} ó μ_G se obtiene como:

$$\widetilde{G} = \cup_{k=1}^m \widetilde{CLG}^{(m)} \quad (6.5)$$

Sobre la salida obtenida con 6.5, se aplica el método de defusificación del centroide, que se calcula según la ecuación 5.1

Las figuras 6.2, 6.3, 6.4 muestran la implementación de las funciones de membresía propuestas:

Las conjunto m de reglas aplicadas esta definido de la siguiente manera:

1. *If (Temperatura is muybaja) and (Edad is joven) then (gasto is mpeq)*
2. *If (Temperatura is muybaja) and (Edad is adulta then (gasto is mpeq)*
3. *If (Temperatura is baja) and (Edad is adulta) then (gasto is mpeq)*
4. *If (Temperatura is muybaja) and (Edad is muyjoven) then (gasto is peq)*
5. *If (Temperatura is baja) and (edad is muyjoven) then (gasto is peq)*
6. *If (Temperatura is baja) and (Edad is joven) then (gasto is peq)*

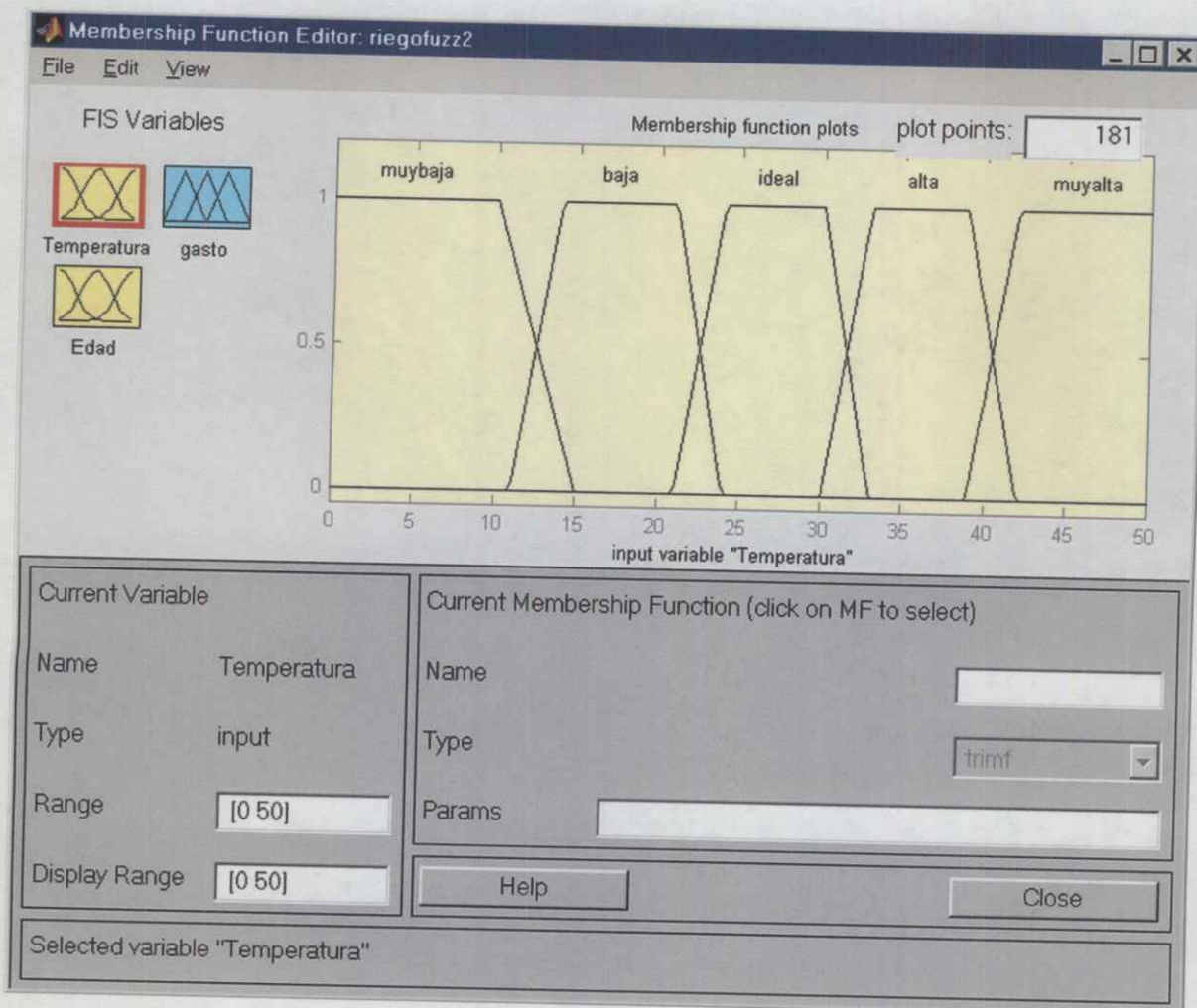


Figura 6.2: Función de membresía para la variable temperatura

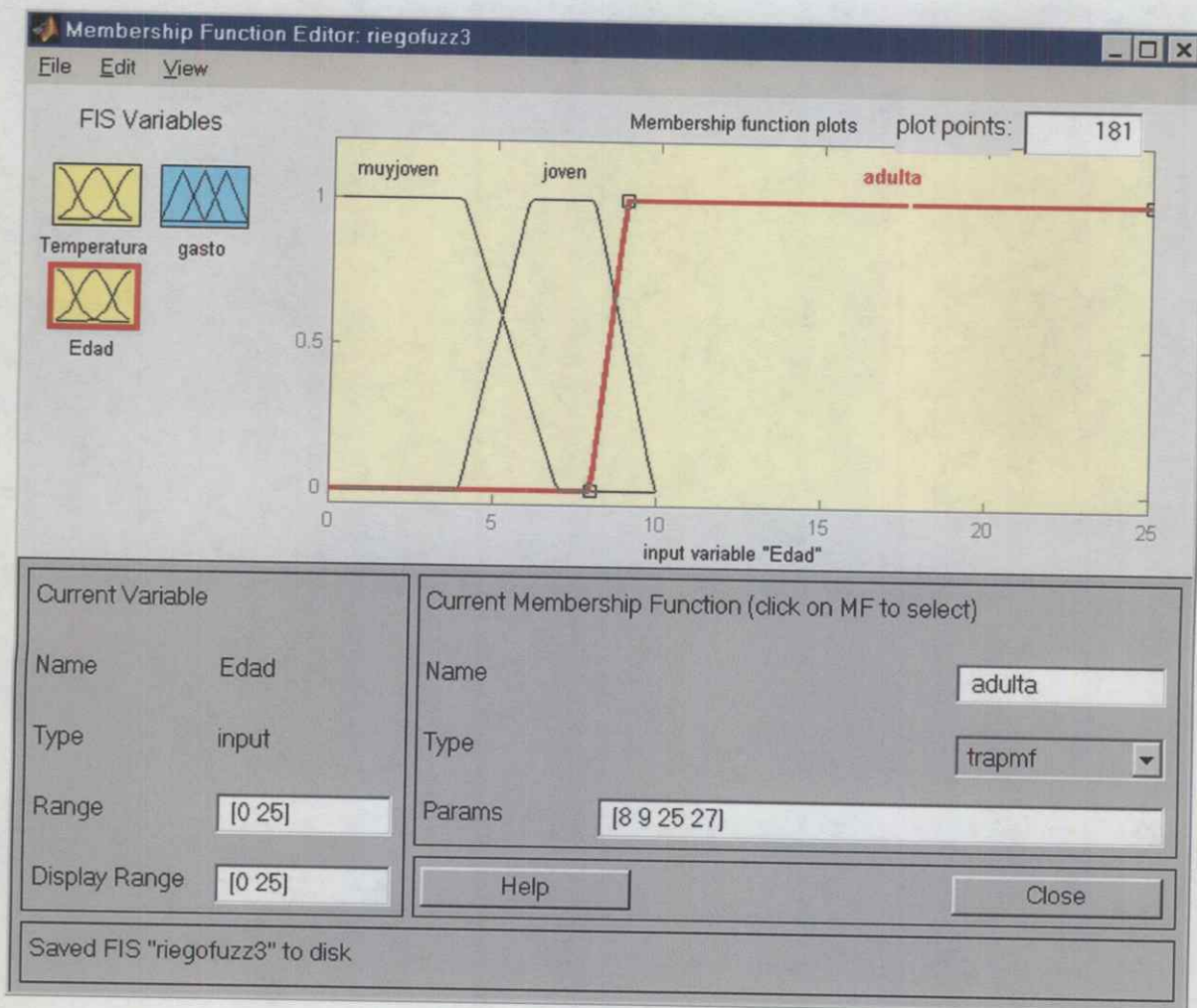


Figura 6.3: Función de membresía para la variable edad

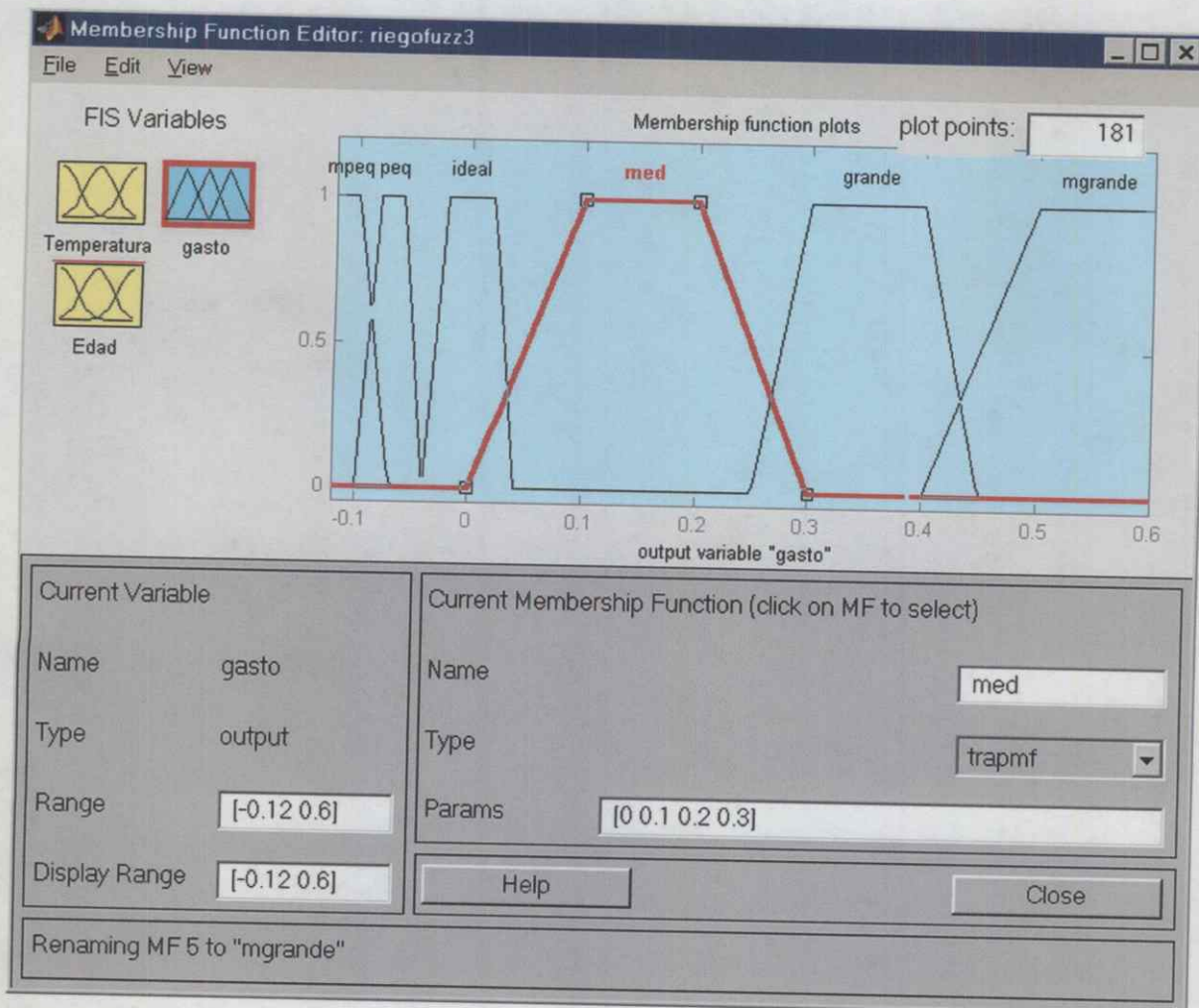


Figura 6.4: Función de membresía para la variable de gasto

Programa riegofuzz.vi

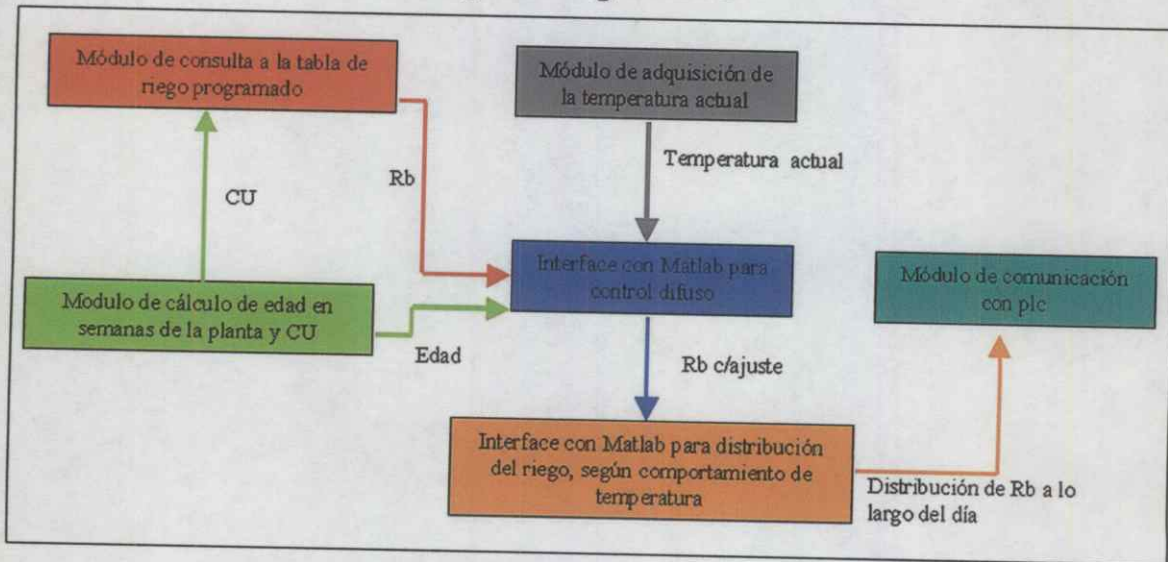


Figura 6.5: Módulos de programa riegofuzz.vi

7. *If (Temperatura is alta) and (Edad is muyjoven) then (gasto is med)*
8. *If (Temperatura is alta) and (Edad is joven) then (gasto is med)*
9. *If (Temperatura is alta) and (Edad is adulta) then (gasto is grande)*
10. *If (Temperatura is muyalta) and (Edad is muyjoven) then (gasto is med)*
11. *If (Temperatura is muy alta) and (Edad is joven) then (gasto is grande)*
12. *If (Temperatura is muy alta) and (Edad is adulta) then (gasto is mgrande)*
13. *If (Temperatura is ideal) then (gasto is ideal) then (gasto is ideal)*

Finalmente para efectuar la distribución del riego ajustado durante el día considerando el cociente del producto del porcentaje acumulado de temperatura en cada hora por el riego diario propuesto y el acumulado de temperatura en el horario de riego.

6.2 Resultados

De esta forma el control difuso propuesto se implementó en el software Matlab 6.2 para posteriormente ser utilizado en un software desarrollado en Labview 5. Éste consta de varios módulos tal y como se muestra en la figura 6.5:

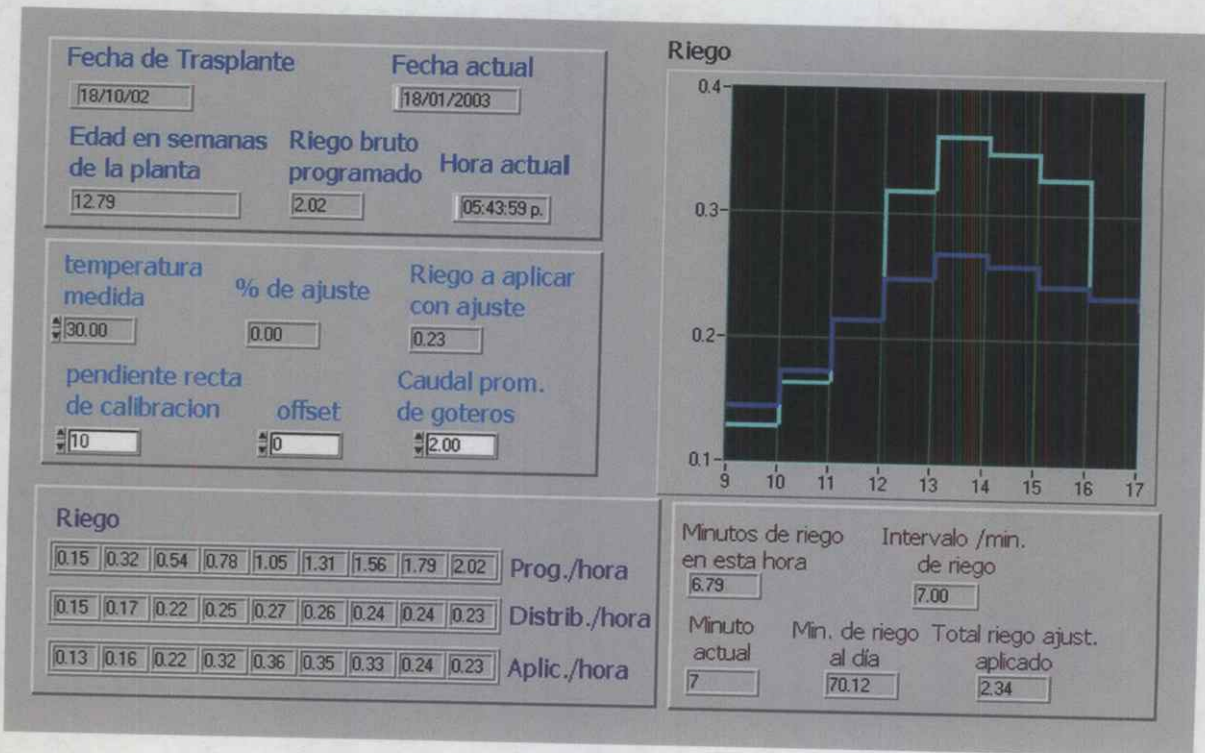


Figura 6.6: Interfaz de labview

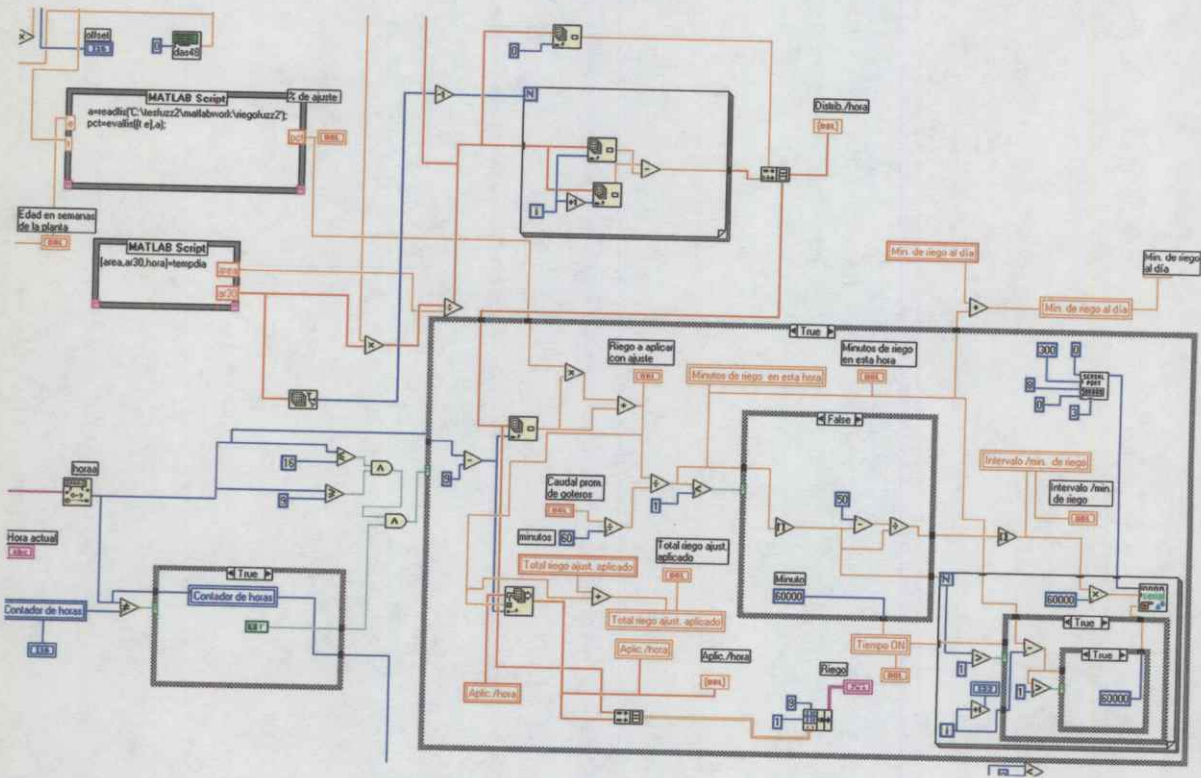


Figura 6.7: Parte de código de labview que incluye programas de matlab

El software se instaló en una computadora pentium II a 100 MHz, con 32 MB de RAM y 1 GB de disco duro. Así mismo, se instaló un sensor transmisor de temperatura para muestrear la temperatura del invernadero y transmitir estos datos a la tarjeta de adquisición de la computadora.

Las pruebas del software en Labview se realizaron en el invernadero del Pueblito que tiene una superficie de 2000 m², el cual cuenta con una población de 5,400 plantas de tomate de la variedad "*Shirley Gabriela Gironda*" y que emplea la técnica de hidroponía. El sustrato que se emplea en el cultivo está constituido por tezontle distribuido según su tamaño en 3 capas, la capa inferior está constituido por partículas con diámetro de 0.8 cm, la capa interna por partículas con diámetro de 0.2 a 0.8 cm y la capa superior por partículas con diámetro inferior a 0.2 cm.

Para efectuar el riego, se cuenta con una bomba de 2 HP, monofásica que proporciona una presión de 20 mm. por gotero.

Durante 2 días se empleó el software propuesto para efectuar el riego y durante los cuales se efectuaron las siguientes actividades:

- Lectura de los sensores indicadores de humedad, temperatura en el centro del invernadero
- Lectura de la cantidad de agua entregada por distintos goteros
- Lectura de la cantidad de agua entregada por goteros escogidos aleatoriamente
- Ajuste del caudal promedio de los goteros, para entregar realmente el agua requerida por las plantas.
- Comparación de los datos obtenidos a través de los sensores indicadores de temperatura y el sensor transmisor conectado a la computadora
- Verificación sobre el tiempo de encendido y apagado de la bomba.

Los datos recolectados durante los experimentos se muestran en la figura 6.8

En la figura 6.9 se muestra gráficamente el comportamiento de las variables climáticas dentro del invernadero del Pueblito.

La figura 6.10 muestra el riego programado según los datos del año 2001, el riego programado ajustado según el control difuso propuesto y el riego real proporcionado.

Para efectuar las mediciones del riego real proporcionado a las plantas se realizó un muestreo de 10 plantas escogidas de forma distribuida en el área del invernadero. De forma previa al experimento se observó que los goteros tenían caudales muy diferentes de manera que mientras unos goteros proporcionaban el caudal esperado, otros proporcionaban mayor o menor cantidad. Para evitar estrés hídrico en las plantas cuyos

20-Ene-03							
Hora	Temperatura Sensor Hg °C	Temperatura Sensor Digital °C	Temperatura Sensor Transmisor °C	Humedad %	Riego Programado ml	Riego programado con ajuste ml	Riego aplicado ml
09:00	15.8	15.4	17.3	94	150	140	156.5
10:00	20	20.5	20.1	80	160	150	167.9
11:00	20	21	19.84	72	190	170	189.3
12:00	23.4	24.5	22.43	61	210	200	224
13:00	27.5	30.7	25.24	47	260	260	290
14:00	26.5	30.3	25.35	51	290	290	313
15:00	25	26.7	24.86	45	280	280	294.4
16:00	23.5	26.2	23.2	54	260	260	270

Figura 6.8: Tabla de datos para el día 20 de Enero

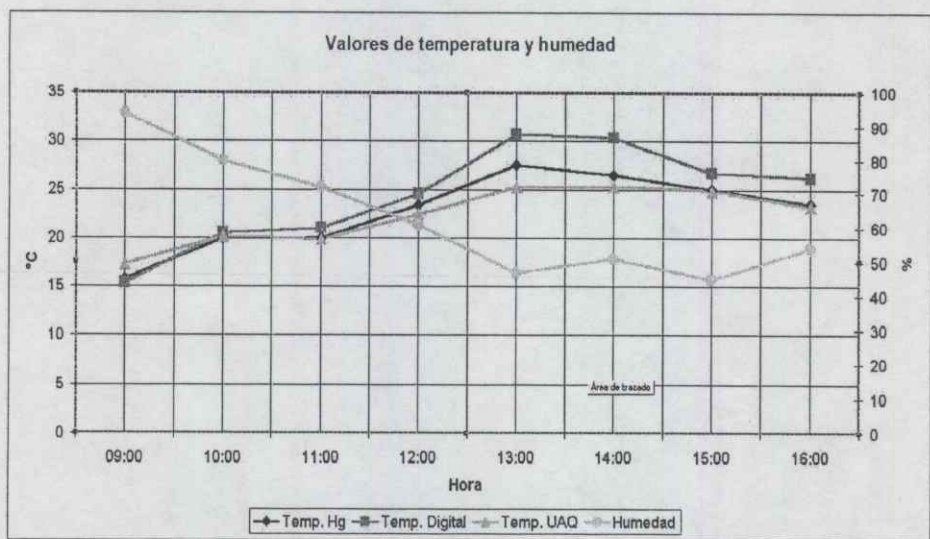


Figura 6.9: Valores de temperatura y humedad del invernadero de El Pueblito del 20 de Enero

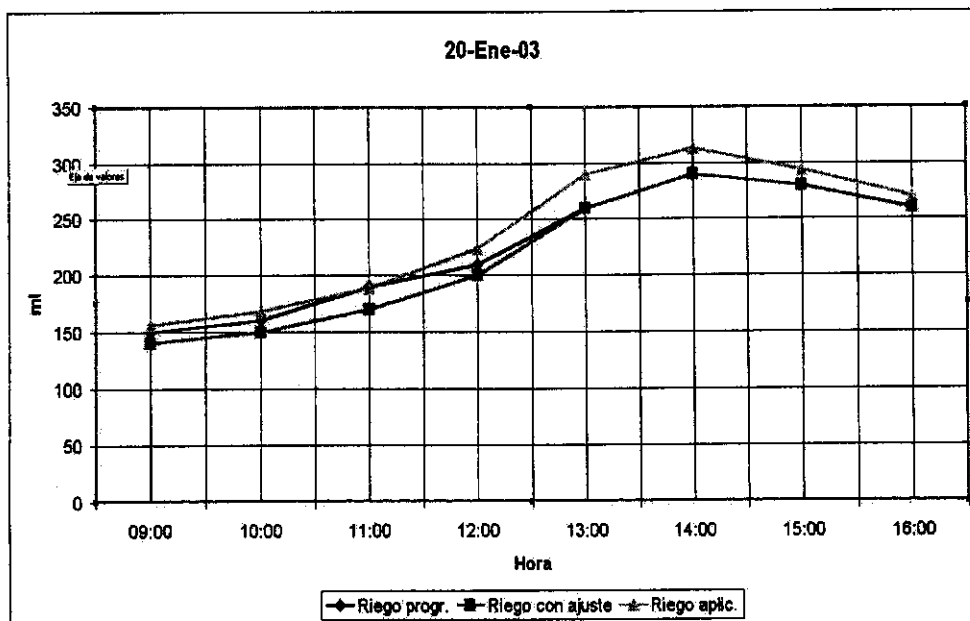


Figura 6.10: Comparación entre riego programado, riego ajustado y riego aplicado

goteros proporcionaban menor caudal, se eligió utilizar un caudal promedio de 1.3. De esta forma se puede apreciar que el riego real proporcionado es mayor que el riego programado ajustado. 6.11

Durante el desarrollo del experimento, se pudo apreciar que la cantidad de riego propuesto ajustado se asemeja a la cantidad de riego manual que de forma empírica se aplica actualmente en el invernadero.

Las plantas no presentaron estrés hídrico, y aunque en los goteros muestreados se proporcionó más agua de la que se tenía programada, haciendo la extrapolación a las 5400 plantas con las que cuenta el invernadero se tiene la relación que mientras de forma empírica se utilizaban 10,000 lts. de solución nutritiva en un día, con el sistema de riego propuesto se proporcionó 9,300 lts. aproximadamente.

hora	planta 1 ml	planta 2 ml	planta 3 ml	planta 4 ml	planta 5 ml	planta 6 ml	planta 7 ml	planta 8 ml	planta 9 ml	planta 10 ml
09:00	186	144	112	170	164	204	144	104	172	160
10:00	196	155	130	188	175	206	157	112	182	178
11:00	226	180	139	208	198	215	177	133	203	214
12:00	272	214	160	249	240	260	184	155	260	252
13:00	344	284	195	324	312	342	264	192	343	319
14:00	382	323	220	349	293	368	295	174	375	353
15:00	368	314	194	328	334	352	280	178	358	234
16:00	340	280	190	320	308	3338	259	184	338	316

Figura 6.11: Cantidad de agua distribuida en 10 plantas de muestra durante 9:00 a 16:00 hrs.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Conclusiones

Existe en el mundo actualmente mucho interés sobre la mejor manera de diseñar y aplicar metodologías para programas de riego en cultivos ya sea abiertos ó en invernaderos. Por esta razón se explica la gran cantidad de investigaciones que se ha desarrollado sobre la mejor manera de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos.

Durante la elaboración de este trabajo, se encontró que muchas de las investigaciones actuales en este campo tienden a coincidir en que la metodología propuesta por Fernández [Fernández, 2001], es una de las soluciones más viables y funcionales de las que hasta ahora se reportan, aún más si se piensa en que el objetivo de desarrollar tecnología en invernaderos deben tener la característica de poder impactar al mayor número posible de productores. Dicha metodología fue diseñada para invernaderos con cultivos en suelos enarenados, sin embargo puede aplicarse a invernaderos hidropónicos siempre y cuando se realicen los ajustes necesarios tal y como se propone en este trabajo para satisfacer la demanda real del cultivo. Tiene además la ventaja de ser un método suficientemente probado en invernaderos de Almería, España desde los años 90's.

Cumpliendo con esta filosofía es posible estimar el riego bruto aproximado aún en invernaderos en los cuales no es posible contar con sensores sofisticados como lo son el sensor de radiación solar, presión barométrica, velocidad y dirección de viento, con datos proporcionados por fuentes cercanas (un invernadero equipado, una estación meteorológica) e incluso por datos proporcionados por la FAO para las distintas regiones del mundo. El riego bruto, calculado de esta forma, puede ser ajustado de acuerdo a las condiciones climáticas particulares de cada invernadero aplicando las reglas y relaciones observadas por los expertos, aprovechando de esta forma su experiencia y conocimientos.

Al finalizar este trabajo se pueden realizar las siguientes consideraciones:

1. **Cálculo de evapotranspiración.-** Existen varias ecuaciones y fórmulas para efectuar el cálculo de la evapotranspiración, que es la base para muchos métodos de programación de riego, estas ecuaciones efectúan varias suposiciones y consideraciones para evitar el uso de las variables climáticas necesarias. El modelo de evapotranspiración más completo es el propuesto por FAO-Penman-Monteith, cuyos resultados son los que se asemejan más a la evapotranspiración real medida según los reportes de varios trabajos, por lo que se justifica la aplicación de ésta ecuación a pesar de requerir varios datos. Así mismo la evapotranspiración así calculada puede ser utilizada por varios invernaderos para programar sus riegos, efectuando los ajustes particulares para cada uno, aplicando el control difuso propuesto.
2. **Variables de entrada.-** Existen varias variables climáticas involucradas en el cálculo de los requerimientos hídricos del cultivo. Un punto muy importante es la consideración sobre cuales son las variables que han de usarse para efectuar el ajuste del riego con control difuso. En la mayoría de los casos se opta por considerar aquellas variables cuyos sensores son de bajo costo, sin embargo es necesario considerar un análisis más profundo sobre la conveniencia o no conveniencia de considerar otras variables diferentes a las aquí propuestas. Por ejemplo el drenaje que presenta el sustrato, la conductividad eléctrica del agua drenada, etcétera.
3. **Otros sistemas de control.-** Durante el desarrollo de este trabajo se observó que es posible implementar otros sistemas de control más sencillos, por ejemplo un control on-off, sin embargo dichos sistemas tienen limitada su capacidad de incorporar nuevas variables de entrada e incluso algunas otras consideraciones "subjetivas" que vayan surgiendo con el manejo del invernadero.

Este método de programación de riego, establece las bases para la realización de un sistema automático de riego de bajo costo.

7.2 Trabajo futuro

Dado que la metodología esta totalmente basada en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia E_{To} a través de variables climáticas sería muy conveniente validar los resultados obtenidos por cualquiera de los dos métodos que se emplearon en este trabajo por medio de la medición de evapotranspiración de un Tanque Evaporímetro Clase A para determinar con exactitud cual método aproxima mejor a la evapotranspiración real que se tiene en los invernaderos localizados en la zona de Querétaro. La asesoría y experiencia que se ha obtenido hasta el momento por parte de investigadores que aplican esta metodología nos indican que FAO Penman-Monteith es el método que más acerca a la evapotranspiración real del cultivo, pero que esto puede variar de un invernadero a otro, debido al manejo de datos.

Es necesario validar esta metodología durante varios ciclos de cultivo, así como recolectar más datos climáticos de la zona, ya que los cálculos fueron efectuados con datos recolectados durante un año. Los expertos indican que para obtener resultados más confiables, se debe trabajar con datos históricos que comprendan al menos 5 años.

El control difuso propuesto puede mejorarse considerando la radiación solar en lugar de la temperatura como variable de entrada, sin embargo esto elevaría el costo de implementar este tipo de control de ajuste de riego. Además de como se observa en el trabajo las variables de temperatura, humedad, radiación solar, presión atmosférica están correlacionadas.

Utilizando el método de distribución del riego propuesto en este trabajo, se recomienda continuar analizando y experimentado sobre la distribución de los minutos de riego en la hora programada ó aplicar dichos minutos concentrados al final, al inicio ó a mitad de la misma.

Con respecto al control difuso es conveniente experimentar con diferentes funciones de membresía, métodos de fusificación y defusificación.

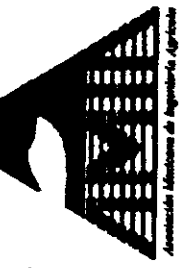
Parte IV

ANEXO

7.3 Artículo



**XII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA
AGRICOLA
Y**



II FORO DE LA AGROINDUSTRIA DEL MEZCAL

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A. Adriana Rojas Molina

Por su participación con la Ponencia "Sistema de riego para invernaderos hidropónicos basado en la evapotranspiración del cultivo", celebrado en el

CIIDIR IPN OAXACA, en
Sta. Cruz Xoxocotlán, Oax.

Del 9 al 11 de octubre del año 2002.

DRA. MA. LUISA DOMÍNGUEZ HDZ.
DIRECTORA DEL CIIDIR OAX.

DR. ARTURO LARA LOPEZ
PRESIDENTE DEL AMIA

SISTEMA DE RIEGO PARA INVERNADEROS HIDROPONICOS BASADO EN LA EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO

Rojas A.¹, Noriega A.*², Herrera G.*²
Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática,¹ Facultad de Ingeniería²
C.U. Av. Universidad Esq. Gabino Barreda s/n
Querétaro, Qro. C.P. 76010
Tel. (4) 2 16 84 30 Ext 116 Fax (4)2 16 64 52
arojas@sunserver.uaq.mx

ABSTRACT

Improving water productivity has required, and requires, more effective management of water, crops and soil. The strategies to make this possible are the selection of appropriate crops and the use of improved planting methods, the latter includes the use of hydroponic greenhouses, which require a strict control to maintain the balance of chemicals in the irrigation solution that furnishes the necessary nutrients to the plant, as well as correct supply of solution; for example a malfunction in the irrigation system could result in hydric stress, quick wilting and finally death of the plant. There are several works on this topic, most of them based either on fixed interval scheduling, or on crop transpiration model derived from the Penman-Monteith equation to determine the hydric requirements of the crop. In this article presented a methodology to determine the hydric requirements of crop in hydroponic greenhouse and its distribution along the crop's cycle, to finally obtain a water saving automatic irrigation system.

Keywords: hydroponic, crop transpiration

RESUMEN

Para obtener una mayor productividad del agua se ha requerido, y se requiere todavía, modificar la gestión de los cultivos, el suelo y el agua. Las posibles estrategias para hacer esto posible son: la selección de cultivos y la utilización de métodos mejorados de siembra, ésta última engloba el empleo de invernaderos hidropónicos, en los cuales se requiere un estricto control sobre el balance de sustancias químicas en la solución de irrigación que proporciona los nutrientes necesarios a la planta, así como un correcto suministro de dicha solución, por ejemplo, el malfuncionamiento en el sistema de riego puede resultar en estrés hídrico, rápido marchitamiento y muerte de la planta. Existen varios trabajos sobre este tema, la mayoría de ellos están basados en una programación del riego por tiempo o emplean un modelo de evapotranspiración del cultivo derivado de la ecuación de Penman-Monteith para determinar las necesidades hídricas del cultivo. En este trabajo se presenta una metodología para determinar las necesidades hídricas de los cultivos en invernadero hidropónico y su distribución durante el ciclo de cultivo, con el objetivo final de implementar un sistema automático de riego.

Palabras clave: hidroponia, evapotranspiración

INTRODUCCIÓN

Se define a la hidroponia como un sistema de producción en el que las raíces de las plantas se irrigan con una mezcla de elementos nutritivos esenciales disueltos en agua y en el que, en vez de suelo, se utiliza como sustrato un material generalmente inerte y estéril el cual

proporciona las condiciones físicas, químicas y sanitarias más adecuadas para el desarrollo vegetal.

El interés por esta técnica de cultivo obedece fundamentalmente a los mayores rendimientos que por unidad de superficie se pueden obtener (100 a 3000% más que el

cultivo convencional en el suelo) (Jensen 1976) [3].

El desarrollo de una tecnología agrícola que permita un uso más eficiente del agua es de vital importancia para el país, ya que en México la disponibilidad de agua es cada vez menor. La mayor parte de la demanda de agua proviene de la agricultura, por ejemplo en Querétaro, un estado principalmente industrial, la Comisión Estatal de Agua (CEA) estima que del volumen anual extraído (aprox. 850 millones de m³); el 84% se destina a uso agrícola, el 9% para agua potable y servicios, el 4% para uso industrial y el 2.5% restante para abrevadero y uso doméstico.

ANTECEDENTES

Uno de los puntos más importantes que se deben considerar para establecer un medio ambiente controlado de agricultura hidropónica es el uso de computadoras. Las computadoras pueden operar cientos de dispositivos en un invernadero (ventilación, calefacción, válvulas mezcladoras, válvulas de irrigación, cortinas, luces, etc.) utilizando parámetros de entrada tales, como temperatura externa e interna, humedad, velocidad y dirección del viento.

Con respecto al sistema de riego las computadoras pueden recolectar y almacenar información relevante tal como temperatura, humedad, niveles de luz y radiación solar, con el fin de analizar la influencia de estos factores en los requerimientos de agua por parte de cultivo, en su desarrollo y finalmente en la calidad del producto (Jensen 1971) [4]. Sin embargo, la mayoría de las veces, el costo de algunos de estos sensores suele ser elevado.

En los cultivos hidropónicos se utilizan dos tipos de sistemas de riego: sistemas abiertos y sistemas cerrados.

Desde un punto de vista técnico y económico, un sistema de riego abierto; es decir sin recirculación de la solución nutritiva, proporciona la ventaja de no tener que efectuar periódicamente costosos análisis químicos, evitando además complicaciones técnicas relacionadas con la recirculación como los son:

alteraciones en el PH, acumulación de sales ó iones tóxicos, transmisión de enfermedades, etc. (Jensen 1971) [4].

Uno de los sistemas de riego más utilizados es el sistema de riego por goteo, que consiste en la aplicación del riego con solución nutritiva directamente hasta el pie de las plantas mediante una red de cintas de goteo que atraviesan las camas (sustrato de soporte a la planta) y dejan salir el agua y la solución nutritiva con un determinado caudal. (Ponce 2001)

JUSTIFICACION

Como ya es bien conocido, la mayor parte del agua absorbida por las plantas se pierde ya sea en forma líquida ó en forma de vapor a través de un proceso llamado transpiración que depende por completo de las condiciones climáticas. Por otro lado, la evaporación es el agua pérdida en forma de vapor por el terreno ó superficie de agua adyacente a la planta, ó por la superficie de las hojas de las plantas. La pérdida de agua por transpiración sumada a la de la evaporación se conoce como evapotranspiración (ETc)

Con el riego se debe aplicar la cantidad justa para cubrir el consumo de agua del cultivo ó ETc. Un exceso de agua de riego supone el lavado de fertilizantes, lo que contribuye a la contaminación de aguas subterráneas. Además, en suelos pesados es común la aparición de problemas de encharcamiento y asfixia radicular. Una aportación inferior a la ETc puede llegar a provocar déficit hídrico y por tanto una reducción de la producción.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un conjunto de procedimientos técnicos (programación del riego) adecuado para predecir cuánto y cuándo regar en invernaderos que no tengan la posibilidad de contar con sensores de alto costo, implementando de esta forma un sistema automático de riego a bajo costo.

