



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE ENERGÉTICOS PARA
INVERNADEROS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Ing. Abel Cháirez Ramírez

Dirigido por:

Dr. Mario Trejo Perea

SINODALES

Dr. Mario Trejo Perea
Presidente



Firma

Dr. José Gabriel Ríos Moreno
Secretario



Firma

Dr. Rodrigo Castañeda Miranda
Vocal



Firma

Dr. Enrique Rico García
Suplente



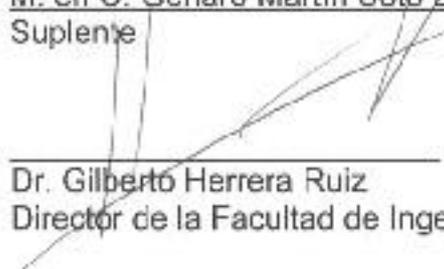
Firma

M. en C. Genaro Martín Sotó Zarázúa
Suplente

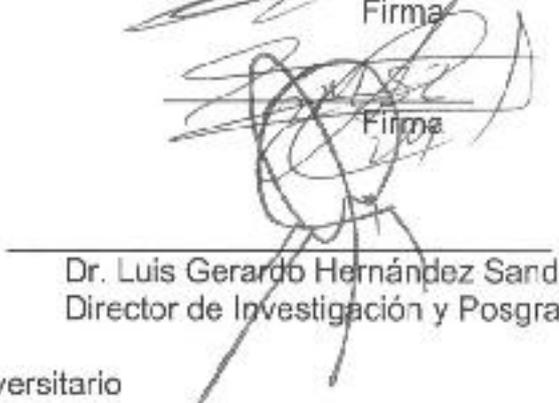


Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado



Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Julio 2009

Ing. Abel Cháirez Ramírez

**Desarrollo de un sistema de monitoreo de energéticos
para invernaderos**

2009



Universidad Autónoma de Querétaro
FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
ENERGÉTICOS PARA INVERNADEROS**

T E S I S

Que como parte de los requisitos
Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

P r e s e n t a:
Ing. Abel Cháirez Ramírez

Dirigido por:
Dr. Mario Trejo Perea

Centro Universitario
Querétaro, Qro. Julio de 2009. México.

RESUMEN

En esta tesis, el desarrollo de un sistema de monitoreo para invernaderos es desarrollado y los resultados obtenidos son discutidos. El sistema busca maximizar la eficiencia de los recursos de agua y electricidad para una mejor administración de ellos. Mediante aplicaciones con tecnología nueva y de esta manera contribuir al cuidado del medio ambiente. El sistema es capaz de monitorear en tiempo real y de una forma precisa los parámetros de consumo de agua y electricidad. También permite observar el historial de los consumos y de esta manera el personal podrá tomar decisiones para un mejor aprovechamiento de los recursos y un ahorro económico. Para mejorar la flexibilidad del sistema, el monitoreo se puede llevar a cabo a través de Internet desde una interfaz amigable para el usuario. Los resultados de la validación del instrumento mostraron un error por debajo del 2% para los consumos de energía eléctrica, así como, 1% para el consumo de agua de acuerdo con los datos obtenidos mediante la comparación de las lecturas con el previamente calibrado Fluke 430 analizador de energía y el equipo de agua Arad. Con la aplicación del sistema se muestra un ahorro de energía de alrededor de un 30% y 20% del total de consumo de energía eléctrica y agua respectivamente del invernadero, logrando tener un impacto social, económico y ecológico. El nuevo sistema de ahorro de energía eléctrica y agua para los invernaderos se llevó a cabo en la Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería.

Palabras clave: monitoreo, ahorro de energía, edificio inteligente, invernadero, predicción de consumo de energía, red neuronal artificial.

SUMMARY

In this thesis, the development of a monitoring system for greenhouses is developed and the results are discussed. The system seeks to maximize the efficiency of water resources and power to better manage them. Through applications with new technology and thus contribute to environmental conservation. The system is able to monitor in real time and in a precise way the parameters of water and electricity. It also shows the history of consumption and so the staff can make decisions for better utilization of resources and saving money. To improve the flexibility of the system, monitoring can be done via the Internet from a user-friendly interface. The results of the validation of the instrument showed an error below 2% for consumption of electricity, and 1% for water consumption based on data obtained by comparing the readings with calibrated Fluke 430 analyzer energy and water equipment Arad. With the implementation of the system is an energy saving of around 30% and 20% of total electricity consumption of gases and water respectively, have made an impact socially, economically and ecologically. The new system will save electricity and water for the greenhouses was held at the Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería.

Keywords: monitoring, saving energy, intelligent building, greenhouse, energy consumption prediction, artificial neural network.

DEDICATORÍA

A mis padres Adrian Cháirez Ortega y Elisa Ramírez Saldaña

A mi esposa e hijos Georgina Ramírez García, Luis Adrián, Denisse Anahli y
Elisa Victoria por su comprensión apoyo y paciencia

A mis hermanos Maricela, Marco Antonio, Adriana y Daniel

AGRADECIMIENTOS

A los profesores de la facultad de Ingeniería división de Posgrado por sus enseñanzas, en especial al **Dr. Mario Trejo Perea, Dr. José Gabriel Ríos y Dr. Enrique Rico García** por su confianza y apoyo en todo momento.

Al PROMEP por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

A mis compañeros Ricardo Luna y Edgar Bedolla por su apoyo incondicional en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

	Página
Resumen.	i
Summary.	ii
Dedicatorias.	iii
Agradecimientos.	iv
Índice general.	v
Índice de figuras.	vii
Índice de tablas.	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación general del uso del agua para la agricultura en el mundo. .	2
1.2. Situación del agua en México	3
1.3. Situación general de la energía eléctrica.	5
1.4. Situación de la energía en México.	5
1.5. Actualidad de invernaderos en México.	9
1.6. El concepto de monitoreo de energía y su importancia.	11
1.6.1. Motivación de los consumidores de ahorrar energía	12
1.7. Revisión de la literatura.	13
1.7.1. Literatura.	13
1.8. Hipótesis.	16
1.9. Objetivo.	17
1.10. Justificación	17
1.10.1. Impacto social.	18
1.10.2. Impacto ecológico.	19
2. CONSIDERACIONES TEORICAS	20
2.1. Proceso de evapotranspiración.	20
2.1.1. Evaporación.	20
2.1.2. Transpiración.	22
2.1.3. Evapotranspiración (ET)	22
2.2. Factores que afectan la evapotranspiración.	23
2.2.1. Variables climáticas	23
2.2.2. Factores de cultivo	24
2.2.3. Manejo y condiciones ambientales	24
2.3. Ecuación de PENMAN-MONTEITH	26
2.4. Necesidad de un método estándar para determinar ETO.	26
2.4.1. Resistencia aerodinámica.	28
2.4.2. Resistencia superficial (total) (rs).	29
2.5. Primeras ecuaciones utilizadas en el monitoreo de energía	29
2.6. Microcontroladores	32
2.7. Estructura básica de las RNAs	33
3. METODOLOGÍA	40
3.1. Descripción de la zona de experimentación.	40
3.2. Descripción de los invernaderos.	41
3.2.1. Generalidades de los invernaderos.	41
3.2.2. Invernadero ubicado en la Universidad Autónoma de Querétaro.	41

3.2.3.	Cultivo.	42
3.3	Prototipo de monitoreo de energéticos.	43
3.3.1.	Descripción de la instrumentación del sistema de monitoreo de energéticos.	44
3.3.2.	Servidor Web embebido	45
3.3.3.	Generalidades del sistema.	46
3.4	Descripción del sistema y procedimiento de validación.	49
3.4.1.	Sistema de monitoreo embebido con capacidad de red para invernaderos.	49
3.4.2.	Descripción del sistema del microcontrolador	50
3.4.2.1.	Descripción de la tecnología ethernet.	52
3.4.2.2.	La comunicación del protocolo TCP/IP.	53
3.4.2.3.	El stack TCP/IP de microchip.	56
3.4.2.3.	Sistema del servidor WEB.	56
3.4.2.4.	El sistema de archivos MPFS.	57
3.4.2.5.	Diseño de paginas dinámicas.	57
4.	RESULTADOS	59
4.1.	Validación.	59
4.2.	Interfaz grafica.	60
4.3.	Periodos de monitoreo de energéticos.	61
4.3.1.	Consumo de agua de las plantas de tomate.	61
4.3.2.	Consumo de energía eléctrica de los motores del invernadero.	62
4.4.	Resultados de los modelos de predicción de energía aplicados a invernaderos de México basado en RNAs.	63
4.4.1.	Sector de invernaderos.	63
5.	CONCLUSIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA	71
	ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pagina
1.1.	Promedio de energías primarias generadas por sector de los últimos 5 años.	6
1.2.	Origen de los energéticos utilizados en México en el año 2006. . .	7
1.3.	Consumo eléctrico por sector.	8
2.1.	Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.	25
2.2.	Estructura de una neurona.	33
2.3.	Red neuronal de retropropagación típica.	36
3.1.	Vista lateral del invernadero ubicado en la Universidad Autónoma de Querétaro.	42
3.2.	Cultivo de tomate saladet.	43
3.3.	Diagrama general del sistema de monitoreo de energéticos.	44
3.4.	Descripción del proceso creado para detectar los pulsos del sistema.	48
3.5.	Muestra el diagrama de conexiones eléctricas y electrónicas del sistema de monitoreo de energéticos para invernaderos.	50
3.6.	Diagrama de bloques.	51
3.7.	El modulo SBC65EC.	52
3.8.	Topología estrella.	53
3.9.	Paquete ethernet.	53
3.10.	Modelo stack.	54
3.11.	Modelo stack 1.	56
4.1.	Interfaz grafica que observara el operador del sistema.	61
4.2.	Muestra el consumo de agua real por el SMEI.	62
4.3.	Muestra la grafica de consumo de energía eléctrica de los 4 motores del invernadero por 6 días.	63
4.4.	Grafica de los valores predichos y medidos de la demanda eléctrica en KW/h para el invernadero.	64
4.5.	Comparación de errores entre la regresión y la MLP.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pagina
1.1.	Volúmenes de extracción para bombeo en la zona de balance para 1996.	4
4.1.	Porcentajes de error...	60
4.2.	G Coeficiente de determinación y estimadores de error para los diferentes modelos MLP.	63
4.3.	Comparación de las mediciones y las estimaciones de los valores usando redes neuronales y modelos de regresión.	67
4.4.	Tabla ANOVA para la comparación de regresión, datos actuales y modelos de redes neuronales.	68

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La producción de cultivos bajo invernadero es una de las técnicas más modernas que utiliza la agricultura protegida actualmente para la producción hortícola. La ventaja del sistema de invernadero sobre el método tradicional a cielo abierto, es que los sistemas de producción de cultivos bajo invernadero se establece una barrera entre el medio ambiente externo y el cultivo. Esta barrera crea un microclima que permite proteger el cultivo del viento, lluvia, enfermedades, hierbas y animales. Pero también esta protección permite al agricultor controlar la temperatura, cantidad de luz, aplicar efectivamente la cantidad necesaria de agua que el cultivo necesita y controlar la cantidad de energía eléctrica necesaria. Todas estas características con el objetivo de tener rendimientos más altos que los sistemas de cultivo a cielo abierto y poder reducir los consumos de energéticos tales como el agua que actualmente se esta sobre explotando los mantos acuíferos y la energía eléctrica la cual es generada a traves de la quema de combustibles fósiles los cuales generan la contaminación del ambiente.

México contaba en el año 2005 con 3,200 hectáreas aproximadamente (dedicadas a la producción de cultivos bajo invernadero) y se previo que para los próximos años se incremente de un 10 a un 15 % aproximadamente, de tal manera que con el aumento del 10% para el 2008 se cuentan con 4160 hectáreas dedicadas a la producción de cultivo bajo invernaderos (Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México, 2006) muy por debajo de las 40,000 hectáreas de España, 11,000 de Holanda que son lideres con la tecnología de la producción de cultivo bajo invernaderos.

En México la mayoría de los invernaderos se encuentran en los estados de Jalisco, Sinaloa, Sonora, Baja California y en segundo lugar la zona centro y recientemente se ha iniciado en Chihuahua y Yucatán (Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México, 2006). Esta tecnología es muy importante ya que sin ella los cultivos están expuestos

a la suerte del clima durante la cosecha, provocando pérdidas de cosecha y bajos rendimientos de la misma. A cielo abierto en México se tiene un rendimiento promedio de 7 Kg/m² en el jitomate, variando desde 9.2 Kg/m² en los mejores climas como Sinaloa y San Luis Potosí, hasta 1.3 Kg/m² en Querétaro. Lográndose alcanzar en invernaderos rendimientos varias veces mayores (LEIDO, 1996).

Los principales cultivos bajo invernadero en México en el área de hortalizas es el tomate (bola, cherry y racimo con 73% de la superficie sembrada, pepino con 12%, pimiento con 11%, melón 1% y otros 4%. La agricultura es un sector con gran importancia en México. La población empleada en este sector ha disminuido en los últimos años, pero aún es muy elevada siendo del 17% del total de la población activa. El PIB agropecuario se mantuvo en el 4% del PIB total durante el 2004, cifra similar a la de países occidentales de la Unión Europea o Estados Unidos (Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México, 2006). Los principales proveedores de invernaderos en México, son empresas de países extranjeros entre los que destacan Holanda, Francia, Israel, Canadá y España.

1.1 Situación general del uso del agua para la agricultura en el mundo

Afrontar la escasez de agua es el lema del día mundial del agua. Este año se pretende hacer hincapié en la importancia creciente de la escasez de agua a nivel mundial y la necesidad de una cooperación y una integración mayor que permita garantizar una gestión sostenible, eficiente y equitativa de los escasos recursos hídricos, tanto a escala internacional como local.

La principal dificultad consiste en encontrar maneras más efectivas de conservar, utilizar y proteger los recursos hídricos a nivel global. Se espera que la población mundial alcance los 8,100 millones de personas en el año 2030.

Para mantener el ritmo de la creciente demanda de alimentos, durante los próximos 30 años será necesario destinar a uso agrícola un 14% más de agua dulce (actualmente se utiliza el 78% del agua dulce para la agricultura a nivel mundial). (Día mundial del agua 2007 FAO).

Al tiempo que crece la población y las necesidades del desarrollo exigen mayor cantidad de agua para las ciudades, la agricultura y la industria, la presión sobre los recursos hídricos se intensifica, llevando a tensiones y conflictos, así como a un impacto excesivo en el medio ambiente.

El cambio climático ha complicado la situación, y se le acusa de estar en el origen de las sequías más frecuentes. También ha intensificado las tormentas e inundaciones que destruyen las cosechas, contaminan el agua dulce e inutilizan las infraestructuras que se usan para almacenarla y transportarla.

Los pequeños campesinos, que constituyen la mayor parte de la población rural pobre del mundo, ocupan a menudo tierras marginales y dependen del agua de lluvia para sus medios de subsistencia, por lo que son particularmente sensibles a las variaciones del clima. (Día mundial del agua 2007 FAO).

1.2 Situación del agua en México

Un punto importante es la necesidad de reducir los consumos de agua y electricidad, en la región Norte y Central de México donde existe un severo déficit hídrico prácticamente en todas las cuencas hidrológicas.

En el caso particular de Querétaro la profundidad del nivel estático en la zona plana del valle es de 100 a 110 metros. Localmente las máximas profundidades se encuentran en el Romeral, San Pedro Mártir, el Estadio y la zona Industrial Benito Juárez, con un promedio de 130 metros en las primeras

tres y hasta 160 en la última. En la zona de la cañada se localiza entre 50 y 70 metros de profundidad. (Estadísticas del Agua en México Edición 2004 CNA)

En este valle se tienen censados 239 aprovechamientos activos, de los cuales 75 corresponden al uso agrícola y abrevadero, 113 pozos se utilizan para uso público urbano y recreativo y 51 pozos para el uso industrial.

En vista que el 35% del volumen de extracción de agua subterránea se utiliza para riego agrícola en el valle.

Tabla 1.1 Volúmenes de extracción para bombeo en la zona de balance para 1996.

USOS	VOLUMEN (Mm³)
Agrícola	28.00
Industrial	8.00
Potable	67.00
TOTAL	103.00

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida, que para el acuífero de Valle de Querétaro es de 70 (Mm³) por año. (E. A. M. edición 2004 CNA).

En el acuífero Valle de Querétaro el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, al 30 de abril del 2002 es de 142,316,279 m³ al año.

La disponibilidad de aguas subterráneas conforme a la metodología indicada en la norma referida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA:

$$-76'316,279 = 70'000,000 - 4'000,000 - 142'316,279$$

La cifra – 76'316,279 indica que no existe volumen disponible para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica denominada acuífero Valle de Querétaro.

1.3 Situación general de la energía eléctrica

En el mundo, el suministro de energía sigue siendo principalmente satisfecho por recursos fósiles; aproximadamente el 80% de la demanda mundial de energía es generada por petróleo, gas natural o carbón. De acuerdo a Jochem (2004), una variedad de factores requieren un uso más eficiente de los recursos. Este objetivo puede, por ejemplo, ayudar a mitigar las consecuencias económicas negativas de un aumento en los precios debido al agotamiento de los recursos. Las políticas para el desarrollo sustentable que han implementado los diferentes gobiernos a nivel internacional, han sido un fracaso y esto parece alimentar el potencial para que los conflictos internacionales se incrementen, cuando la escasez de este recurso se presente. Según Campbell (2003), el agotamiento de la mitad del período para el petróleo crudo y gas natural probablemente se alcanzara en el 2015. Una amplia gama de predicciones sobre el agotamiento de los recursos se han reunido y comparado (Rempel *et al.* 2000).

1.4 Situación de la energía eléctrica en México

Por otro lado, el panorama nacional de los últimos 5 años en materia de generación de energía primaria en México, muestran que el petróleo crudo genera un 69.99%, mientras que el carbón genera 2.07%, condensados 1.45%,

gas natural 19.3%, núcleo de energía 1.08% hidroenergía 2.49%, geoenergía 0.6524% y energía eólica 0.028% [figura 1.1]. Con estos datos obtenidos en el Sistema de Información Energética de México SIE, (2005), se demuestra que los consumos de energía de fuentes no renovables (como carbón petróleo y gas natural) son de aproximadamente el 91.36% [figura.1.2], estando en promedio un 10% arriba del panorama mundial. Los principales sectores consumidores de energía en México son: a) el sector industrial, que es el que tiene un mayor consumo de energía eléctrica con un 60% del total de la energía generada; b) el sector comercial, en segundo lugar, con un 23%; y finalmente c) los sectores público-agrícola y el comercial con un 9% y 8% (FIDE, 2007) respectivamente [figura 1.3]. Todos estos factores son importantes de considerar, ya que impactan directamente al incremento en las tarifas eléctricas (teniendo un importante impacto en las decisiones de inversión y en la competitividad de la economía mexicana), lo que ha ejercido presiones sobre el costo de producción de la electricidad, aumentando así los cargos que enfrentan los consumidores.

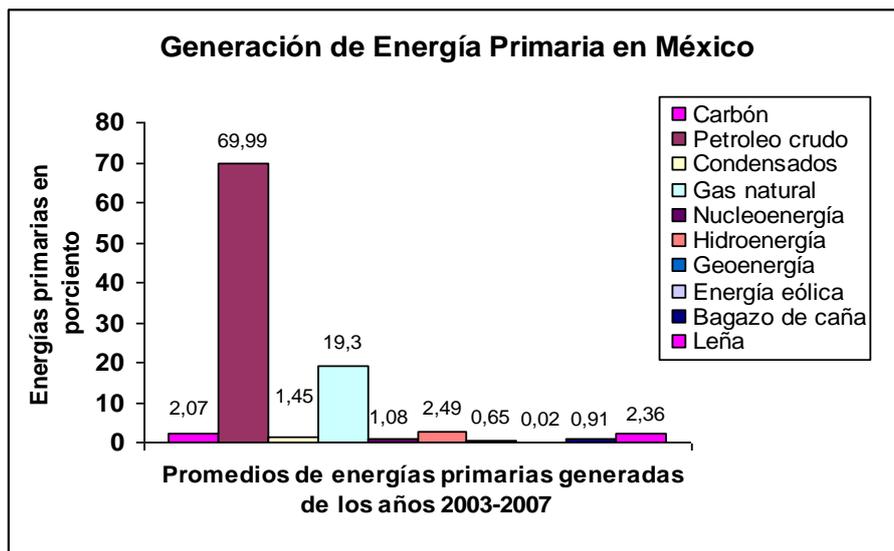


Figura 1.1 Promedio de energías primarias generadas por sector de los últimos 5 años. Fuente: SIE 2003-2007.

Se estima que en México se están implementando sistemas de monitoreo de energía, predictores de carga inteligentes y nuevas tecnologías para el ahorro de energía; con estas acciones podrían obtenerse ahorros

potenciales entre un 10 y un 40% en instituciones educativas (FIDE, 2007). Por otro lado, para el progreso del sector agrícola en México será necesario tomar en cuentas dos ámbitos bien diferenciados: el ámbito tecnológico y el científico.

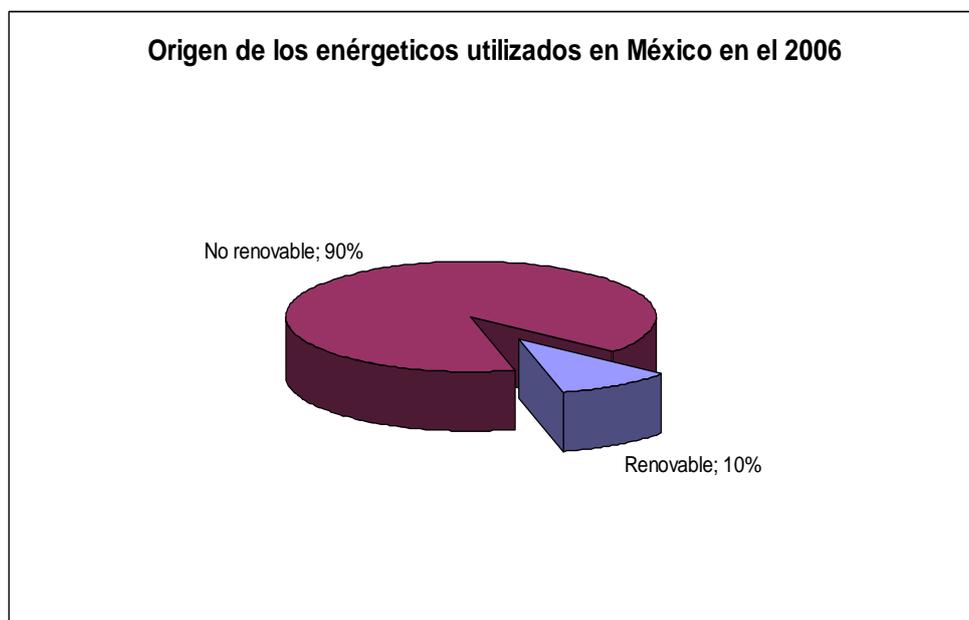


Figura 1.2 Origen de los energéticos utilizados en México
. Fuente: FIDE-SENERG (2006).

En el ámbito tecnológico, han sido las empresas, las que con sus nuevos productos de integración de todos sus dispositivos presentes en la planta en redes informáticas (sensores, actuadores, microcontroladores, PLC, FPGA, etc.), han conseguido reducir el cableado, mejorar la fiabilidad del sistema y facilitar su reconfiguración. También se han abierto nuevas posibilidades a través de Internet para poder realizar a distancia, desde cualquier lugar del mundo, lo que hasta hace poco tiempo sólo era posible a pie de invernadero. Mientras que en el ámbito científico, las nuevas metodologías de modelado abren un nuevo campo de investigación en la agricultura bajo invernadero y dentro está el cultivo hidropónico o sin suelo, además de nuevas perspectivas que permitirán predecir los consumos de energía, hídricos y de fertilizantes de las plantas; de esta forma se podrán planear estrategias de ahorros de energía.

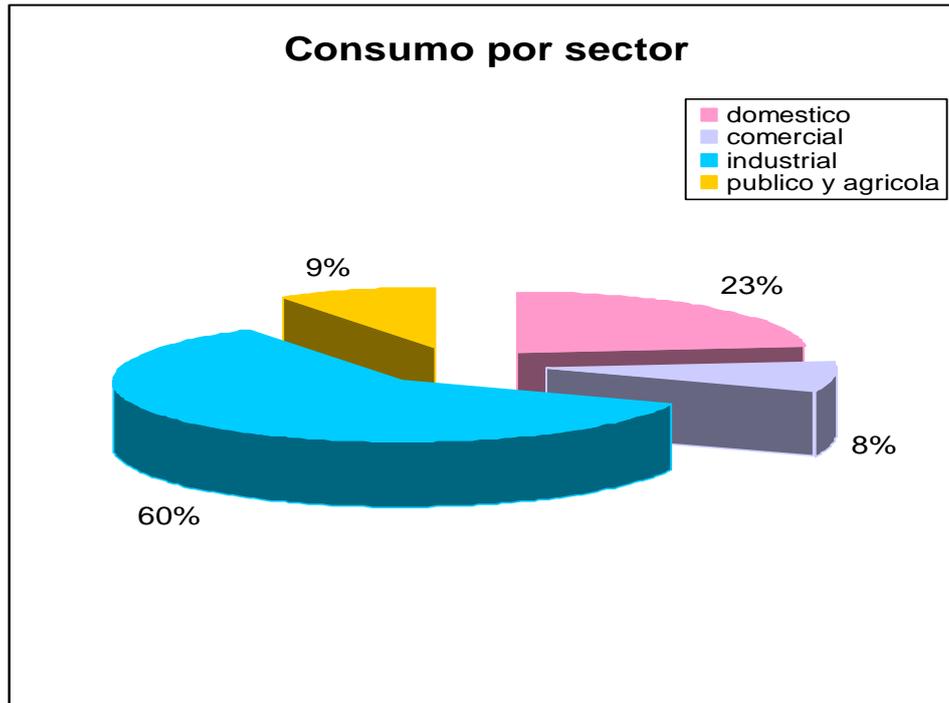


Figura 1.3 Consumo eléctrico por sector en México.

Las computadoras, la creación de redes, la medición y el desarrollo de la tecnología de base de datos han tenido un gran impacto en el aspecto de calidad de la energía: en lecturas de medidores eléctricos, en el registro de energía utilizada por los diferentes usuarios, así como también en la adquisición de datos de energía confiable. Los avances tecnológicos en la creación de redes, comunicaciones, gestión de datos y tecnología de medición se han combinado para disminuir de manera importante los costos de los sistemas de monitoreo de energía (SME), y para aumentar la capacidad de estos sistemas al poder incluir datos de la calidad de la energía.

Investigaciones recientes sobre el despliegue de datos de consumo eléctrico han demostrado ser ineficientes para lograr un cambio en el comportamiento en los usuarios; con los métodos electrónicos de realimentación se ha registrado más eficiencia (Wood, 2003). Ser (1999) cree que esa es la forma más eficaz de información de energía porque capta la atención de la audiencia, gana participación, además de que es creíble y útil en la situación de los usuarios. No es simplemente el despliegue de la información, lo importante es la forma en la que la información motiva al

consumidor a ahorrar energía. Una evaluación de lo que motiva a las personas a desarrollar nuevas prácticas de ahorro de energía, revela que una parte esencial consiste en mostrar a los usuarios de una manera amigable los consumos eléctricos.

Actualmente, el 80% de la demanda de la energía eléctrica en el mundo se obtiene inicialmente de fuentes de combustible fósil (Gaterell, 2005). Durante el proceso de conversión de energía, existe también una gran producción de CO₂, lo que debilita la capa de ozono y contribuye al calentamiento global.

Actualmente en México, debido al ineficiente uso de la energía eléctrica, programas educacionales tales como “Fideicomiso para Ahorro de la Energía Eléctrica” (FIDE) y EDUCAREE han sido implementados con el fin de enseñar a los niños como evitar el malgasto de la energía eléctrica (FIDE, 2007). En el 2005, aproximadamente 228,270.460 GW/h fueron generados. La pérdida durante la generación, transporte, distribución y uso incorrecto fue de aproximadamente 37,417.612 GW/h (SIE, 2005). Esto representa alrededor de un 16% de la energía total generada en México.

1.5 Actualidad de invernaderos en México

Hay buenas razones para que los agricultores piensen en invertir en la construcción de un invernadero, ya que estas estructuras permiten controlar variables como temperatura, humedad y cantidad de agua que requieren los cultivos. Con un manejo adecuado de esta tecnología es posible aumentar hasta en 10 veces la producción en relación con cielo abierto. Esto puede traducirse en un mejor ingreso para el agricultor, siempre y cuando tenga asegurado un comprador.

De ahí el espectacular crecimiento que está teniendo la producción agrícola en invernadero en diversos países del mundo, donde Holanda, Canadá, España e Israel que están a la vanguardia en tecnología.

En el caso de México el interés por los invernaderos está en aumento y ahora no sólo los productores del norte del país o la zona florícola del Estado de México producen bajo este sistema, sino que se han incorporado agricultores en Puebla, Morelos, Querétaro, Zacatecas y o del sureste mexicano.

El interés es tal que México pasará de las cuatro mil hectáreas de invernaderos que se calcula en la actualidad a una superficie de 6,500 hectáreas para el año 2010. Debido a que el ritmo de crecimiento que se prevé para los próximos años es de aproximadamente entre un 20 a 25%, expone Niv Dardik, responsable de Netafim América Central, empresa que desarrolla tecnología agrícola avanzada. El especialista destaca que de seguir esa tendencia, incluso, podría superarse esa cifra.

Durante los próximos años se espera que México sea una de las regiones donde más se desarrollen cultivos en invernadero, debido a varios factores: Estados Unidos demanda más hortalizas frescas; el TLCAN facilita el movimiento de hortalizas hacia esa nación, y las diversas condiciones ambientales en territorio mexicano permiten producir a bajo costo, destaca Armando Ramírez Arias, profesor investigador de la U.A.Ch.

En México, el interés en los proyectos de invernaderos comenzó alrededor de los años noventa y de ahí a la fecha se da un crecimiento muy claro, afirma Niv Dardik, quien asegura que en la actualidad el nivel tecnológico promedio estimado en nuestro país es de 40%, si se considera un paquete tecnológico completo con fertirrigación, recirculación de agua, ventilación automática, calefacción, pantallas térmicas para ahorro de energía, sensores, control, automatización, sustratos y cultivo en hidroponía.

1.6 El concepto del monitoreo de energía y su importancia.

Las computadoras, la creación de redes, la medición y el desarrollo de la tecnología de base de datos han tenido un gran impacto en el aspecto de calidad de la energía: en lecturas de medidores eléctricos, en el registro de energía utilizada por los diferentes usuarios, así como también en la adquisición de datos de energía confiable. Los avances tecnológicos en la creación de redes, comunicaciones, gestión de datos y tecnología de medición se han combinado para disminuir de manera importante los costo de los sistemas de monitoreo de energía (SME), y para aumentar la capacidad de estos sistemas al poder incluir datos de la calidad de la energía.

Los ingenieros eléctricos necesitan más que lecturas de Kw/h para planificar el crecimiento de red. Ellos necesitan el perfil detallado de información de la carga, su perfil y los datos contenidos en los armónicos generados por dicha carga. Como los clientes demandan una mejor calidad de la oferta de los servicios públicos, necesitan datos sobre la calidad de energía. Con el fin de que las empresas planifiquen una expansión de la red eléctrica y para ofrecer una mejor calidad de suministro, necesitan una gran cantidad de datos sobre la red existente y de su rendimiento. Los sistemas SME podrían ofrecer sólo una pequeña cantidad de los datos para tomar acciones de ahorro de energía de forma local, y la próxima generación de predictores de carga necesitarán más información, de manera que puedan predecir la carga necesaria que necesitan los diferentes sectores consumidores de energía para su óptima operación. Esta importante acción es lo que motiva a los consumidores para ahorrar energía.

1.6.1 Motivación de los consumidores a ahorrar energía.

Investigaciones recientes sobre el despliegue de datos de consumo eléctrico han demostrado ser ineficientes para lograr un cambio en el comportamiento en los usuarios; con los métodos electrónicos de realimentación se ha registrado más eficiencia (Wood, 2003). Ser (1999) cree que esa es la forma más eficaz de información de energía porque capta la atención de la audiencia, gana participación, además de que es creíble y útil en la situación de los usuarios. No es simplemente el despliegue de la información, lo importante es la forma en la que la información motiva al consumidor a ahorrar energía. Una evaluación de lo que motiva a las personas a desarrollar nuevas prácticas de ahorro de energía, revela que una parte esencial consiste en mostrar a los usuarios de una manera amigable los consumos eléctricos. La mayoría de los estudios anteriores tiene considerado mostrar el total de consumo de energía en invernaderos, y no el consumo de los distintos aparatos o actividades. Un consumidor puede demostrar cuánta energía se han utilizado en una situación en comparación con otra. Esta comparación podría hacer un consumo consciente y mostrar en qué se está utilizando más o menos la energía, y esto significa tener un mejor control de su consumo eléctrico. Alternativamente, el consumidor podría utilizar esta información comparativa como base para fijar metas, o para buscar recompensas económicas o sociales.

1.7. Revisión de Literatura

Aunque los agricultores han reducido considerablemente el uso de la energía, la vigilancia de la horticultura de invernadero, muestra que los recursos adicionales y esfuerzos serán necesarios para cumplir con los acuerdos de energía. (Van Der Velden et al. 1999).

Los cálculos modelizados indican que para muchos hortícolas y empresas nuevas las inversiones en las tecnologías de ahorro de energía son rentables. (Van Der Velden et al. 1999)

La adopción de tecnologías de ahorro de energía es una realidad en el tema de la horticultura de invernadero holandés. Este sector es un importante usuario de la energía, ya que representa el 7% del total. La utilización de la energía nacional y el 79% del uso total de energía en agricultura (Oude Lansink y otros. 2001).

Oude Lansink *et al.* (2001) desarrollaron un modelo para la adopción de sistemas de ahorro de energía. Los resultados mostraron que los principales factores que influyen en la adopción de sistemas de ahorro de energía son los siguientes: disponibilidad de un sucesor, la edad de la empresa explotadora, el tamaño de la empresa, el tamaño de la familia, tipo de empresa, la solvencia, la liquidez real.

En general, el tiempo hasta la flor disminuye a medida que aumenta la temperatura del invernadero. Por otro lado, el consumo de energía por día aumenta a medida que aumenta la temperatura del invernadero, especialmente durante el invierno. Dado que el calendario de cultivos y el consumo de energía se mueven en direcciones opuestas como invernadero los cambios de temperatura, se podría preguntar cual es el consumo total de energía para producir una cosecha. (Hiroshi Shimizu *et al.* 2002).

Trejo *et al.* (2007) desarrollo un sistema de monitoreo de energía para monitorear las variables energéticas potencia activa reactiva aparente y factor de potencia para obtener los costos de operación de la empresa y de esta manera el usuario administre de una forma más eficiente la energía eléctrica obteniendo bonificaciones por parte de la compañía suministradora de energía (CFE).

Un suministro eléctrico de alta calidad se entiende como aquel con bajo nivel de disturbios (Rodríguez *et al.* 2003). El nuevo concepto de calidad de servicio de la energía eléctrica (Power Quality), que ha evolucionado en la

última década a escala mundial, está relacionado con las perturbaciones electromagnéticas que pueden afectar las condiciones eléctricas de suministro (tensión y/o corriente) y ocasionar el mal funcionamiento o daño de equipos y procesos. Durante los últimos años ha adquirido importancia como uno de los elementos básicos de calidad y confiabilidad en la prestación del servicio. El conocimiento de las exigencias inherentes al ambiente electromagnético presente en el medio (como son las descargas atmosféricas, los armónicos, fluctuaciones de tensión, etc.) es fundamental para definir las pautas de planeamiento, diseño y operación de los sistemas.

La calidad de la energía eléctrica tiene que ver con cuatro elementos fundamentales: la amplitud del voltaje, la frecuencia, la forma de onda del voltaje y la continuidad de las señales de tensión y corriente.

Los tres primeros se refieren a la calidad de la potencia eléctrica expresada como el producto de la tensión por la corriente, mientras que el cuarto elemento, la continuidad, se refiere al tiempo disponible de las señales de tensión y corriente para el usuario.

La mala calidad de la energía puede tener dos orígenes: El primero, en la acometida de la red eléctrica que alimenta la instalación, por deficiencias del suministro. Y el segundo, en la propia instalación.

Una opción importante para los agricultores de la horticultura es reducir la utilización de la energía y estar invirtiendo en sistemas de ahorro de energía (Oude Lansink *et al* 2006).

Típicamente, los invernaderos holandeses son calentados por el centro Utilizando calderas de calefacción de gas natural. (Pietola *et al*, 2006).

Agricultores hortícolas Puede elegir entre varias opciones de inversión para ahorrar energía En sus invernaderos. Algunas de estas inversiones son los únicos con el fin de ahorrar energía, mientras que otros son polivalentes; es decir, la mayoría de la mejora de la producción y el ahorro de energía al mismo tiempo.

La forma más difundida de ahorro de energía son los sistemas de Almacenamiento de calor, uno de los generadores de energía y las pantallas.

En las normas internacionales se han establecido límites para la explotación eficiente de las máquinas eléctricas en condiciones de desbalance de tensión y procedimientos para determinar la magnitud del desbalance (Gómez *et al*, 2006).

La norma ANSI C50.41.4.2 establece que un desbalance superior a un 1% es una condición inusual que debe eliminarse. La IEC 34.1.12.2.1 plantea que los motores deben ser capaces de operar por un largo período de tiempo con un desbalance de un 1%, o por un corto período de tiempo que no exceda varios minutos con un desbalance de 1,5 %. Además, durante las pruebas de elevación de temperatura, la tensión de secuencia negativa debe ser inferior a un 0,5% de la tensión de secuencia positiva sin componentes de secuencia cero. La norma NEMA MG1 14.35 recomienda reducir la capacidad normal a aplicar a los motores en función del desbalance. Se emplean fundamentalmente tres definiciones de desbalance de tensión:

1. Factor de desbalance de tensión de línea definido por la NEMA.
2. Factor de desbalance de tensión de fase según la IEEE Std. 141:
3. Factor de desbalance de tensión definido por la IEC como la relación entre la componente de secuencia negativa V_2 y la componente de secuencia positiva V_1 de la tensión:

De estos factores el más utilizado en la práctica es el propuesto por la NEMA, ya que aunque no especifica qué tipo de desbalance tiene lugar, evita el uso del álgebra compleja y el trabajo con componentes simétricas, empleando las mediciones del valor rms de las tensiones de línea directamente.

Los bancos de condensadores, conectados en paralelo, normalmente son instalados en los sistemas de distribución para reducir las pérdidas de energía y potencia, mejorar el perfil de voltaje, mejorar el factor de potencia, aumentar la capacidad de transporte de las líneas de distribución y de los

transformadores, entre otros. Con el incremento de las componentes armónicas en las señales eléctricas, aumentan los problemas técnicos y económicos que disminuyen la eficiencia e incrementan los costos operativos en los sistemas de distribución. Entre los problemas más comunes se encuentran: aumento de pérdidas de potencia, errores en la medición de potencia activa y reactiva, excesiva circulación de corrientes por el neutro, incremento en los niveles de interferencia electromagnética, incorrecta operación en los relevadores de protección, disminución en la calidad de la potencia, aumento peligroso de las tensiones y las corrientes por condiciones de resonancia. (Ríos c. et al. 2006).

1.8 Hipótesis

El diseño de un sistema de monitoreo de energía eléctrica y agua que muestre los consumos energéticos a través de una interface amigable al usuario en invernaderos puede motivar a los usuarios al ahorro de una mayor cantidad de energía eléctrica y agua a la implementación de estrategias óptimas para la administración de estos recursos. Una de las estrategias para el ahorro de energía es la predicción del consumo eléctrico y de agua para poder tomar acciones de control sobre la demanda máxima y el consumo de agua del invernadero.

1.9 Objetivo

Desarrollar un sistema de monitoreo de energéticos (agua y energía eléctrica) aplicado a invernaderos el cual permita supervisar y administrar de forma remota (vía Internet) dichos energéticos y muestre una interface amigable los consumos eléctricos y del agua para los agricultores en el área de invernaderos inteligentes.

1.10 Justificación

La producción intensiva hortícola bajo invernadero requieren de la medición continua de las variables del proceso debido a la rapidez con la que se pueden propagar enfermedades, estrés, ya sea por la baja y alta temperatura o la falta de agua. En general las variables que se controlan en un microclima, que pueden ocasionar pérdidas muy cuantiosas.

El alto costo de las diferentes fuentes de energía (electricidad y agua) y las emisiones de gas que esta desprenden a la atmósfera, hace necesario la comparación de cada una de ellas con el fin de determinar cual requiere menor inversión y emite menos contaminantes, además de aprovechar otras fuentes como son las renovables. Por estas razones se pretende hacer un sistema de monitoreo de variables energética que nos permita conocer los costos de producción de los productos agrícolas, para de esta manera realizar programas de ahorro tanto de agua y electricidad, y utilizar de manera más eficiente los recursos y reducir las emisiones de CO₂.

1.10.1 Impacto social

Un buen abastecimiento de agua y electricidad es fundamental para la vida y el desarrollo de toda sociedad. Una infraestructura suficientemente desarrollada y un sistema de distribución eficiente y de fácil acceso constituyen bases indispensables para el conjunto de la economía. Estos servicios también son esenciales para las personas en su vida de cada día y les permiten participar plenamente en la vida social de su comunidad.

El uso de invernaderos tiene un impacto social importante, ya que una hectárea establecida con agricultura protegida genera en promedio 8 empleos directos.

1.10.2 Impacto económico

En México el crecimiento de esta modalidad de la agricultura protegida ha crecido de manera muy importante, ya que mientras en 1999 se tenía una producción de 721 hectáreas, para el año 2008, la extensión se incremento en 6000 hectáreas aproximadamente.

Los impactos en términos de producción y económicos son muy elocuentes; por ejemplo en jitomate se obtiene en campo abierto 40 toneladas por hectárea, pero en invernaderos con tecnología moderada, la producción de jitomate será de 350 toneladas por hectárea (ocho veces más) y en invernaderos con alta tecnología la cosecha será de 500 toneladas (12 veces más).

A través de la agricultura protegida y la producción del campo en general, se aspira a que la producción del campo ayude al crecimiento del producto interno bruto nacional en el 2009, tal como ocurrió en el 2008.

1.10.3 Impacto ecológico

El impacto ecológico puede ser positivo o negativo. Los invernaderos presentan un impacto positivo ya que se puede utilizar de manera más eficiente los recursos naturales, como la cantidad de agua para la producción de alimentos, así como la emisión de contaminantes como CO₂, además de obtener productos de mayor calidad nutricional.

El impacto ecológico negativo se puede presentar si no se regulan de acuerdo a las normas ambientales o tratamientos de los cultivos. Ecologistas han denunciado la alta peligrosidad de los residuos de los invernaderos, como son los plásticos y residuos de plaguicidas no controlados o incluso prohibidos,

los cuales pueden provocar serios problemas de salud. Destaca la contaminación de la atmósfera, los acuíferos, olores y descomposición orgánica.

Con la finalidad de describir con mayor claridad el desarrollo del presente trabajo, la tesis está organizada de la siguiente forma: en el capítulo 2 se muestra las consideraciones teóricas a la luz de la literatura más reciente, de las condiciones teóricas para la implementación de los sistemas de monitoreo de energía y sistemas predictores basados en redes. El capítulo 3 describe la metodología utilizada para las mediciones de campo en el desarrollo del sistema de monitoreo de energía. Por otra parte, en el capítulo 4 se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo

Capítulo 2

CONSIDERACIONES TEORICAS

En este capítulo se presentan las definiciones y fundamentos teóricos necesarios para comprender el trabajo presentado. Un aspecto importante a considerar es la ecuación de Penman Monteith para determinar la evapotranspiración, ya que a través del tiempo se han realizado modificaciones de las cuales no ha tenido el impacto suficiente, tanto que hasta la actualidad se sigue considerando como la principal para la FAO. También los indicadores de la calidad y consumo de energía han evolucionado a lo largo de distintas etapas que han ido apareciendo debido a que las cargas instaladas en las redes eléctricas se han vuelto cada vez más complejas causando efectos indeseables como la distorsión y contaminación del medio ambiente.

2.1 Proceso de evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

2.1.1 Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura

ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas. Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo.

2.1.2 Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo.

Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración.

2.1.3 Evapotranspiración (ET)

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un

suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo.

Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En la se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del de 90% de la ET ocurre como transpiración.

2.2 Factores que afectan la evapotranspiración

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los conceptos relacionados a la ET y presentados en la Figura 2.1 se describen en la sección sobre conceptos de evapotranspiración.

2.2.1 Variables climáticas

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}). La evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar. La E_{To} se describe más adelante en este Capítulo y en los Capítulos 2 y 4 en forma más detallada.

2.2.2 Factores de cultivo

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas.

2.2.3 Manejo y condiciones ambientales

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.

Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o

afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo. Una barrera rompe vientos reduce la velocidad del viento y disminuye la tasa de ET de la zona situada directamente después de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas aunque la evapotranspiración de los mismos árboles podría compensar cualquier reducción en el campo. La evaporación del suelo de un huerto con árboles jóvenes, en donde los árboles están ampliamente espaciados, puede ser reducida usando un sistema de riego por goteo bien diseñado. Los goteros aplican el agua directamente al suelo cerca de los árboles, de modo en que dejan la mayor parte de la superficie del suelo seca, limitando las pérdidas por evaporación. El uso de coberturas, especialmente cuando el cultivo es pequeño, es otra manera de reducir substancialmente la evaporación del suelo. Los anti-transpirantes, tales como estimulantes del cierre de los estomas, o los materiales que favorecen el reflejo del suelo, reducen las pérdidas de agua del cultivo y por lo tanto la tasa de transpiración. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ET_c ($ET_c aj$). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo.

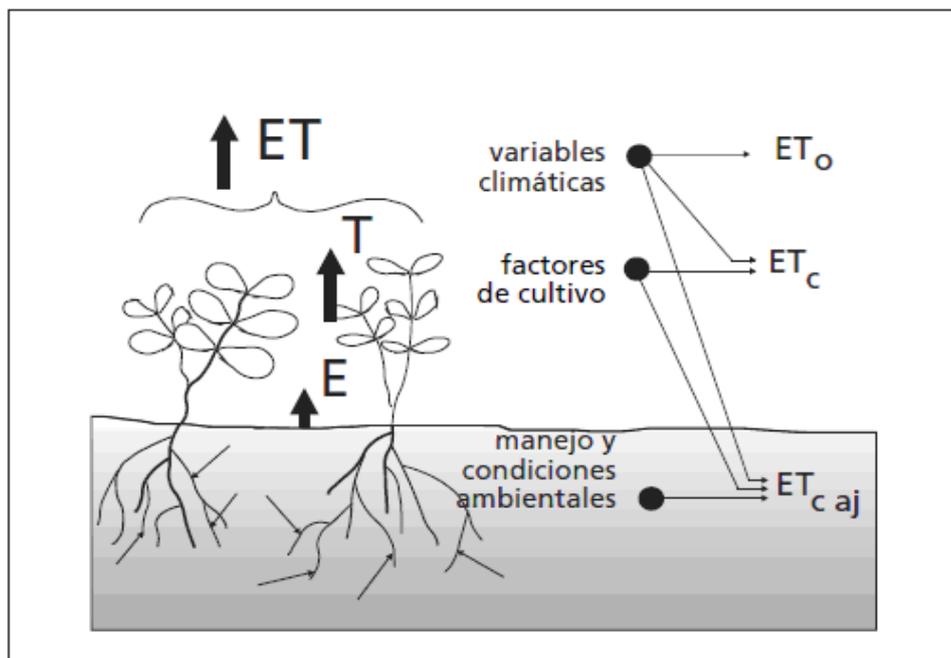


Figura 2.1 Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET

2.3 Ecuación de PENMAN-MONTEITH

Este capítulo muestra al usuario la importancia de contar con un método estándar para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en base a información meteorológica. El método de FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método para determinar la evapotranspiración de referencia ET_o. En este capítulo se describen el método, su derivación, los datos meteorológicos requeridos y la definición correspondiente de la superficie de referencia.

La evapotranspiración (ET_o) se puede calcular utilizando datos meteorológicos. Como resultado de una consulta de expertos realizada en mayo de 1990, el método de FAO Penman-Monteith ahora se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia. El método de FAO Penman-Monteith requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. En esta parte (Capítulo 3) se presentan los procedimientos de cálculo necesarios para derivar estos parámetros climáticos de los datos meteorológicos, así como, para estimar las variables faltantes requeridas para calcular ET_o. Los procedimientos de cálculo presentados en este libro permiten la determinación de ET_o con el método de FAO Penman-Monteith bajo casi todas las circunstancias, incluyendo los casos en que falten datos climáticos.

2.4 Necesidad de un método estándar para determinar ETO

Durante los últimos 50 años se han desarrollado una gran cantidad de métodos más o menos empíricos por numerosos científicos y especialistas en todo el mundo, con el fin de estimar la evapotranspiración a partir de diferentes variables climáticas. A menudo las ecuaciones estaban sujetas a rigurosas calibraciones locales pero demostraron tener limitada validez global. Por otra parte, probar la exactitud de los métodos bajo nuevas condiciones es laborioso

y necesita mucho tiempo y dinero. A pesar de ello, los datos de evapotranspiración son necesarios con antelación al planeamiento de proyectos o para programar calendarios de riego.

La fórmula de Penman-Monteith ha sido reportada por ambos equipos de investigación (ASCE y europeo) como aquella que produce resultados relativamente exactos y consistentes tanto en climas áridos como en húmedos.

La ecuación se puede utilizar para el cálculo directo de la evapotranspiración de cualquier cultivo pues las resistencias superficial y aerodinámica son específicas para cada cultivo.

La ecuación combinada de Penman-Monteith es:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2.1)$$

Donde: R_n es la radiación neta, G es el flujo del calor en el suelo, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor del aire, ρ_a es la densidad media del aire a presión constante, C_p es el calor específico del aire, Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, γ es la constante psicométrica, y r_s y r_a son las resistencias superficial (total) y aerodinámica.

2.4.1 Resistencia aerodinámica (r_a)

La transferencia de calor y de vapor de agua desde la superficie evaporante hacia el aire que se encuentra sobre la planta, esta determinada por la resistencia aerodinámica:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 - u_z} \quad (2.2)$$

Donde:

r_a resistencia aerodinámica [s m⁻¹],

z_m altura de medición del viento [m],

z_h altura de medición de humedad [m],

d plano de altura de desplazamiento cero [m],

z_{om} longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia del momento [m],

z_{oh} longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua [m],

k constante de Von Karman, 0,41 [-],

u_z velocidad del viento a la altura z [m s⁻¹].

2.4.2 Resistencia superficial (total) (r_s)

La resistencia superficial 'total' describe la resistencia al flujo de vapor a través del cultivo transpirante y de la superficie evaporante de suelo. En casos en que la vegetación no cubra totalmente el suelo, el factor de resistencia debe incluir de hecho los efectos de la evaporación de la superficie del suelo. Si el cultivo no esta transpirando de manera potencial, la resistencia depende también del estado del agua dentro de la planta. Una aproximación aceptable de una relación muy compleja de la resistencia superficial de una vegetación densa que cubre completamente el suelo es:

$$r_s = \frac{r_1}{IAF_{ACTIVO}} \quad (2.3)$$

Donde:

r_s resistencia superficial (total) [s m⁻¹],

r_1 resistencia estomática total de una hoja bien iluminada [s m⁻¹],

IAFactivo es el índice activo de área foliar [m² (área de la hoja) m⁻² (Superficie del suelo)].

2.5 Primeras ecuaciones utilizadas en el monitoreo de energía

Anteriormente cuando en las líneas de distribución la distorsión era mínima y despreciable, y tanto la tensión como la corriente eran senoidales se tomaba ante todo el desfaseamiento entre tensión y corriente como el factor determinante para evaluar las pérdidas. En aquellos tiempos, se elaboraron

fórmulas clásicas conocidas, que para el caso senoidal se usan hasta el día de hoy.

Las ecuaciones empleadas para describir las señales de corriente y voltaje senoidal son:

$$U(t) = U_{max} * \text{sen}(\omega t) \quad (2.4)$$

$$I_1(t) = I_{1max} * \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.5)$$

Donde I_{max} y U_{max} son los valores pico para la corriente y voltaje de la línea respectivamente, ω es la velocidad angular y φ representa el desfase entre ambas señales.

El valor efectivo de una señal de corriente alterna (CA) establecen una relación entre la potencia disipada con respecto a una señal de corriente directa (CD). El valor eficaz de una señal de CA es el valor de DC que debemos aplicar a una carga resistiva para que produzca la misma disipación de energía que si conectáramos esa misma carga resistiva a la señal AC en cuestión. El valor eficaz se obtiene a partir de la raíz del promedio de los cuadrados (en inglés root mean square), en forma de ecuación tenemos que el valor RMS para el voltaje y la corriente se calcula a partir de la ecuación (2.6) y ecuación (2.7) respectivamente. Para señales puramente senoidales los valores efectivos se obtienen a partir de una sencilla expresión como se muestra en la ecuación (2.6) y ecuación (2.7).

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^T i^2(t) dt} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

El factor de potencia (FP) se define como el coseno del ángulo (φ) que forman los fasores de la intensidad y el voltaje, como se muestra en la ecuación (2.8). Mantener un FP alto se traduce como una menor pérdida de energía, por norma el factor de potencia en instalaciones eléctricas debe mantenerse en un valor cercano a 0.9.

$$FP = \cos\varphi \quad (2.8)$$

El consumo de energía por un sistema eléctrico esta determinado por los valores de potencia aparente, potencia activa y potencia reactiva, en forma de ecuación estas cantidades se obtienen a partir de las ecuaciones. (2.9), (2.10) y (2.11) respectivamente. La potencia aparente es la energía total que es tomada por la red eléctrica, la potencia activa es la que registran los medidores y es facturada al consumidor. La energía reactiva no produce por si misma un trabajo, pero es requerida por motores, transformadores y demás equipos similares para generar el campo magnético para su funcionamiento.

$$S = U_{ef} * I_{ef} = \sqrt{Q^2 + P^2} \quad (2.9)$$

$$P = S * \cos\varphi = S * FP \quad (2.10)$$

$$Q = S * \sen\varphi = S * \sqrt{1 - FP^2} \quad (2.11)$$

Transportar mayor energía a la que realmente se consume, impone la necesidad de que los conductores, transformadores y demás dispositivos que participan en el suministro de energía sean más robustos, por lo tanto eleva el costo del sistema de distribución.

La consecuencia de tener una elevada cantidad de usuarios en esta condición, provoca que disminuya en gran medida la calidad del servicio de electricidad (caídas de tensión y sobretensiones, cortes de electricidad, etc.). Por estos motivos hay que tomar medidas que compensen esta situación, con ayuda de un instrumento adecuado se pueden medir estos parámetros y determinar las condiciones de la red para tomar acciones preventivas y correctivas. De esta manera se obtiene un ahorro sustancial de energía eléctrica y una mejora en el funcionamiento de los aparatos.

2.6 Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea determinada, como el control de una lavadora, un teclado de ordenador, una impresora, un sistema de alarma, etc. Para esto el microcontrolador utiliza muy pocos componentes asociados. Un sistema con microcontrolador debe disponer de una memoria donde se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo que, una vez programado y configurado, solo sirve para realizar la tarea asignada. La utilización de un microcontrolador en un circuito reduce notablemente el tamaño y número de componentes y, en consecuencia, disminuye el número de averías, el volumen y el peso de los equipos, entre otras ventajas.

El microcontrolador es uno de los inventos más notables del siglo XX. En el mercado hay gran cantidad de ellos, con multitud de posibilidades y características. Cada tipo de microcontrolador sirve para una serie de casos y es el diseñador del sistema quien debe decidir cual es el microcontrolador más idóneo para cada uso.

En los últimos años han tenido un gran auge los microcontroladores PIC fabricados por Microchip Technology Inc. Los PIC son microcontroladores que han tenido gran aceptación y desarrollo en los últimos años gracias a que sus buenas características, bajo precio, reducido consumo, tamaño pequeño, gran

calidad, fiabilidad y abundancia de información, lo convierten en muy fácil, cómodo y rápido de utilizar.

2.7 Estructura básica de las RNAs

En años recientes, las RNAs han surgido como una tecnología para modelado y predicción de temperatura, debido a su habilidad para aprender funciones no lineales complejas. Éstas permiten la estimación de posibles modelos no lineales sin la necesidad de especificar una forma funcional precisa. Las RNAs pueden ser vistas como sistemas de procesamiento distribuido y paralelos que consisten de un enorme número de simples procesadores ampliamente conectados llamadas neuronas. Cada neurona individual consiste de un conjunto de entradas sinápticas, a través de las cuales, las señales de entrada son recibidas. Entonces, las activaciones entrantes son multiplicadas por los pesos sinápticos y sumadas. La activación saliente es determinada aplicando una función umbral a la suma. La función umbral puede ser una función lineal o no lineal, que decide la salida de la neurona. La estructura de la neurona se muestra en la figura 2.2.

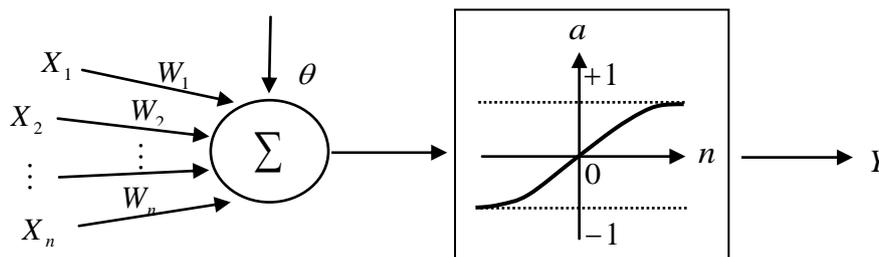


Figura. 2.2 Estructura de una neurona.

Donde: X_1, X_2, \dots, X_n representan las entradas de la neurona; W_1, W_2, \dots, W_n son los pesos (o ponderaciones), θ es el valor de umbral y Y representa la salida. La relación entrada - salida es caracterizada por:

$$Y(X) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + \theta\right) = f(W^T X + \theta) \quad (2.12)$$

Donde \mathbf{W} es el vector de pesos sináptico, \mathbf{X} es el vector de entrada, θ es una constante llamada offset o vías (ajuste o compensación), y f es la función de activación. El superíndice T denota el operador traspuesta y $\mathbf{Y}(\mathbf{X})$ es la salida de neurona.

Las funciones de activación usadas incluyen:

1. La función sigmoide (logística):

$$f(x) = [1 + \exp(-x)]^{-1}; \quad (2.13)$$

2. La función hiperbólica tangente (tanh):

$$f(x) = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)}; \quad (2.14)$$

3. La función seno o coseno:

$$f(x) = \sin x \quad \text{or} \quad f(x) = \cos x; \quad (2.15)$$

4. La función lineal:

$$f(x) = x. \quad (2.16)$$

El entrenamiento de una RNA es asumido principalmente usando la retropropagación (BP) - algoritmo basado en el aprendizaje -, el cual es un algoritmo supervisado. Este método requiere un sistema de patrones del entrenamiento, y sus correspondientes salidas deseadas. Entonces éste, de manera autónoma, ajusta los pesos de la conexión entre las neuronas. La

corrección de los pesos se hace según reglas de aprendizaje impuestas y de tal modo, se obtiene un conocimiento único de los datos.

Aunque se utilice con éxito en muchas aplicaciones del mundo real, el algoritmo estándar de retropropagación (SBP) sufre de algunos defectos. Uno de ellos, es la tasa a la cual el algoritmo converge. Se requieren varias iteraciones para entrenar una red pequeña, incluso para un problema simple. Reducir el número de iteraciones y agilizar el tiempo de aprendizaje de las RNAs, son temas de investigación reciente; algunas mejoras del algoritmo de SBP son la pendiente del gradiente [Zhou et al, 1998] y el algoritmo de Levenberg-Marquardt [Parisi et al, 1996; Hagan et al, 1994].

El modelo de la red neuronal es determinado por los siguientes tres factores: i) la estructura topológica de la red, ii) las características de la neurona y iii) el algoritmo de entrenamiento [Ayata et al, 2007]. Las redes de perceptrón multicapa (MLP) se utilizan en una gran variedad de problemas, especialmente en predicción debido a su capacidad inherente del mapeo arbitrario de la entrada-salida. Una red MLP se compone típicamente de varias capas de nodos. La primera (o la menor) capa, es una capa de la entrada donde se recibe la información externa. La última (o la mayor) capa, es una capa de salida donde se obtiene la solución del problema. La capa de la entrada y la capa de la salida son separadas por una o más capas intermedias, llamadas capas ocultas. Los nodos en capas adyacentes generalmente son completamente conectados por los arcos acíclicos, de la capa menor a la mayor. La figura 2.4 da un ejemplo de una MLP completamente conectado con una capa oculta.

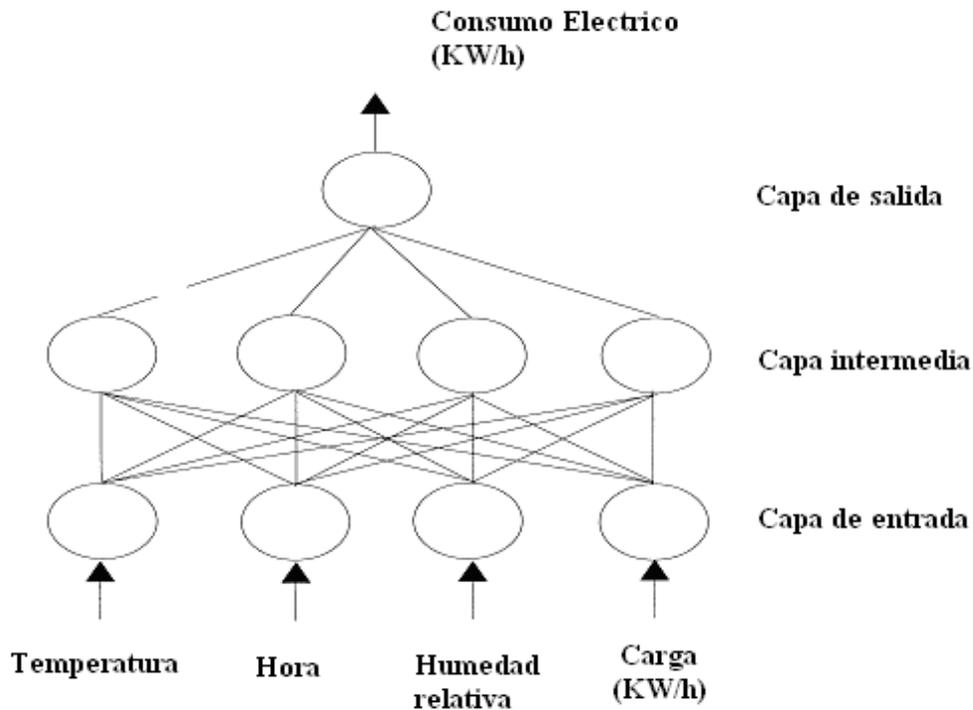


Figura. 2.3 Red neuronal de retropropagación típica.

Las funciones no lineales de activación, tales como la función logística, típicamente tienen el papel de ajustar o restringir al máximo la salida posible de un nodo a unos valores típicos de (0,1) ó (- 1,1). La normalización de los datos se realiza a menudo antes de que el proceso de entrenamiento inicie. Según lo mencionado anteriormente, cuando las funciones de transferencia no lineales se utilizan en los nodos de salida, los valores deseados a la salida se deben transformar a la gama de salidas reales de la red.

Por cada tipo de aproximación de la normalización discutido arriba, las fórmulas siguientes se utilizan con frecuencia: i) transformación lineal en el intervalo [0,1] [Lapides et al, 1988]; ii) transformación lineal en el intervalo [a,b] [Srinivasan et al. 1994]; iii) normalización estadística [Wigend et al, 1992]; y iv) normalización simple [Lachtermacher et al, 1995], como se muestra en las ecuaciones 2.53 a 2.56, respectivamente.

$$\text{Linear transformation to } [0,1]: x_n = \frac{(x_0 - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2.17)$$

$$\text{Linear transformation to } [a,b]: x_n = (b-a) \left(\frac{(x_0 - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \right) + a \quad (2.18)$$

$$\text{Statistical normalization: } x_n = \frac{(x_0 - \bar{x})}{s} \quad (2.19)$$

$$\text{Simple normalization: } x_n = \frac{x_0}{x_{\max}} \quad (2.20)$$

Donde x_n y x_0 representan los datos normalizados y originales; x_{\min} , x_{\max} , \bar{x} y s son respectivamente el mínimo, máximo, media, y desviación estándar a lo largo de las columnas o filas.

Aunque pueda haber muchas medidas de funcionamiento para una RNA predictora, como el tiempo de modelado y el tiempo de entrenamiento, la medida de funcionamiento decisiva y la más importante es la exactitud de la predicción, que puede alcanzar más allá de los datos del entrenamiento. Sin embargo, una medida conveniente de exactitud para un problema dado no es aceptada universalmente por los académicos y los profesionales de la predicción. Una medida de la exactitud se define a menudo en términos del error de predicción, que es la diferencia entre el valor real y el pronosticado. Hay un número de medidas de exactitud en la literatura de la predicción, y cada uno tiene ventajas y limitaciones [Makridakis et al., 2006]. Entre los más frecuentemente usados están: La desviación media absoluta (MAD), (ecuación 2.57); la suma del error cuadrático (SSE) (ecuación 2.58); el error medio cuadrático (MSE) (ecuación 2.59); el error medio cuadrático de la raíz (RMSE), (ecuación 2.60); y el error de porcentaje de la media absoluta (MAPE) (ecuación 2.61).

$$MAD = \frac{\sum(e_t)}{N} \quad (2.21)$$

$$SSE = \sum(e_t)^2 \quad (2.22)$$

$$MSE = \frac{\sum(e_t)^2}{N} \quad (2.23)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.24)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{e_t}{y_t} \right) (100) \quad (2.25)$$

Donde: e_t es el error de predicción individual; y_t es el valor actual; y N es el número de términos del error.

Además de lo anterior, otras medidas de precisión también se encuentran en la literatura. Por ejemplo, los errores medios (AE) fueron utilizados por Yiu (2007); el error máximo de media cuadrada de la raíz (MRMSE) fue utilizado por Ruano (2006), la media cuadrada de la raíz (RMS) fue divulgado por Ayata (2007) y la diferencia media cuadrática (MSD) fue utilizado por Mohseni (2006).

En las dos décadas pasadas, los métodos paramétricos lineales de identificación se han utilizado en gran parte para analizar el rendimiento de la energía en edificios [Andersen et al, 2000; Bloem, 1996; Bloem, 1994; Bloem, 1992; Angeby et al, 1991; Norlén, 1990; Norlén, 1988]. Al mismo tiempo, avances significativos en los campos del reconocimiento de patrones no lineal y la teoría de control de sistemas, han sido posibles gracias a avances en la rama de los sistemas de identificación basados en RNAs. Las RNAs han proporcionado la oportunidad de desarrollar modelos matemáticos no lineales de caja negra de manera eficaz, capaces de representar arbitrariamente procesos no lineales complejos, que relacionan las entradas y las salidas de cualquier sistema.

La gama de usos de las RNAs está aumentando constantemente. Su uso en aplicaciones relacionadas con la administración y manejo de energía comienza a principios de los años 90. Kalogirou (2001) proporciona una exhaustiva descripción de las aplicaciones de las RNAs en sistemas de energía

renovable y en edificios. Las RNAs parecen ser particularmente apropiadas para el control de sistemas de calefacción en edificios solares.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

Durante el estudio de este capítulo, se muestran las diferentes estrategias y métodos utilizados para desarrollar la investigación, que van desde la descripción del lugar donde se realizaron las mediciones de campo, así como la descripción del equipo utilizado, hasta la instalación, y puesta en marcha del sistema de monitoreo de energía llamado SMEI.

3.1 Descripción de la zona de experimentación

El experimento se llevo a cabo en el estado de Querétaro, particularmente en el invernadero de la Universidad Autónoma de Querétaro con un bajo grado de automatización, las pruebas fueron efectuadas cuando trabajaba como invernadero semiautomatizado.

Querétaro:

La ciudad de Querétaro está ubicada en las coordenadas siguientes: latitud norte 20° 36', longitud oeste de 100° 24' y altitud de 1820m, su clima es semiseco-semicálido.

En este municipio el 49.79% de la superficie del municipio es susceptible a emplearse para la agricultura y el 44.56% se cultiva, 5.38% es pastizal, 33.43% es matorral, 4.44% es bosque y 12.19% en otros [INEGI, 2000].

3.2 Descripción de los invernaderos.

El invernadero es una estructura en que las partes correspondientes a las paredes y el techo están cubiertos con películas plásticas, con la finalidad

de desarrollar cultivos en un ambiente controlado de temperatura y humedad. Se pueden tener construcciones simples, diseñadas por los agricultores a bajo costo, o sofisticadas, con instalaciones y equipos para un mejor control del ambiente. Los invernaderos generalmente son utilizados para cultivos de porte alto, como tomate, pepino, pimentón, melón, flores y otros.

3.2.1 Generalidades de los invernaderos.

Los invernaderos se utilizan para asegurar la producción y calidad de los cultivos, ya que en campo abierto es muy difícil mantener los cultivos de una manera perfecta a lo largo de todo el año. El concepto de cultivos bajo invernadero representa el paso de producción extensiva de tomate a producción intensiva. Para ello, las plantas han de reunir condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo. Los controles de temperatura, humedad relativa, corrientes de aire y composición atmosférica son esenciales, como lo son, además, el control del agua y de los fertilizantes, el mantenimiento del nivel de oxígeno cerca de las raíces y la sanidad del cultivo para asegurar una calidad y una productividad óptimas.

3.2.2 Invernadero ubicado en la Universidad Autónoma de Querétaro

El invernadero ubicado en la Universidad Autónoma de Querétaro C.U. (Centro Universitario) está ubicado en la zona descrita como Querétaro. La superficie del invernadero es de 964.8m² (36m de largo por 26.8m de ancho). Este invernadero es de tipo multicapilla y tiene una altura a la canaleta de 3m y de 4.5m a la cumbrera. La orientación de la cumbrera es hacia el norte. El invernadero cuenta con cuatro ventanas cenitales de 0.9m x 28m y cuatro

ventanas laterales: dos de ellas de 2.5m x 20m y las dos restantes de 2.5m x 28m. Los porcentajes de ventilación son: cenital 10% y lateral de 24% con respecto al área cubierta. Figura 3.1

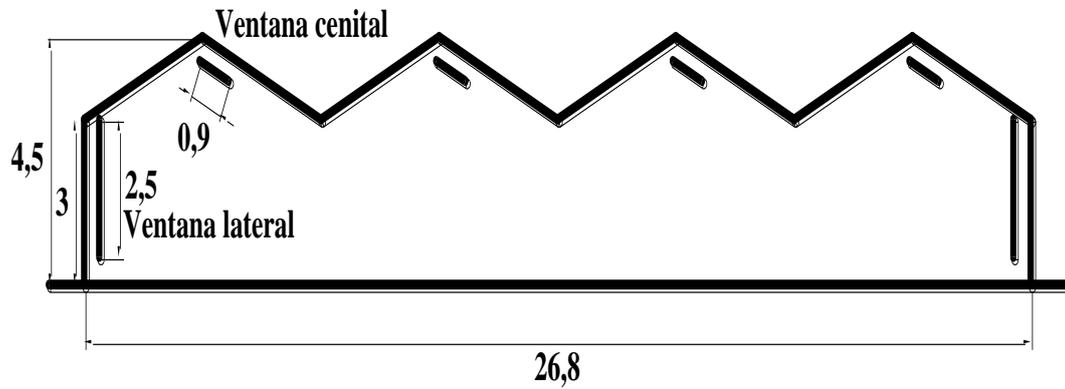


Figura 3.1. Vista lateral del invernadero ubicado en la Universidad Autónoma de Querétaro.

3.2.3 Cultivo

El tipo de planta que se sembró es tomate saladet con una densidad de planta de 2.5 por m², el cual se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2. Cultivo de tomate saladet.

3.2.4 Prototipo de monitoreo de energéticos

El prototipo de monitoreo de energía fue implementado en el invernadero de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro como se muestra en la Figura 3.3; donde el cual muestra la instalación de los sensores de agua, de energía eléctrica, la tarjeta de adquisición de datos y los acondicionadores de señal. La validación y efectividad del sistema fue realizada con los instrumentos Fluke modelo 43B y elster V100. Una vez que se comprobó la valides y efectividad del sistema este se utilizo como sistema de monitoreo de energéticos de invernadero totalmente automatizado ubicado en Querétaro.

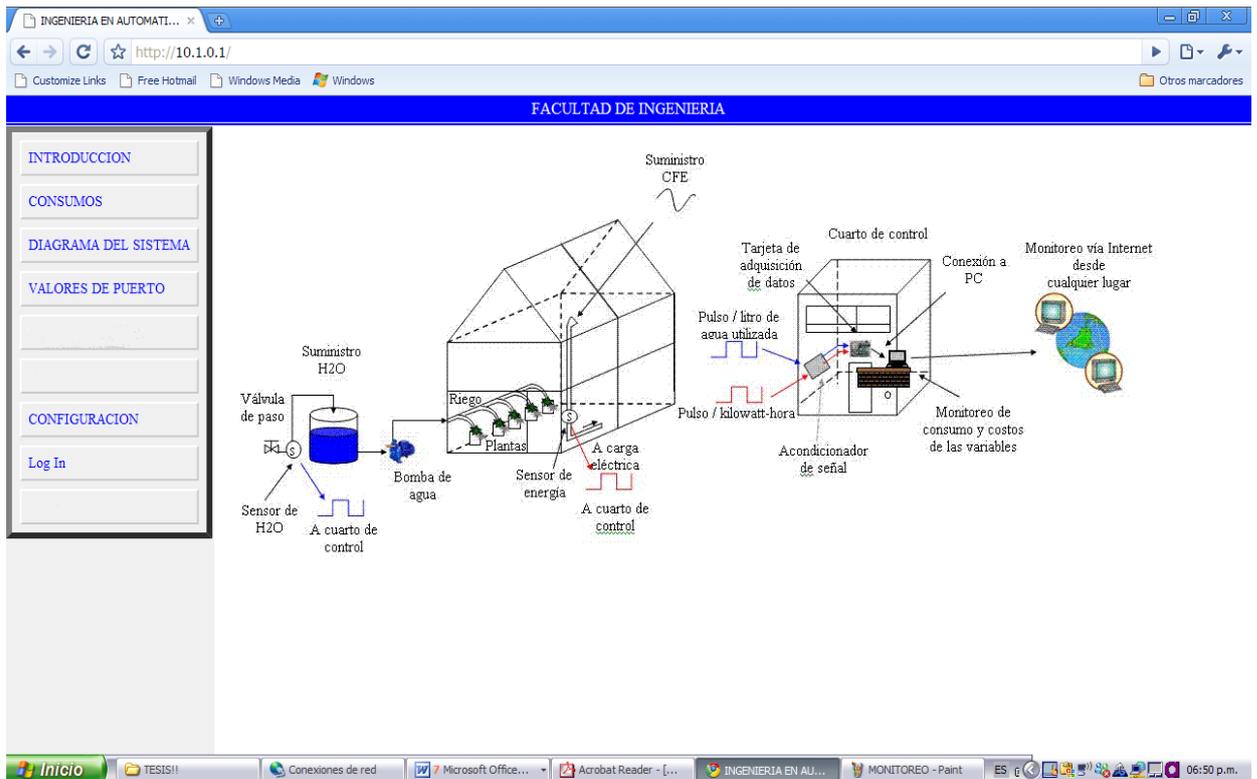


Figura 3.3. Diagrama general del sistema de monitoreo de energéticos.

3.3.1 Descripción de la instrumentación del sistema de monitoreo de energéticos

Como se muestra en la Figura 3.3 el sistema integral de monitoreo de energéticos para invernaderos el cual tiene dos instrumentos para la medición de los parámetros de consumo. Un medidor de energía eléctrica monofásico de estado sólido tipo Itrón modelo C1S, el cual proporciona una salida de pulsos eléctricos. La relación de impulsos eléctricos es de uno por cada 1000 watts de consumo de energía eléctrica, además cuenta con un indicador LCD numérico y una interfaz de comunicación por infrarrojo; las características eléctricas de la terminal de salida del medidor corresponden a una señal de voltaje con pulsos de corta duración.

Para la medición del flujo de agua se utilizó un sensor volumétrico. El sensor utiliza el principio de operación de un pistón acanalado, el cual recibe

movimiento por el empuje del agua al pasar dentro de una cámara de trabajo donde cada accionamiento del pistón es equivalente a un volumen conocido de agua. El medidor seleccionado es del tipo ELSTER V100 (PSM) el cual cumple con los estándares NOM-012, BS5728, ISO 4064, clase B Además puede proporcionar salidas de pulso tipo REED para conexiones a sistemas de lectura remota. Ambas señales de los instrumentos de medición de flujo y energía eléctrica deben ser acondicionadas para adecuar las señales y estas puedan ser recibidas e interpretadas correctamente por la tarjeta que se encarga de la captura y registro de pulsos.

3.3.2 Servidor Web embebido

El monitoreo y control de procesos por Internet usando sensores habilitados para conectarse a la red global mundial (World Wide Web, o simplemente Web) es una de las tecnologías más impactantes, habilitando el acceso al sistema desde cualquier Terminal conectada a la red. La exhibición de los parámetros del proceso, control remoto, pruebas del sistema y reconfiguración del sistema puede realizarse usando un navegador Web estándar en una computadora.

A pesar de su importancia, el monitoreo y control por Internet esta rezagado debido a varios factores incluyendo el costo de proporcionar una computadora servidor y a la falta de seguridad que acompaña el formato abierto de la WWW. El puente entre los sensores y actuadores distribuidos en un lado y la red

Internet en el otro lado se puede hacer con ayuda de un servidor Web embebido; los servidores Web embebidos son por si mismos un pequeño sitio Web que son diseñados con relativamente poca memoria y capacidad para minimizar costos y el tiempo de transferencia de datos.

Entre las ventajas de usar un servidor Web embebido podemos citar las siguientes:

- Costo reducido.
- En muchos casos incorporan un microcontrolador con capacidad para conectar directamente los instrumentos e implementar ciertos algoritmos de control. Con lo cual se obtienen una disminución adicional en el hardware.
- Permiten el uso de protocolos de comunicación estándar tales como, TCP/IP, HTTP Y FTP.
- Tienen reducido tamaño y consumo de energía.
- Generación dinámica de paginas Web, ya que el contenido de las paginas servidas será información de estados o lecturas de sensores las paginas deben ser generadas de forma practica.

3.3.3 Sistema de monitoreo embebido con capacidad de red para invernaderos

La selección del servidor Web embebido será de acuerdo a los requerimientos globales del sistema, tanto desde el punto de vista de hardware y de software. Es necesario contar con las especificaciones detalladas de las características de los sensores que se desean interconectar al sistema, para determinar el tipo de interface (analógica o digital) necesaria.

Entre los distintos dispositivos de interface, se encuentra el modulo servidor Web SBC68EC de Modronix [10] esta es una tarjeta que usa un microcontrolador PIC16F6680. Algunas de las características más importantes de este servidor Web embebido se encuentran las siguientes:

- Incorpora un microcontrolador PIC16F6680 el cual posee una memoria de programa de 64 KB, 4 KB de memoria SRAM y 64 KB de memoria EEPROM.

- 32 terminales de entrada/salida de propósito general.
- 12 entradas de conversión analógico a digital programables de 10 bits resolución.
- 2 salidas PWM, configurables y programables desde la pagina Web.
- 1 USART para comunicación serial de datos por RS232.
- Diversas interfaces de comunicación como SPI, I2C, CAN.
- Memoria I2C EEPROM externa de 512 K Bits para almacenamiento de las páginas Web.
- Incluye MAC, DHCP, ARP, IP, UDP, TCP/IP.

La programación del dispositivo involucra actualización del firmware del microcontrolador y de la página Web almacenada en una memoria I2C EEPROM externa. El firmware es el código creado para ejecutarse en el microcontrolador que determina las tareas de monitoreo, procesamiento y almacenamiento de datos. Los datos capturados pueden ser entonces pasados como parámetros hacia la pagina Web, la visualización de los datos y botones de control pueden acomodarse de acuerdo con un diseño de la pagina Web el cual se puede hacer por medio de algún editor o bien escrito en lenguaje HTML.

Para nuestro caso particular el firmware debe ejecutar varias tareas, entre ellas se encuentra la configuración de los puertos de entrada/salida del microcontrolador para que puedan recibir las señales de voltaje provenientes de los sensores de flujo, consumo de energía eléctrica, etc. Además se creo un procedimiento para detectar el instante en que ocurren eventos en los sensores (pulsos) provocados por el incremento de las variables bajo medición. El diagrama de flujo que describe el proceso creado para detectar los pulsos es el siguiente.

La Figura 3.4. Describe el proceso creado para detectar los pulsos del sistema donde las variables ant. x, act. x y cont. x corresponden a los valores anterior, actual y del contador de los pulsos para cada variable, x es el identificador del sensor empleado (x= 1,2,3). El proceso descrito por el

diagrama de flujo anterior se ejecuta indefinidamente dentro del ciclo del programa principal con un periodo de muestreo constante fijado por la velocidad del procesador y el número de instrucciones a realizar.

Los consumos de agua, y electricidad se almacenan en forma de contadores de pulsos en el interior del microcontrolador, el valor de estos contadores puede ser solicitado desde una terminal remota con ayuda de algún navegador Web. Con ayuda de un editor de paginas Web se diseño una interface visual para el monitoreo de los contadores, a partir de cuyo valor se calculan los consumos de agua y energía eléctrica.

Es importante resaltar que en la misma tarjeta SBC68EC se almacena en memoria no volátil muestras de las mediciones para prevenir perdidas de datos en caso de cortes de energía eléctrica, el historial de datos se puede solicitar por una terminal remota con ayuda de un strip escrito en PHP que además de capturar la información la envía a un archivo de texto. Esta característica del sistema permite visualizar graficas de consumo por tiempos, tal como se muestra en las figuras.

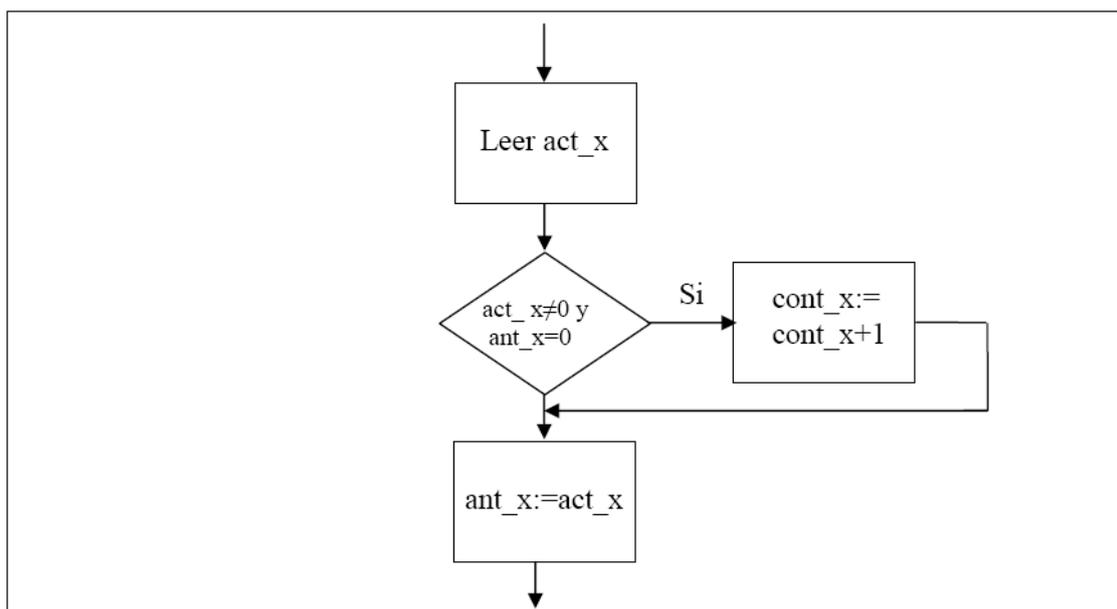


Figura 3.4. Descripción del proceso creado para detectar los pulsos del sistema.

3.4 Descripción del sistema y procedimiento de validación

En la Figura. 3.5 se muestra el diagrama eléctrico del sistema de monitoreo de energéticos por Internet, los instrumentos de medición requieren una fuente de voltaje para poder operar normalmente. En el caso del medidor de energía eléctrica, este obtiene su alimentación de la propia línea que se encuentra midiendo; mientras que el sensor de flujo necesita una fuente de alimentación de +24 Volts que es suministrada por una fuente dispuesta para tal fin.

Las señales de los medidores pasan por una etapa de acondicionamiento antes de ser enviadas a la tarjeta que recibe, procesa y registra la información para su consulta por Internet. Para las condiciones de operación de un invernadero, se cuenta con una carga eléctrica inductiva (4 motores trifásico de 1/2 hp y una bomba de 1.5 hp). El medidor de energía mide el consumo de energía en una de las fases del motor, debido a que la potencia en una carga trifásica balanceada es la misma en cada fase podemos entonces inferir el consumo total de energía eléctrica.

Para la comparación y validación se utilizó un analizador de la calidad de energía eléctrica Fluke Modelo 430, y el sistema Monito UAQ [11] a partir de un historial de consumos de energía fueron comparados los consumos del motor en distintos periodos y formas de operación.

El motor también es usado para mover una bomba de agua que produce el flujo de agua que es transportado a través del medidor de agua, este flujo genera los pulsos que son registrados por la tarjeta modtronix. Haciendo recircular el agua de un recipiente y aplicando secuencias de operación similares a las usadas en un sistema de riego en invernadero se registraron los datos.

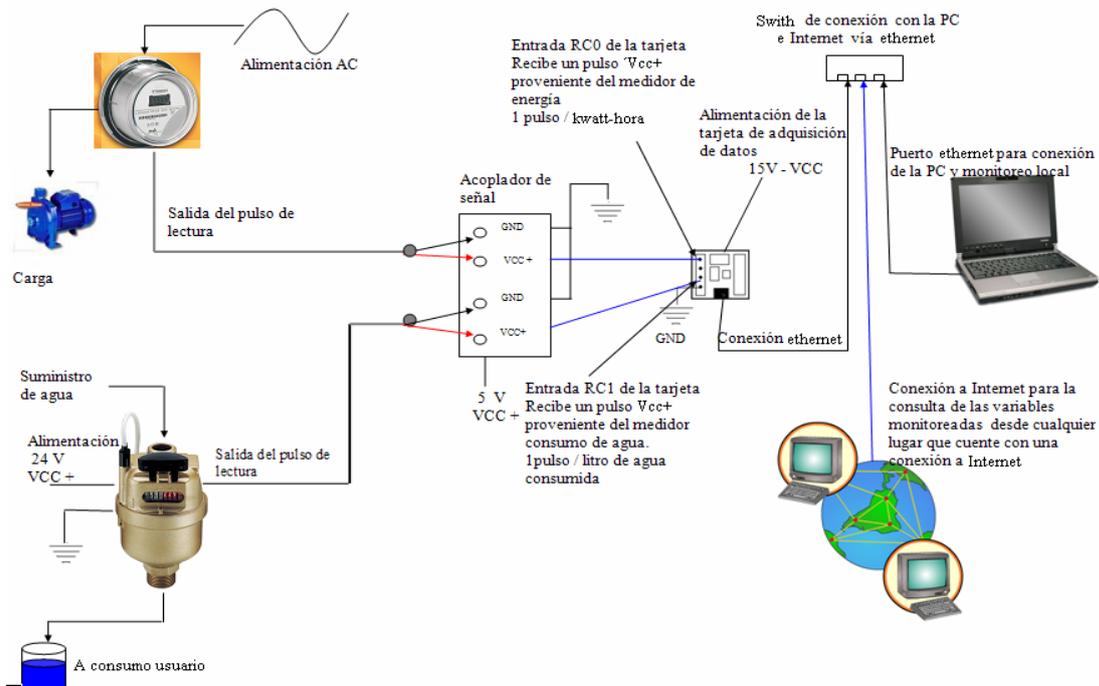


Figura 3.5. Muestra el diagrama de conexiones eléctricas y electrónicas del sistema de monitoreo de energéticos para invernaderos.

3.4.1 Descripción del sistema del microcontrolador

El sistema está desarrollado en base a una tarjeta que contiene los siguientes componentes:

Controlador Ethernet Realtech 8019AS 10BaseT, Microcontrolador 18F6621 de microchip, Memoria EEPROM externa 24F512 de 64 k bytes, Fuente de 5 volts integrada, Conector de expansión para conexión de dispositivos Figura 1.

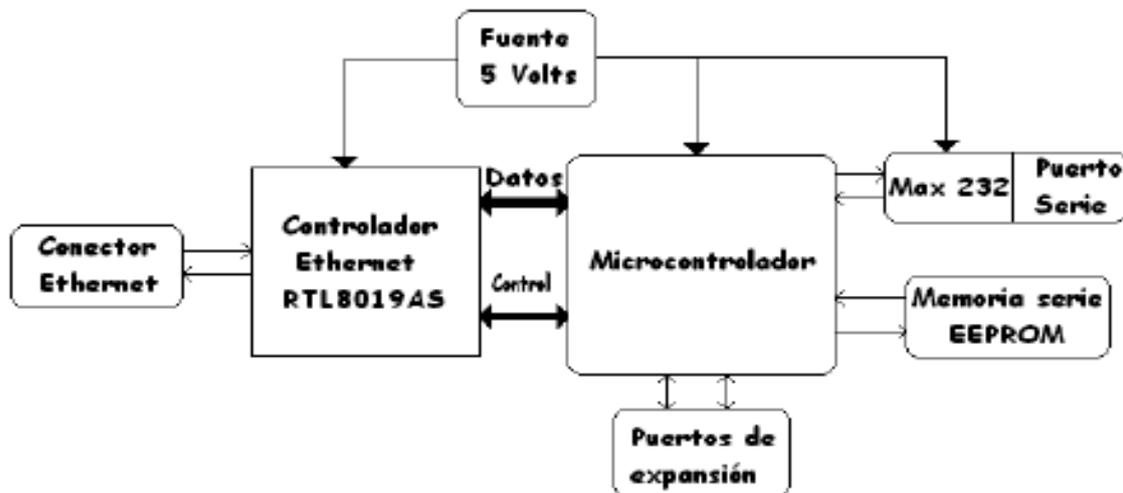


Figura 3.6 Diagrama de bloques

El objetivo de este sistema, es realizar una conexión entre un microcontrolador y una red de computadoras utilizando el protocolo TCP/IP. Para realizar esto, se requieren de varios componentes. Los cuales se muestran en el diagrama de bloques de la Figura 1. Indudablemente la implementación de redes de computadoras se ha generalizado con la tecnología Ethernet. Ese tipo de topología se caracteriza por una alta velocidad y confiabilidad. Esta tecnología comparte el canal de comunicación. Estas características la hacen ideal para ser seleccionada como una de las mejores opciones de conexión entre un microcontrolador y una red.

Después de seleccionar el tipo de topología, se procede a seleccionar el controlador para realizar la conexión entre el microcontrolador y la red de computadoras.

Existen varios controladores ethernet, para realizar la conexión de los cuales se seleccionó el circuito RTL8019AS debido a la disponibilidad de la información para la implementación del controlador. El microcontrolador utilizado es el PIC18F6621 de microchip, este microcontrolador cuenta con las características suficientes para realizar la interfaz con el controlador ethernet y 32 líneas libres para la conexión de diferentes dispositivos. La cantidad de memoria interna del microcontrolador es limitada, esto hace necesaria la

conexión de memoria externa para almacenar básicamente las paginas html. La memoria utilizada permite almacenar hasta 64 k bytes de información.

Una fuente de 5 volts alimenta a todos los componentes del sistema. Este sistema es suficiente para realizar una conexión, a una red. Este sistema se encuentra disponible en el mercado y se conoce como SBC65EC comercializado por modtronix[1].



Figura 3. Tarjeta modtronix modelo SBC65EC

3.4.2.1 Descripción de la tecnología ethernet.

Ethernet es una canal de comunicación rápido, y es una alternativa a los canales de comunicación seriales como el RS-232 y el IIC. Actualmente la mayoría de las computadoras se encuentran equipadas como una tarjeta ethernet, esta característica permite pensar que en el desarrollo de aplicaciones basadas en microcontrolador un método para “ver el mundo” es utilizar este canal de comunicación. El siguiente paso, es conectar este dispositivo a una red con el propósito de compartir la información o bien tener acceso de manera remota desde cualquier punto de la red. Ahora bien, si se considera que la red se conecta a Internet, es posible compartir la información desde cualquier punto de Internet.



Figura 3.8. Topología estrella

Este tipo de topología utiliza la detección de portadora y detección de colisiones para funcionar, esta función la realiza el controlador ethernet. En la figura 3.8 se muestra una de las conexiones más comunes la cual se basa en un hub y cable del tipo par trenzado.

La información que viaja a través de Ethernet no debe de ser menor de 64 y mayor de 1518 bytes. En la figura 3.9 se muestra de manera gráfica la cantidad de información de un paquete.

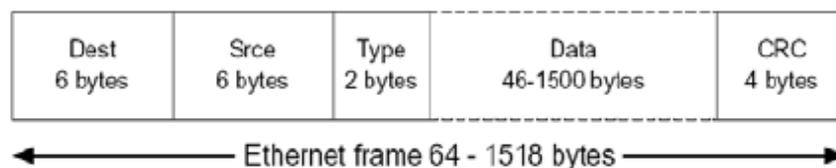


Figura 3.9 Paquete ethernet

En la parte de Data se incrusta todo el stack TCP/IP para implementar cada uno de los protocolos implementados, y los datos de las aplicaciones.

3.4.2.2 La comunicación del protocolo TCP/IP

Después de realizar la conexión a una red ethernet es necesario implementar el protocolo de comunicación para poder compartir información entre el microcontrolador y la red de computadoras. El TCP/IP es un conjunto de protocolos de comunicación diseñados para la comunicación entre las computadoras conectadas a Internet. TCP/IP esta basado en un modelo modular a manera que permite que cada módulo funcione de manera independiente.

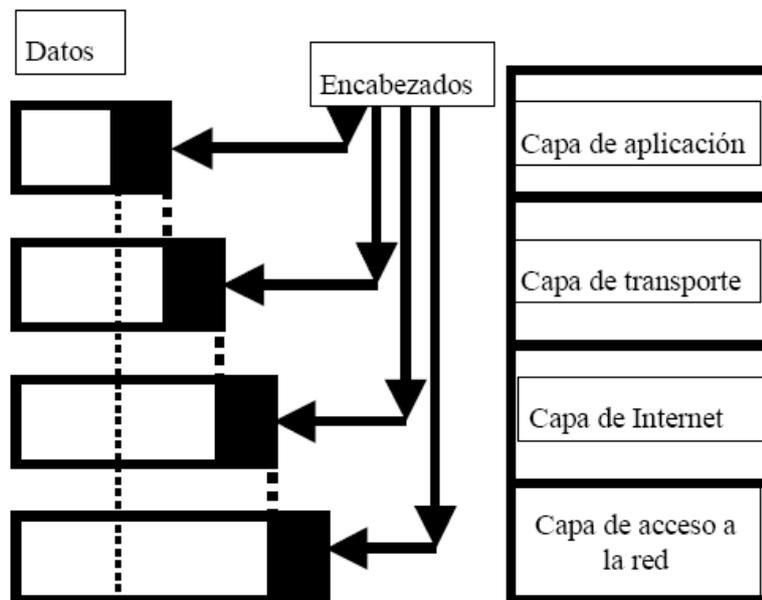


Figura 3.10 Modelo stack

Capa de acceso a la red. Brinda una interfaz con la red física, da formato a los datos para adecuarlos al medio de transmisión y los direcciona para la subred basándose en direcciones físicas del hardware. Provee una verificación de errores para los datos enviados por la red física.

Capa de Internet. Provee un direccionamiento lógico, independiente del hardware, para que los datos puedan pasar a través de las subredes con diferentes arquitecturas físicas. Realiza un ruteo para reducir el tráfico y soportar envíos a través de la interred. El término interred se refiere a la interconexión de grandes redes de área local LAN que, por ejemplo, puede encontrarse en grandes compañías o en la propia Internet. Relaciona las direcciones físicas (usadas en la capa de acceso a la red) con las direcciones lógicas.

Capa de transporte. Provee un control de flujo, verificación de errores y servicios de confirmación para la red. Sirve como interfaz para las aplicaciones de la red. Capa de aplicación. Proporciona aplicaciones para la solución de problemas de la red, así como para transferencia de archivos, control remoto y actividades de Internet.

También soporta Interfaces para Programación de Aplicaciones (APIs) de red, que permiten a los programas escritos para un ambiente operativo específico, tener acceso a la red. A pesar de todos estos formatos de comunicación son importantes, por razones de espacio y de tiempo computacional, no es posible implementarlos en el programa del microcontrolador. Sin embargo varios de estos protocolos se desarrollaron de manera que contienen una versión “adaptada” para el microcontrolador elegido. A continuación se da una lista de los protocolos implementados. MAC, IP, ARP, ICMP, TCP, UDP, HTTP, FTP, DHCP.

Estos protocolos permiten desarrollar un sistema para la comunicación entre el microcontrolador y una red de computadoras. En la figura 3.10 se muestra la interacción y el protocolo utilizado en cada una de las capas.

La empresa Microchip [2] desarrollo un pequeño stack TCP/IP, para el desarrollo de aplicaciones basadas en microcontrolador y ethernet, el cual lo dejo libre para el desarrollo de aplicaciones. Este software se utilizo como base para el desarrollo de este prototipo, el cual a su vez fue modificado por la empresa Modtronix [1]. Ambos códigos se utilizaron con el objetivo de desarrollar la aplicación antes descrita.

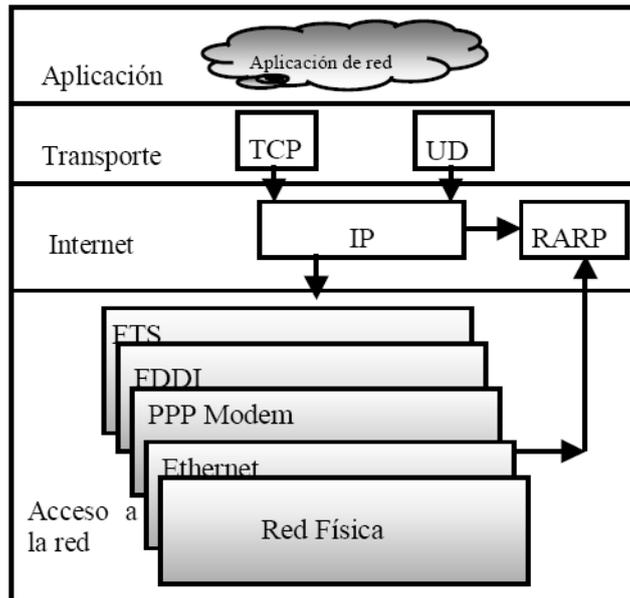


Figura 3.11 Modelo stack

3.4.2.3 El Stack TCP/IP de microchip.

En la figura 3.11 se muestra el stack TCP/IP de microchip cuenta con las siguientes características: Realizado en lenguaje C, diseñado de manera modular, soporte para TCP y UDP, servidor HTML y sistema básico de archivos. Estas características permiten realizar las siguientes acciones: Realizar control remoto utilizando el servidor web, notificación remota, actualización remota implementar un puente entre diversos puertos de comunicación y Ethernet.

3.4.2.5 Sistema del servidor WEB

El sistema que permite el uso del stack TCP/IP como un medio de control y monitoreo de manera remota a los procesos, es la implementación de

un pequeño servidor http. Este servidor permite presentar páginas web a los clientes que se conectan a la dirección del servidor.

Las páginas que se desean mostrar se deben de colocar en la memoria EEPROM externada conectada al microcontrolador. Antes de colocar una página web en la memoria es necesario darle el formato adecuado.

3.4.2.6 El sistema de archivos MPFS

El servidor web obtiene los archivos de una memoria EEPROM externa que puede ser de hasta 64 kbytes de capacidad. Al momento de diseñar la página web, es necesario que todas las páginas se encuentren en el mismo directorio. La página inicial que busca el servidor es index.htm, de manera que si un cliente accede al servidor, la primera página que se despliega es "index.htm" El diseño de las páginas html requiere de un cuidado especial, ya que no es posible que dentro del cuerpo de la página existan los caracteres (‘, “, <, >, #, %, [,], {, }, |, \, ^, ~) además, es necesario que el nombre de todos los archivos respeten el antiguo formato de DOS que es 8 caracteres de nombre seguido por un punto y 3 caracteres con la extensión del archivo. Entre las extensiones que pueden contener los archivos se encuentran: txt, htm, gif, cgi, jpg, cla, wav.

3.4.2.7 El Diseño de páginas dinámicas

Una página web "normal" solo presenta la información que fue introducida al momento del diseño, si requerimos del diseño de una página que se modifique dependiendo de las necesidades del usuario o de eventos o sensores conectados al microcontrolador,

Requerimos de generar páginas dinámicas. El servidor http puede generar de manera dinámica páginas web utilizando variables de tiempo real con el propósito de mostrar el estado de las entradas y salidas de un sistema.

Para esto se incrusto en el servidor http un pequeño módulo CGI con el propósito de que el servidor entienda que se trata de una página que requiere de intercambiar información de tiempo real entre el microcontrolador y la página web. Este pequeño módulo permite tener una gran cantidad de variables que permiten interactuar con el sistema. De manera natural el sistema solo proporciona una pequeña cantidad de memoria, sin embargo esta cantidad de memoria es suficiente para nuestras aplicaciones. El diseño del sistema se baso en la modificación de las funciones que atiende el servidor web en caso de solicitar una página CGI. Este módulo permite de adicional interactuar con el usuario mediante la función GET contenida en los navegadores.

Capítulo 4

RESULTADOS

Los resultados esperados de la investigación son mostrados en esta tesis. Este capítulo realiza una discusión del sistema de monitoreo de energéticos (agua y energía eléctrica) desarrollado llamado SMEI.

Con el sistema propuesto (SMEI) obtenemos datos de la cantidad de energía eléctrica y agua que se gasta en un invernadero.

4.1 Validación

Para calcular los parámetros de error de energía la ecuación fue definida de acuerdo a Cox (8). Y es mostrada a continuación.

$$\%errorEP = 100\left(\frac{X_{Fluke} - Y_{SMEI}}{X_{SMEI}}\right) \quad (4.1)$$

Donde Y_{SMEI} representa el consumo de energía eléctrica del sistema de monitoreo de energía para invernaderos (SMEI) calculados mediante la ecuación (1).

$X_{fluke/itron}$ denota el consumo de energía de los medidores fluke modelo 430, el medidor de energía itrón modelo C1S.

Por otro lado la ecuación utilizada para calcular el porcentaje de error del consumo de agua es el siguiente.

$$\%errorEP = 100\left(\frac{X\left(\frac{V_{100}}{ara\acute{a}}\right) - Y_{SMEI}}{X_{SMEI}}\right) \quad (4.2)$$

Donde X_{V100} representa el consumo de agua del medidor marca Elester modelo V100 y el Y_{SMEI} indica el consumo de agua del sistema de monitoreo de energía para invernaderos (SMEI).

La tabla 4.1 muestra los porcentajes de error comparados con diferentes medidores tanto de agua como de energía eléctrica. El error de consumo de energía del medidor SMEI comparado con el fluke modelo 430 presenta un error de alrededor de 2%. La comparación entre el medidor Itrón y el SMEI mostró un error por debajo del 2%. Estos valores están dentro de los parámetros que indica la norma IEEE 1000-4-7 para energía eléctrica. En la misma tabla se observa el error de la medición del agua, comparando el SMEI con el medidor ELSTER V100 y es de 1.5% y con el medidor ARAD de un 1%.

Tabla 4.1 Porcentajes de error

SMEI vs	% ERROR	TIPO DE ENERGÍA
FLUKE mod. 430	2%	Eléctrica
ITRÓN mod. C1S	2%	Eléctrica
ELESTER mod. V100	1.5%	Agua
ARAD	1%	Agua

4.2 Interfaz grafica

En la figura 4.1 Se muestra la interfaz grafica a través de Internet. Con la dirección [http//10.1.0.1](http://10.1.0.1) de Internet podemos acceder a la página y observar los consumos energéticos del sistema para una mayor comodidad del usuario estos son mostrados en KW-h, metros cúbicos y en pesos. Los costos de los energéticos son calculados de acuerdo a la tarifa eléctrica y del agua, para los invernaderos en México. Estos datos son guardados en la tarjeta modtronix para que posteriormente a través de un navegador Web el historial de datos se pueda solicitar por una terminal remota con ayuda de un script escrito en PHP

que además de capturar la información y enviarla a un archivo de texto, para posteriormente generar las graficas mostradas

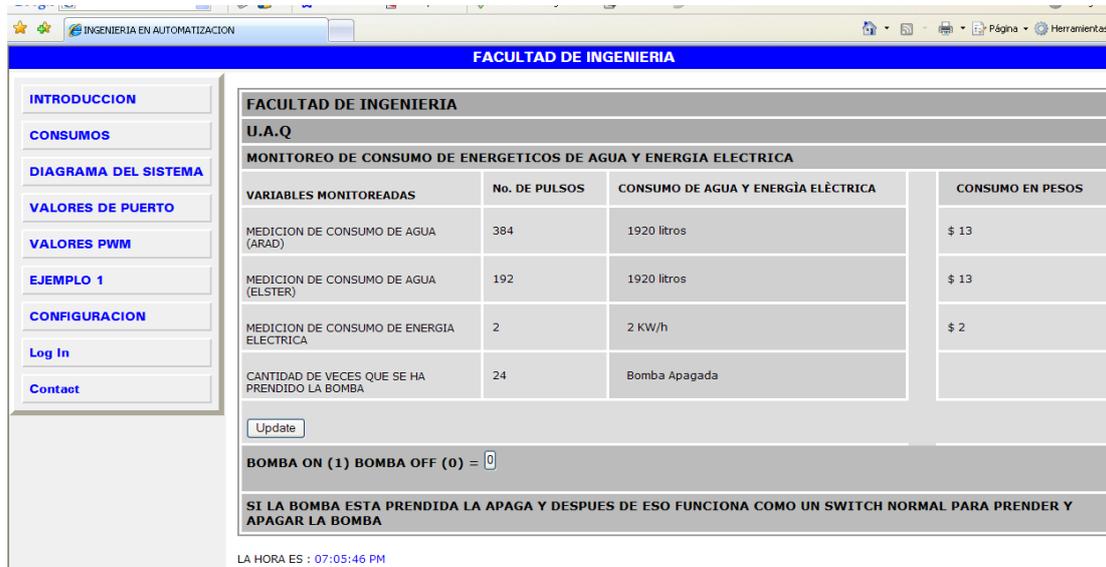


Figura 4.1 Muestra la interfaz grafica que observara el operador del sistema.

4.3 Consumos de agua de las plantas de tomate y periodos de monitoreo de energéticos

La figura 4.2 muestra el consumo de agua del 30 de Abril al 9 de Julio del 2008 por etapas desde el enraizamiento (1ª semana), 1º al 4º racimo floral (de la 2ª a la 5ª semana), 5º racimo floral (6ª semana), 6º racimo floral (de la 7ª a la 9ª semana). Estos datos se obtuvieron del invernadero medidos con el Elster V100 el cual manda un pulso por cada 5 litros de agua, además se compararon con el medidor Arad que manda un pulso por cada 10 litros de agua el cual se tomo como el testigo.

De acuerdo con la FAO los valores que aparecen como mínimos y máximos son los que recomienda en el consumo de agua del cultivo de tomate.

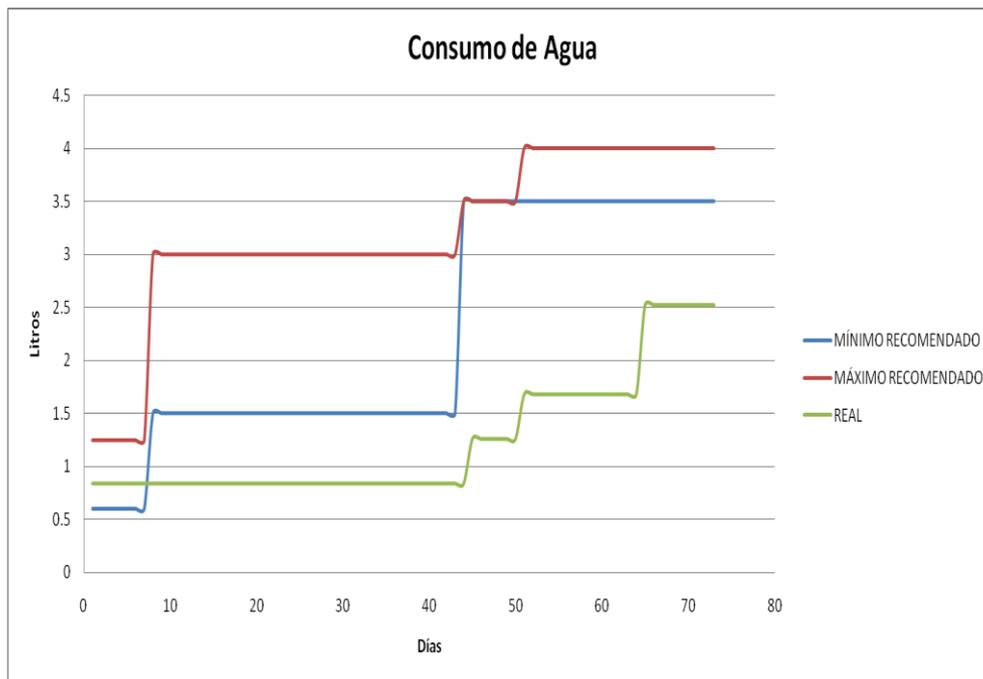


Figura 4.2 Muestra el consumo de agua real por el SMEI y es comparado con los valores que recomienda la FAO.

4.3.1 Consumo de energía eléctrica de los motores del invernadero

La figura 4.3 muestra los consumos de energía eléctrica los cuales son complicados de entender sobre todo para el personal que no cuente con los conocimientos necesarios y aun para algunos que tienen los conocimientos, por lo cual se hace un sistema más amigable de tal manera que cualquier persona pueda interpretarlos de forma adecuada por medio de números que se puedan observar directamente en la pantalla del sistema de monitoreo. Además también se puede observar puntos de mejoras ya que los picos que muestra la figura se pueden reducir con sistemas de arranque por autotransformador o variadores de velocidad los cuales pueden reducir hasta un 40% el consumo de energía eléctrica.

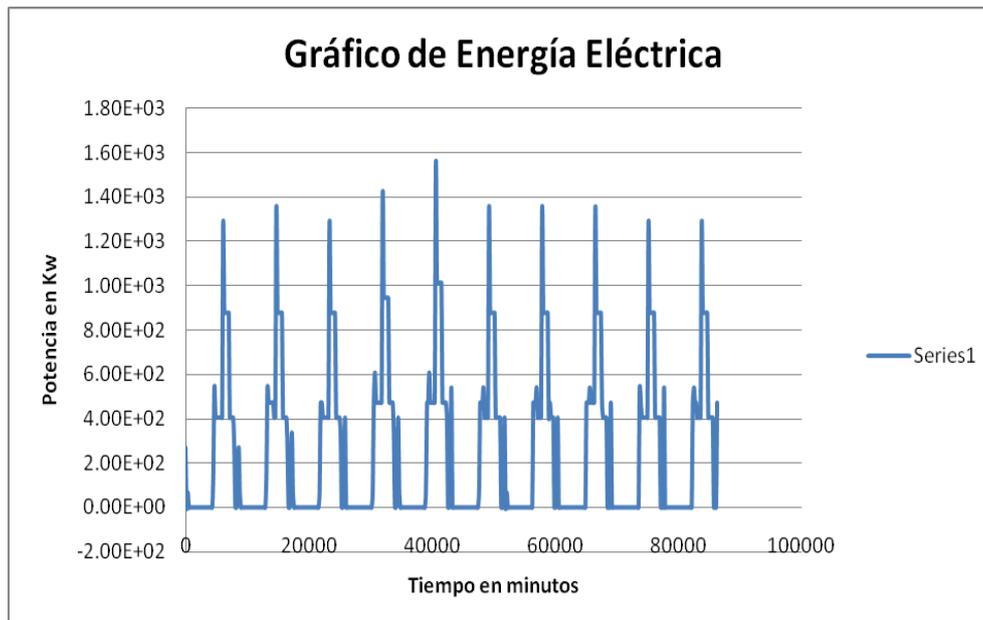


Figura 4.3 Muestra la gráfica del consumo de energía eléctrica de los 4 motores del invernadero por 6 días.

4.4. Resultados de los modelos de predicción de energía aplicados a invernaderos de México basado en RNAs.

Los datos registrados del consumo de energía eléctrica en el invernadero fueron a partir un día sábado iniciando a las 16:51 de la tarde, y terminando al siguiente viernes a las 15:51 de la tarde. Los datos fueron divididos en dos grupos: las primeras 137.5 horas fueron seleccionadas para el entrenamiento de la red (B1), mientras que las restantes 5.5 horas se mantuvieron para examinar la RNA (B2). Diferentes tipos de redes MLP fueron generadas y probadas. El algoritmo de retropropagación de Levenberg-Marquardt fue utilizado para ajustar el procedimiento de aprendizaje y los datos comprendidos en el periodo del viernes de las (10:21 A.M al las 13:51 PM del mismo día) fueron utilizados para probar la red.

Tabla.4.2 Coeficiente de determinación y estimadores de error para los diferentes modelos MLP

Número de modelo MLP	R ²	MAPE	SEP	MSE
4-5-1	0.9107	0.0662	0.108241	0.2528
4-4-1	0.9009	0.0692	0.114008	0.2804
4-3-1	0.9353	0.0626	0.08828	0.1875
4-2-1	0.903	0.0697	0.112805	0.2745

La tabla 4.2 muestra los cuatro mejores modelos y los índices de desempeño de cada modelo. Estos resultados se derivaron de los datos no entrenados. En la misma tabla podemos ver que el modelo MLP dio mejores resultados, con la configuración (4-3-1) con respecto a los otros tres, obteniendo un MAPE de 0.0626, MSE de 0.1875, R2 de 0.9353 y finalmente un SEP de 0.08828. Los resultados se muestran en la gráfica del modelo (4-3-1) de la RNA contra los datos medidos (figura 4.4).

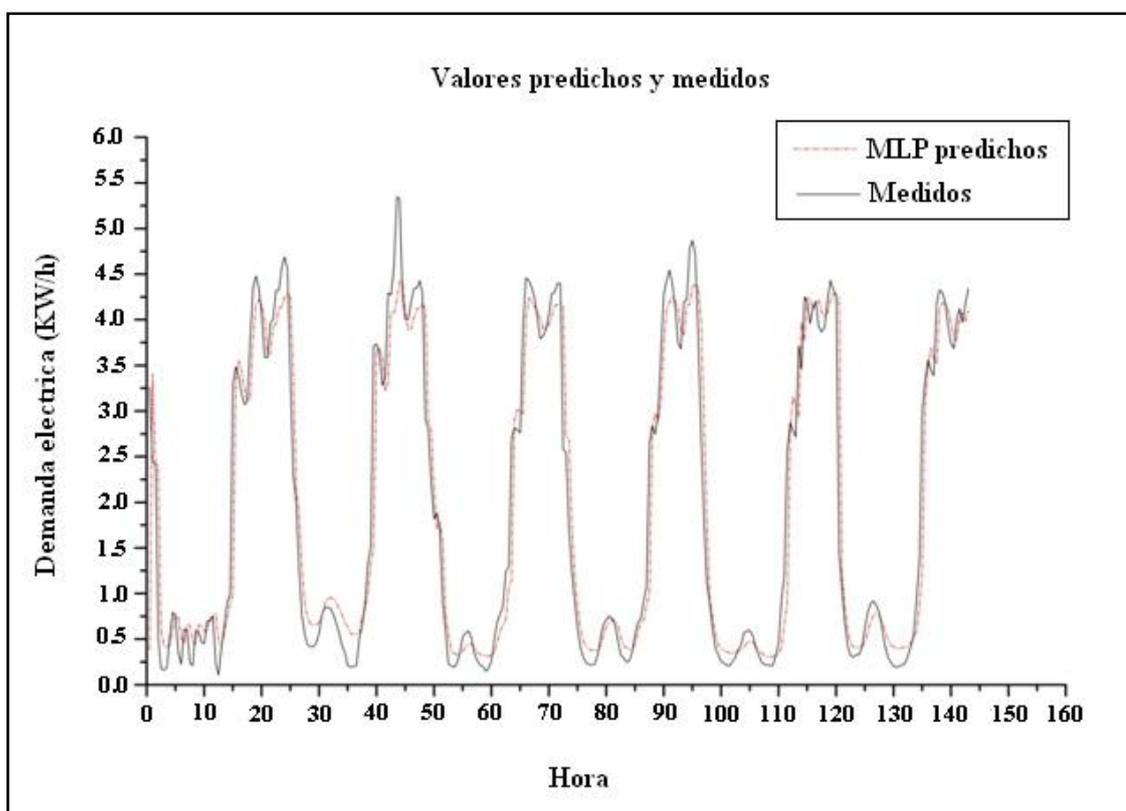


Figura 4.4. Grafica de los valores predichos y medidos de la demanda eléctrica en KW/h para el invernadero.

Los resultados de la red MLP son comparados con un modelo de regresión no lineal (Tabla II). Podemos observar fácilmente que la salida de la MLP tiene un error más pequeño que el modelo de regresión no lineal. La comparación de los errores del MAPE, MSE, R2 y SEP para los modelos MLP y la regresión son presentados en la figura 4.5.

Análisis de varianza: verificación y validación. Los resultados de la RNA seleccionada, el método de regresión, y los datos reales son comparados mediante análisis de varianza (ANOVA).

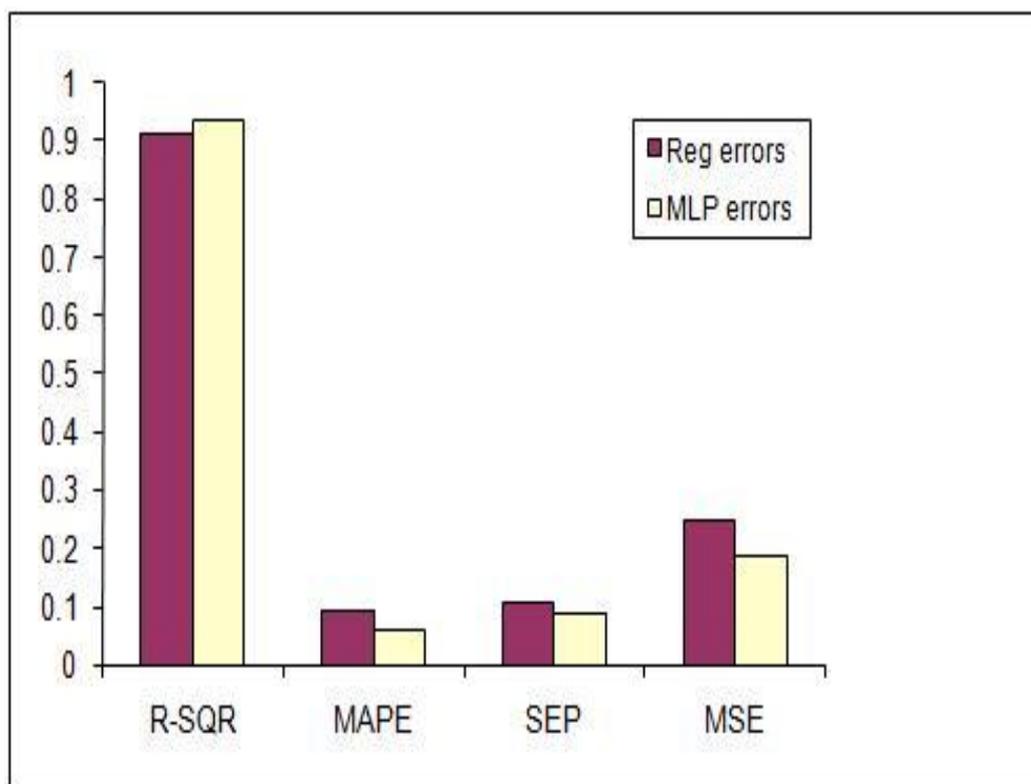


Figura 4.5. Comparación de errores entre la regresión y la MLP.

El experimento fue diseñado de tal modo que la variabilidad se deriva de fuentes ajenas que pueden ser controladas sistemáticamente. El tiempo es la fuente común de la variabilidad en el experimento, que puede ser sistemáticamente controlado a través de bloqueo (Montgomery, 1999). Por lo tanto, el método “one way desing” ANOVA fue aplicado. Los resultados se muestran en la Tabla III. La prueba de hipótesis se define como:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3, \\ H_1 : \mu_i \neq \mu_j \quad i, j = 1, 2, 3, \quad i \neq j, \end{aligned} \quad (4.3)$$

Donde μ_1 , μ_2 y μ_3 son el promedio obtenido de la estimación de regresión, los datos reales y los estimados por la RNA, respectivamente. Se puede observar en la tabla 4.3 que para una $\alpha = 0.05$, la hipótesis nula es rechazada porque:

$$f_{0.05, 2, 33} = 4.9, \quad f_{cv} = 0.12 \quad \text{y} \quad 4.9 > 0.12.$$

Ahora, con el fin de encontrar qué tratamiento de las medias (o de regresión RNA) está más cerca de los datos reales, la prueba de rango múltiple de Duncan se aplica en la siguiente sección.

Prueba DMRT. Con el fin de realizar la prueba de rango múltiple de Duncan, debemos encontrar la desviación estándar para cada media de tratamiento, de la siguiente manera:

$$B_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{MS(error)}{a}} \quad (4.4)$$

Donde a es el número de bloques u observaciones para tres tratamientos (actual, RNA y regresión). Entonces podemos calcular los valores de estado de R_p como sigue:

$$R_p = r\alpha(p, f)B_{\bar{y}_i} \quad (4.5)$$

$r\alpha(p, f)$ Es obtenido de la tabla de la prueba de Duncan. Después de la clasificación de la media de tratamiento, podemos comparar cada tratamiento como sigue:

$$B_{\bar{y}_i} = 0.05944$$

$$r_{0.05}(2, 33) = 2.877$$

$$R_2 = r_{0.05}(2, 33)B_{\bar{y}_i} = 2.877 \times 0.05944 = 0.1710$$

Comparando tratamientos 2 y 3 = $4.2471 - 3.9876 = 0.2595$

$0.2595 > 0.1710 \rightarrow \mu_2 \neq \mu_3$

Comparando tratamientos 1 y 2 = $4.2471 - 4.0795 = 0.1676$

$0.1676 < 0.1710 \rightarrow \mu_1 = \mu_2$

De lo anterior, podemos observar que sólo un tercio de la media (datos reales) y el segundo tratamiento (con la RNA seleccionada) son igual $\alpha = 0.05$. Esto muestra que el promedio de los valores estimados del consumo de energía eléctrica (con la RNA seleccionada) y los datos reales son aproximadamente iguales en un 95% de nivel de confianza. Por lo tanto, los resultados de la RNA superan significativamente los convencionales de la regresión.

Tabla 4.3. Comparación de las mediciones y las estimaciones de los valores usando redes neuronales y modelos de regresión

Hora	Mediciones	Red Neuronal	Regresión
137.5	4.1768	4.2456	3.518
138	4.3275	4.5623	4.1169
138.5	4.2967	4.3624	4.1884
139	4.1924	4.2453	4.1728
139.5	3.934	4.123	4.1213
140	3.7397	3.9923	3.9669
140.5	3.6858	3.8742	3.824
141	3.9989	4.121	3.7771
141.5	4.1242	4.3215	4.0058
142	3.9714	4.2105	4.0784
142.5	4.1687	4.3548	3.9831
143	4.3379	4.5521	4.099
MAPE error		0.0626	0.0921

Tabla 4.4. Tabla ANOVA para la comparación de regresión, datos actuales y modelos de redes neuronales. ANOVA: un modo de diseño

Resumen						
			Sumatori a			Promedi o
	Datos		(Kw/h)			(Kw/h)
Grupos Medición Red	12		48.954			4.0795
Neuronal	12		47.851			4.2471
Regresión	12		50.965			3.9876
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media de los cuadrad os	Fcv	F($\alpha=0.05$)	P
Entre los grupos (tratamient o)	0.4153	2	0.2076	0.1 2	4.9	0.0137
Dentro los grupos	1.3991	33	0.0424			
Total	1.8144	35				

Capítulo 5

CONCLUSIONES.

Inicialmente se ha tratado de centrar la discusión identificando el área de estudio. Posteriormente se ha pasado a analizar cómo se resuelve este problema desde un ámbito más tecnológico, asociado a las empresas, y otro más científico asociado a grupos e instituciones de investigación.

Se ha pasado a continuación, a definir un caso particular o problema tipo con la propuesta de un sistema tecnológico integral para control de invernaderos, que trata de dar respuesta a algunas de las especificaciones exigibles.

Como se ha comentado, la monitorización y control de invernaderos es hoy en día un campo en expansión, dado que este tipo de instalación se está haciendo cada vez más presente en el ámbito agronómico. Desde un punto de vista tecnológico los avances que parecen vislumbrarse en el futuro están asociados a la incorporación definitiva de las tecnologías de la información y las comunicaciones (redes inalámbricas, telefonía móvil, etc.). Respecto al ámbito científico, hay líneas de trabajo en la definición de modelos de primeros principios como de caja negra. No obstante, parece que los primeros siguen teniendo cierta predominancia por la facilidad con la que explican los fenómenos bajo invernadero.

Desde un punto de vista agronómico se trabaja intensamente en complementar el modelo del clima con el modelo de nutrición que están, a su vez, muy correlacionados con el modelo de evapotranspiración. Con ello será posible establecer en el futuro nuevas metodológicas de riego y fertilización basadas en magnitudes climáticas.

Los invernaderos de Querétaro y otros estados de la república muestran un alto grado de automatización pero no tienen un sistema de monitoreo de energéticos, por lo tanto este sistema propuesto resulta una buena solución para los agricultores y motivarlos al ahorro de agua y energía eléctrica, también contar con un mejor manejo de la administración de los costos de operación por cosecha.

Las ventajas del sistema de monitoreo de energéticos permiten proporcionar la información sobre la cantidad de consumo de energía eléctrica y agua en Kw-h y en metros cúbicos respectivamente, además del costo en pesos en cualquier etapa del cultivo.

Usando esta información proporcionada por el sistema, es posible tomar acciones específicas para tener un impacto significativo en la calidad del producto, en el ahorro de energéticos, en lo ecológico, económico y social para brindar sustentabilidad al campo de México.

El error mostrado por el sistema estuvo por debajo de lo que establece la norma IEC 1000-4-7 para mediciones eléctricas, razón por la cual el sistema podría ser implementado en invernaderos, del estado de Querétaro y la república mexicana.

REFERENCIAS

AIE World Energy Outlook 2002.

Boulard, T., J.F. Meneses, M. Mermier, G. Papadakis, (1996). The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*. 79. 61-77.

Campbell, C.J., *The Essence of Oil and Gas Depletion*, Multi-Science Publishing Group, Brentwood, 2003, ISBN: 0-906522-19-6.

Departamento de Energía de Estados Unidos y el Consejo Mundial de Energía

Fideicomiso para el Ahorro de Energía, 2007.
<http://www.fide.org.mx/difusion/educaree.html>

Gaterell M.E. McEvoy, M.R., The impact of energy externalities on the cost effectiveness of energy efficiency measures applied to dwellings , *Energy and Buildings* 37 (2005) 1017-1027

INEGI. Marco Geoestadístico, 2000. Fuente www.inegi.gob.mx

Jochem, E., *Farsightedness—Learn to Think Sustainable*, A.P.E.S. Conference from 24th July 2004, Bilanz04 SwissEnergy, *Farsightedness – Outlook – Moment*, Zurich, 2004 (in German).

LEIDLO (1996). *Holland statistics*. Technical report, LEIDLO.

Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México, *El Mercado de los Invernaderos en México*, (2006), pags. 54

Oppenheim, A. V. and R. W. Schafer, Discrete-Time Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1989.

Oude Lansink, A., Verstegen, J., Van Den Hengel, J., 2001. Investment Decision Making in Dutch Greenhouse Horticulture. Netherlands J. Agr. Sci. 49, 357-368.

Palacios V., E. 1995. Curso gerencial sobre sistemas de riego presurizado. Colegio de postgraduados. Distrito Federal México.

Presidencia de la Comisión de Preservación del Medio Ambiente y Protección Ecológica de la 54 Legislatura de Querétaro.

Rempel, H., Will the hydrocarbon era finish soon? DGMK/BGR Conference 'Geosciences in Exploration and Production: Information Exchange for Research and Industry', Hanover, 23 May 2000, see <http://www.bgr.de> (in German).

Rodrigo Castañeda, 2002. Elementos de Instrumentación y Control para la Simulación del Balance de Energía en un Invernadero. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.

SAGARPA. Programa de Desarrollo Agropecuario y Pesquero 2002-2012.

SAGARPA. Programa de Desarrollo Agropecuario y Pesquero 2005.

SBC68EC, Modtronix Engineering. www.modtronix.com

Sistema de Información Energética. Secretaria de Energía en Mexico. Información estadística. Balance de energía eléctrica año 2005 <http://sie.energia.gob.mx>

The World Bank, Development Education Program. 2005

Trejo Perea, M., Ríos Moreno, J.G., E. Rivas, V. Rauch, Savings and 537 Analysis of the Consumption and Quality of the Energy, 1er International Congress of Engineering, Universidad Autónoma de Querétaro, México, 2005, pp. 253-261

Trejo-Perea, M; Ríos-Moreno, G.J; Herrera-Ruiz, G; Rivas-Araiza, E. A; Castañeda-Miranda, R. (2007). "Electric energy monitoring system for intelligent buildings" . 3er International Congress of Engineering, Universidad Autónoma de Querétaro, México, pp. A-231-241

Van Der Velden, N.J., Bakker, A.R., Van Der Knijff. A., Verhaegh, A.P., 1999. Energie in the glastuinbouw van Nederlands. Energy in Dutch greenhouse horticulture Report No. 2.99.13 LEI. The Hague.

Wood, G., M. Newborough, Energy-use information transfer for intelligent homes: Enabling energy conservation with central and local displays Energy and Buildings xxx (2006) xxx–xxx.

ANEXOS