



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DURANTE LA ETAPA DE DISEÑO DEL INVERNADERO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

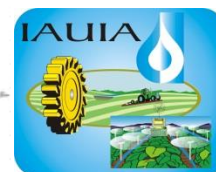
EDILBERTO SANTOS POBLANO ORTIZ



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



Febrero del 2015
Chapingo, Estado de México





METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DURANTE LA ETAPA DE DISEÑO DEL INVERNADERO

Tesis realizada por el C. **Edilberto Santos Poblano Ortiz** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA,
ORIENTACIÓN DE MECANIZACIÓN AGRÍCOLA**

DIRECTOR:

DR. EUGENIO ROMANTCHIK KRIUCHKOVA

ASESOR:

M. C. OMAR RESENDIZ CANTERA

ASESOR:

M. I. FRANCISCO BETANZOS CASTILLO

Chapingo, Estado de México. Febrero del 2015.



DEDICATORIA

A Dios quien me regala los dones de la Sabiduría y el Entendimiento.

A mis padres Gerardo Avelino y Marcelina Mónica, por cada uno de sus consejos y apoyo incondicional que hicieron de mí una persona trabajadora y honesta. Cada logro, cada paso ha sido por haberme transmitido lo mejor de ustedes.

A mis hermanos Angel y Diana por ser parte importante de mi vida y por compartir tantos momentos juntos.

A toda mi familia por brindarme todo su apoyo a lo largo de estos años y por ser un impulso y la fortaleza para salir adelante y quienes aún en la distancia siempre han estado conmigo.

Con mucho amor, a mi novia Azucelli Maythe por su apoyo incondicional, por compartir tantos momentos bellos conmigo y por alentarme a seguir siempre adelante.

A personas tan importantes como lo son mis amigos y compañeros del posgrado, quienes con sus ocurrencias y amistad han hecho que la vida sea divertida.

A todos ellos dedico el éxito y la satisfacción de esta investigación.

Edilberto Santos Poblano Ortiz.



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado para la realización y culminación de mis estudios de maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo recibido para la culminación de este trabajo de investigación a través de la Beca para Tesis de Posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por brindarme la oportunidad de prepararme profesionalmente y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por darme la oportunidad de realizar satisfactoriamente mis estudios de maestría.

Al Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova por su acertada dirección, constante apoyo, atinadas sugerencias y motivación durante la realización de la investigación.

Al Dr. Federico Félix Hahn Schlam por brindarme su confianza, apoyo incondicional y experiencia durante mi estancia en el Posgrado.

Al M. C. Omar Reséndiz Cantera por todo el apoyo brindado durante mi estancia en el DIMA y posgrado, por sus sugerencias y por el paciente trabajo de revisión.

Al M. I. Francisco Betanzos Castillo por su valioso tiempo para el desarrollo y revisión de este proyecto de investigación y sugerencias para mejorar el mismo.

A Doña Rosy y a todas las personas que de manera desinteresada me brindaron su apoyo para la realización de esta investigación.

Sinceramente...

Edilberto Santos Poblano Ortiz.



DATOS BIOGRÁFICOS

Edilberto Santos Poblano Ortiz es originario de la Comunidad de Texas de Morelos, municipio de Ocotlán de Morelos del estado de Oaxaca, nació en la ciudad de Oaxaca de Juárez el 02 de noviembre de 1989; realizó sus estudios de educación básica en la escuela primaria “General Lázaro Cárdenas” y Escuela Secundaria Técnica No. 70 en las comunidades de Texas de Morelos, Ocotlán, Oaxaca y San Pedro Apóstol, Ocotlán, Oaxaca respectivamente y media superior en el Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 150 en el municipio de Ocotlán de Morelos del Estado de Oaxaca.

En 2007 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo para cursar el propedéutico y una vez concluido pasó a formar parte del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola donde exitosamente se graduó y obtuvo el título de Ingeniero Mecánico Agrícola por mérito académico en el año 2012. El mismo año obtuvo un diplomado en horticultura protegida por el departamento de Fitotecnia de la UACH y fue aceptado para cursar los estudios de Maestría en el Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua de la Universidad Autónoma Chapingo, donde para obtener el grado de Maestro en Ingeniería presentó la investigación siguiente.



METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DURANTE LA ETAPA DE DISEÑO DEL INVERNADERO

METHODOLOGY FOR SELECTING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS DURING THE DESIGN STAGE OF GREENHOUSE

Edilberto Santos Poblano Ortiz¹ y Eugenio Romantchik Kriuchkova²

RESUMEN

La agricultura en invernaderos es una actividad de alto consumo energético generando aumento de costos y dificultad para instalarlos lejos de una red eléctrica, sin embargo se puede utilizar una fuente de energía alterna como los sistemas fotovoltaicos (SFV). El objetivo del trabajo fue desarrollar una metodología de selección de SFV's durante la etapa de diseño del invernadero en función de su área y comparar los costos de Energía Eléctrica de Comisión Federal de Electricidad (CFE) con los costos de SFV's a diferentes gastos de energía del invernadero. Se desarrolló la metodología para calcular el consumo energético del invernadero en función de su área, cultivo, lugar y los sistemas a instalar (riego, calefacción, ventilación, humidificación, iluminación y sombreado), así como un algoritmo de cálculo y selección de los elementos del SFV a instalar desde la etapa del diseño del invernadero que servirá para el desarrollo del software de selección de SFV's. Se muestran ejemplos del consumo energético de los sistemas para algunos lugares. Esto permite al productor tomar una decisión técnica y económicamente correcta sobre la utilización del SFV desde la etapa de diseño del Invernadero. La comparación de costos permitió determinar la distancia mínima y el consumo mínimo de para justificar la instalación de los SFV's y se comprobó que es viable instalarlos aun en lugares donde ya existe la red eléctrica de CFE.

PALABRAS CLAVE: Energía fotovoltaica, costos, sistemas del invernadero, superficie, consumo energético, algoritmo.

ABSTRACT

Greenhouse agriculture is an activity with high-energy consumption that generates costs increases and difficulty to install greenhouses far from a power grid; however, it is possible to use an alternative energy source, such as photovoltaic systems (PVS). The objective of this work was to develop a methodology to select photovoltaic systems from the design stage of a greenhouse in function of its area and compare the electric energy cost of the Electricity Federal Commission (CFE) with the PVS costs to different greenhouse energy consumptions. A methodology was developed to calculate the greenhouse's energy consumption in function of its area, crop, place and the systems to be installed (irrigation, heating, ventilation, humidification, lighting and shading), as well as an algorithm of calculation and selection of the PVS elements to install from the design stage of greenhouse that will serve to develop the PVS software selection. Systems examples of energy consumption for some places are shown. This allows the producer to make a technical and economically correct decision about the use of PVS from the design stage of a greenhouse. The costs comparison allowed determining the minimum distance and the minimum energy consumption to justify the installation of the PVS and it was found that it is feasible to install it even in places where there is already a grid of CFE.

KEYWORDS: Photovoltaic energy, costs, greenhouse systems, surface, energy consumption, algorithm.

¹ Tesista

² Director



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DATOS BIOGRÁFICOS.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE DE CUADROS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1. Tecnología de Invernaderos	6
2.2. Metodologías para el cálculo de consumo energético y diseño de los sistemas de invernaderos.....	8
2.2.1. Riego.....	9
2.2.2. Calefacción	10
2.2.3. Ventilación.....	14
2.2.4. Enfriamiento (Humidificación).	16
2.2.5. Iluminación artificial.....	18
2.2.6. Sombreo.....	19
2.3. Consumo energético de los invernaderos.....	20



2.4.	Contratación y suministro de energía eléctrica en México	22
2.4.1.	Costos de construcción y extensión de redes de electrificación ...	23
2.4.2.	Tarificación de la energía eléctrica.....	25
2.5.	Sistema Solar Fotovoltaico.	28
2.5.1.	Aplicaciones	29
2.5.2.	Componentes.....	38
2.5.3.	Metodologías para el cálculo y selección de SFV's	40
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1.	Comparación de costos de instalación y extensión de redes eléctricas de CFE e instalación de SFV's para invernaderos	43
3.1.1.	Costos de instalación de sistemas fotovoltaicos	43
3.1.2.	Costos de construcción, instalación y consumo de energía de redes eléctricas de CFE para 10, 15, 20 y 25 años.....	44
3.2.	Determinación de la potencia y cargas energéticas de los sistemas del invernadero.....	50
3.2.1.	Riego por goteo.....	51
3.2.2.	Calefacción directa.....	58
3.2.3.	Enfriamiento por muro húmedo	63
3.2.4.	Ventilación natural y forzada	68
3.2.5.	Horas de uso de los sistemas de calefacción, ventilación forzada y enfriamiento.....	73
3.2.6.	Iluminación artificial	76



3.2.7. Sombreo.....	81
3.3. Elaboración de las diferentes bases de datos o catálogos.	83
3.4. Metodología de cálculo y dimensionamiento de los subsistemas del sistema fotovoltaico	87
3.4.1. Generación.....	88
3.4.2. Acumulación.....	91
3.4.3. Regulación	94
3.4.4. Adaptación del suministro eléctrico	96
3.4.5. Transporte de la energía	97
3.5. Algoritmo de selección de sistemas fotovoltaicos para invernaderos ..	98
3.6. Desarrollo del software de selección	99
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	101
4.1. Comparación de costos de construcción y extensión de redes eléctricas de CFE tomando en cuenta el incremento anual de las tarifas e instalación de SFV's para invernaderos.....	101
4.1.1. Costos de instalación de sistemas fotovoltaicos	101
4.1.2. Incremento anual de las tarifas de energía eléctrica durante los últimos 10 años.	102
4.1.3. Distancia y consumo energético mínimos justificados para la instalación de SFV's en invernaderos.....	105
4.2. Potencia, consumo energético y costo del SFV para los diferentes sistemas a instalar en el invernadero	112



4.2.1. Riego por goteo.....	112
4.2.2. Calefacción directa.....	114
4.2.3. Enfriamiento con Muro Húmedo.....	115
4.2.4. Ventilación natural y forzada	116
4.2.5. Iluminación artificial	118
4.2.6. Sombreo.....	119
4.3. Catálogos para software de selección	120
4.3.1. Catálogo de los sistemas del invernadero.....	120
4.3.2. Catálogo de ciudades.....	121
4.3.3. Catálogo de cultivos	121
4.3.4. Catálogo de componentes fotovoltaicos.....	122
4.4. Algoritmo de selección de sistemas fotovoltaicos	124
4.4.1. Generación; cálculo y selección de módulos fotovoltaicos.....	126
4.4.2. Regulación; cálculo y selección de reguladores.....	128
4.4.3. Acumulación; cálculo y selección de baterías	130
4.4.4. Adaptación; cálculo y selección del inversor	131
4.5. Software de cálculo y selección de sistemas fotovoltaicos para invernadero desde la etapa de diseño.....	132
CONCLUSIONES	134
LITERARURA CITADA	138



ANEXOS.....	158
A. Tiempo de trabajo de los sistemas de calefacción, ventilación forzada y enfriamiento de acuerdo con el estado y cultivo a instalar	158
B. Artículos científicos y participaciones en congresos.....	159



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de los tipos de invernaderos.	7
Cuadro 2. Tarifas vigentes para el suministro y venta de energía eléctrica.	27
Cuadro 3. Clasificación de los Sistemas Fotovoltaicos.	29
Cuadro 4. Costo de construcción de redes aéreas (Precios a Junio del 2013 M.N.).	45
Cuadro 5. Tarifa 9M. Costo por energía (\$/kWh).	49
Cuadro 6. Coeficientes de corrección para calcular el volumen de extracción de aire.	66
Cuadro 7. Requerimientos de luz de algunas especies de flores cultivadas en invernadero.	77
Cuadro 8. Factor de utilización de lámpara.	79
Cuadro 9. Factor de reflexión.	79
Cuadro 10. Factor de mantenimiento de la instalación.	80
Cuadro 11. Tarifa 1 domésticas.	103
Cuadro 12. Tarifas agrícolas.	104
Cuadro 13. Disposición de los datos dentro del catálogo.	121



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del desarrollo de la investigación.....	43
Figura 2. Red de distribución del sistema de riego por goteo.	53
Figura 3. Comportamiento horario de la temperatura. Estación Meteorológica de Cd. Victoria Tamaulipas.....	74
Figura 4. Horas de calefacción, ventilación y enfriamiento a suministrar de acuerdo a la temperatura que se desea mantener en el invernadero.	75
Figura 5. Datos presentados por la NASA para el municipio de Texcoco de Mora, México.	86
Figura 6. Costos de instalación de SFV's de acuerdo con el consumo energético.	102
Figura 7. Comparación del costo total durante 10, 15, 20 y 25 años por redes CFE, pagando la tarifa 9CU y los costos de instalación de SFV.	106
Figura 8. Comparación del costo total durante 10, 15, 20 y 25 años por redes CFE, pagando la tarifa 9M y los costos de instalación de SFV.....	109
Figura 9. Detalle de figura 8.....	110
Figura 10. Comparación del costo total durante 10, 15, 20 y 25 años por redes CFE, pagando la tarifa doméstica 1 (Básica, Intermedia y Excedente) y los costos de instalación de SFV.....	111



Figura 11. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de riego por superficie.....	113
Figura 12. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de calefacción directa por superficie.	114
Figura 13. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de enfriamiento por superficie.	116
Figura 14. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de ventilación por superficie.....	117
Figura 15. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de iluminación por superficie.....	118
Figura 16. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de sombreado por superficie.....	119
Figura 17. Algoritmo general de cálculo y selección de sistemas fotovoltaicos para invernadero desde la etapa de diseño.....	125
Figura 18. Algoritmo de cálculo y selección del subsistema de generación. ..	126
Figura 19. Algoritmo de cálculo y selección del subsistema de regulación.....	128
Figura 20. Algoritmo de cálculo y selección del subsistema de acumulación.	130
Figura 21. Algoritmo de cálculo y selección del subsistema de adaptación de la energía.....	131



1. INTRODUCCIÓN

La agricultura bajo invernadero es una actividad que durante la última década ha cobrado gran importancia en nuestro país ya que permite brindar condiciones ambientales óptimas a los cultivos. Diversos institutos de investigación insisten en la necesidad de que las instalaciones de invernaderos reúnan ciertas características técnicas que permitan la creación de las condiciones óptimas para que los cultivos se desarrollen. Sin embargo claro está que esto exige el uso de diversos sistemas eléctricos que faciliten un adecuado manejo los cuales tienen altos consumos energéticos y debido a los altos costos por extensión e instalación de redes eléctricas y el incremento anual en las tarifas de consumo de electricidad es difícil que los productores decidan instalar invernaderos en lugares lejanos a una red eléctrica. Por otro lado México es un país en donde debido a su posicionamiento geográfico existen las condiciones climatológicas favorables para el aprovechamiento de la energía solar y la posibilidad de su aplicación a las explotaciones agropecuarias, en este sentido se han desarrollado investigaciones empleando los sistemas fotovoltaicos (SFV) para el suministro de energía en actividades agrícolas e invernaderos y se ha comprobado que el uso de estos sistemas en la agricultura es económicamente viable.

Tuvieron que pasar varias décadas y múltiples investigaciones desde el descubrimiento del efecto fotovoltaico hasta la aparición de la primera celda fotovoltaica capaz de convertir la energía solar en energía eléctrica, desde entonces se han generado investigaciones y adoptado esta tecnología a



diversas aplicaciones, en su mayoría en telecomunicaciones, industriales, alumbrado y electrificación doméstica. La aplicación de los sistemas fotovoltaicos en el sector agropecuario ha sido principalmente para el bombeo de agua (Sánchez, 2006) y cercas eléctricas (Fischer *et al.*, 2009). Actualmente se ha optado por el uso sistemas fotovoltaicos para el suministro de esta energía en función de los equipos, horas de uso y consumo de los sistemas de invernaderos ya instalados. Existen algunas investigaciones encaminadas a la aplicación de SFV a invernaderos para suministrar la energía a sistemas de climatización ya instalados (Sánchez, 2004; Bermejo, 2007) y algunos otros más que evalúan el uso de estos sistemas para el suministro energético del sistema de ventilación del invernaderos (Yano *et al.*, 2005; Yano *et al.*, 2007; Yano *et al.*, 2010). Sin embargo muestran poca información sobre la selección de los componentes fotovoltaicos. Martínez *et al.* (2013) concluye que la aplicación de sistemas fotovoltaicos para el suministro de energía a un sistema de riego de un invernadero es viable. Todos los anteriores coinciden en que el uso de sistemas fotovoltaicos es viable para este fin pero son investigaciones aplicadas en los cuales los equipos del invernadero ya estaban instalados.

En la actualidad existen programas especializados para la selección de sistemas fotovoltaicos tales como PVsyst, HOMER, iHOGA, SolarSoft y POLYSUN principalmente, sin embargo estos softwares fueron desarrollados en Europa y EUA lo cual no permite una selección de SFV para las características que se tienen en lugares de México. Exclusivamente para México existe un software de uso público desarrollado por la CONAE, actualmente Comisión



Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) para la selección de componentes fotovoltaicos, calcula los parámetros eléctricos y el costo del sistema pero para aplicaciones domésticas.

Martínez (2014) desarrolló una metodología para la selección de SFV para invernaderos en función de los equipos, horas de uso y consumo de los sistemas instalados en el invernadero con la cual se desarrolló el software de "Selección de sistema fotovoltaico para invernadero (Romantchik *et al.*, 2013). Poblano *et al.* (2013) Realizó una comparación de costos de los SFV y costos de energía eléctrica de la red para diferentes consumos de energía en invernaderos con ayuda del software (Romantchik *et al.*, 2013) y concluye que la tecnología fotovoltaica es competitiva económicamente para suministrar la energía que se utiliza en un invernadero. Sin embargo es indispensable realizar un buen diseño del invernadero y por lo tanto una buena selección de los equipos para tener un aprovechamiento eficiente de la energía. De esta manera para recomendar instalar un sistema fotovoltaico eficiente y útil para el suministro de la energía del invernadero desde la etapa de diseño de invernaderos hay que conocer el consumo energético que se tendrá en función del área de invernadero, cultivo, lugar y de los sistemas instalados (riego, calefacción, iluminación, ventilación, humidificación, etc.). Por lo anterior el objetivo del presente trabajo fue elaborar una metodología de cálculo para la selección del sistema fotovoltaico durante la etapa de diseño del invernadero en función de los parámetros anteriormente mencionados.



OBJETIVOS

Objetivo general.

Desarrollar una metodología de cálculo y selección de sistemas fotovoltaicos desde la etapa de diseño de los invernaderos en función del área, cultivo, los sistemas a instalar y el lugar.

Objetivos particulares.

- Realizar una comparación de los costos por construcción y conexión de la red de energía eléctrica en función de la distancia de construcción sumando el pago por su uso durante 10, 15, 20 y 25 años y los costos de instalación de sistemas solares fotovoltaicos a diferentes gastos de energía que se tienen en un invernadero.
- Revisión y elección de las metodologías de cálculo de los diversos sistemas a instalar y determinar las cargas energéticas.
- Elaborar una base de datos del consumo energético para cada sistema instalado en los invernaderos en función del área.
- Elaborar la base de datos en forma de catálogos de los lugares y sus normales climatológicas, cultivos (requerimientos de temperatura) y componentes fotovoltaicos (características y costos).



- Desarrollar el algoritmo de cálculo y selección optima de SFV's desde la etapa de diseño del invernadero.



2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Tecnología de Invernaderos

La producción de cultivos está limitada por una serie de factores naturales, los cuales bajo condiciones de campo abierto es difícil controlar y muchas de las veces esto ocasiona que los rendimientos de producción sean bajos aun en grandes superficies de cultivo, estas variables pueden ser mantenidas, aumentados, reducidos o simplemente optimizadas dentro de instalaciones que protegen el cultivo las cuales son llamados invernaderos, permitiendo que las plantas se desarrollen en un medio más favorable alcanzando mejores rendimientos por unidad de superficie que si se cultivasen al aire libre.

Un invernadero se define como una construcción agrícola de estructura metálica, con cubierta de película plástica traslúcida que no permite el paso de la lluvia al interior y que tiene por objetivo reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en el interior (NMX-E-255-CNCP-2013).

En la actualidad, podemos ver diferentes tipos de estructuras de invernaderos para la producción de cultivos. Aunque cada tipo tiene sus ventajas para una aplicación en particular, no existe un tipo de invernadero que sea considerado como el mejor. Se han desarrollado diferentes tipos de invernaderos según las necesidades específicas que se requieren y estas se muestran a continuación.

Cuadro 1. Clasificación de los tipos de invernaderos.

Por su tamaño (Bastida y Ramírez, 2008)	Minitúneles: Las labores se realizan desde el exterior.
	Macrotúneles: No alcanzan el tamaño de los Invernaderos.
	Invernaderos: Estructuras cuyas alturas al canalón es mayor a 2 m.
	Macroinvernaderos: Estructuras de más de 10 m de alto.
Por el emplazamiento de las estructuras (Castilla, 2007; Bastida y Ramírez, 2008)	Monocapilla: Una sola estructura aislada.
	Multinave: Varias estructuras dispuestas en batería.
	Adosado: Uno de los costados unido a una estructura sólida.
	Planos o parral.
Por la forma externa (Castilla, 2007; Radha & Igathinathane, 2007; Bastida y Ramírez, 2008)	A un agua.
	A dos aguas.
	Asimétricos.
	Dentados.
	Arco.
	Elípticos.
	Especiales: Inflables, piramidales, raspa y amagado, poligonales, poliédricos, geodésico, etc.
	De Madera.
Por los materiales empleados en la estructura (Radha & Igathinathane 2007; Bastida y Ramírez, 2008)	De Acero o Metal.
	De Concreto.
	Mixtos.
	Rígida: Vidrio y Cristal.
Por el material de la cubierta (Radha & Igathinathane 2007; Bastida y Ramírez, 2008)	Semirrígida: Fibra de vidrio, Policarbonato, Acrílico, etc.
	Flexible: Polietileno, pvc, eva, polipropileno, mallas, etc.
	Frio: 02 – 10 °C.
Por el régimen térmico nocturno (Matalana y Montero, 1988; Castilla, 2007; Bastida y Ramírez, 2008)	Templado: 10 – 15 °C.
	Caliente: 16 – 25 °C.
Por el clima donde se instalara (Von Zabeltitz, 2011)	Tropical húmedo: Temperatura mínima del mes más frio > 12°C.
	Subtropicales: Temperatura mínima del mes más frio < 12°C.
	Secos y áridos.
	Templados.
Por el periodo de vida útil (Bastida y Ramírez, 2008; NMX-E-255-CNCP-2013)	A10: La cubierta no permite el desplazamiento de la estructura como resultado de la acción de las cargas. Diseñado para cubiertas rígidas con vida útil de 10 años.
	A15: La cubierta no permite el desplazamiento de la estructura como resultado de la acción de las cargas. Diseñado para cubiertas rígidas con vida útil de 15 años.
	B5: La cubierta permite cierto desplazamiento de la estructura como resultado de la acción de las cargas. Diseñado para cubiertas flexibles con vida útil de 5 años.
	B10: La cubierta permite cierto desplazamiento de la estructura como resultado de la acción de las cargas. Diseñado para cubiertas flexibles con vida útil de 10 años.
	B15: La cubierta permite cierto desplazamiento de la estructura como resultado de la acción de las cargas. Diseñado para cubiertas flexibles con vida útil de 15 años.
	Nivel Bajo o manual: Rústicos, sin o con poco equipo.
Por niveles Tecnológicos y equipamiento (Bastida y Ramírez, 2008)	Nivel Medio o mecanizado: Equipados con dispositivos mecánicos y eléctricos.
	Nivel Alto o automatizado: Equipados con sensores y controladores locales.
	Muy alto o computarizado: Equipados con programas inteligentes y control a distancia.

Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes.



Los principales elementos o partes de un invernadero son: a) la estructura. B) la cubierta, c) el área de crecimiento del cultivo, los sistemas mecánicos y de automatización y d) cada uno de los sistemas para el riego y la ambientación del cultivo.

2.2. Metodologías para el cálculo de consumo energético y diseño de los sistemas de invernaderos

La ambientación de invernaderos implica el manejo de los factores climáticos dentro, con la finalidad de recrear las condiciones óptimas para el cultivo (De Francisco *et al.*, 1993; Bastida, 2006). Es necesario un control preciso de los diferentes parámetros ambientales del invernadero para optimizar el consumo energético y maximizar las ganancias económicas. Así que el objetivo del control ambiental es maximizar el crecimiento de la planta y aumentar su productividad.

El control ambiental se logra mediante la implementación de sistemas dentro del invernadero que realicen tareas como el riego, la adición y remoción de calor y humedad relativa, suministro y/o reducción de la luz.

Obviamente, estos sistemas de riego y control del clima constan básicamente de motobombas, motores y equipos eléctricos los cuales tienen un consumo de energía eléctrica, por lo cual es indispensable realizar una buena selección de estos equipos con la finalidad de aprovechar de manera eficiente su potencia y por ende optimar el consumo de energía del invernadero. A continuación se



describen los diversos sistemas del invernadero y las metodologías para su diseño y selección.

2.2.1. Riego

En la agricultura protegida se entiende por riego la práctica de aportar agua en forma controlada a los cultivos, cuando el cultivo lo requiere y de acuerdo a las necesidades hídricas de las plantas. Si con el agua de riego se aplican los fertilizantes mediante una solución nutritiva, al sistema se le llama fertirriego. (Bastida, 2006). Existen diversas técnicas de riego y la selección de uno depende de factores como la disponibilidad y calidad del agua en el lugar, el cultivo, las características del suelo, condiciones agronómicas del lugar y por supuesto el costo. Dada la naturaleza de la producción bajo invernadero, lo más recomendable es emplear sistemas de riego moderno, que optimicen el vital líquido y logre el éxito en la producción de cultivos, como los sistemas por goteo.

El diseño de una instalación de riego es el primer eslabón de una cadena, que continúa con la ejecución de la instalación y posteriormente con las prácticas de manejo, operación y mantenimiento.

De acuerdo con García y Briones (2011) la clave para un buen diseño consiste en establecer de la forma más precisa posible las prestaciones que posteriormente se le exigirán a la instalación. Las condiciones que guardan el suelo, el suministro de agua, el clima y los aspectos agronómicos deben permanecer cuidadosamente evaluadas.



Los requisitos mínimos para el diseño, instalación y funcionamiento de los sistemas de micro irrigación son descritos por la American Society of Agricultural Engineers (ASABE) (ASAE, 2010). Es así como investigadores y profesionistas en el diseño de sistemas de riego por goteo tales como Rodrigo *et al.* (1997); Moya (1998) y Ángeles (2002) han propuesto criterios y procedimientos usando tablas de datos, ábacos y reglas para el cálculo que facilitan la tarea de diseñar dichos sistemas de riego. Otros más como García y Briones (2011) y Suazo (2012), presentan la metodología para el diseño realizando un análisis de esta paso a paso. Todos los investigadores concuerdan en que el proceso de diseño de un sistema de riego por goteo consta de dos fases; un diseño agronómico del riego y el diseño hidráulico de la instalación. El diseño agronómico comprende la estimación de las necesidades de hídricas del cultivo en base a los criterios agronómicos y la disponibilidad de agua mientras que en el diseño hidráulico se determina la disposición, dimensionamiento de las tuberías, las pérdidas de carga hidráulica del sistema, el gasto de agua y la potencia del equipo de bombeo.

2.2.2. Calefacción

La temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica, el crecimiento y el desarrollo de los vegetales por lo cual la calefacción es imprescindible en los invernaderos en regiones con inviernos fríos y es aconsejable en los países mediterráneos, aunque no es estrictamente necesaria.



La baja inercia térmica del invernadero y su elevado coeficiente de pérdidas térmicas debido al pequeño espesor de las paredes, implican que se debe aportar una atención especial a la elección, diseño y manejo de este sistema, con el objeto de minimizar los gastos de calefacción que, en algunos casos según Gonzáles y Baille (2005), pueden representar hasta 30 % de los costos totales de producción.

Según utilicen una o varias de las formas en que el calor se puede transferir (convección, conducción y radiación), podemos tener tres formas principales de calefacción:

Calefacción por conducción en el suelo: Estos sistemas están diseñados para proporcionar una temperatura adecuada en la zona radicular. Desde una caldera central se aporta calor al suelo a través de tuberías enterradas circulando el agua por toda la superficie.

Calefacción por convección - radiación: La transferencia de calor se realiza a través de tuberías aéreas o dispuestas sobre el medio de cultivo, por donde circula agua caliente.

Calefacción por convección: Son sistemas en los que el elemento conductor del calor es el aire. De acuerdo con Bastida (2006), es la tecnología que mayoritariamente se instalan en Invernaderos de México. Dichos sistemas



están integrados básicamente por un motor-ventilador eléctrico el cual sopla el aire al interior de la cámara de combustión donde este se calienta.

El diseño de un sistema de calefacción tiene que procurar que el aporte de calor sea además de eficaz, eficiente. El calor se debe de distribuir de manera uniforme, minimizando los gradientes térmicos, tanto verticales como horizontales. Debe compensar las pérdidas de calor por radiación, conducción, filtración y conducción del suelo por lo cual conociendo las pérdidas de calor del invernadero y el salto térmico a cubrir, podemos calcular la potencia a instalar (López *et al.*, 2000).

Para el cálculo de los requerimientos de calefacción total en [W] de un modo aproximado FAO (2002), Castilla (2007) y Radha & Igathinathane (2007), presentan una ecuación general que considera de manera global todas las pérdidas de calor a través del coeficiente global de transmisión de calor característico de cada material de cubierta y tomando en cuenta la superficie de la cubierta del invernadero y el diferencial de temperaturas interior y exterior.

Nelson (1991) y Radha & Igathinathane (2007) presentan una metodología para calcular los requerimientos totales de calefacción por hora del invernadero, considerando las pérdidas de calor en cada uno de los componentes del invernadero (paredes, techo, aguilón y faldón). Dichos valores de pérdidas se pueden consultar en tablas y están dados en MBtu h⁻¹ de acuerdo con las medidas del invernadero. Cada una de estos valores se multiplica por un factor



de corrección debido a velocidad del viento y diferencial de temperatura y otro factor más de acuerdo con tipo de construcción. La suma de las pérdidas en cada componente del invernadero es la pérdida total de calor por hora en el invernadero.

FAO (2002), Francescangeli y Mitidieri (2006) y Von Zabeltitz (2011), presentan una ecuación general simplificada para calcular los requerimientos de calefacción en $W\ m^{-2}$ de suelo cubierto por el invernadero, tomando en cuenta un diferencial de temperatura entre el interior y exterior, una relación entre la superficie de la cubierta del invernadero con el área cubierta por el invernadero y un coeficiente global de transmisión de calor el cual depende del material de cubierta, de la hermeticidad del invernadero, del sistema de calefacción, del sistema de riego, de la velocidad de viento, de la cantidad de nubes que cubran el cielo y de la precipitación.

En NGMA (2010a) y ASAE (2008) se presentan las pautas para el diseño de sistemas de calefacción y la importancia de su uso, asimismo se presenta la manera de determinar las pérdidas de calor por conducción e infiltración del invernadero. Dicha metodología para estimar la pérdida de calor coincide con el método presentado por Contreras (2012), quien describe una metodología que además de tomar en cuenta las pérdidas anteriores añade las pérdidas por radiación y por conducción del suelo, considerándola como la metodología más completa para estimar las pérdidas de calor en $Kcal\ h^{-1}$ que se presentan en el invernadero y por ende la capacidad que debe tener el sistema de calefacción.



2.2.3. Ventilación

La ventilación es una de las variables esenciales para controlar el clima dentro de los invernaderos debido a que el intercambio de aire entre el interior y el exterior del abrigo tiene un importante efecto sobre la temperatura, humedad relativa, concentración de CO_2 y evaporación. Debido a lo anterior, es importante contar con una importante superficie de ventilación.

En la producción en invernadero se distinguen dos tipos de ventilación: la natural y la forzada (Baptista *et al.*, 1999).

Ventilación natural: Es una de las más utilizadas debido a que es una de las mejores y más económicas. Sin embargo al contar con un área pequeña de ventanas (laterales y cenitales) y el hecho de utilizar mallas antiáfidos causa una insuficiencia de ventilación. Está integrado básicamente por motorreductores eléctricos dispuestos en las cortinas laterales y cenitales para controlar la entrada del aire y la hermeticidad del invernadero.

Ventilación Mecánica o forzada: Es la aportación forzada de masas de aire frío para mover el aire caliente y obligarlo a salir del invernadero empleando motor-ventiladores para este fin. Es utilizada cuando la ventilación natural es insuficiente.



Un buen diseño del sistema de los sistemas de ventilación permitirá un mejor control climático, lo que directamente repercute en un mejor desarrollo y rendimiento del cultivo así como el uso eficiente de la energía eléctrica.

Existen modelos que se basan en la ecuación de Bernoulli para estimar las tasas de ventilación natural en invernaderos equipados solamente con ventanas cenitales o laterales como el propuesto por Bailey (2000), Boulard (2006) y Pérez-Parra *et al.* (2006) así como para invernaderos equipados tanto con ventanas laterales como cenitales propuesto por Kittas *et al.* (1997). Dichos modelos contemplan el diferencial de temperatura entre el interior y exterior del invernadero, áreas de ventanas y velocidad del viento. Sin embargo existe una reducción significativa de la tasa de ventilación debido al uso de mallas antiáfidos por lo cual Pérez-Parra *et al.* (2004) presenta un modelo para calcular de manera aproximada dicha reducción tomando en cuenta la porosidad de la malla.

Von Zabeltitz (2011) propone un modelo para estimar en número de renovaciones horarias aportadas por la ventilación natural tomando en cuenta la tasa de ventilación y el volumen del invernadero.

Por otro lado, los estudios realizados sobre ventilación forzada son pocos. La American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE, 2011) determina los fundamentos de ventilación y son retomados por la American Society of Agricultural Engineers quien proporciona las pautas y



recomendaciones para el diseño y control de los sistemas de ventilación forzada en invernaderos (ASAE, 2008). Sin embargo existe dificultad de incorporar con precisión el coeficiente de transpiración presente en la metodología de cálculo del sistema de ventilación propuesta por la ASAE (Willits, 2006).

De otra forma y de acuerdo con Salvador Escoda (s.f.), se puede recurrir al cálculo basado en el caudal de aire requerido en $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ por el sistema, basándose en el número de renovaciones de aire por hora, esto es, las veces que debe renovarse por hora todo el volumen de aire del invernadero. Tomando en cuenta que la tasa mínima de ventilación recomendado para invernaderos oscila entre 0.75 a 1 renovaciones por minuto (Montero, 1992; Tendero, 2007; ASAE, 2008).

2.2.4. Enfriamiento (Humidificación).

El enfriamiento por evaporación consiste en evaporar agua para absorber el calor del aire dentro del invernadero y por ende bajar la temperatura del ambiente. Estos sistemas se basan en la conversión de calor sensible en calor latente del agua evaporada, con el agua suministrada mecánicamente (Sethi & Sharma, 2007).

Los sistemas de enfriamiento empleados en la agricultura bajo invernadero son dos (Nelson, 1991):



Sistemas de nebulización o fog system: Consiste en distribuir en el aire un gran número de partículas de agua líquida ($2 - 60 \mu\text{m}$ de diámetro) a altas presiones haciendo que permanecen suspendidas en el aire del invernadero el tiempo suficiente para evaporarse sin llegar a mojar los cultivos (Montero, 1992). Los equipos eléctricos que en este se usan son motor-ventiladores y motobombas de alta presión.

Muro húmedo o pantalla evaporadora: Se trata de una pantalla de material poroso que se satura de agua por medio de un equipo de riego (motobomba). La pantalla se sitúa a lo largo de todo un lateral o un frontal del invernadero. En el extremo opuesto se instalan motoventiladores eléctricos. El aire exterior entra a través de la pantalla porosa, absorbe humedad y baja su temperatura. Posteriormente, es expulsado por los motoventiladores.

Los requisitos y recomendaciones para el diseño de los sistemas de enfriamiento Evaporativo por muro húmedo son descritos por la National Greenhouse Manufacturers Association (NGMA, 2010b) y la American Society of Agricultural Engineers (ASABE) (ASAE, 2008). De acuerdo con estas consideraciones Nelson (1991) y Radha & Igathinathane (2007), proponen una metodología para calcular el número de extractores, las dimensiones del muro y la capacidad de la motobomba para alimentar el sistema.



2.2.5. Iluminación artificial

La energía solar radiante es el factor ambiental que ejerce mayor influencia sobre el crecimiento de las plantas. De ella depende la mayoría de los procesos biológicos, incluyendo la fotosíntesis. En cuanto a los requerimientos de energía luminosa por las plantas, se puede distinguir dos aspectos; calidad determinada por el color y a su vez en función de la longitud de onda y cantidad determinada por las horas que dure y por la cantidad de energía luminosa que llegue a los cultivos (Bastida, 2006). Sin embargo, en algunos casos la carencia de horas de sol obliga al agricultor al uso de la iluminación artificial para lograr un correcto crecimiento, floración y maduración del fruto. Es ahí cuando se debe utilizar el sistema de iluminación artificial que suministre la energía lumínica que necesitamos. Las condiciones de iluminación para un invernadero, así como la calidad y cantidad de luz son las que determinan las posibilidades biológicas y agronómicas del mismo y deben regularse en función de las necesidades de luz de los cultivos presentes en su interior.

El sistema de iluminación artificial consta de una serie de luminarias distribuidas en el interior del invernadero con la finalidad de aportar la intensidad lumínica que requieren todas las plantas para aumentar la actividad fotosintética y la prolongación del periodo de luz y de esta forma mejorar y acelerar su crecimiento y desarrollo. Es frecuente en invernaderos sofisticados para cultivos de alto valor agregado. Su empleo más extendido es en cultivos de flor de corte y crecimiento de plántula (Castilla, 2007).



Las pautas y métodos para el diseño de sistemas de iluminación artificial en interiores así como la normatividad se especifican por la Illuminating Engineering Society of North America (IESNA, 2000), la Westinghouse Electric Corporation, el National Electrical Code (NFPA, 2008) y específicamente para México se retoman por la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2009). Sin embargo, De Francisco *et al.* (1993) y García y Boix (2014) muestran la metodología para el cálculo de instalaciones de alumbrado interior de una manera clara, sencilla y fácil de aplicar.

2.2.6. Sombreo

Estos sistemas permiten reducir la radiación e intensidad lumínica que llega al cultivo, lo cual toma un papel muy importante también en la reducción de la temperatura dentro del invernadero durante los días de verano (Huertas, 2007 y Montero *et al.*, 2008). El sistema de sombreado dentro del invernadero debe ser móvil para poder controlar la apertura y cierre. Es por ello que consta de una serie de alambres tensados y motorreductores que se encargan de enrollar y desenrollar las mallas.

Aunque no existe una metodología para seleccionar el sistema de sombreado (y por ende las características de los motores) para un invernadero es la Food and Agriculture Organization (FAO) quien proporciona una serie de consideraciones para poder seleccionar la pantalla o malla sombra a instalar (FAO, 2002). Es dentro de las características técnicas de los motorreductores encontrados en



los catálogos como podemos elegir el motor que necesitamos de acuerdo a la longitud del invernadero donde se instalara la malla sombra.

2.3. Consumo energético de los invernaderos.

Sin duda alguna la agricultura bajo invernaderos es una de las actividades de mayor consumo energético, debido a los diferentes equipos utilizados en los procesos de climatización, los cuales utilizan necesariamente alguna fuente de energía eléctrica.

Con el objeto de reducir los costos y ahorrar energía, existen diversas opciones de construcción de invernaderos y cubiertas específicas para cada sitio donde el agricultor desea instalarlo de acuerdo con las condiciones climáticas de la región.

En México podemos observar a lo largo del país invernaderos instalados con diferentes niveles tecnológicos los cuales van desde invernaderos rústicos o manuales hasta parques de invernaderos totalmente computarizados y con diversos sistemas de climatización. Resultados de la AMHPAC (2009) muestran que los estados de Jalisco, Sonora, Sinaloa, Baja California y Baja California Sur son los estados con mayor producción bajo invernaderos. Además de que 79% de los invernaderos mexicanos se encuentra bajo un sistema de producción entre media y alta tecnología.

Diversos investigadores han realizado análisis del consumo energético y el uso eficiente de los insumos durante la producción en invernadero para diferentes lugares y tipos de tecnología. Desde el punto de vista de consumo de energía



eléctrica Ozcan *et al.* (2004); Hatirli *et al.* (2006) y Ozcan *et al.* (2011) obtuvieron resultados en cultivos de tomate bajo invernadero muy similares reportando consumos de 4400, 4746.8 y 4623.7 kWh ha⁻¹ respectivamente durante la producción para la región de Antalya, Turquía, mientras que Rezvani *et al.* (2011) reportan consumos de 3120 kWh ha⁻¹ para dicha producción en Razavi Khorasan, Irán. Por otro lado para la producción de pepino bajo invernadero Mohammadi & Omid (2010); Heidari, & Omid (2011); reportan consumos de energía eléctrica de 2438.74 y 2144.5, kWh ha⁻¹ respectivamente en Teherán, Irán y Ozcan *et al.* (2004) reportan 2700 kWh ha⁻¹ para Antalya, Turquía, mientras que para la producción bajo invernadero de otros cultivos como Pimiento, Berenjena (Ozcan *et al.*, 2004), Fresa (Banaeian *et al.*, 2011), lechuga (Dimitrijević *et al.*, 2011) y Clavel (Shabani *et al.*, 2012) se reporta un consumo de 2500, 4000, 3076.8, 2373.4 y 5276.4 kWh ha⁻¹ respectivamente. Un gran porcentaje de dichos consumos generalmente se atribuyen al uso de sistemas de riego, calefacción y luz artificial en caso particular del clavel.

De acuerdo con Salazar *et al.* (2012) en los invernaderos mexicanos entre el 70 y 80 % de la energía consumida corresponde a los sistemas de calefacción. Es por eso que se debe prestar atención en realizar un buen diseño del invernadero así como de los equipos eléctricos a instalar de acuerdo con los requerimientos del cultivo, datos climáticos y geográficos de la región. Asimismo, se deben evitar las pérdidas de energía durante la noche.

De acuerdo con Zapata (2009) en Europa existe un proyecto nombrado Greenergy con la finalidad de reunir conocimientos y datos sobre consumo



energético de los invernaderos españoles y mejorar su eficiencia energética reduciendo su consumo, partiendo desde una selección adecuada de los componentes y estrategias en el manejo técnico de cultivos y equipos.

Dicho proyecto podría ser adoptado por diferentes países para poder generar alternativas viables y dicho consumo energético que es uno de los factores principales que eleva los gastos económicos.

2.4. Contratación y suministro de energía eléctrica en México

En 1937 México tenía 18.3 millones de habitantes, de los cuales únicamente siete millones contaban con electricidad, proporcionada con serias dificultades por tres empresas privadas. En ese momento las interrupciones de luz eran constantes y las tarifas muy elevadas. Para dar respuesta a esa situación, el gobierno federal creó, el 14 de agosto de 1937, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que tendría por objeto organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. A partir octubre de 2009, CFE es la encargada de brindar el servicio eléctrico en todo el país (CFE, 2014). Para abril del 2013 los usuarios de energía eléctrica en México suman un total de 36, 796, 000 (SENER-CFE, 2013). Datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2012) indican que el 98.2% del total de viviendas en México disponen de energía eléctrica.

De acuerdo a la Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027 (SENER, 2013), la generación nacional total de energía eléctrica en 2012, incluyendo la

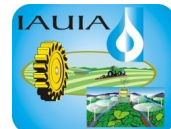


participación privada, se ubicó en 278,086 Giga Watts hora (GWh) de los cuales el 94.2 % fue generación en el servicio público, el consumo total de energía eléctrica fue de 234, 219 GWh y las ventas se incrementaron 2.7% respecto al año 2011. El suministro de energía eléctrica creció 2.8 % al extenderse la cobertura a más de 36.4 millones de usuarios. La capacidad instalada nacional se ubicó en 63, 745 Mega Watts (MW). La red de transmisión y distribución incrementó 1.0%. Lo cual implica un aumento de 8,289 km con relación a 2011, alcanzando una longitud total de 853,490 km.

La energía eléctrica se ha convertido en parte de nuestra vida diaria, y está íntimamente relacionada con los requerimientos actuales del hombre; sin ella, difícilmente podríamos imaginarnos los niveles de progreso que el mundo ha alcanzado. Por este motivo hay que conseguir generar de una forma sostenible respetuosa con el medio ambiente a largo plazo.

2.4.1. Costos de construcción y extensión de redes de electrificación

De acuerdo con la Ley del Servicio Público de la Energía Eléctrica (CDHCU, 2012), el sector eléctrico mexicano es propiedad del Estado, y mediante la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE), se encarga de velar por el correcto funcionamiento del sistema compuesto por la generación, transmisión y distribución, y de su posterior desarrollo, con el fin de cumplir con la misión de servicio público que se le atañe a la electricidad en la Constitución Mexicana y en las leyes vigentes.



La transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica de servicio público es responsabilidad completa de la CFE. La infraestructura es manejada por esta empresa, buscando cumplir con los estándares de confiabilidad, seguridad y estabilidad del consumo, producto del requerimiento tipificado en la Constitución Mexicana. De tal manera que los precios de la distribución (construcción y extensión de redes) son determinados por la CFE y se aplican a todos los clientes regulados.

En la web oficial de la CFE podemos encontrar el catálogo de precios unitarios por mano de obra, materiales y equipo para la construcción de redes aéreas y subterráneas, acometidas, subestaciones, etc., además de los cargos administrativos.

La metodología para extender la red de transmisión se presenta por CFE (2012) y consta de los siguientes pasos:

Plan de transmisión de costo mínimo; Para estudios de planificación en Sistema Eléctrico Nacional se divide en 9 áreas: Central, Oriental, Occidental, Noroeste, Norte, Noreste, Baja California, Baja California Sur y Peninsular. La planificación consiste en realizar un balance técnico-económico entre el desarrollo de la generación y la transmisión para lograr la confiabilidad adecuada, a un costo mínimo, del suministro de electricidad. Permite definir y/o confirmar las adiciones a la infraestructura.



Escenario de la demanda; Se realiza un estudio de los indicadores del mercado eléctrico. Este se elabora a nivel de circuito de distribución para identificar el crecimiento de carga a nivel geográfico.

Desarrollo del plan de transmisión para el año horizonte; Se toma como referencia la topología del sistema del año en curso y los proyectos de transmisión en la etapa de construcción y los comprometidos. Se evalúan diferentes condiciones base para el despacho de generación, demanda y puntos de operación.

Ubicación en el tiempo de los proyectos de transmisión; Se ubican los proyectos requeridos en el tiempo de modo que los propuestos para cada año cumplan con los criterios anteriores.

Actualmente el área correspondiente a la Comisión Federal de Electricidad tiene una red de transmisión troncal que incluye líneas de transmisión y subestaciones de potencia a tensión elevada (230 kV y 400 kV), conectando regiones alejadas, mientras que la red de subtransmisión abarca regiones más acotadas del país y utilizan líneas en media tensión (69 kV a 161 kV).

2.4.2. Tarificación de la energía eléctrica

El sector transmisión pertenece a la CFE, y por el uso de las líneas ésta puede cobrar una tarifa apropiada y reglamentada que le permita subsanar los costos incurridos por ofrecer dicho servicio.



Las tarifas eléctricas es el precio que pagan los usuarios por la prestación del servicio eléctrico, que busca recuperar los costos causados a la CFE por el servicio de transmisión entregado y mejorar la eficiencia global del uso del sistema. Para definir dichos costos la CFE se rige en la metodología para la determinación de los cargos por servicios de transmisión de energía eléctrica aprobada por la comisión reguladora de energía (CRE). Se identifican oficialmente por su número y/o letras, según su aplicación y se basan en el consumo de energía del usuario, diferencias regionales, estaciones del año, horarios de consumo, nivel de tensión, la demanda contratada y tipo de uso (domestico, alumbrado público, agrícola, etc.) tal y como se muestra en el cuadro 2.

Actualmente el sector eléctrico nacional cuenta con un subsidio en la energía eléctrica. Dichos apoyos gubernamentales llegan a representar entre 50% y 90% del costo real de la tarifa, dependiendo de la zona y el consumo. A mayor consumo menor aportación gubernamental. Sin embargo Las tarifas eléctricas de CFE se ajustan mensualmente de acuerdo a la inflación, a los precios de los combustibles fósiles empleados en la generación, a la fracción de generación neta fósil y al tipo de cambio.

El Financiero (2014) reportan un aumento anual de las tarifas eléctricas industrial HT-L y residencial DAC del 20 % y 0.6 % respectivamente. Indican también que la causa principal de los incrementos en las tarifas es que el precio de los insumos para generar electricidad significa el 80% del costo de la energía eléctrica.

Cuadro 2. Tarifas vigentes para el suministro y venta de energía eléctrica.

CASA	DOMESTICAS		1	(B,I,E,DAC)
			1 ^a	Verano (B,I,E,DAC)
				Fuera de Verano (B,I,E,DAC)
			1B	Verano (B,I,E,DAC)
				Fuera de Verano (B,I,E,DAC)
			1C	Verano (B,IB,IA,E,DAC) *
				Fuera de Verano (B,I,E,DAC)
			1D	Verano (B,IB,IA,E,DAC)
				Fuera de Verano (B,I,E,DAC)
			1E	Verano (B,IB,IA,E,DAC)
				Fuera de Verano (B,I,E,DAC)
			1F	Verano (B,IB,IA,E,DAC)
				Fuera de Verano (B,I,E,DAC)
			DAC **	Alto Consumo Mensual prom.
NEGOCIO Y/O INDUSTRIA	ESPECIFICAS	SERVICIOS PUBLICOS	5	Alumbrado Público (DF, MTY, GDL)
			5-A	Alumbrado Público (Resto)
			6	Bom. Pub. de aguas pot. o negras
		AGRÍCOLAS	9	Riego agrícola Baja Tensión
			9M	Riego agrícola Media Tensión
			9-CU	Riego agrícola (Estimulo)
			9-N	Riego agrícola Nocturno
		TEMPORAL	7	Temporalmente
		ACUÍCOLA	EA	Estimulo Acuícola
		BAJA TENSIÓN	2	Hasta 25 kW de demanda
			3	Más de 25 kW de demanda
	GENERALES	MEDIA TENSIÓN	O-M	Menor a 100 kW
			H-M	100 kW o más
			H-MC	100 kW o más (Corta utilización)
		MT CON CARGOS FIJOS	OMF	Menor a100 kW
			HMF	100 kW o más
			HMCF	100 kW o más
		ALTA TENSION	HS	Nivel Subtransmisión
			HS-L	Nivel Subtransmisión (larga utiliz.)
			HT	Nivel Transmisión
			HT-L	Nivel Transmisión (larga utilización)
		AT CON CARGOS FIJOS	HSF	Nivel Subtransmisión
			HS-LF	Nivel Subtransmisión (larga utiliz.)
			HTF	Nivel Transmisión
			HT-LF	Nivel Transmisión (larga utilización)
			HM-R	Falla y Mant. en Media Tensión
		SERVICIO DE RESPALDO	HM-RF	Falla en Media Tensión
			HM-RM	Mantenimiento Programado MT
			HS-R	Falla y Mant. AT (Subtransmisión)
			HS-RF	Falla en AT (Subtransmisión)
			HS-RM	Mant. Prog. AT (Subtransmisión)
			HT-R	Falla y Mant. en AT (Transmisión)
			HT-RF	Falla en AT (Transmisión)
			HT-RM	Mant. Prog. AT (Transmisión)
		SERVICIO INTERRUMPIBLE	I-15	Mayor o igual a 10,000 kW
			I-30	Mayor o igual a 20,000 kW

* B=Básico, I=Intermedio, IB=Intermedio Bajo, IA=Intermedio Alto, E=Excedente, DAC=De Alto Consumo. ** Cargos fijos mensuales diferentes en verano y fuera de verano.

Fuente: Elaboración propia con datos de la CFE. Disponibles en;
<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/OTROS/Aportaciones/Inicio.asp>.



Llamas *et al.* (2004) realizó un estudio acerca del aumento de las tarifas de alta tensión al duplicar el costo a noviembre del 2001 de combustóleo importado, combustóleo nacional, gas natural, diésel industrial, carbón importado y carbón nacional obteniendo porcentajes de aumento de 5.4, 16.9, 11.9, 1.0, 2.1 y 3.7 % respectivamente. Concluye que durante el ciclo 2000-2004 la tarifa (en pesos) de alta tensión aumentó un 60 %. Además que el precio de venta apenas cubre el costo de generación de electricidad.

2.5. Sistema Solar Fotovoltaico.

Un sistema Solar Fotovoltaico es el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que se combinan convenientemente para conseguir las condiciones óptimas para captar la energía solar disponible, transformarla directamente en energía eléctrica, en algunos casos almacenarla, controlarla, medirla, acondicionarla a los requerimientos de una aplicación determinada y distribuirla para su consumo. Dichos componentes deben ser compatibles en tensión y potencia además de estar certificados para tener un correcto funcionamiento.

Los sistemas FV se clasifican de acuerdo a la complejidad de su diseño, es decir, su grado de independencia de otros medios de generación eléctrica, y los elementos que los forman como se muestra en el cuadro 3.



Cuadro 3. Clasificación de los Sistemas Fotovoltaicos.

Autónomo o "Isla".	Sistemas en Corriente Directa (CD).	Conexión Directa
		Conexión c / seguidor de potencia
	Sistemas en Corriente Alterna (CA)	Conexión con Baterías y controlador
Híbrido	Sistemas en Corriente Directa (CD).	Conexión con Baterías, controlador e inversor
		Fotovoltaico / Motogenerador
		Fotovoltaico / Eólico
		Fotovoltaico / Eólico / Motogenerador
	Sistemas en Corriente Alterna (CA)	Fotovoltaico / Motogenerador
		Fotovoltaico / Eólico
		Fotovoltaico / Eólico / Motogenerador
Interconectado con la Red	Sistemas en Corriente Directa (CD).	SFV sin almacenamiento / Red
		SFV con almacenamiento / Red
	Sistemas en Corriente Alterna (CA)	SFV sin almacenamiento / Red
		SFV con almacenamiento / Red

A su vez, cada tipo de sistema puede subdividirse por el tamaño, ya sea distribuidos o centralizados.

2.5.1. Aplicaciones

La tecnología solar fotovoltaica no es nueva. Esta historia empieza en 1839 cuando el científico francés Alexandre-Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, años después en 1883 Charles Fritts fabricó la primera célula solar de Selenio recubierta con una capa de oro con una eficiencia de 1 % basándose en los trabajos de Becquerel. En 1887 Heinrich Hertz realizó experimentos sobre la producción y recepción de ondas electromagnéticas y observó que la absorción de luz ultravioleta facilitaba el salto de los electrones y la intensidad de la chispa eléctrica, publicó un artículo de sus resultados sin explicar de manera teórica el fenómeno. Fue en 1905 cuando Albert Einstein propuso una descripción matemática del fenómeno fotovoltaico y publicó un



artículo titulado "Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz" trabajo por el cual más tarde en 1921 recibiría el Premio Nobel de Física. Tuvieron que pasar varios años más de investigación por diferentes investigadores hasta que en 1954 se inventara la primera celda fotovoltaica de Silicio en USA por los Laboratorios Bell alcanzando una eficiencia de 11 % siendo considerado ese momento como el nacimiento de la tecnología Fotovoltaica. A partir de ese momento inicio una carrera por incrementar la eficiencia de dichas celdas y la búsqueda de sus aplicaciones (US DOE, 2014).

Aplicaciones Industriales. Dentro de este tipo de aplicaciones se encuentran las Telecomunicaciones, Señalización y Sistemas de Monitoreo Remoto. Son esenciales para mejorar la calidad de vida en áreas alejadas y tener acceso a la información.

Fue la primer aplicación ya que en 1958 se aplicaría por primera vez tecnología FV para suministrar la energía a los satélites y vehículos lanzados al espacio (US DOE, 2014). Posteriormente la tecnología se extendió a aplicaciones terrestres. Aunque las primeras aplicaciones terrestres se dieron en productos de consumo como relojes, juguetes, calculadoras, etc., estos requieren poca energía, por lo cual la instalación FV comercial considerada como la más importante para demostrar la viabilidad y el potencial de esta fuente de energía se realizó en 1963, en el faro de la isla Ogami, Japón.

Actualmente las aplicaciones de este tipo son muchas, además de los



productos de consumo como lo son celulares, reproductores de música, cargadores portátiles, pequeños televisores, podemos encontrar estos sistemas en semáforos, teléfonos públicos, parquímetros e incluso computadoras (González, 2013) y compresores de aire (Lozano y Almazán, 2014).

Dentro de las aplicaciones industriales de gran potencia podemos encontrar los proyectos de electrificación con energía FV de cadenas comerciales y supermercados, electrificación de sistemas de tratamiento de aguas, plantas para elaborar hielo y refrigeradores para almacenaje de vacunas y sangre en lugares remotos.

Existe también gran investigación en la aplicación de esta tecnología en vehículos principalmente para las competencias de carreras de vehículos solares y estaciones de carga para vehículos eléctricos.

Aplicaciones de electrificación Rural y Urbana. En la década de los 80, los primeros sistemas fotovoltaicos fueron sistemas aislados de baja potencia en viviendas, que suministraban pequeñas cantidades de electricidad a hogares individuales sin acceso a una red eléctrica, en los países en desarrollo. A pesar de que este mercado tuvo gran importancia social en esa época, era limitado. En la década de los 90 el mercado fotovoltaico comenzó a crecer de manera significativa debido a la transición hacia los sistemas fotovoltaicos conectados a la red en el mundo desarrollado.

Actualmente podemos encontrar calles, avenidas, puentes peatonales e incluso carreteras dotadas de lámparas fotovoltaicas para iluminar ya sea en la ciudad



o en poblados alejados de redes de electrificación. También existen proyectos de electrificación de escuelas públicas rurales por medio de SFV's.

Se ha comprobado que los SFV's son una buena solución para proveer electricidad en áreas lejanas a la red de electricidad.

EPRI (1991) citado por Reineke (1993) realizó una evaluación económica para comparar los costos de los SFV para diferentes energías con los costos de extensión de línea (costo inicial de la construcción, más costos anuales recurrentes tales como la operación y mantenimiento, seguros, impuestos a la propiedad y la depreciación) e indica cuando los sistemas de energía fotovoltaica son más rentables que las extensiones de línea de servicios públicos.

Ángeles (2009) realizó un estudio económico del uso de SFV instalados en tres localidades de Tapanatepec, Oaxaca. Realizó una comparación entre la instalación de los SFV y el costo por extensión de red de CFE para el caso de dichas comunidades, concluyó que resulta mucho más viable económicamente la instalación de SFV a partir de los 10 km de distancia que extender la red de CFE (tomando en cuenta el costo por vivienda), sin embargo no tomo en cuenta el costo de la tarifa por consumo de energía y el incremento anual que esta tiene. En este trabajo también calculó que el costo de producir 1 kWh de electricidad con el SFV durante los 20 años de vida del sistema mucho mayor



que el costo de producir electricidad por CFE por bimestre instalado con tarifa doméstica, sin embargo, no se comparen con otras tarifas agrícolas y no incluye su incremento anual.

Abd El-Shafy (2009) realizó una comparación de costos de generación de energía a partir de SFV y extensión de la red eléctrica de Egipto e indica que en sitios remotos de la red la generación de energía fotovoltaica será viable en el futuro para electrificación de hogares debido a su esperado costo inferior al de la red y la generación de energía limpia en comparación con la convencional red de suministro eléctrico. Sin embargo no se indican el costo por extensión de red eléctrica. Lacchini y Dos Santos (2013) realizaron una comparación entre los costos de generación de energía FV y el uso de plantas generadoras de electricidad a partir de carbón en Brasil y concluyen que el costo fotovoltaico es un 11% menor en comparación con el costo de las plantas de carbón.

Aplicaciones Agropecuarias e Invernaderos. En 1965, investigaciones realizadas por la *Solar Energy Society* indicaban que países como Reino Unido, Etiopía, Francia, India, Pakistán, Portugal y, especialmente, Estados Unidos realizaban entonces experiencias sobre algún aspecto de la energía solar aplicada a la agricultura (Casanova, 1993, citado por Pérez, 2007). Fue entonces y durante la década de los 70's cuando surgió la idea de aplicar los sistemas fotovoltaicos para la extracción y bombeo de agua iniciando así con las aplicaciones agropecuarias (US DOE, 2014).



Otras aplicaciones en este ramo son la refrigeración para la conservación de insumos y productos agrícolas, electrificación de cercas (Fischer *et al.*, 2009), acondicionamiento de alojamientos ganaderos, equipos de monitoreo de aguas, herramientas de corte y cauterización de frutos (Hahn, 2010) y actualmente maquinaria agrícola como el arado solar “Utopus” construido por Damià Bover y el suministro energético a Invernaderos.

Sánchez (2006) afirmó que en sistemas de bombeo fotovoltaicos y proyectos productivos agropecuarios, la tecnología fotovoltaica es económicamente rentable para sistemas alejados a más de 0.5 km de la red con demandas de potencia menores a 5 kW y que la decisión de extender la red de CFE puede ser aceptable si el productor requiere electricidad para otras aplicaciones del orden de la capacidad del transformador instalado. Yeager & Radstake (2012) concluyen que los sistemas de bombeo FV son rentables y lo serán aún más si los costos de los combustibles fósiles aumentan.

Sánchez (2004) estudió la aplicación de SFV para suministrar la energía a los sistemas de ventilación, pantalla térmica, foggin, y riego hidropónico de un invernadero ubicado en Navarra, España y concluye que específicamente en su estudio y en función de los puntos de partida no resulto viable, sin embargo no consideró un sobredimensionamiento por lo cual también concluye que puede ser viable para aplicarlo a los sistemas con excepción del riego. Por otro lado Bermejo (2007) evaluó la aplicación de un SFV para accionamiento de 4



motorreductores que forman parte de las cortinas laterales y cenitales de un invernadero y concluye que existe un excelente funcionamiento del SFV durante todo el año siendo este una opción viable para tal fin. Además realizó la comparación de costos de su SFV y la instalación-extensión del tendido eléctrico de España y concluye que en España se puede considerar viable la instalación solar frente a la red eléctrica a partir de 10 km de distancia del invernadero al punto de conexión a la red más próximo, sin embargo no se toma en cuenta el pago de la tarifa por el consumo de energía eléctrica durante los años de uso.

Yano *et al.* (2005); Yano *et al.* (2007); Yano *et al.* (2009); Yano *et al.* (2010) evaluaron el uso de SFV montados al invernadero (incluso con diferentes orientaciones) para producir la energía necesaria para el control de la ventilación dentro de este considerando la radiación solar disponible en el lugar y el consumo energético de los sistemas involucrados (ventilación forzada, apertura y cierre de ventanas) y concluye que la generación de energía eléctrica mediante SFV es válida para esta fin.

Rocamora & Tripanagnostopoulos (2006) instalaron un SFV en un invernadero ubicado en Alicante, España con propósito de generar la electricidad que el sistema de ventilación natural y forzada utilizara durante un año, pero también coleccionar el calor que se desprende del SFV para utilizarlo para calentar agua. El resultado de la investigación mostró que el SFV/Térmico contribuye



satisfactoriamente para suministra la energía eléctrica a los sistemas de ventilación, sin embargo, es ineficaz para el propósito de calentar el invernadero por medio del calor despedido. Por otro lado Sonneveld *et al.* 2010 construyeron un invernadero que combina la aplicación de un SFV/Térmico dando una curvatura al techo del invernadero convirtiéndolo en un concentrador y montando las celdas FV sobre el eje focal logrando concentrar los rayos del sol sobre estas generando electricidad para alimentar el sistema de ventilación y calor para calentar agua y elevar la temperatura del invernadero por las noches. El resultado mostró una producción eléctrica y térmica de 20 kWh m^{-2} y 160 kWh m^{-2} .

Seif *et al.* (2007) realizó un estudio sobre la instalación y prueba de un SFV interconectado a la Red (por seguridad) para suministrar energía al sistema de enfriamiento por nebulización con consumo energético de 2000 Wh diarias conformado por 2 ventiladores nebulizadores de un invernadero ubicado en la Universidad de Putra Malasia. Sus resultados mostraron que el SFV es adecuado para suministrar electricidad y cubrir las demandas requeridas sin utilizar la energía de la red.

Fischer *et al.* (2009) indica que puede resultar más económico instalar SFV's de 100 - 300 W a partir de los 15 metros de distancia de la red más cercana para uso en invernaderos así como para cercas eléctricas, que normalmente



suministran 500 voltios a bajo amperaje para administrar una descarga inofensiva para el ganado.

Ganguly *et al.* (2010) realizó el modelado y análisis de un SFV híbrido (SFV/Banco electrolizador/Pilas de combustible) para generar la energía eléctrica que consume los sistemas de enfriamiento por muro húmedo y ventilación natural de un invernadero bajo diferentes condiciones climáticas en Calcuta, India. El modelo reveló que se requeriría de 51 módulos FV (17 en paralelo y 3 en serie) cada uno de 75 W, un electrolizador de 3.3 kW y 2 pilas de combustible para poder cumplir con los requerimientos energéticos de un invernadero para flores de 90 m².

Kadowaki *et al.* (2012); Ureña-Sánchez *et al.* (2012) realizaron investigaciones del efecto que produce el sombreado sobre los cultivos de Cebolla y Tomate respectivamente en invernaderos con módulos FV montados en la cubierta utilizados para aportar la energía eléctrica a los diferentes sistemas. Ambas investigaciones concluyen que no existe efecto negativo sobre los cultivos mientras que el SFV cumple con el objetivo de suministrar toda la energía requerida durante el ciclo.

Martínez (2014) Instaló y evaluó un SFV de 3.68 kWp para suministrar la energía a una motobomba que forma parte del sistema de riego y un motor soplador encargado de agitar la solución nutritiva y concluye que la producción



energética del SFV es de 14 kWh la cual satisface las necesidades de los motores en todo momento siendo una aplicación viable energética y económicamente.

Sin embargo teniendo en cuenta que el área utilizada por un SFV sobre una superficie es importante, además del problema de sombreado anteriormente mencionado, Yano *et al.* (2014) han desarrollado 2 prototipos de módulos semitransparentes para aplicaciones en techos de invernadero teniendo como objetivo no afectar la radiación que entra al invernadero y una optimización del área ocupada por el sistema de generación fotovoltaico.

2.5.2. Componentes

Un sistema Fotovoltaico consta de los componentes siguientes:

- Subsistema de generación; Formado por el arreglo de módulos FV's. Su misión es recibir la radiación solar y transformarla en energía eléctrica.
- Estructura y cimientos del arreglo; Es la estructura donde estará montada el arreglo de los módulos, debe proporcionar un buen anclaje de los paneles haciéndolos resistentes a la acción de fenómenos meteorológicos problemáticos, también debe tomarse en cuenta que estos deben dar cierta inclinación a los módulos con respecto a la trayectoria del sol, de manera que el sistema reciba la mayor cantidad posible de energía solar.



- Subsistema de regulación; Conformado por reguladores de voltaje y otros controles, cuya función controlar permanentemente que la carga del panel solar se encuentre dentro de los límites tolerables por las baterías y, de acuerdo a ello, desconecta o conecta el panel.
- Subsistema de acumulación; Formado por un banco de baterías de almacenamiento eléctrico y recinto para ellas; Son los elementos donde se almacena la energía en forma química para su uso posterior como electricidad en corriente continua.
- Subsistema de adaptación; Conformado por equipos inversores de corriente que permite suministrar la potencia generada a las cargas para una aplicación o a la red eléctrica comercial. Su función principal es convertir la corriente directa producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna, con las características establecidas por la red.
- Instrumentos y cargas; tales como medidores, aparatos eléctricos, iluminación, etc.
- Subsistema de transporte de la energía; Conformado por cables e interruptores utilizados para conducir la energía hasta los aparatos eléctricos y accesorios.

La producción de energía de un sistema fotovoltaico depende de varios factores que incluyen la ubicación, orientación e inclinación de los paneles, así como la temperatura y el sombreado. Un buen diseño tiene que tener en cuenta todos estos factores.



2.5.3. Metodologías para el cálculo y selección de SFV's

Podemos afirmar que las aplicaciones de sistemas fotovoltaicos en la vida cotidiana son extensas, sin embargo, una vez seleccionada la aplicación y el tipo de SFV se debe estimar su tamaño y componentes para que sea capaz de generar la electricidad que consumirá la carga durante todo el tiempo de uso.

Aunque existen diferentes metodologías propuestas para el dimensionamiento de SFV's el criterio es el mismo. Se trata de elaborar un balance de energía el cual de acuerdo con Sánchez (2014) puede expresar como “La energía generada debe ser igual a la energía consumida por las cargas”.

Existen Autores como Ibáñez *et al.* (2004) proponen una metodología basada en dimensionar el SFV para satisfacer las demandas eléctricas durante la temporada más desfavorable logrando ser un método confiable. Labouret y Villos (2008) proponen una metodología que también toma en cuenta el balance energético sin embargo los parámetros y datos de la metodología están adaptados al Código Técnico de la Edificación de Madrid. Sánchez (2014) propone 2 diferentes metodologías para el cálculo de SFV's la primera por criterio del consumo energético en Ah (Amper-hora) recomendable para SFV's con voltaje nominal menor a 48 V en CD y el segundo criterio es el de watt-hora que se usa cuando el voltaje nominal del sistema es mayor de 48 V en CD y no se conoce explícitamente la corriente que consume cada una de las cargas.



Dichas metodologías son parecidas y confiables ya que se basan en el balance energético y solo cambian algunos parámetros y/o coeficientes de cálculo.

Por otra parte, las herramientas como softwares de calco para apoyo durante este proceso son pocas.

En la web podemos encontrar diversas hojas de cálculo, softwares y/o calculadoras online para dimensionar sistemas fotovoltaicos para aplicaciones de electrificación doméstica, algunos con datos de lugares o países específicos y algunos otros ofrecen la facilidad de elegir algunos criterios. Sin embargo la bases de datos son muy específicas y no existe la posibilidad de introducir datos de equipos además si los proyectos son muy complejos estos softwares pueden no funcionar por lo cual no son útiles para el cálculo de una instalación por parte de un instalador.

Algunos programas más especializados para este fin se presentan son PVsyst, iHOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms), HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), SolarSoft, PVWatts (Por el National Renewable Energy Laboratory de E.U.A.), PVSol (por Valentin Software), SAM (System Advisor Model), POLYSUN entre otros, desarrollados en Europa y USA. Algunos de ellos dimensionan el sistema FV y algunos otros solo estiman la producción energética de los sistemas, sin embargo los anteriores tienen un costo económico. Por el país donde se desarrollaron sus bases de datos pueden no ser confiables para proyectos en México y de igual manera solo



funcionan para aplicaciones domésticas. Para condiciones de México existe el software FV2.0 de uso público desarrollado por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, s.f.) para la selección de componentes fotovoltaicos, calcula los parámetros eléctricos y el costo del sistema pero su base de datos es exclusivo para aplicaciones domésticas.

La mayoría de softwares están orientados hacia la aplicación de los SFV's para el suministro de energía a las cargas domésticas, por otro lado, debido a que diversos estudios concluyen que los SFV's son energéticamente y económicamente viables existe la necesidad de desarrollar una metodología que tome en cuenta datos de partida de las diversas cargas que encontramos en los sistemas de invernaderos.

Es por ello que Martínez (2014) desarrolló una metodología para la selección de SFV's para invernaderos en función de los equipos, horas de uso y consumo de los sistemas instalados en el invernadero con la cual se desarrolló el software de "Selección de sistemas fotovoltaicos para invernadero" (Martínez *et al.*, 2014; Romantchik *et al.*, 2013) y la aplicó para calcular la instalación necesaria para un invernadero ubicado en el campo experimental Tlapeaxco de la UACH, realizó la instalación y concluye que satisface las necesidades de los motores en todo momento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describirá la metodología desarrollada para la realización de la investigación. A continuación se muestra un diagrama de las fases de la investigación.

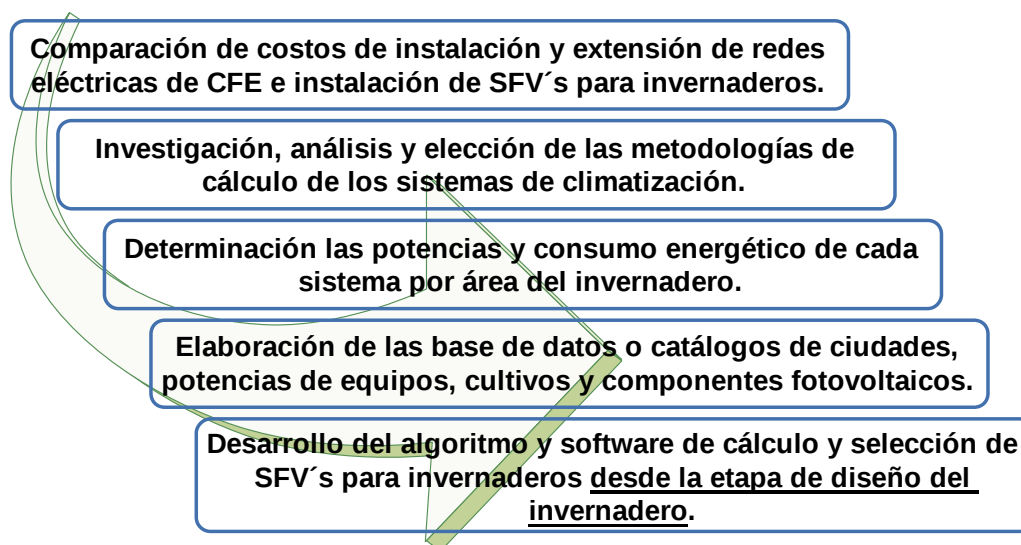


Figura 1. Etapas del desarrollo de la investigación.

3.1. Comparación de costos de instalación y extensión de redes eléctricas de CFE e instalación de SFV's para invernaderos

3.1.1. Costos de instalación de sistemas fotovoltaicos

Para el cálculo de los costos de instalación de SFV's se utilizó el "Software de selección de SFV para invernaderos" desarrollado por en el posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) de la UACH, el cual se encuentra disponible en línea en: <http://sistemas.chapingo.mx/empresas/SICF/>. Dicho software cuenta con un catálogo de 53 ciudades en 29 estados de la



República Mexicana.

Además de un inventario de aplicaciones dentro de las cuales podemos elegir los sistemas que utiliza el invernadero tales como ventilación, riego, iluminación, sombreado, calefacción, accesorios, etc., es en este apartado donde elegimos los tipos de motores, resistencias, focos o lámparas, la potencia, la cantidad y las horas de uso que son necesarias.

Mediante un algoritmo el software selecciona de un catálogo de componentes la opción más económica en cuanto al costo estimado del SFV de diferentes (n) energías ($C_{SFV \ n \ En}$) y las características de sus componentes (marca, modelo, voltaje, corriente, etc.). Este software calcula tanto sistemas autónomos como sistemas conectados a red.

3.1.2. Costos de construcción, instalación y consumo de energía de redes eléctricas de CFE para 10, 15, 20 y 25 años.

En la construcción de líneas aéreas de distribución en zonas rurales se utilizan cables mixtos de aluminio con refuerzo de acero galvanizado (ACSR) de calibres 477 kCM ($1 \text{ kCM} = 0.5067 \text{ mm}^2$) y cobre hasta 250 kCM en la escala de calibres del “American Wire Gage” (AWG) y postes de concreto (PC). Los costos por construcción de redes eléctricas aéreas se presentan en el cuadro 4 (CFE, 2013).



Cuadro 4. Costo de construcción de redes aéreas (Precios a Junio del 2013

M.N.).

Por kilómetro de línea de distribución aérea (rural) Poste de Concreto					
Descripción	Materiales y equipo de instalación permanente (\$)	Mano de obra (\$)	Diseño del proyecto (\$)	Supervisión (\$)	Costo total/km (\$)
1C-3F-4H-33 kV-477-AWG-ACSR-PC (RURAL)	268,605.13	116,110.48	1,445.06	1,894.93	388,055.61
Costo por conexión de línea de 3 fases: \$ 2,011.83					
Costo de Acometidas de media tensión para distancia máxima de poste a 35 m (para propósito de reembolso)					
Descripción	Materiales y equipo de instalación permanente (\$)	Mano de obra (\$)	Tipo		Total (\$)
ACOM AEREA 3F MT 13 KV AAC (CFE CA-MT 101)	1,760	1,177	TRIFASICO		2,937

Los costos de construcción de redes de energía eléctrica ($C_{ConsCFE}$) se obtienen analizando la normatividad por parte de CFE (CFE, 2006) en función de la distancia, materiales, tipo de instalación y cantidad de energía a suministrar y considerando que es proporcional a la distancia en metros, y se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

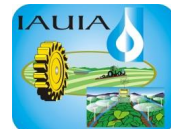
$$C_{ConsCFE} = C_{Acom} + C_{1km} \quad (1)$$

Dónde:

C_{Acom} = Costo de Acometida [\$].

C_{1km} = Costo de 1 km de instalación [$\$ m^{-1}$].

Una acometida es el tramo de línea que conecta la instalación del usuario a la línea suministradora de CFE. Puede estar hasta una distancia de 35 a 50



metros como máximo. Como el costo de acometida es fijo y el de construcción está dado por km se puede determinar el costo de construcción por metro:

$$C_{mtr} = \frac{C_{ConsCFE} - C_{Acom}}{1000} \quad (2)$$

Dónde:

C_{mtr} = Costo por metro de instalación [$\$ m^{-1}$].

Si los costos de instalación de SFV son menores a los costos de construcción de redes de CFE es justificable el uso de esta energía alternativa y al revés. Entonces hay que analizar los puntos de igualdad de costos:

$$C_{SFV n En} = C_{ConsCFE} \quad (3)$$

Así podemos obtener la distancia mínima ($Dist$) de justificación del uso de SFV tomando en cuenta solo costos por construcción de red de CFE con lo siguiente:

$$Dist = \frac{C_{SFV m En} - C_{Acom}}{C_{mtr}} \quad (4)$$

Es importante resaltar que para realizar una comparación entre costos de instalación de SFV y extensión de líneas de CFE se debe incluir el pago de tarifas de energía suministrada para agricultores durante diferentes años. El costo total incluyendo la tarifa (C_{TotTar}) se calcula de acuerdo con la ecuación (5):

$$C_{TotTar} = C_{Acom} + [C_{mtr} * Dist] + [Tar * En * 365 * No \text{ años}] \quad (5)$$

Dónde:

Tar = Tarifa de 1kWh [$\$ kWh$]

En = Energía consumida por día [kWh]



No años= Número de años al cual se hará el análisis.

También hay que tomar en cuenta que existe un incremento anual de la tarifa. Este incremento se calcula en base a una recopilación de las tarifas de consumo de energía agrícola sin y con subsidios 9M y 9CU y domestica durante 10 años atrás (de 2003 al 2013). Se obtuvo la diferencia entre cada año respecto al anterior y posteriormente el porcentaje de incremento de acuerdo con:

$$Dif_{Tar} = Tar_{año\ n} - Tar_{ant} \quad (6)$$

$$In_{año\ n} = \frac{(Dif_{Tar} * 100)}{Tar_{ant}} \quad (7)$$

$$In_{an} = \frac{\sum_{2003}^{2013} In_{año\ n}}{10} \quad (8)$$

Dónde:

Dif_{Tar} = Diferencia de tarifa [\$].

$Tar_{año\ n}$ = Tarifa de 1 kWh al año n [\$ kWh].

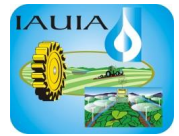
Tar_{ant} = Tarifa anterior al año n de 1kWh [\$ kWh].

$In_{año\ n}$ = Incremento en un año n [%].

In_{an} = Promedio de incremento anual de la tarifa de los años 2013-2023 [%].

El promedio de incremento anual se utiliza para calcular las tarifas para los años futuros hasta el año 2038 con la expresión siguiente:

$$Tar_{año\ n} = Tar_{ant} + (Tar_{ant} * In_{an}) \quad (9)$$



Se obtiene el costo de consumo a n (10, 15, 20 y 25) años ($CC_{n \text{ años}}$) con la siguiente expresión:

$$CC_{n \text{ años}} = \sum_{1}^n (Tar_{año \ n} * En * 365) \quad (10)$$

El costo total de las instalaciones de red eléctrica CFE incluyendo las tarifas de energía suministrada para agricultores (C_{TotTar}) durante diferentes años se calcula de acuerdo con la ecuación (11):

$$C_{TotTar} = C_{Acom} + [C_{mtr} * Dist] + CC_{n \text{ años}} \quad (11)$$

Una vez obtenidos todos los anteriores, se comparan los costos totales de construcción de red de CFE con los costos de instalación de SFV obtenidos con el software de selección desarrollado en el posgrado de IAUIA.

Para obtener la distancia mínima de justificación de la instalación de SFV's en función de la energía m que se desea utilizar y tomando en cuenta tanto costos de construcción e instalación de red como costos por el pago de m energía por los n años debemos localizar el punto de igualdad de costos de SFV's de n energía y costos totales de construcción de red C_{TotTar} es decir cuándo:

$$C_{SFV \ m \ En} = C_{TotTar} \quad (12)$$

O bien:

$$C_{SFV \ m \ En} = C_{Acom} + [C_{mtr} * Dist] + CC_{n \text{ años}} \quad (13)$$

De la ecuación anterior podemos despejar la distancia mínima de justificación de instalación de SFV y calcular:



$$Dist = \frac{C_{SFV\ m\ En} - C_{Cn\ años} - C_{Acom}}{C_{mtr}} \quad (14)$$

De todas las tarifas existentes se analizaron y compararon las siguientes:

Tarifas domésticas: Estas tarifas se aplican a los servicios que destinan la energía para uso exclusivamente doméstico, individualmente a cada residencia, apartamento o casa. Existen 7 diferentes las cuales cambian desde \$ 0.561 hasta \$ 2.76 por 1 kWh en el año 2013 en función del mes aplicación, del lugar, del consumo, de la temperatura media - mínima, etc.

Tarifas agrícolas: De 4 diferentes tarifas (9, 9M, 9CU y 9N) la tarifa 9 corresponde al costo del servicio para bombeo de agua para riego agrícola en baja tensión y los costos son iguales a la 9M (en los primeros 5000 kWh por mes) que sirve exclusivamente a servicio para bombeo de agua para riego agrícola en media tensión así como al alumbrado del local donde se encuentre instalado el equipo de bombeo. En el cuadro 5 se presenta esta tarifa durante el año 2013 y se observa que existe un incremento mensual.

Cuadro 5. Tarifa 9M. Costo por energía (\$/kWh).

Rango	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1-5000	3.21	3.28	3.34	3.41	3.48	3.55	3.62	3.69	3.76	3.84	3.92	3.99

Tarifa 9CU de estímulo para bombeo de agua para riego agrícola con cargo único; esta tarifa es un beneficio que está establecido dentro del acuerdo de la energía para el campo; es una tarifa especial para toda persona física o moral que cuente con bombeo para riego agrícola en todo el país. Esta tarifa de estímulo se aplicará para la energía eléctrica utilizada en la operación de los equipos de bombeo de agua para riego agrícola por los sujetos productivos



inscritos en el padrón de beneficiarios de energéticos agropecuarios, hasta por la cuota energética determinada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). El costo de esta es de \$ 0.5 por 1 kWh para todo el año 2013.

La tarifa 9N es de estímulo nocturna para bombeo de agua para riego agrícola, el costo por energía de esta tarifa es de \$ 0.250 por 1 kWh para todo el año 2013.

3.2. Determinación de la potencia y cargas energéticas de los sistemas del invernadero

Se realizó una investigación y análisis de las metodologías de diseño y cálculo de los diferentes sistemas del invernadero. Las metodologías determinan las potencias de los equipos eléctricos necesarios en cada sistema del invernadero (riego, calefacción directa, ventilación natural y forzada, enfriamiento por muro húmedo, iluminación y sombreo) en función de área del invernadero.

Para el diseño y cálculo de la potencia de los diferentes sistemas se debe respetar la normatividad de las dependencias especializadas para cada sector. Por otro lado, para el cálculo de la potencia del sistema de ventilación natural, y sombreo se desarrolló una metodología de diseño, en ambos casos de manera que se cumplieran los requerimientos teóricos, pautas de diseño y normas descritas por diferentes autores.



Para aplicar las metodologías para el diseño y cálculo de la potencia de los sistemas a instalar en el invernadero es necesario contar con algunos datos de entrada o condiciones de partida tales como datos geográficos (altitud, latitud y longitud) y climatológicos (temperaturas máxima, mínima y media y evapotranspiración) de la zona o ciudad donde se instalara el invernadero y los cultivos más comunes en invernadero con sus respectivas condiciones climáticas para su desarrollo (temperaturas mínima, óptima y máxima, coeficientes Kc y nivel de iluminación).

3.2.1. Riego por goteo.

El consumo de energía eléctrica es la potencia consumida en un periodo de tiempo. Se define como el producto de la potencia eléctrica consumida por el tiempo de consumo (Sánchez, 2007). De tal manera que el consumo de energía por el sistema de riego (E_{c-SR}) en [kWh] se obtiene con la ecuación siguiente:

$$E_{c-SR} = HP_b * T_r \quad (15)$$

Dónde:

T_r = Tiempo de riego en [h día⁻¹].

HP_b = Potencia de la(s) bomba(s) en [kW].

El tiempo de riego (T_r) forma parte del diseño agronómico del sistema de riego y se obtiene con la siguiente ecuación (Rodrigo *et al*, 1997):

$$T_r = \frac{VBd}{Q_e} \quad (16)$$

Dónde:

VBd = Volumen bruto de agua por planta [l día⁻¹].



Q_e = Gasto del emisor [l h^{-1}]. El emisor se elige de entre los comerciales existentes dentro de catálogos de empresas como REX irrigación, DRIPSA o NaanDan Jain, entre otros.

De acuerdo con Suazo (2012) y Fernández (s.f.) el volumen bruto de agua por planta (VBd) en [l día^{-1}] se obtiene con la ecuación siguiente:

$$VBd = \frac{ET_c * E_e * E_h * F_1}{\eta_R} \quad (17)$$

Dónde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo [mm día^{-1}] o lámina de riego diaria [l m^2].

E_e = Espaciamiento entre emisores o macetas [m] a criterio y conveniencia del diseñador y/o productor.

E_h = Espaciamiento entre hileras [m] a criterio y conveniencia del diseñador y/o productor.

F_1 = Porcentaje de mojado deseado.

η_R = Eficiencia del riego.

De acuerdo con la FAO (2006) la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y el coeficiente del cultivo (Kc):

$$ET_c = Kc * ET_o \quad (18)$$

Mientras los valores de Kc están determinados a partir de trabajos de investigación y varían principalmente en función de las características particulares del cultivo y su desarrollo vegetativo ET_o representa un indicador de

la demanda climática el cual se estima a partir de mediciones del tanque evaporímetro (E_{tan}) corrigiendo el dato por un coeficiente de tanque (K_{tan}):

$$ET_o = K_{tan} * E_{tan} \quad (19)$$

La potencia de la bomba (HP_b) se determina dentro del diseño hidráulico en el cual además se determina la disposición y dimensionamiento de las tuberías y las pérdidas de carga hidráulica del sistema.

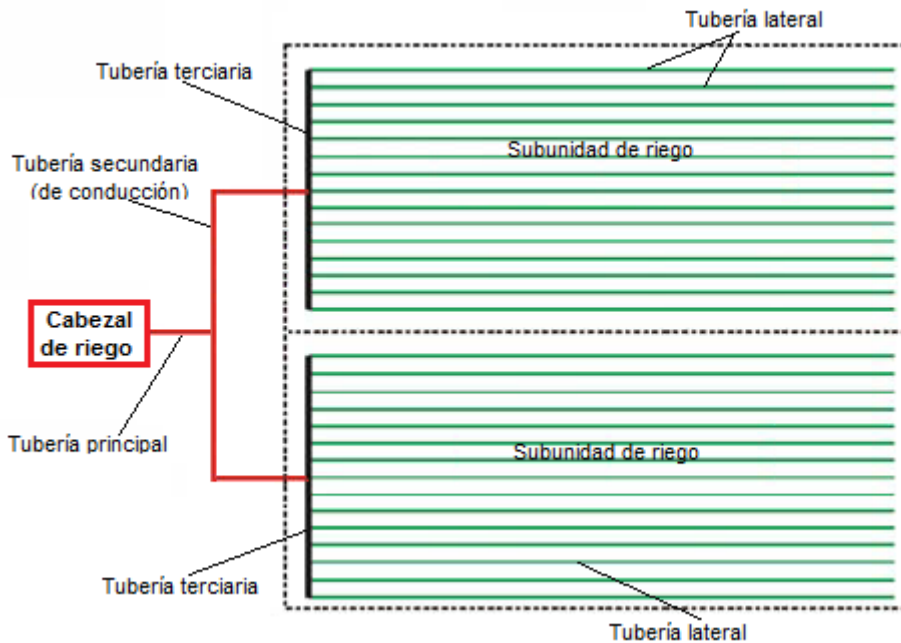


Figura 2. Red de distribución del sistema de riego por goteo.

Para el diseño hidráulico del sistema de riego por goteo tomamos la metodología desarrollada por Ángeles (2002) y Suazo (2012).

La potencia eléctrica de la bomba (HP_b) en [kW] podemos obtenerla con la ecuación siguiente:

$$HP_b = 1.15 * \frac{Q_{sis} * H_B * \rho_{Agua} * g}{1000 * \eta_b * \eta_m} \quad (20)$$



Dónde:

1.15= Factor de sobredimensionamiento para lavados.

Q_{sis} = Gasto total del sistema [$m^3 s^{-1}$].

H_B = Carga total del sistema [m].

ρ_{Agua} = Densidad del agua [$kg m^{-3}$].

g = Gravedad [$m s^{-2}$].

η_b = Eficiencia hidráulica de la bomba.

η_m = Eficiencia del motor eléctrico.

El gasto total del sistema (Q_{sis}) en [$l h^{-1}$] se obtiene con la ecuación siguiente:

$$Q_{sis} = N_e * K_l * K_t * Q_e \quad (21)$$

Dónde:

N_e = Número total de emisores.

K_l = Factor de sobredimensionamiento del gasto en tuberías laterales (1.0154).

K_t = Factor de sobredimensionamiento del gasto en tuberías terciarias (1.0349).

Q_e = Gasto del emisor [$l h^{-1}$].

El número total de emisores se obtiene con la ecuación siguiente:

$$N_e = N_{slat} * N_{ster} \quad (22)$$

Dónde:

N_{slat} = Número de salidas en la tubería lateral.

N_{ster} = Número de salidas en la tubería terciaria.

El número de salidas en la tubería lateral se obtiene con la ecuación siguiente:

$$N_{slat} = \frac{L_{inv}}{E_e} \quad (23)$$



Dónde:

L_{inv} = Largo del invernadero [m] según las características del terreno donde se instalara.

El número de salidas en la terciaria (N_{ster}) se calcula con la ecuación siguiente:

$$N_{ster} = \frac{W_{inv}}{E_h} \quad (24)$$

Dónde:

W_{inv} = Ancho del invernadero [m] según las características del terreno donde se instalara y de acuerdo con dimensiones comúnmente instaladas por empresas del ramo como ACEA, IMAAS entre otros.

Por lo tanto el gasto total del sistema (Q_{sis}) en [$l\ h^{-1}$] se puede obtener con la ecuación siguiente:

$$Q_{sis} = \frac{L}{E_e} * \frac{A}{E_h} * K_l * K_t * Q_e \quad (25)$$

O bien:

$$Q_{sis} = \frac{A_{inv} * K_l * K_t * Q_e}{E_e * E_h} \quad (26)$$

Dónde:

A_{inv} = Área del invernadero [m^2].

La carga total que debe tener el sistema (H_B) en [m] podemos calcularlo con la ecuación siguiente (Suazo, 2012):

$$H_B = 1.1 * (H_l + H_t + H_c + H_{cab} + H_{loc}) \quad (27)$$

Dónde:

H_l = Perdidas de carga en la tubería lateral [m].

H_t = Perdidas de carga en la tubería terciaria [m].



H_c = Pérdidas de carga en la tubería de conducción [m].

H_{cab} = Pérdidas de carga en el cabezal de riego [m].

H_{loc} = Pérdidas de carga localizadas [m].

La pérdida de carga en el lateral (H_l) en [m] se calcula con la ecuación de Christiansen (Ángeles, 2002):

$$H_l = F \left[\frac{10.3 * n^2 * N_{slat}^3 * Ee * Qe^2}{D_l^{16/3}} \right] \quad (28)$$

Dónde:

F = Factor de corrección de Christiansen obtenido de tablas (0.36).

n = Coeficiente de rugosidad de la pared de Manning (0.009) [$s\ m^{1/3}$].

D_l = Diámetro interior del lateral [m].

La pérdida de carga en la terciaria (H_t) en [m] se calcula de la manera siguiente Ángeles, 2002):

$$H_t = F \left[\frac{10.3 * n^2 * N_{ster}^3 * Eh * Q_{ter}^2}{D_{ter}^{16/3}} \right] \quad (29)$$

Dónde:

D_{ter} = Diámetro interior de la terciaria [m].

Q_{ter} = Gasto de la última salida en la terciaria [$l\ h^{-1}$].

El gasto de la última salida en la terciaria (Q_{ter}) en [$l\ h^{-1}$] podemos obtenerlo de la siguiente manera (Suazo, 2012):

$$Q_{ter} = N_{slat} * K_l * Q_e \quad (30)$$

La pérdida de carga en la conducción (H_c) en [m] se obtiene mediante la ecuación de Manning (Ángeles, 2002):



$$H_c = \frac{10.3 * n^2 * L_c * Q_{sis}^2}{D_c^{16/3}} \quad (31)$$

Dónde:

L_c = Longitud de la tubería de conducción [m].

Q_{sis} = Gasto del tramo de conducción o Gasto total del sistema [$m^3 s^{-1}$].

D_c = Diámetro de la tubería de conducción [m].

La pérdida de carga en la conducción (H_{cab}) en [m] se obtiene mediante la ecuación siguiente (Suazo, 2012):

$$H_{cab} = H_f + H_v \quad (32)$$

Dónde:

H_f = Perdidas de carga en los filtros del cabezal [m].

H_v = Perdidas de carga en el inyector de fertilizante tipo venturi [m].

Por lo general estos datos son proporcionados por el fabricante o se encuentran en tablas (Ángeles, 2002).

La pérdida de carga localizada (H_{loc}) en [m] se calcula de acuerdo con la ecuación siguiente (Suazo, 2012):

$$H_{loc} = 0.1 * (H_l + H_t + H_c + H_{cab} + H_e) \quad (33)$$

Dónde:

H_e = Carga del emisor [m], se define a partir de datos del fabricante va de un rango de 6-20 metros columna de agua (m.c.a).

Así la potencia eléctrica de la bomba (HP_b) en [kW] podemos obtenerla en función del área del invernadero con la ecuación siguiente:



$$HP_b = 1.15 * \frac{A_{inv} * K_l * K_t * Q_e * H_B * \rho_{Agua} * g}{746 * Ee * Eh * \eta_b * \eta_m} \quad (34)$$

3.2.2. Calefacción directa

La calefacción debe compensar las pérdidas de calor por radiación, conducción, filtración y conducción del suelo. El consumo de energía eléctrica del sistema de calefacción se define como el producto de la potencia eléctrica de los calefactores instalados por el tiempo de trabajo de estos equipos por lo tanto el consumo de energía por el sistema de calefacción (E_{C-SC}) en [kWh] se obtiene con la ecuación siguiente:

$$E_{C-SC} = P_C * t_{trab} \quad (35)$$

Dónde:

t_{trab} = Tiempo de trabajo del sistema [h].

Depende de los factores climatológicos del sitio de instalación del invernadero. Generalmente la calefacción se utiliza en el invierno y durante la madrugada cuando la temperatura del exterior baja y el invernadero pierde el calor que almaceno durante el día. Un ejemplo se presenta en invernaderos del campo experimental la Cerona de la UACH donde durante el invierno el sistema de calefacción se enciende de 2 a 3 horas (por intervalos de tiempo de acuerdo con la programación del equipo) durante la madrugada iniciando a partir de la 1:00 o 2:00 am, siendo aproximadamente a las 6 am el último ciclo de encendido.

P_C = Potencia eléctrica del calefactor o calefactores en [kW], que aportan la energía calorífica [BTU's] que pierde el invernadero.



Para realizar el diseño de un sistema de calefacción de cualquier tipo (tubería radiante, directa con calefactores centinela, resistencias o bombas de calor) primeramente se deben estimar las pérdidas de calor del invernadero. Una vez que se conocen dichas pérdidas de calor y el salto térmico a cubrir se puede calcular la potencia de los equipos a instalar.

Para el cálculo de las pérdidas de calor del invernadero tomamos la metodología desarrollada por Contreras, 2012 y Nelson, 1991. La pérdida total de calor total (Q_{inv}) en [kcal h^{-1}] es la suma de todas las pérdidas de calor en invernadero y se calcula con la ecuación siguiente:

$$Q_{inv} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (36)$$

Dónde:

q_1 = Pérdida de calor por conducción [kcal h^{-1}].

q_2 = Pérdida de calor por filtración de la cubierta [kcal h^{-1}].

q_3 = Pérdida de calor por radiación [kcal h^{-1}].

q_4 = Pérdida de calor por conducción del suelo [kcal h^{-1}].

La pérdida de calor por conducción [kcal h^{-1}] se obtiene con la ecuación siguiente:

$$q_1 = K_c S_e (t_i - t_e) \quad (37)$$

Dónde:

K_c = Coeficiente de conducción de la cubierta [$\text{kcal (m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$].

S_e = Superficie expuesta del invernadero (superficie de la cubierta) [m^2].

t_i = Temperatura interior deseada [$^\circ\text{C}$].



t_e = Temperatura exterior mínima esperada [$^{\circ}\text{C}$].

La pérdida de calor por la filtración en la cubierta [kcal h^{-1}] se obtiene con la ecuación siguiente:

$$q_2 = Ce * Pe[(A_{inv} * H_{pinv}) + V_{tecin}]R(t_i - t_e) \quad (38)$$

Dónde:

Ce = Calor específico del aire [0.26 kg m^{-3}].

Pe = Peso específico del aire [$1.31 \text{ kcal kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

A_{inv} = Área del invernadero [m^2].

H_{pinv} = Altura de las paredes del invernadero [m].

V_{tecin} = Volumen del techo del invernadero [m^3].

R = Renovaciones de aire por hora [h^{-1}]. Esto es las veces que está renovando por hora todo el volumen de aire del invernadero.

O bien:

$$q_2 = Ce * Pe[A_{frente} * L_{inv}]R(t_i - t_e) \quad (39)$$

Dónde:

A_{frente} = Área del frente del invernadero [m^2].

L_{inv} = Largo del invernadero [m].

La pérdida de calor por radiación [kcal h^{-1}] se obtiene con la ecuación siguiente:

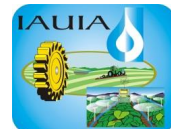
$$q_3 = \sigma A_{inv} P_r (t_i^4 - t_e^4) \quad (40)$$

Dónde:

$\sigma = 4.4 \times 10^{-8}$ = Constante de Stefan-Boltzmann [$\text{kcal (h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4})$].

P_r = Coeficiente de permeabilidad de la cubierta.

t_i = Temperatura interior deseada [K].



t_e = Temperatura exterior mínima esperada [K].

La pérdida de calor por conducción del suelo [kcal h^{-1}] se estima con la siguiente ecuación:

$$q_4 = 0.1(q_1 + q_2 + q_3) \quad (41)$$

De acuerdo con Contreras (2012) se requiere un aporte de 150 kcal h^{-1} por m^2 de suelo cubierto por el invernadero aproximadamente para mantener un diferencial de 10° C con respecto al exterior.

Potencia del sistema de calefacción con resistencias eléctricas.

Para calcular la potencia del sistema de calefacción por resistencias eléctricas (P_{res}) en [kWh] capaz de compensar la pérdida total de calor del invernadero se debe tener en cuenta que para suministrar una capacidad calorífica de 3412 BTU's por medio de resistencias se requiere un consumo eléctrico de 1kWh (Cengel y Boles, 2009). De esta forma dicha potencia se calcula acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_{res} = \frac{Q_{inv}}{3412} \quad (42)$$

Dónde:

3412= Coeficiente de conversión de BTU's a kWh [BTU kW^{-1}].

Potencia del sistema de calefacción con bombas de calor.

Cengel y Boles (2009) presentan la siguiente fórmula para el cálculo de potencia de una bomba de calor (P_{bc}) en [kW] que compense la pérdida de calor del invernadero:



$$P_{bc} = \frac{Q_{inv}}{COP * 3412} \quad (43)$$

Dónde:

COP = Coeficiente de desempeño de la bomba, la podemos encontrar en las especificaciones del equipo y/o generalmente 3.0 para sistemas de calefacción en invernadero (Cengel y Boles, 2009).

Potencia del sistema de calefacción directa con calefactores tipo centinela.

Son los sistemas más utilizados para aportar el calor perdido a los invernaderos debido al menor consumo energético en comparación con los anteriores.

Cuando se diseñan sistemas de calefacción de este tipo se tiene presente que el consumo de energía será por el ventilador el cual impulsa el calor generado al ambiente mediante aire forzado. Sin embargo no podemos calcular de manera directa la potencia de este equipo por lo cual es necesario recurrir a los catálogos de fabricantes existentes (CALELEC, OKLIMA, MASTER, MUNTERS SIAL), los cuales pueden ser un conjunto de tablas y seleccionar un calefactor que cumpla con las características de calefacción deseadas.

La capacidad que el sistema de calefacción con cañón calefactor de combustión directa (C_{cal}) en $[BTU\ h^{-1}]$ para compensar la energía calorífica perdida en el invernadero se determina de acuerdo con la ecuación siguiente (Contreras, 2012):

$$C_{cal} = Q_{inv} * 3.97 \quad (44)$$

Dónde:

3.97= Constante de conversión de unidades de $kcal\ h^{-1}$ a $BTU\ s\ h^{-1}$ [$BTU\ kcal^{-1}$].



Así el número de calefactores se calcula con la ecuación siguiente:

$$N_{cal} = \frac{C_{cal}}{C_{cc}} \quad (45)$$

Dónde:

C_{cc} = Capacidad del cañón calefactor seleccionado [BTU h⁻¹].

De esta manera podemos contar con la potencia del ventilador del calefactor y por ende la potencia eléctrica del calefactor o calefactores en [kW], es decir:

$$P_C = N_{cal} * P_{vent} \quad (46)$$

Dónde:

P_{vent} = Potencia del ventilador del calefactor [kW].

Para el cálculo de la potencia y consumo energético del sistema de calefacción directa se consideraron la forma y dimensiones de naves de invernadero comerciales (largo, ancho, altura de paredes, formas y dimensiones del techo, etc.).

3.2.3. Enfriamiento por muro húmedo

El sistema de enfriamiento permite disminuir la temperatura dentro del invernadero y por ende mantener el cultivo en un estado de confort cuando este alcanza temperaturas elevadas.

El consumo de energía del sistema de enfriamiento (E_{C-SE}) en [kWh] se calcula con la ecuación siguiente:

$$E_{C-SE} = P_{SE} * t_{trab} \quad (47)$$

Dónde:

t_{trab} = Tiempo de trabajo [h].



Depende de los factores climatológicos del sitio de instalación del invernadero. Generalmente el enfriamiento se utiliza en verano y durante las horas más críticas cuando la temperatura del interior del invernadero está por encima de la temperatura máxima que soportan los cultivos. En invernaderos del campo experimental la Cerona de la UACH durante el verano el sistema de enfriamiento se enciende de 3 a 4 horas (por intervalos de tiempo de acuerdo con la programación del equipo) durante el día iniciando a partir de 12 o 1 pm hasta las 4 o 5 de la tarde.

P_{SE} = Potencia del sistema de enfriamiento por muro húmedo [kW].

Para el calcular la potencia del sistema de enfriamiento por muro húmedo (P_{SE}) de invernaderos tomamos la metodología presentada por Manohar e Igathinathane (2007), Nelson (1991) y Contreras (2012) los cuales respetan las recomendaciones de diseño de la NGMA (2010b).

Se calcula primeramente el volumen de extracción por minuto (V_{ext}) en [$m^3 \text{ min}^{-1}$] tomando en cuenta que por cada m^2 de invernadero el aire se debe renovar a una tasa de $2.44 \text{ [m}^3 \text{ min}^{-1}\text{]}$, valor de remoción del aire suficiente para mantener una diferencia máxima de 4°C entre la pared húmeda y los extractores, determinado por la NGMA (2010b) para invernaderos con una intensidad lumínica de 5000 pies-bujía (53.8 klux) y a una altitud de 300 msnm con la ecuación siguiente:

$$V_{ext} = [A_{inv} * 2.44] * F_{inv} \quad (48)$$



Dónde:

2.44= Tasa de remoción del aire dentro del invernadero bajo condiciones estándar [$\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$].

F_{inv} = Factor de corrección para el invernadero que depende de la elevación, luz y temperatura (NGMA, 2010b).

La capacidad del aire para eliminar el calor del invernadero depende de su peso y no su volumen. Debido a que la densidad del aire disminuye y se vuelve más ligero con el aumento en la elevación la tasa de eliminación de aire del invernadero debe aumentar a medida que la elevación del sitio del invernadero aumenta. Por otro lado al aumentar la altitud también la intensidad lumínica lo hace y la temperatura dentro del invernadero aumenta por lo cual se requiere una tasa de remoción de aire mayor. Por último el diferencial de temperatura entre la pared húmeda y el extractor puede ajustarse de acuerdo a nuestras necesidades. Por lo anterior la elevación del sitio, la intensidad lumínica y el diferencial de temperatura deben ser considerados dentro del el factor de corrección. De esta manera el factor de corrección para el invernadero se calcula con la ecuación siguiente:

$$F_{inv} = F_{elev} * F_{luz} * F_{temp} \quad (49)$$

Dónde:

F_{elev} = Factor de corrección por elevación del sitio donde se sitúa el invernadero.

F_{luz} = Factor de corrección por intensidad lumínica dentro del invernadero.

F_{temp} = Factor de corrección por temperatura dentro del invernadero.



La NGMA (2010b) proporciona los factores de corrección para cada uno de factores anteriormente mencionados y se presentan en el cuadro 6.

Cuadro 6. Coeficientes de corrección para calcular el volumen de extracción de aire.

ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR (msnm)									
Altura	<300	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400
F_{elev}	1	1.04	1.08	1.12	1.16	1.2	1.25	1.3	1.36
INTENSIDAD LUMINOSA INTERIOR (pies-bujía)									
Intensidad	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000
F_{luz}	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
VARIACION DE TEMPERATURA ENTRE EL MURO Y LOS EXTRACTORES (Δ °C)									
Dif. de Temp.	5.5	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2	
F_{temp}	0.7	0.78	0.9	1	1.2	1.45	1.7	2	

Calculamos el número de extractores (N_{ext}) con la siguiente ecuación:

$$N_{ext} = \frac{A_{inv}}{L_{inv} * d_{ext}} \quad (50)$$

Dónde:

L_{inv} = Largo del invernadero [m]. De acuerdo con Contreras (2012) la distancia entre el muro húmedo y los extractores debe ser menor o igual a 60 m, siendo esta la longitud máxima que debe tener el invernadero al utilizar muro húmedo.

d_{ext} = Distancia entre extractores [m]. De acuerdo con la NGMA (2010b) los extractores no deben estar separados entre ellos por más de 8 metros, esto para que no queden bolsas de aire caliente. Además deben ser como mínimo 2 extractores.



Calculamos la capacidad de los extractores (C_{ext}) en $[m^3 \text{ min}^{-1}]$ con la ecuación siguiente:

$$C_{Ext} = \frac{V_{ext}}{N_{ext}} \quad (51)$$

O bien en función del área del invernadero (A_{inv}):

$$C_{ext} = \frac{[A_{inv} * 2.44] * F_{inv}}{N_{ext}} \quad (52)$$

Una vez que obtenemos la capacidad de los extractores es necesario recurrir a los catálogos de fabricantes existentes (MUNTERS SIAL, SIEMENS, AIRTEC, S & P, WIND MASTER, ULMA), los cuales pueden ser un conjunto de tablas para seleccionar el extractor que nos asegure una capacidad menor o igual a la calculada y por lo tanto de las características del extractor obtenemos su potencia eléctrica (P_{ext}) en [kW].

Para calcular la potencia eléctrica total ($P_{t,ext}$) de los extractores utilizamos la siguiente ecuación:

$$P_{t,ext} = P_{ext} * N_{ext} \quad (53)$$

Para calcular el área total del muro húmedo (A_{MH}) en $[m^2]$ se debe considerar que se requiere de capacidad de los extractores de $45.8 [m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}]$ (NGMA, 2010b), por lo tanto la ecuación es la siguiente:

$$A_{MH} = \frac{V_{ext}}{45.8} \quad (54)$$

El muro debe cubrir completamente la pared en la cual está instalado, así que la longitud del muro húmedo (L_{MH}) en [m] es igual al ancho del invernadero (W_{inv}). Por lo tanto la altura del muro húmedo (H_{MH}) en [m] se determina mediante la ecuación siguiente:



$$H_{MH} = \frac{A_{MH}}{L_{MH}} \quad (55)$$

Para calcular la capacidad de la bomba (Q_b) en [l min^{-1}] se debe considerar que se requiere de un gasto [Q_m] de 4 l min^{-1} por cada metro de longitud del muro (NGMA, 2010b) por lo que aplicamos la ecuación siguiente:

$$Q_b = L_{MH} * Q_m \quad (56)$$

Tomando como dato de entrada la capacidad de la bomba (Q_b) en [l min^{-1}] elegimos de catálogos existentes (SIEMENS, EVANS) la potencia eléctrica de la bomba (P_B) en [kW]. De otra forma podemos calcular la potencia de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$P_B = \frac{Q_b * H_b * \rho_{\text{Agua}} * g}{746 * \eta_b * \eta_m} \quad (57)$$

Dónde:

H_b = Altura de bombeo desde la bomba a la entrada del muro húmedo [m].

Así que la potencia total del sistema de enfriamiento (P_{SE}) en [kW] por muro húmedo se obtiene de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$P_{SE} = P_{t,ext} + P_B \quad (58)$$

El tiempo de trabajo de la bomba y de los extractores es el mismo ya que operan varias veces al día por cortos ciclos de tiempo.

3.2.4. Ventilación natural y forzada

En general, para cualquier proceso energético, el consumo de energía se obtiene como el producto de la potencia requerida por el tiempo durante el cual



actúa dicha potencia. El consumo de energía del sistema de ventilación (E_{C-SV}) natural y forzada en [kWh] se calcula con la ecuación siguiente:

$$E_{C-SV} = E_{C-SVn} + E_{C-SVf} \quad (59)$$

Dónde:

E_{C-SVn} = Consumo de energía del sistema de ventilación natural [kWh].

E_{C-SVf} = Consumo de energía del sistema de ventilación forzada [kWh].

O bien:

$$E_{C-SV} = [P_{V,nat} * t_{trab-n}] + [P_{V,forz} * t_{trab-f}] \quad (60)$$

Dónde:

t_{trab-n} = Tiempo de trabajo del sistema de ventilación natural [h].

t_{trab-f} = Tiempo de trabajo del sistema de ventilación forzada [h].

Depende de los factores climatológicos del sitio de instalación del invernadero. Generalmente la ventilación forzada tiene su aplicación en los casos en que la ventilación natural sea insuficiente. En invernaderos del campo experimental la Ceron de la UACH durante el verano el sistema de ventilación (ventiladores desestratificadores) se enciende de 3 a 4 horas (por intervalos de tiempo de acuerdo con la programación del equipo) durante el día iniciando a partir de 12 o 1 pm hasta las 4 o 5 de la tarde.

$P_{V,nat}$ = Potencia del sistema de ventilación natural [kW].

$P_{V,forz}$ = Potencia del sistema de ventilación forzada [kW].

Para el cálculo de la potencia en ventilación natural (P_{SVn}) debemos tomar en cuenta el tipo de invernadero que se instalara ya que así conoceremos la cantidad de ventanas laterales y cenitales que tendremos y por lo tanto la



cantidad y potencia de motorreductores que abrirán y cerraran las cortinas de las ventanas (Contreras, 2012).

La potencia de los motorreductores se obtiene en función de la longitud de la ventana (L_{vent}). Elegimos de un catálogo (AGROCOMPONENTES) el Motorreductor que sea capaz de enrollar una ventana de longitud del largo y/o ancho del invernadero y por lo tanto este catálogo nos brinda la potencia del motor que elegimos como una de sus características.

La potencia total en ventilación natural ($P_{V,nat}$) en [kW] la podemos calcular con la ecuación siguiente:

$$P_{V,nat} = 2P_{M,lat-L} + 2P_{M,lat-A} + (N_{cen} * P_{M,cen}) \quad (61)$$

Dónde:

$P_{M,lat-L}$ = Potencia del motor en ventana lateral a lo largo del invernadero [kW],

$P_{M,lat-A}$ = Potencia del motor en ventana lateral a lo ancho del invernadero [kW],

N_{cen} = Número de ventanas cenitales

$P_{M,cen}$ = Potencia del motor en ventana cenital [kW].

El tiempo de trabajo del sistema de ventilación natural (t_{trab-n}) en [h] es el tiempo que tardan los motoredutores en enrollar y desenrollar las cortinas del invernadero en el eje del mismo, por lo cual dicho tiempo se puede calcular de la manera siguiente:

Se calculan las revoluciones que dará el eje (θ_{eje}) en [Rad] para enrollar la cortina con la ecuación siguiente:



$$\theta_{eje} = \frac{H_{pinv}}{R_{eje}} \quad (62)$$

Dónde:

H_{pinv} = Altura de las paredes del invernadero [m].

R_{eje} = Radio del eje del motoreductor [m].

Como $1 Rev = 360^\circ = 2\pi Rad$ entonces el número de vueltas que dará el eje (N_{rev}) para enrollar o desenrollar la cortina está dado por:

$$N_{rev} = \frac{\theta_{eje} * 1 Rev}{2\pi Rad} \quad (63)$$

Es importante que los motorreductores de las cortinas tengan las mismas características en cuanto al número de rpm del eje además de que todos los están sincronizados. El tiempo trabajo [h] del sistema de ventilación natural se calcula con la ecuación siguiente:

$$t_{trab-n} = 2 * \frac{N_{rev}}{N_{rev-m}} \quad (64)$$

Dónde:

N_{rev} = Número de vueltas que dará el eje para enrollar las cortinas [rev].

N_{rev-m} = Número de revoluciones del motoreductor [$r h^{-1}$].

Para que un invernadero este bien ventilado y los cultivos se desarrollen mejor debe haber una renovación de aire horaria de 60 renovaciones por minuto. Según Arnijas (1991) y Montero (1992), citados por Contreras y Sánchez (2012) si el invernadero cuenta con un 10 % de ventilación lateral y más un 5% cenital la tasa de renovaciones horaria es de 25 a 35. Por lo anterior el sistema de



ventilación forzado (con ventiladores) deberá suministrar las renovaciones de aire faltantes al interior del invernadero.

Para calcular el caudal de aire (Q_v) en $[m^3 h^{-1}]$ necesario para ventilar el invernadero y alcanzar las 60 renovaciones por minuto utilizamos la ecuación siguiente:

$$Q_v = [(A_{inv} * H_{pinv}) + V_{tecin}] * N_{ren} \quad (65)$$

ó bien:

$$Q_v = [A_{frente} * L_{inv}] * N_{ren} \quad (66)$$

Dónde:

A_{inv} = Área del invernadero $[m^2]$.

V_{tecin} = Volumen del techo del invernadero $[m^3]$.

N_{ren} = Numero de renovaciones horarias de aire faltantes $[h^{-1}]$.

A_{frente} = Área del frente del invernadero $[m^2]$.

L_{inv} = Largo del invernadero $[m]$.

Una vez que obtenemos el caudal de aire (Q_v) en $[m^3 h^{-1}]$ necesario para ventilar el invernadero es necesario recurrir a los catálogos de fabricantes de ventiladores existentes (MUNTERS SIAL, SIEMENS, AIRTEC, S & P, WIND MASTER, ULMA), los cuales pueden ser un conjunto de tablas para seleccionar el ventilador que nos asegure una capacidad menor o igual a la calculada y por lo tanto de las características del ventilador obtenemos su potencia eléctrica (P_v) en $[kW]$.



Lo siguiente es calcular el número de ventiladores (N_{vent}) como el seleccionado para suministrar el caudal (Q_v) calculado anteriormente en [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]:

$$N_{vent} = \frac{Q_v}{Q_{vent}} \quad (67)$$

Para calcular la potencia total en ventilación forzada ($P_{V,forz}$) en [kW] utilizamos la ecuación que se muestra a continuación:

$$P_{V,forz} = N_{vent} * P_v \quad (68)$$

3.2.5. Horas de uso de los sistemas de calefacción, ventilación forzada y enfriamiento

Para calcular el tiempo de uso de los sistemas de calefacción, ventilación y enfriamiento se propone la siguiente metodología:

Se deben obtener la temperatura máxima promedio anual y mínima mensual anual que se presentan en el lugar a instalar el invernadero de acuerdo con los datos climatológicos que se presentan por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

De acuerdo con las estaciones automáticas del SMN (<http://smn.cna.gob.mx/emas/>) se obtiene la hora del día en la cual se presentan tanto la temperatura máxima como la mínima.



Estación: TM32 - CD. VICTORIA, último dato: 26/01/2015 15:50 TUC
Temperatura en las últimas 24 horas (cada 10 minutos)

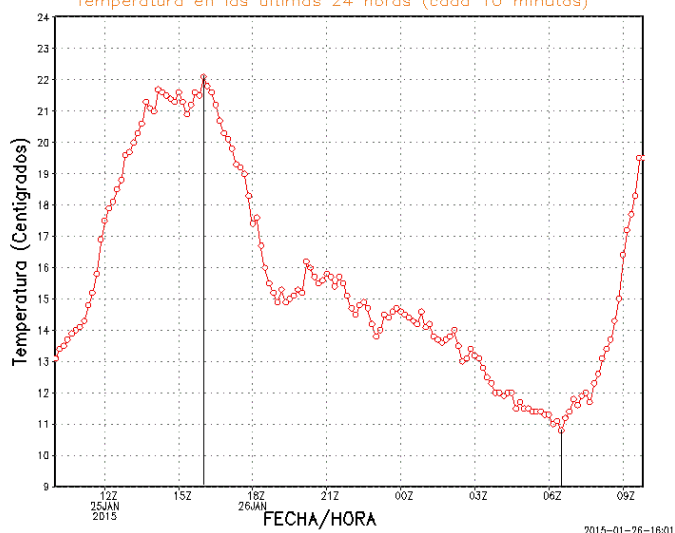


Figura 3. Comportamiento horario de la temperatura. Estación Meteorológica de Cd. Victoria Tamaulipas.

Con los datos de temperatura máxima promedio anual y mínima mensual anual, y la hora en cual estas se presentan se grafica el comportamiento de la temperatura durante todo el día (24 horas).

De acuerdo con Matallana y Montero (1988) la temperatura en el interior del invernadero es 5° C mayor a la del exterior durante el día si este se encuentra bien ventilado (es decir que cuente con ventilación lateral y cenital completamente abiertas) y durante la noche si este se encuentra cerrado herméticamente.

De este modo se puede obtener dichas temperaturas dentro del invernadero y posteriormente graficar su comportamiento durante todo el día. Asimismo de acuerdo con los requerimientos de temperaturas del cultivo a establecer en el

invernadero se ubica las temperaturas mínima y máxima que puede soportar el cultivo. Lo siguiente es ubicar los puntos de intersección entre la curva de temperatura del invernadero y la línea de temperaturas máxima y mínima del cultivo.

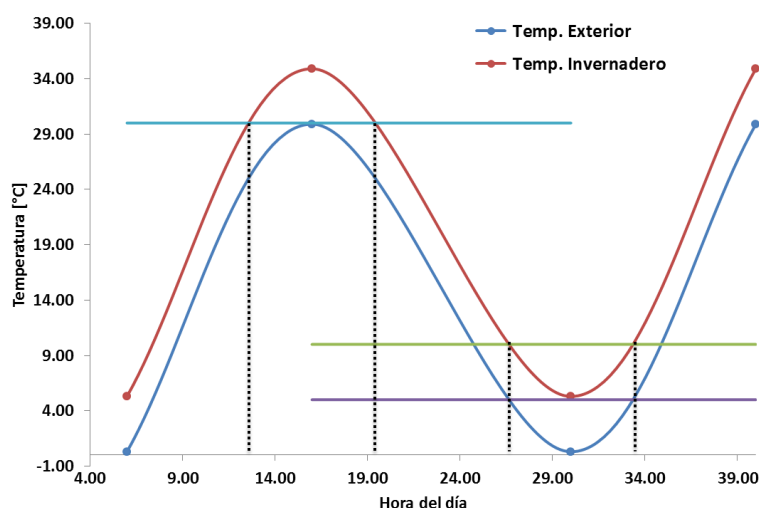


Figura 4. Horas de calefacción, ventilación y enfriamiento a suministrar de acuerdo a la temperatura que se desea mantener en el invernadero.

De acuerdo con las intersecciones podemos conocer cuántas horas debemos calentar, ventilar o enfriar el invernadero para mantener las temperaturas que soportan los cultivos.

Las temperaturas mínimas y máximas son datos disponibles en el portal del SMN y de acuerdo con estas podemos obtener el tiempo de uso de los sistemas de calefacción, ventilación y enfriamiento el cual se usa en el software para calcular el consumo energético del invernadero. Podemos concluir que el tiempo de uso de estos sistemas esta dado en función de la temperatura



mínima del sitio para la calefacción y máxima para ventilación forzada y enfriamiento. En el anexo A se presenta el tiempo de uso de estos 3 sistemas de acuerdo al estado de la república y el cultivo que se desea instalar.

Una manera más completa será obtener el comportamiento horario anual de la temperatura del sitio donde se desea instalar el invernadero durante todo el año de los datos registrados por el SMN, sin embargo como estos datos no están disponibles en la plataforma deben pedirse directamente vía e-mail al SMN así podemos ubicar de forma más precisa el día del año y la hora en el que se presentan la temperatura mínima y máxima e incluso graficar el comportamiento de la temperatura dentro del invernadero y obtener las horas de calefacción, ventilación y enfriamiento en esas mismas gráficas

3.2.6. Iluminación artificial

La iluminación artificial se utiliza principalmente para alargar las horas luz a los cultivos de flor de corte. En el caso de las hortalizas dicho sistema no se requiere.

El consumo de energía del sistema de iluminación (E_{C-SI}) en [kWh] se calcula con la ecuación siguiente:

$$E_{C-SI} = P_{SI} * t_{trab} \quad (69)$$

Dónde:

t_{trab} = Tiempo de trabajo [h]. Depende del fotoperiodo del cultivo al cual se le necesite aplicar iluminación. En el cuadro 7 se muestra el tiempo que se



requiere iluminar para diferentes especies de flores comúnmente cultivadas en invernaderos.

P_{SI} = Potencia del sistema de iluminación [kW].

Cuadro 7. Requerimientos de luz de algunas especies de flores cultivadas en invernadero.

Cultivo	Requerimiento de luz [Lux]	Nivel de iluminación (E) durante la noche [Lux]	Tiempo de iluminación durante la noche [h]
Crisantemo	75000 - 90000	200.0	3
Noche buena	26900-37660	107.6	3
Clavel	15000 - 45000	200.0	3
Rosa	100000	3000.0	3
Dalia	30000 - 50000	200.0	3

Fuente: Elaboración propia con información del VII curso de especialización y 1er diplomado en horticultura protegida – UACH, 2012; InfoAgro y TRADECORP.

La potencia del sistema (P_{SI}) en [kW] se obtiene de acuerdo con el número de lámparas o focos que nos aportan la cantidad de luz que necesitamos y la podemos calcular con la ecuación siguiente:

$$P_{SI} = N_l * P_l \quad (70)$$

Dónde:

N_l = Número de lámparas o focos.

P_l = Potencia de la lámpara [kW].

Para calcular el número de lámparas necesarias para suministrar la cantidad de luz necesaria en interiores de acuerdo con los requerimientos tomamos la



metodología presentada por De Francisco *et al.* (1993) y García y Boix (2014). Es necesario recurrir a los catálogos de fabricantes de luminarias existentes (Philips) para seleccionar la luminaria y por lo tanto de sus características obtenemos su potencia eléctrica (P_l) en [kW] y su flujo luminoso (ϕ_L) en [luxes o lúmenes].

El número de lámparas (N_l) se obtiene con la ecuación siguiente:

$$N = \frac{\phi_T}{\phi_L} \quad (71)$$

Dónde:

ϕ_T = Flujo luminoso total necesario [Luxes o Lúmenes].

ϕ_L = Flujo luminoso de una lámpara [Luxes o Lúmenes].

El flujo luminoso total necesario (ϕ_T) en [Luxes ó lúmenes] se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\phi_T = \frac{E * A_{inv}}{\eta * f_m} \quad (72)$$

Dónde:

E = Nivel de iluminación que requiere el cultivo durante la noche [Luxes o Lúmenes]. En el cuadro 7 se presentan valores para algunos de los cultivos de flor bajo invernadero.

A_{inv} = Área del invernadero [m^2].

η = Factor de utilización.

f_m = Factor de mantenimiento.

El factor de utilización de la lámpara (η) se determina a partir de los factores de reflexión del techo y de la pared del invernadero y del factor del local. Estos valores se encuentran tabulados y los suministran los fabricantes para cada tipo de luminaria como el caso del cuadro 8. Si no se pueden obtener los factores por lectura directa será necesario interpolar.

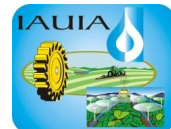
Cuadro 8. Factor de utilización de lámpara.

Tipo de aparato de alumbrado	Factor k del local	FACTOR DE UTILIZACION (η)								
		FACTOR DE REFLEXION DEL TECHO								
		0.7			0.5			0.3		
		FACTOR DE REFLEXION DE LAS PAREDES								
		0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1
	1.0	0.28	0.22	0.16	0.25	0.22	0.16	0.26	0.22	0.16
	1.2	0.31	0.27	0.20	0.30	0.27	0.20	0.30	0.27	0.20
	1.5	0.39	0.33	0.26	0.36	0.33	0.26	0.36	0.33	0.26
	2	0.45	0.40	0.35	0.44	0.40	0.35	0.44	0.40	0.35
	2.5	0.52	0.46	0.41	0.49	0.46	0.41	0.49	0.46	0.41
	3	0.54	0.50	0.45	0.53	0.50	0.45	0.53	0.50	0.45
	4	0.61	0.56	0.52	0.59	0.56	0.52	0.59	0.56	0.52
	5	0.63	0.60	0.56	0.63	0.60	0.56	0.62	0.6	0.56
	6	0.68	0.63	0.60	0.66	0.63	0.60	0.65	0.63	0.60
	8	0.71	0.67	0.64	0.69	0.67	0.64	0.68	0.67	0.64
	10	0.72	0.70	0.67	0.71	0.70	0.67	0.71	0.70	0.67

Los coeficientes de reflexión (ρ) del techo, paredes y suelo del invernadero se deben elegir de acuerdo con el cuadro 9.

Cuadro 9. Factor de reflexión.

	Color	ρ
Techo	Blanco o muy claro	0.7
	claro	0.5
	medio	0.3
	claro	0.5
Paredes	medio	0.3
	oscuro	0.1
	claro	0.3
Suelo	oscuro	0.1



El factor de mantenimiento (f_m) de la instalación depende del grado de suciedad ambiental y la frecuencia de la limpieza del invernadero.

En el cuadro 10 se muestran los valores que este presenta:

Cuadro 10. Factor de mantenimiento de la instalación.

Ambiente	Factor de mantenimiento (f_m)
Limpio	0.8
Sucio	0.6

Como el invernadero debe mantenerse limpio podemos tomar un valor de 0.8.

El factor del local (k) se obtiene a partir de la geometría del invernadero y de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$k = \frac{A_{inv}}{h_{op} * (W_{inv} + L_{inv})} \quad (73)$$

Dónde:

h_{op} = Altura óptima entre el plano de trabajo y las luminarias [m].

Con la finalidad de conseguir la iluminación óptima del invernadero se han de fijar las luminarias a una altura determinada dependiendo de la altura del propio invernadero. Para el caso del invernadero el sistema de iluminación es directo y por lo tanto la altura óptima (h_{op}) en [m] entre el plano de trabajo y las luminarias es:

$$h_{op} = \frac{4}{5} * (h' - 0.85) \quad (74)$$

Dónde:

h' = altura del invernadero (hasta los canalones) [m].



0.85= altura recomendada al plano de trabajo (altura del suelo a la superficie de la mesa de trabajo).

Así la potencia eléctrica del sistema de iluminación (P_{SI}) en [kW] podemos obtenerla en función del área del invernadero con la ecuación siguiente:

$$P_{SI} = \frac{E * A_{inv} * P_l}{\phi_L * \eta * f_m} \quad (75)$$

3.2.7. Sombreo

El consumo de energía del sistema de sombreado (E_{C-SS}) en [kWh] se calcula con la ecuación siguiente:

$$E_{C-SS} = P_{Som} * t_{trab} \quad (76)$$

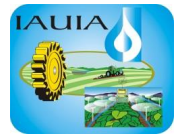
Dónde:

t_{trab} = Tiempo de trabajo [h].

P_{Som} = Potencia del sistema de sombreado [kW].

La potencia del sistema de sombreado es la potencia de los motorreductores que enrollan y desenrollan las mallas sombra y pantallas térmicas y se obtiene en función del área del invernadero (A_{inv}). Elegimos de un catálogo (AGROCOMPONENTES) el motoreductor o e que sea capaz de enrollar una malla sombra de superficie igual al invernadero o la cantidad de estos que en conjunto cubran la superficie del invernadero. De esta forma el número de motoredutores (N_M) se calcula de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$N_M = \frac{A_{inv}}{A_{pan-mo}} \quad (77)$$



Dónde:

A_{pan-mo} = Área de la pantalla que puede enrollar el motoreductor seleccionado [m^2].

El catálogo nos brinda la potencia del motor que elegimos como una de sus características. De esta manera la potencia total en el sistema de sombreo (P_{Som}) en [kW] la podemos calcular con la ecuación siguiente:

$$P_{Som} = P_M * N_M \quad (78)$$

Dónde:

P_M = Potencia del motor [kW]

N_M = Número de motores

El tiempo de trabajo del sistema de sombreo (t_{trab}) en [h] es el tiempo que tardan los motoreductores en enrollar y desenrollar la malla sombra del invernadero en el eje del mismo, por lo cual dicho tiempo se puede calcular de la manera siguiente:

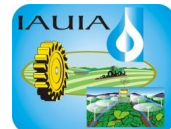
Se calculan las revoluciones que dará el eje (θ_{eje}) en [Rad] para enrollar la cortina con la ecuación siguiente:

$$\theta_{eje} = \frac{L_{malla}}{R_{eje}} \quad (79)$$

Dónde:

L_{malla} = Largo del invernadero [m].

R_{eje} = Radio del eje del motoreductor [m].



Como $1 Rev = 360^\circ = 2\pi Rad$ entonces el número de vueltas que dará el eje (N_{rev}) para enrollar o desenrollar la malla está dado por:

$$N_{rev} = \frac{\theta_{eje} * 1 Rev}{2\pi Rad} \quad (80)$$

Es importante que los motorreductores de las mallas tengan las mismas características en cuanto al número de rpm del eje además de que todos los están sincronizados. El tiempo trabajo [h] del sistema de sombreo se calcula con la ecuación siguiente:

$$t_{trab-n} = 2 * \frac{N_{rev}}{N_{rev-m}} \quad (81)$$

Dónde:

N_{rev} = Número de vueltas que dará el eje para enrollar las cortinas [rev].

N_{rev-m} = Número de revoluciones por hora del motoreductor [$r h^{-1}$].

Una vez que obtenida la potencia y el consumo energético para diferentes tiempos de uso de los sistemas por superficie del invernadero con las metodologías utilizadas se realizó el cálculo de los costos del SFV que suministra la energía necesaria. Para esto se utilizó el software de selección de SFV's para invernadero desarrollado en el posgrado IAUIA. Con los datos obtenidos se elaboraron catálogos de selección para el desarrollo del software.

3.3. Elaboración de las diferentes bases de datos o catálogos.

Las bases de datos son herramientas donde se organiza y almacena la información. Como se ha mencionado estas son de gran importancia para su aplicación en metodologías y el desarrollo de algoritmos y softwares por lo cual



deben contener información útil, certera y actualizada.

Para la realización de la base de datos de las condiciones geográficas y meteorológicas de las ciudades se investigó y analizó cada estado y sus formas de división político-administrativa (regiones, distritos y/o municipios). Se realizó la división por cabecera municipal para cada uno de los estados de la república que cuentan con un número de municipios menor o igual a 10, sin embargo, algunos estados cuentan con un número mayor de municipios por lo cual para estos se realizó una caracterización por regiones y se eligió la ciudad más poblada y/o más importante política o económicamente dentro de la región para incluirla en la base de datos y poder coleccionar dicha información.

Una vez seleccionadas y elaborada la lista de ciudades se coleccionaron los datos necesarios para cada una de ellas de acuerdo con la información que presenta el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y que obtiene a través de las diferentes estaciones meteorológicas a lo largo y ancho del país. Se tomó en cuenta información de las normales climatológicas del periodo de 1951 al 2010. Es importante mencionar que el SMN es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país. También realiza el acopio de la información climatológica nacional por lo cual cuenta con una red de observatorios, estaciones de radiosondeo, radares meteorológicos y estaciones receptoras de imágenes satelitales (SMN, 2014).

Para realizar una base de datos de los cultivos principales que se establecen en



invernadero y sus condiciones climáticas favorables para su desarrollo se recopiló información de distintas fuentes de literatura nacional e internacional sobre cultivos bajo invernadero tales como Bastida (2006), FAO (2002), FAO (2006), Jara (1998), Tradecorp (2014).

Es necesario contar con una base de datos de equipos fotovoltaicos la cual sea diversa y actualizada. Para esto se realizó una búsqueda de los fabricantes y distribuidores certificados de estos componentes y se recopiló información sobre marcas, modelos, especificaciones técnicas (mecánicas y eléctricas) y costos unitarios.

Para el dimensionamiento y selección de los SFV's es imprescindible conocer el valor de la radiación solar en el sitio específico donde se elabora el proyecto. Por lo anterior fue necesario coleccionar información de recurso solar diario disponible en cada ciudad del catálogo y agregarla a este. Para ello se utilizó la herramienta Surface Meteorology and Solar Energy: RETScreen desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) el cual genera una base de datos para cada sitio de acuerdo con su ubicación geográfica (latitud, longitud y altitud).

Surface Meteorology and Solar Energy: RETScreen es una página Web libre publicada por la NASA en la que encontramos una gran base de datos de parámetros meteorológicos y de radiación solar. La información ofrecida se



basa en mediciones realizadas durante más de 22 años sobre diferentes regiones del planeta a partir de una red de más de 200 satélites geoestacionarios (NASA *et al.*, 2014) y se presenta como se muestra en la figura 5.

Latitude 19.52 / Longitude -98.87 was chosen.

	Unit	Climate data location
Latitude	°N	19.52
Longitude	°E	-98.87
Elevation	m	1795
Heating design temperature	°C	6.22
Cooling design temperature	°C	25.52
Earth temperature amplitude	°C	15.67
Frost days at site	day	0

Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days	Cooling degree-days
	°C	%	kWh/m ² /d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
January	12.4	68.4%	4.73	82.5	3.1	14.2	163	93
February	14.1	61.2%	5.50	82.4	3.3	16.6	105	127
March	16.7	52.1%	6.20	82.3	3.6	20.3	55	214
April	19.0	51.7%	6.21	82.3	3.5	23.1	19	271
May	19.7	58.9%	6.16	82.3	3.1	23.5	7	305
June	19.0	70.4%	5.64	82.3	2.9	21.6	5	275
July	18.3	69.5%	5.67	82.5	2.8	20.8	11	259
August	18.3	69.5%	5.57	82.5	2.6	20.8	6	264
September	17.6	74.8%	4.95	82.3	2.5	19.8	18	237
October	16.0	75.0%	4.94	82.4	2.7	17.9	59	194
November	14.3	73.6%	4.79	82.5	2.9	16.0	101	140
December	12.6	72.5%	4.49	82.5	3.0	14.1	156	100
Annual	16.5	66.5%	5.40	82.4	3.0	19.1	705	2479
Measured at (m)					10.0	0.0		

Figura 5. Datos presentados por la NASA para el municipio de Texcoco de Mora, México.

Para obtener la información de recurso solar diario con el que se cuenta en cada sitio es necesario colocar su ubicación (latitud y longitud). Se debe tener en cuenta que los valores de latitud sur (que se encuentran al sur del Ecuador) y longitud oeste (se encuentran al oriente del meridiano de Greenwich) se colocan como negativos. Una vez cargados los datos el software devuelve la información que incluye datos climáticos promedio del sitio y datos mensuales y anuales de temperatura, humedad relativa, temperatura de la tierra, velocidad del viento y por supuesto la radiación solar diaria expresada en kWh m⁻² por



día. Una vez obtenido el dato de recurso solar este se comparó y validó con los mapas de irradiación de la República Mexicana.

3.4. Metodología de cálculo y dimensionamiento de los subsistemas del sistema fotovoltaico

Se realizó una investigación y análisis de las metodologías de cálculo y selección de sistemas fotovoltaicos presentados por diversos autores. El dimensionado de un sistema fotovoltaico se refiere al proceso de cálculo y selección de los distintos componentes y subsistemas que constituyen una instalación fotovoltaica. El proceso de diseño y dimensionado de SFV's debe seguir estrictamente la normatividad establecida por la NOM-001-SEDE-2012 de instalaciones eléctricas.

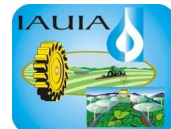
Sin embargo un dimensionado preciso es un proceso relativamente complejo ya que hay varios parámetros a considerar como la meteorología del lugar y muchas interacciones entre los componentes y las cargas.

Lo primero es determinar el consumo energético (E_{cons}) del conjunto de sistemas del invernadero en [kWh día⁻¹] con la ecuación siguiente:

$$E_{cons} = \sum E_{C-S Inve} \quad (82)$$

Dónde:

$E_{C-S Inve}$ = Consumo de energía de cada uno de los sistemas instalados en el invernadero [kWh día⁻¹].



Una vez estimado el consumo energético diario de los sistemas del invernadero el siguiente paso es calcular las necesidades totales del consumidor (ET_{cons}) en [kWh día⁻¹] con la ecuación siguiente:

$$ET_{cons} = (1 + F_s) * E_{cons} \quad (83)$$

Dónde:

F_s = Factor de seguridad por perdidas e imprevistos (5 – 10 %).

3.4.1. Generación

Para el dimensionado del subsistema de generación es imprescindible elegir el modelo de panel fotovoltaico comercial a utilizar o por lo menos algunas de las características eléctricas de estos.

De acuerdo con Sánchez (2014) se determina el número de módulos fotovoltaicos con la siguiente ecuación:

$$N_{mod} = \frac{(1 + F_s) * ET_{cons}}{P_{mod} * R_T * HSP * \eta_W * \eta_C * \eta_I * \eta_{CB}} \quad (84)$$

Dónde:

F_s = Factor de sobredimensionamiento (5 – 10 %).

P_{mod} = Potencia del módulo FV [kW].

R_T = Rendimiento térmico del módulo (85 - 90 %).

HSP = Recurso solar pico [HSP].

η_W = Eficiencia en las líneas de transmisión.

η_C = Eficiencia en el controlador.

η_I = Eficiencia en el inversor.



η_{CB} = Eficiencia Coulómbica en baterías.

Es importante mencionar que si el número de módulos FV obtenido no es entero, este se debe ajustar al número inmediatamente superior.

A continuación se debe calcular la conexión de los módulos es decir la configuración que el subsistema de generación tendrá.

El número de módulos conectados en serie ($N_{mod,s}$) de acuerdo con Ibáñez *et al.* (2004) se calcula de la siguiente manera:

$$N_{mod,s} = \frac{V_{SFV}}{V_{mod}} \quad (85)$$

Dónde:

V_{SFV} = Tensión de trabajo del SFV [V].

V_{mod} = Tensión del módulo FV [V].

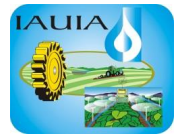
El número de módulos conectados en paralelo ($N_{mod,p}$) está dado por la ecuación siguiente:

$$N_{mod,p} = \frac{N_{mod}}{N_{mod,s}} \quad (86)$$

Si el número de módulos FV conectados en paralelo obtenido no es entero, este se debe ajustar al número inmediatamente superior.

De esta manera, el número total de módulos FV (N_{mod}) se puede comprobar con el producto:

$$N_{mod} = N_{mod,s} * N_{mod,p} \quad (87)$$



El costo total del arreglo fotovoltaico ($\$_{ArregloFV}$) se calcula con la ecuación siguiente:

$$\$_{ArregloFV} = N_{mod} * \$_{mod} \quad (88)$$

Dónde:

$\$_{mod}$ = Costo de cada módulo FV [\\$].

Una vez determinados el número de módulos, costo y su configuración se puede calcular los principales parámetros eléctricos del subsistema de generación.

La potencia pico del arreglo FV (P_{gen}) en [kW] se obtiene:

$$P_{gen} = N_{mod} * P_{mod} \quad (89)$$

Sin embargo debemos tomar en cuenta que la potencia pico que encontramos dentro de las características eléctricas de los módulos es bajo condiciones estándar, es decir, a una temperatura establecida por lo cual al incrementar la temperatura de este por la exposición al sol existe pérdida de potencia por lo que la potencia total del arreglo FV se calcula:

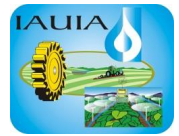
$$P_{SFV} = N_{mod} * P_{mod} * R_T \quad (90)$$

La energía total que produce el arreglo FV (E_{SFV}) en [kWh día⁻¹] se calcula:

$$E_{SFV} = P_{SFV} * HSP \quad (91)$$

La intensidad pico de salida del subsistema de generación de energía (I_{Pgen}) en [A] se obtiene:

$$I_{Pgen} = I_{Pmod} * N_{mod,p} \quad (92)$$



Dónde:

I_{pmod} = Corriente nominal del módulo FV [A].

La intensidad total de cortocircuito del arreglo (I_{SCgen}) en [A] se calcula con la ecuación siguiente:

$$I_{SCgen} = I_{SCmod} * N_{mod,p} \quad (93)$$

Dónde:

I_{SCmod} = Corriente de cortocircuito del módulo FV [A].

La tensión nominal del subsistema de generación de energía (V_{gen}) en [V] se calcula de la siguiente forma:

$$V_{gen} = V_{mod} * N_{mod,s} \quad (94)$$

La tensión pico del subsistema (V_{Pgen}) en [V]:

$$V_{Pgen} = V_{pmod} * N_{mod,s} \quad (95)$$

Dónde:

V_{pmod} = Tensión pico del módulo FV [V].

Por último la tensión total en circuito abierto del subsistema (V_{OCgen}) en [V] la podemos calcular con la ecuación siguiente:

$$V_{OCgen} = V_{OCmod} * N_{mod,s} \quad (96)$$

Dónde:

V_{OCmod} = Tensión de circuito abierto del módulo FV [V].

3.4.2. Acumulación

La seguridad global de una instalación FV depende en gran medida de un buen funcionamiento del subsistema de acumulación de energía, además de ser una



gran parte de la inversión por lo cual se debe prestar atención y realizar un buen dimensionado.

Es importante elegir el modelo de batería o acumulador comercial a utilizar o por lo menos algunas de las características eléctricas de estos.

De acuerdo con Ibáñez *et al.* (2004) la metodología para dimensionar el sistema de acumulación inicia con el cálculo de la energía que almacena una batería (E_{bat}) en [kWh] con la ecuación siguiente:

$$E_{bat} = C'_{bat} * V_{bat} \quad (97)$$

Dónde:

C'_{bat} = Capacidad de la batería [Ah].

V_{bat} = Voltaje de la batería [V].

La energía que deberá almacenarse en el sistema de acumulación (E_{acu}) en [kWh] se calcula con la ecuación siguiente:

$$E_{acu} = \frac{F_S * [N_D * ET_{cons}]}{P_{Dmax}} \quad (98)$$

Dónde:

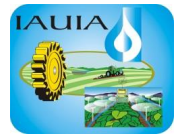
F_S = Factor de seguridad por imprevistos (5 – 10).

N_D = Número de días de autonomía (Normalmente se recomiendan 3 días como mínimo).

P_{Dmax} = Profundidad máxima de descarga.

Por lo tanto la capacidad necesaria del sistema de acumulación (C'_{Tacu}) en [Ah] viene dada por la ecuación siguiente:

$$C'_{Tacu} = \frac{E_{acu}}{V_{Tacu}} \quad (99)$$



Dónde:

V_{Tacu} = Tensión de trabajo del subsistema de acumulación (igual a tensión de trabajo del sistema FV) [V].

En este punto es importante verificar que la C'_{Tacu} obtenida sea superior a la mínima necesaria para que la batería no se descargue diariamente más de la profundidad de descarga diaria

Por lo tanto es necesario verificar que:

$$C'_{Tacu} \geq \frac{ET_{cons}}{P_{Ddiaria} * V_{Tacu}} \quad (100)$$

Dónde:

$P_{Ddiaria}$ = Profundidad máxima de descarga diaria de la batería

Si la condición anterior no se cumple (generalmente porque los días de autonomía son pocos) la capacidad necesaria del sistema de acumulación será:

$$C'_{Tacu} = \frac{ET_{cons}}{P_{Ddiaria} * V_{Tacu}} \quad (101)$$

De esta manera podemos calcular el número de baterías conectadas en serie ($N_{bat,s}$) a través de la ecuación siguiente:

$$N_{bat,s} = \frac{V_{Tacu}}{V_{bat}} \quad (102)$$

Y el número de baterías conectadas en paralelo ($N_{bat,p}$) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$N_{bat,p} = \frac{C'_{Tacu}}{C'_{bat}} \quad (103)$$



Si el número baterías conectadas en paralelo obtenido no es entero, este se debe ajustar al número inmediatamente superior.

Por lo tanto el número total de baterías (N_{bat}) se obtiene a través de:

$$N_{bat} = N_{bat,s} * N_{bat,p} \quad (104)$$

Una vez determinadas las características del banco de acumulación y el número de elementos acumuladores y su conexión lo siguiente es calcular el costo total del subsistema de acumulación ($\$_{sis\ acu}$) por medio de la siguiente ecuación:

$$\$_{sis\ acu} = N_{bat} * \$_{bat} \quad (105)$$

Dónde:

$\$_{bat}$ = Costo de cada batería [\$].

3.4.3. Regulación

Este subsistema se encarga de regular el flujo de electricidad de los módulos FV a las baterías y desde las baterías a las cargas receptoras. Por lo cual se debe prestar cuidado al dimensionado y este se debe realizar de acuerdo a la normatividad.

La tensión nominal de trabajo del regulador (V_{reg}) en [V] debe ser igual a:

$$V_{reg} = V_{SFV} = V_{Tacu} \quad (106)$$

Sin este subsistema debe estar diseñado para soportar aumentos de tensión por el arreglo FV en condiciones de picos. Por lo cual y de acuerdo con la NOM-001-SEDE-2012 de instalaciones eléctricas el voltaje de regulación máxima está dado por:



$$V_{regmax} = FS * V_{OCgen} \quad (107)$$

Dónde:

FS = Factor de seguridad (1.25).

La intensidad nominal del interruptor de conexión y desconexión de la corriente eléctrica desde el generador fotovoltaico hacia el subsistema de acumulación ($I_{reg\ gen-acu}$) en [A] se calcula con la ecuación siguiente:

$$I_{reg\ gen-acu} = FS * I_{SC\ gen} = FS * I_{SCmod} * N_{mod,p} \quad (108)$$

Dónde:

FS = Factor de seguridad (1.25).

De igual manera debe sobredimensionarse por seguridad de acuerdo con la NOM-001-SEDE-2012.

De esta manera el número de reguladores (N_{reg}) se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$N_{reg} = \frac{I_{reg\ gen-acu}}{I_{reg}} \quad (109)$$

Dónde:

I_{reg} = Intensidad del regulador comercial [A].

Si el número reguladores obtenido no es entero, este se debe ajustar al número inmediatamente superior. Los reguladores deben conectarse en paralelo y todos ellos deben ser del mismo tipo y tener las mismas características eléctricas.



El costo total del subsistema de regulación ($\$_{sis\ reg}$) se determina con la ecuación siguiente:

$$\$_{sis\ reg} = N_{reg} * \$_{reg} \quad (110)$$

Dónde:

$\$_{reg}$ = Costo de cada regulador [€]

3.4.4. Adaptación del suministro eléctrico

Este subsistema constituye un costo importante de la inversión inicial del SFV además de ser importante por ser el que adapta la energía que es utilizada por las cargas conectadas por lo cual es importante realizar una excelente selección y dimensionado para tener un sistema confiable.

La potencia del inversor debe cubrir las necesidades energéticas diarias, es decir que esta potencia es igual a la suma de las potencias de todos los equipos que funcionan de manera simultánea. Es recomendable un sobredimensionamiento de esta potencia del 25 % para situaciones no previstas de funcionamiento.

Por lo tanto de acuerdo con Ibáñez *et al.* (2004) y Sánchez (2014) la potencia necesaria del subsistema de adaptación o Inversor (P_{SInv}) en [kW] se calcula con la ecuación siguiente:

$$P_{SInv} = 1.25 * P_{ins} \quad (111)$$

Dónde:

P_{ins} = Potencia total instalada en el invernadero [kW].

La tensión nominal de trabajo del inversor (V_{inv}) en [V] está dado por:



$$V_{inv} = V_{SFV} \quad (112)$$

El número total de inversores (N_{inv}) se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_{inv} = \frac{P_{SInv}}{P_{Ninv}} \quad (113)$$

Dónde:

P_{Ninv} = Potencia nominal del inversor comercial [kW].

El costo total del subsistema de adaptación está dado por:

$$\$_{sis\ inv} = N_{inv} * \$_{inv} \quad (114)$$

Dónde:

$\$_{inv}$ = Costo de cada Inversor [\$].

3.4.5. Transporte de la energía

El dimensionado del sistema de cableado que constituye este subsistema debe realizarse cumpliendo con la NOM-001-SEDE-2012.

El dimensionado de los conductores de los diferentes subsistemas que constituyen un SFV, merecen tratamiento especial. En dichos subsistemas, debe prestarse especial atención a los valores de la máxima intensidad y tensión a que se verán sometidos los conductores.

La intensidad máxima suministrada por los módulos debe estar sobredimensionada respecto a la intensidad de cortocircuito, aconsejándose por la NOM-001-SEDE-2012 un sobredimensionado del 25% como mínimo. Por



consiguiente, la intensidad máxima que deben soportar los conductores que conectan los módulos FV se tomará igual a:

$$I_{con\ mod} \geq 1.25 * I_{SCmod} \quad (115)$$

De igual forma, los conductores que transportan corriente eléctrica procedente directamente de los módulos fotovoltaicos hacia los reguladores y de estos hacia el subsistema de acumulación deben admitir el paso de una intensidad ($I_{con\ gen-acu}$) en [A] como mínimo igual a:

$$I_{con\ gen-acu} \geq 1.25 * I_{SCgen} \quad (116)$$

La línea de conexión entre las baterías y el o los inversor(es) debe admitir una intensidad ($I_{con\ acu-inv}$) dada por:

$$I_{con\ acu- inv} \geq 1.25 * \left(\frac{P_{Ninv}}{V_{min-acum} * \eta_{inv}} \right) \quad (117)$$

Dónde:

$V_{min-acum}$ = Voltaje mínimo de funcionamiento del inversor [V].

η_{inv} = Eficiencia del inversor

De esta manera, una vez calculadas las intensidades máximas para cada sección, la selección del calibre de los conductores se realiza con ayuda de este y tablas proporcionadas por el fabricante.

3.5. Algoritmo de selección de sistemas fotovoltaicos para invernaderos

Para obtener un algoritmo capaz de dimensionar y seleccionar el SFV's óptimo para la aplicación a las cargas de un invernadero desde la etapa de su diseño,



es importante tener bases de datos actualizados con información precisa y certera.

Se desarrolló un algoritmo general del proceso de dimensionamiento desde la etapa de diseño del invernadero partiendo desde la selección del área y tipo del invernadero, cultivo y sistemas que se instalaran así como del lugar donde este se desea instalar.

También se desarrollaron algoritmos para el dimensionamiento y selección de cada uno de los subsistemas; generación (Módulos FV's), almacenamiento (Banco de baterías), regulación (Reguladores o controladores de carga y voltaje) y adaptación (Inversores). Se tomaron en cuenta restricciones de acoplamiento y conexión necesarias para tener una instalación confiable y un cálculo de costo lo aproximado lo más posible a la realidad. Es importante tener bases de datos de equipos fotovoltaicos certificados existentes tanto en mercado nacional como internacional.

3.6. Desarrollo del software de selección

Los diferentes catálogos con las normales meteorológicas de las ciudades, datos de cultivos, equipos fotovoltaicos y los algoritmos se utilizaron para el desarrollo del software de cálculo y selección de SFV's para invernaderos desde su etapa de diseño.



Debido a que propósito es que un productor que desea instalar un invernadero en un lugar alejado de las redes convencionales de electricidad (CFE en el caso de México) logre de una manera sencilla pero efectiva dimensionar el sistema fotovoltaico necesario para su aplicación en el invernadero y que satisfaga sus necesidades energéticas con tan solo introducir datos básicos como las dimensiones del invernadero, tipo de invernadero, lugar donde se instalara, cultivo a instalar y los sistemas con los que estará dotado el invernadero. Se realizaron bosquejos gráficos de las ventanas del software para un fácil entendimiento y que sirvieron como guía para la realización del mismo.

Así que el primer paso es calcular la potencia a instalar de cada uno de los sistemas además del tiempo de trabajo con ayuda de la metodología elaborada y de acuerdo con los parámetros de entrada antes mencionados. De esta manera el software calculara y brindara el consumo energético total del invernadero que se instalara. El usuario podrá también (si así lo requiere) configurar las horas de trabajo que su equipo deberá estar funcionando.

El dato de consumo energético obtenido servirá como dato de entrada para la aplicación de la metodología siguiente con la cual se dimensionará y seleccionara el SFV así como el costo total del equipo.

Es importante mencionar que la metodología de cálculo se desarrolló de una manera sencilla para que el software sea fácil de usar, eficaz y de ninguna manera tediosa pero si muy útil para que el usuario pueda dimensionar el sistema fotovoltaico capaz de suministrar la energía necesaria para el correcto funcionamiento del invernadero desde la etapa de su diseño.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Comparación de costos de construcción y extensión de redes eléctricas de CFE tomando en cuenta el incremento anual de las tarifas e instalación de SFV's para invernaderos

4.1.1. Costos de instalación de sistemas fotovoltaicos

Se obtuvieron los costos para diferentes consumos de energía diaria desde 0.25 hasta los 30 kWh día⁻¹, para 3 diferentes situación de recurso solar (3, 4 y 5 HSP) con varias repeticiones variando diferentes potencias y horas de trabajo de los equipos dentro del software de selección desarrollado por Romantchik *et al.* (2013). Los costos máximos corresponden a una energía calculada con una potencia grande por un tiempo de trabajo pequeño (7.50 kW * 0.033 a 4 h) mientras que los costos mínimos se calcularon con potencias pequeñas multiplicados por un tiempo grande (0.37 a 1.50 kW * 0.676 a 20 h). Los resultados se muestran en la figura 6.

Los costos resultantes contemplan en todos los casos, módulos fotovoltaicos, banco de baterías para 3 días de autonomía, controladores, inversores y mano de obra. Se puede observar que existe una ventana amplia dentro de la que pueden estar los costos de acuerdo a la configuración de potencia instalada y tiempo de trabajo que se utilice. Consumos de energía compuestos por potencias instaladas grandes y tiempos de trabajo pequeño resultan más cerca de la línea de costos de SFV's máximos debido al incremento de costo por el

inversor ya que a mayor potencia mayor es el costo y al contrario para consumos derivados de potencia pequeñas y tiempos de trabajo grandes el costo de los SFV's tiende a economizarse debido al menor costo del inversor.

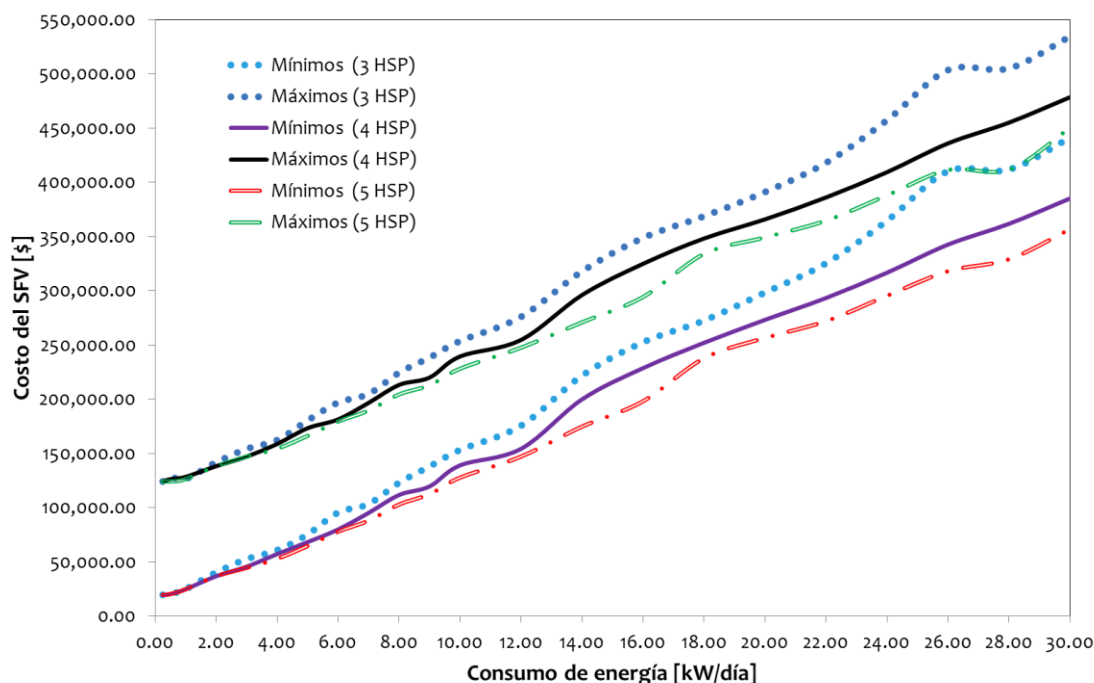


Figura 6. Costos de instalación de SFV's de acuerdo con el consumo energético.

4.1.2. Incremento anual de las tarifas de energía eléctrica durante los últimos 10 años.

En los cuadros 8 y 9 se presenta la recopilación de la tarifa anual durante los 10 años anteriores desde 2003 al 2013 de las tarifas domésticas 1 (básica, intermedia y excedente) y agrícolas sin y con subsidio (9M y 9CU, el porcentaje de aumento anual para cada uno de los años ($In_{año\ n}$) y el porcentaje promedio



de los 10 años (In_{an}) y con estos se elaboró una proyección de las tarifas aproximadas durante los siguientes años (n) hasta el 2038.

Cuadro 11. Tarifa 1 domésticas.

Básica (Rango de 1 – 75 kWh al mes).													
Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Prom.
Tarifa	0.49	0.52	0.54	0.58	0.61	0.63	0.65	0.67	0.70	0.72	0.75	0.77	
Diferencia		0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	
Incremento respecto al año ant.		5.95	5.23	6.54	5.10	3.78	3.01	3.69	3.56	3.44	3.32	3.62	4.30
Intermedia (Rango de 76 – 125 kWh al mes).													
Tarifa	0.73	0.86	0.91	0.96	1.00	1.04	1.07	1.11	1.16	1.21	1.08	0.94	
Diferencia		0.13	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	-0.13	-0.14	
Incremento respecto al año ant.		17.27	5.57	5.37	4.66	3.44	2.80	4.22	4.32	4.14	-10.5	-12.6	2.60
Excedente (desde 126 kWh al mes).													
Tarifa	1.69	1.81	1.91	2.02	2.12	2.20	2.27	2.36	2.45	2.55	2.65	2.76	
Diferencia		0.12	0.11	0.11	0.10	0.08	0.07	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	
Incremento respecto al año ant.		6.83	5.85	5.69	4.86	3.80	3.03	4.04	4.07	3.91	3.98	4.07	4.50

En el caso de las tarifas domésticas en los últimos 10 años la tarifa básica aumento en 43%, con el promedio de 4.3% por año, disminuyendo de 5.95% a 3.62%, la tarifa intermedia en los 2 últimos años bajo por lo cual al obtener el porcentaje promedio de incremento esta resulta menor que en la tarifa anterior. Sin embargo es importante mencionar que el incremento debe ser similar en ambos casos ya que el costo de la tarifa intermedia siempre será mayor al costo de la tarifa básica, por lo tanto para cálculos posteriores se toma un incremento



de 4.3%, la tarifa excedente es la máxima entre las domesticas. Mientras, según un recibo oficial de pago de un consumidor, el costo de producción de energía eléctrica en julio del 2013 es de \$ 4.11 por 1 kWh, entonces las tarifas domésticas tienen el subsidio.

Cuadro 12. Tarifas agrícolas.

9CU (con estimulo)												
Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Prom.
Tarifa	0.3	0.32	0.34	0.36	0.38	0.4	0.42	0.44	0.46	0.48	0.5	
Diferencia		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Incremento respecto al año ant.		6.67	6.25	5.88	5.56	5.26	5.00	4.76	4.55	4.35	4.17	5.24
9 y 9M. Rango 1 – 5000 kWh al mes.												
Tarifa	0.33	0.42	0.54	0.68	0.86	1.10	1.39	1.76	2.23	2.84	3.60	
Diferencia		0.09	0.11	0.14	0.18	0.23	0.29	0.37	0.47	0.60	0.76	
Incremento respecto al año ant.		28.77	26.81	26.81	26.69	26.76	26.76	26.85	26.82	26.89	26.82	27.43

En el cuadro 12 se observa que la diferencia de precio en tarifas 9CU de un año a otro tiene un valor constante de \$0.02 como incremento anual, el cual utilizaremos para cálculos posteriores.

El valor del porcentaje de 27.43% obtenido para tarifas 9 y 9M que corresponden al costo del servicio para bombeo de agua para riego agrícola es muy elevado por lo cual es importante mencionar que si esta tarifa sigue aumentando de esta manera lo que algunos productores pagaran durante los 10, 15, 20 y 25 años será un costo muy elevado por kWh de energía utilizado (39.2, 129.7, 428.4, 1415.2 pesos por 1 kWh respectivamente), lo cual implicara que optar pagar a CFE por un servicio de energía no es viable



económicamente. Se debe considerar que las políticas no deben ir encaminadas en ese sentido ya que es demasiado el aumento anual y para los cálculos se toma como máximo un incremento anual del 5 % para los cálculos de costos futuros.

4.1.3. Distancia y consumo energético mínimos justificados para la instalación de SFV's en invernaderos.

En la figura 7 se muestran los costos de construcción de redes de CFE en función de la distancia entre el poste de red más cercano y el lugar donde se requiere la instalación (línea diagonal roja CFE) (ec. 1), así como los costos de materiales, instalación y mantenimiento de SFV para situaciones de recurso solar de 3 HSP (líneas horizontales) (de software) y los costos por construcción de redes más el pago de la tarifa agrícola con estímulo (9CU) a diferentes años (líneas irregulares) (ec. 11).

Mientras que Comisión Federal de Electricidad aumenta los costos de instalación por metro a medida de que la distancia entre el poste de CFE más cercano y el invernadero aumenta (línea roja continua diagonal), los costos por instalación de SFV siempre se mantienen constantes en las diferentes distancias, solo cambia su costo con referencia a la energía que se desea consumir (líneas horizontales).

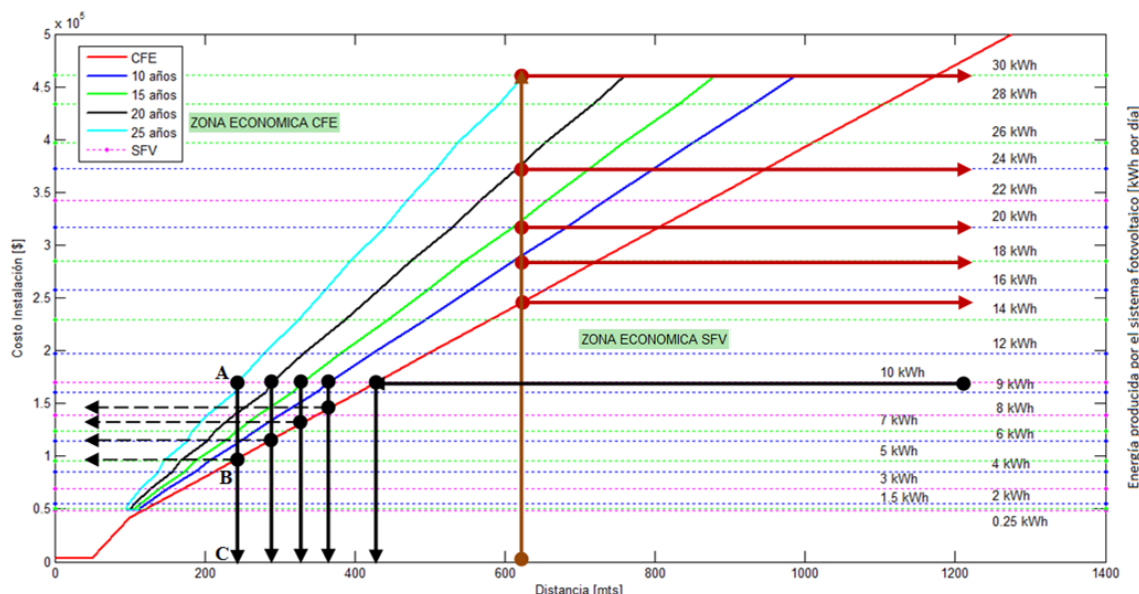


Figura 7. Comparación del costo total durante 10, 15, 20 y 25 años por redes CFE, pagando la tarifa 9CU y los costos de instalación de SFV.

También en la figura se muestran las líneas de los costos totales por construcción de red más los costos generados por el pago de la tarifa con estímulo de acuerdo a la energía de consumo durante 10, 15, 20 y 25 años (líneas continuas de color).

Por lo tanto en la figura 7 se observan dos zonas:

Zona por debajo de la curva; Esta es la zona en donde resulta más económica la instalación de SFV en el invernadero para suministrar la energía que se consume.

Zona por encima de la curva; Esta es la zona donde resulta más económica la construcción de redes de CFE para suministrar la energía.



A manera de ejemplo, si un agricultor o productor desea construir un invernadero a una distancia aproximada de 620 metros del último poste de red de CFE:

- a) El costo de instalación y conexión de la red es de \$ 257 259 pesos.
- b) Con este costo se puede instalar un SFV de consumo de 15 kWh por día, entonces si los consumos son menores es viable instalar un SFV.
- c) Para 10 años de uso se aumenta el costo del uso de energía de CFE hasta \$ 284 415.00 pesos y la instalación de SFV se justifica siempre y cuando se utilice una energía de hasta 18 kWh por día como máximo y los productores con SFV de menor consumo ya van a tener una ganancia correspondiente.
- d) Entonces, si el agricultor utilizara la energía durante 15, 20 y 25 años (lo cual es la vida útil de los SFV) la energía de consumo máxima justificable para el uso de SFV aumenta a 20, 24 y 30 kWh por día respectivamente y las ganancias de menor consumo aumentan considerablemente.

De igual manera, si el agricultor lo que desea es utilizar una energía máxima de 10 kWh al día para su invernadero:

- a) El costo será \$ 169, 563.00 pesos (línea horizontal).
- b) La distancia máxima entre el invernadero y la red de CFE considerando solamente costos de construcción y conexión es de 420 metros y al utilizar la energía durante 10, 15, 20 y 25 años esta debe ser de 365, 330, 290 y 244 metros respectivamente, considerando los gastos eléctricos con las tarifas establecidas y el aumento que estas tienen anualmente;



dicho de otra forma esta es la distancia mínima justificable para la instalación de SFV en el invernadero.

Resultados parecidos presenta Reineke (1993) que muestra que resulta más económico el uso de SFV que la extensión de redes de electricidad a partir de una distancia de 150, 1500 y 2500 m para un consumo de 0.33, 1.6 y 3.3 kWh por día respectivamente, mientras que la distancias justificables para uso de SFV obtenidas anteriormente para estos consumos diarios son menores (115, 122 y 150 m) bajo esta tarifa 9CU la cual es más económica.

De la figura 7 y de acuerdo con la ecuación siguiente se puede obtener el porcentaje de pago de esta tarifa (9CU) respecto al costo total para 10, 15, 20 y 25 años es de 14, 22, 31 y 43 % respectivamente para cualquier consumo.

$$\%_{PT} = \frac{(C_{TotTar} - C_{ConsCFE}) * 100}{C_{TotTar}} \quad (118)$$

O bien:

$$\%_{PT} = \frac{C_{n \text{ años}} * 100}{C_{TotTar}} \quad (119)$$

Dónde:

$\%_{PT}$ = Porcentaje referente solo al pago de la tarifa.

La figura anterior muestra costos de tarifas con estímulo (9CU), pero también existe el caso de los agricultores que no están inscritos a ese padrón los cuales deben de pagar la cuota de riego de media tensión sin estímulo (9M) por lo cual

en la figura 8 se muestra otra comparación de costos ahora considerando la tarifa 9M de riego sin estímulo a 10, 15, 20 y 25 años, el área bajo la curva es mayor, es decir resulta mucho más viable económicamente pagar los costos de la instalación fotovoltaica. En general podemos decir que a partir de una distancia mínima justificable de 50 m entre el poste más cercano y el invernadero la tecnología fotovoltaica es competitiva económicamente para suministrar la energía que se utiliza en este tomando en cuenta el gasto de la tarifa a 10 años.

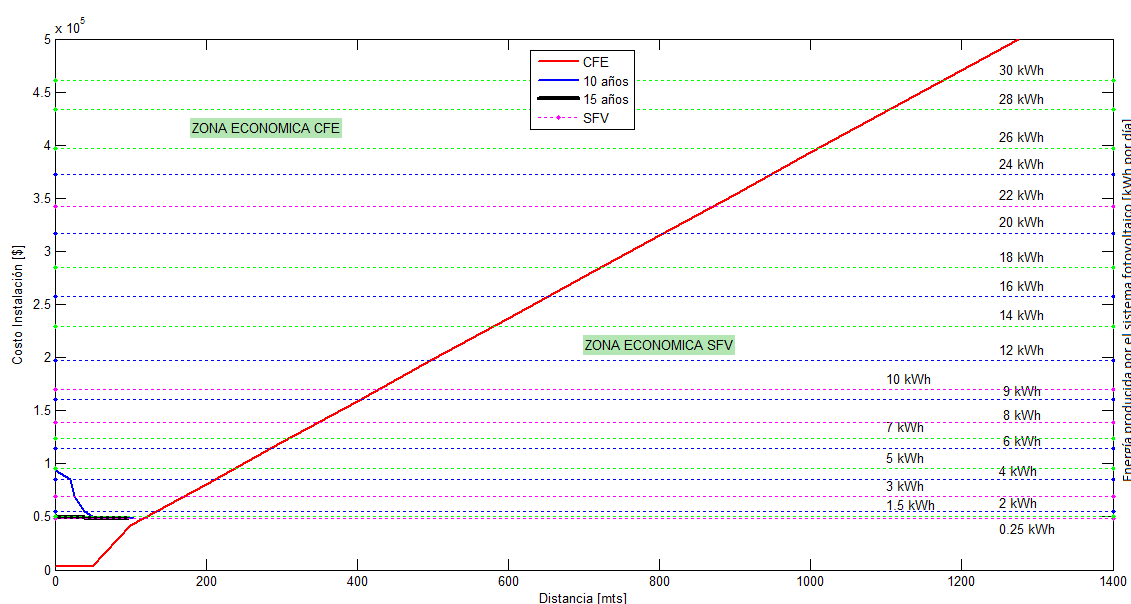


Figura 8. Comparación del costo total durante 10, 15, 20 y 25 años por redes CFE, pagando la tarifa 9M y los costos de instalación de SFV.

Si consideramos los costos que hay que pagar por la energía que se consumirá en 10 y 15 años, se puede observar en la figura 8 y 9 que ya no es económicamente viable la construcción de redes de CFE para consumo a partir de 4.8 y 1.5 kWh por día correspondientemente ya que solamente los costos

por el pago del consumo energético resultan ser mayores a los costos de instalación de SFV.

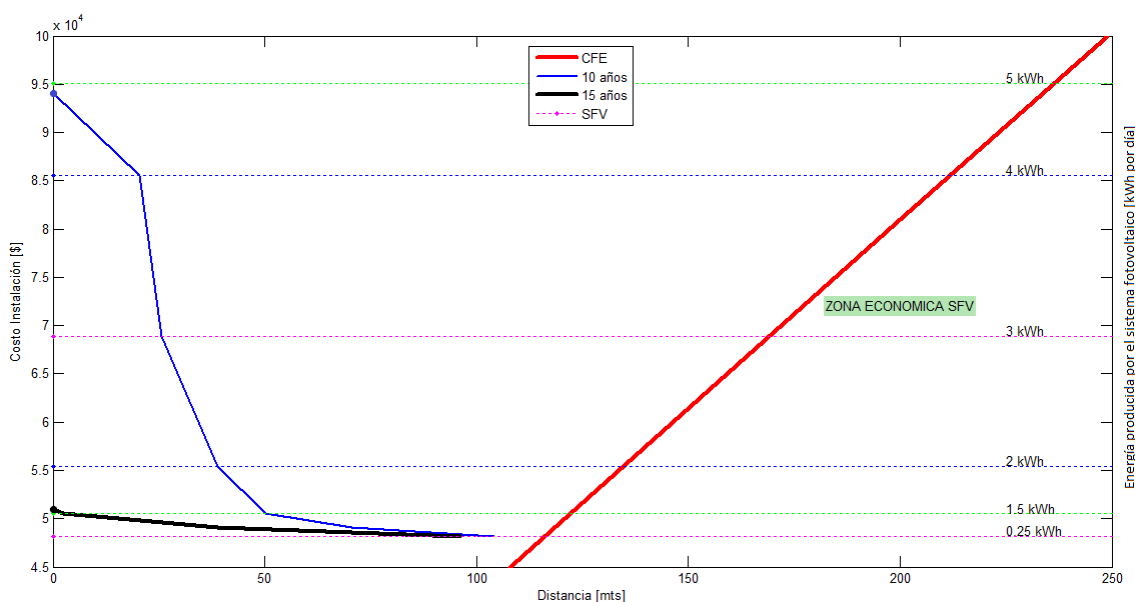


Figura 9. Detalle de figura 8

Al extender los costos a 15, 20 y 25 años los costos por el pago del consumo energético resultan ser mucho mayores a los costos de instalación de SFV y es viable instalar SFV de cualquier consumo en lugares donde ya existe la red eléctrica de CFE.

Sin tener un invernadero cerca o inclusive dentro de nuestra vivienda, en este caso podemos abastecer de la energía que utilizamos en la vivienda a nuestro invernadero y pagar las tarifas domésticas. Para este caso en la figura siguiente se muestra la comparación tomando en cuenta las tarifas de consumo doméstico (1 Básica, intermedia y excedente) a diferentes rangos.

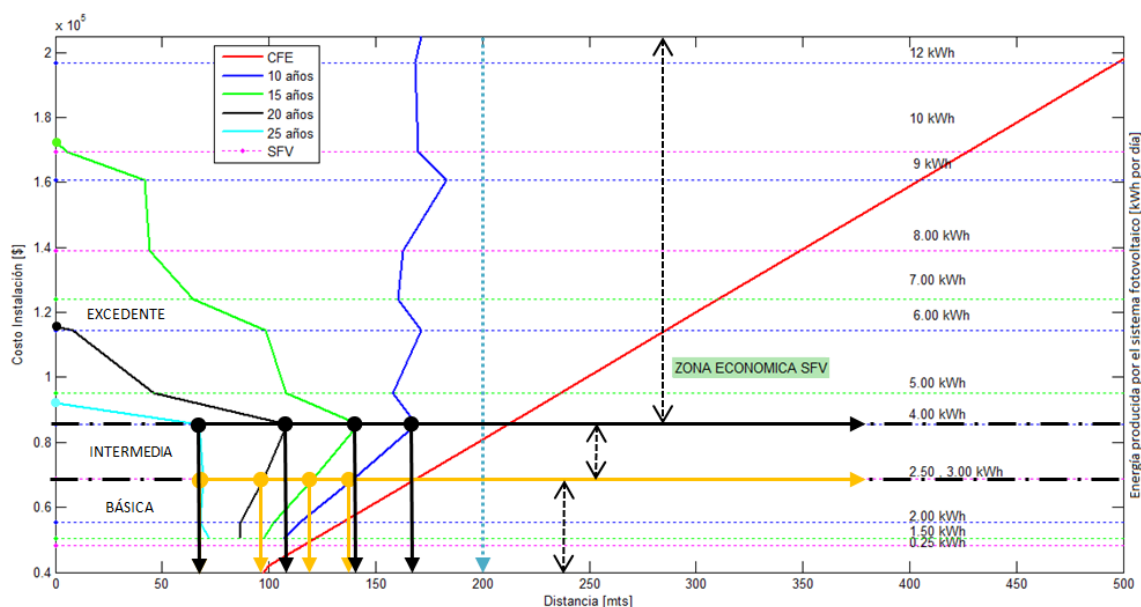


Figura 10. Comparación del costo total durante 10, 15, 20 y 25 años por redes CFE, pagando la tarifa doméstica 1 (Básica, Intermedia y Excedente) y los costos de instalación de SFV.

De acuerdo con la figura 10, si el agricultor utiliza los consumos máximos por día tenemos:

1. En la tarifa básica se puede tener un consumo máximo diario de 2.5 kWh durante 10, 15, 20 y 25 años por lo que las distancias entre la vivienda y la red de CFE mínimas de justificación para el uso de SFV es de 140, 120, 97 y 70 metros respectivamente.
2. En la tarifa intermedia se puede tener un consumo máximo diario de 4 kWh durante 10, 15, 20 y 25 años por lo tanto las distancias entre la vivienda y la red de CFE mínimas de justificación para el uso de SFV es de 169, 142, 109 y 68 metros respectivamente.



3. En la tarifa excedente se puede utilizar cualquier energia mayor a 4 kWh por dia por lo que las distancias entre la vivienda y la red de CFE minimas de justificacion para el uso de SFV es de 200 metros para 10 años. Sin embargo para el uso durante 15, 20 y 25 años podemos ver que ya no es económicamente viable la construcción de redes de CFE para consumo a partir de 10.2, 6 y 4.8 kWh por día correspondientemente ya que solamente los costos por el pago del consumo energético resultan ser mayores a los costos de instalación de SFV.

4.2. Potencia, consumo energético y costo del SFV para los diferentes sistemas a instalar en el invernadero

4.2.1. Riego por goteo

En la figura 11 se muestra el consumo energético del sistema de riego por superficie de invernadero para diferentes tiempos de trabajo así como el costo del SFV que suministra esa energía. Se realizó una comparación de los resultados de energía obtenidos con el programa y las energías de consumo en diferentes invernaderos de la zona (La Cerona, Tlapeaxco y el Ranchito).

Nota: En este trabajo “Por día” nos referimos siempre “en 24 horas”.

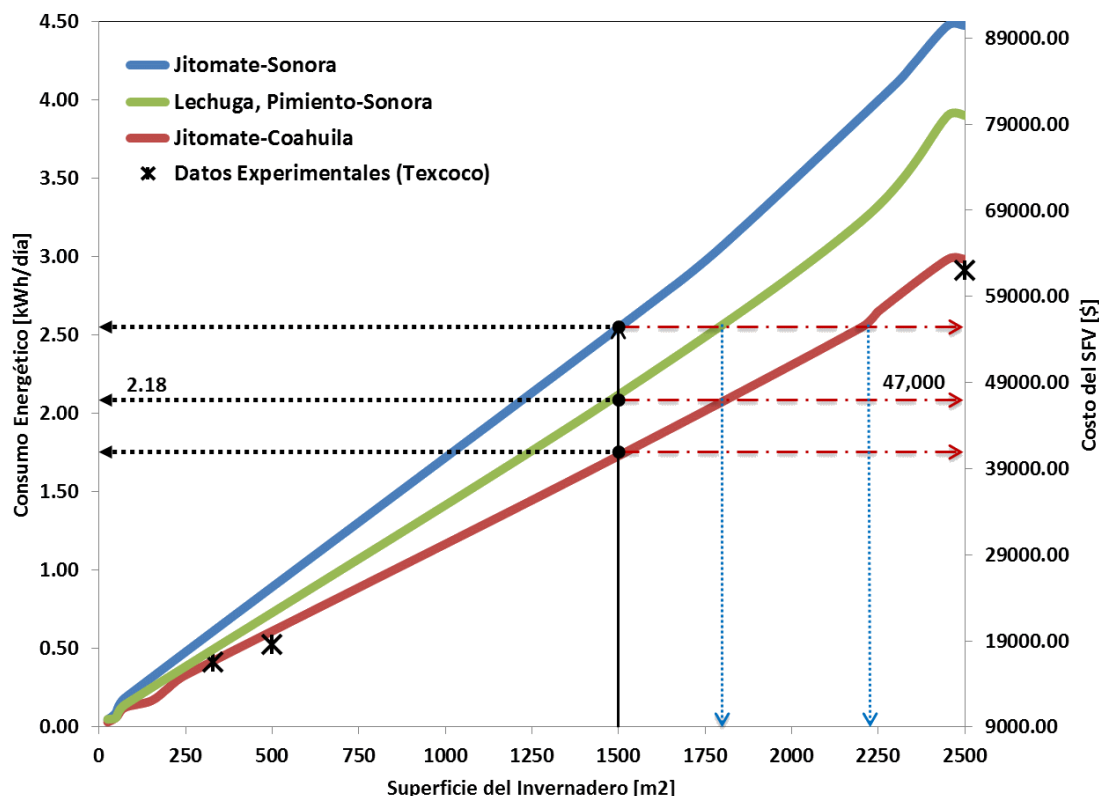


Figura 11. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de riego por superficie.

De acuerdo con la figura 11 si el agricultor desea instalar un invernadero de 1500 m² con sistema de riego:

- Para el cultivo de Jitomate en el estado de Coahuila el consumo energético será de 1.80 kWh por día mientras que el costo del SFV que abastece esta energía es de \$ 40 000 aproximadamente.
- Para cultivo de Lechuga y Pimiento en Sonora el consumo energético será de 2.18 kWh por día mientras que el costo del SFV incluyendo instalación que abastece esta energía es de \$ 47 000 aproximadamente.

c) Para el cultivo de Jitomate en Sonora el consumo energético de este será de 2.60 kWh por día mientras que el costo del SFV incluyendo instalación que abastece esta energía es de \$ 58 000 aproximadamente, mientras que este SFV también nos sirve para suministrar la energía a un invernadero de 2250 m² con sistema de riego trabajando 40 minutos.

4.2.2. Calefacción directa

En la figura 12 se muestra el consumo energético del sistema de calefacción por superficie de invernadero para diferentes tiempos de trabajo así como el costo del SFV que suministra esa energía.

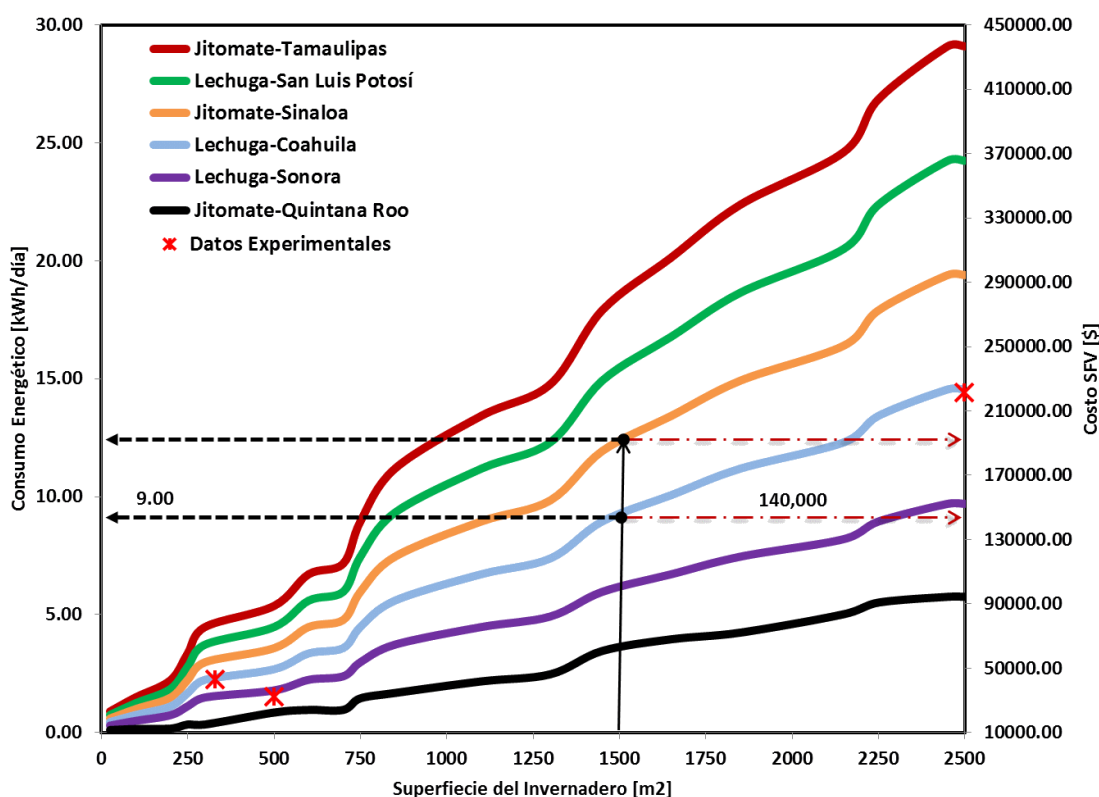


Figura 12. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de calefacción directa por superficie.



De acuerdo con la figura 12 si el agricultor desea instalar un invernadero de 1500 m² con sistema de calefacción directa (calefactores tipo centinela):

- a) Para el cultivo de Lechuga en el estado de Coahuila el consumo energético de este será de 9 kWh por día mientras que el costo del SFV que abastece esta energía es de \$ 140 000 aproximadamente.
- b) Para el cultivo de Jitomate en Sinaloa el consumo energético de este será de 13 kWh por día mientras que el costo del SFV incluyendo instalación que abastece esta energía es de \$ 200 000 aproximadamente, mientras que este SFV también nos sirve para suministrar la energía a un invernadero de 2200 m² con sistema de calefacción para el cultivo de Lechuga en Coahuila.

4.2.3. Enfriamiento con Muro Húmedo

En la figura 13 se muestra el consumo energético del sistema de enfriamiento por superficie de invernadero para diferentes tiempos de trabajo así como el costo del SFV que suministra esa energía.

De acuerdo con la figura 13 si el agricultor desea instalar un invernadero de 1500 m² con sistema de enfriamiento (Muro húmedo):

- a) En el estado de Durango el consumo energético de este será de 30 kWh aproximadamente por día mientras que el costo del SFV que abastece esta energía es de \$ 420 000 aproximadamente.

b) En el estado de Querétaro el consumo energético de este será de 39 kWh por día mientras que el costo del SFV incluyendo instalación que abastece esta energía es de \$ 600 000 aproximadamente, mientras que este SFV también nos sirve para suministrar la energía a un invernadero de 2500 m² con sistema de enfriamiento en Durango.

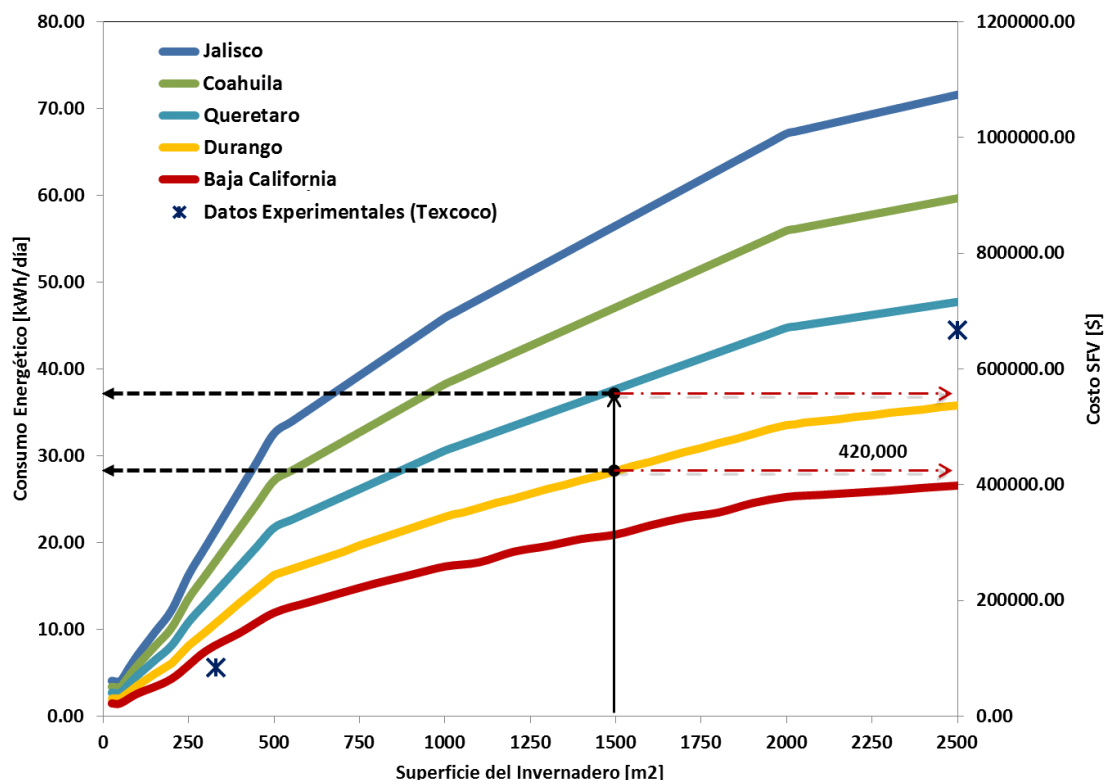


Figura 13. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de enfriamiento por superficie.

4.2.4. Ventilación natural y forzada

En la figura 14 se muestra el consumo energético del sistema de ventilación (natural y forzada) por superficie de invernadero para diferentes tiempos de trabajo así como el costo del SFV que suministra esa energía.

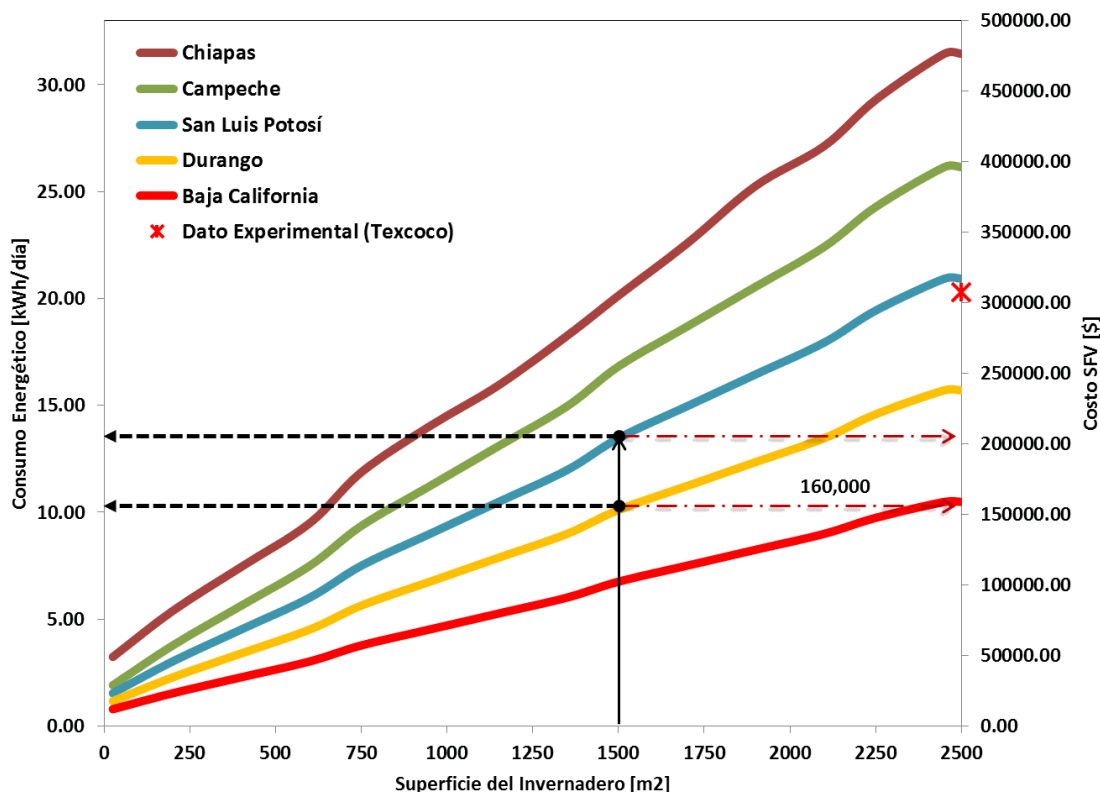


Figura 14. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de ventilación por superficie.

De acuerdo con la figura 14 si el agricultor desea instalar un invernadero de 1500 m² con sistema de ventilación (Natural y Forzada):

- En el estado de Durango el consumo energético de este será de 10 kWh por día mientras que el costo del SFV que abastece esta energía es de \$ 160 000 aproximadamente.
- En San Luis Potosí el consumo energético de este será de 14 kWh por día mientras que el costo del SFV incluyendo instalación que abastece esta energía es de \$ 210 000 aproximadamente, mientras que este SFV

también nos sirve para suministrar la energía a un invernadero de 2200 m² con sistema de ventilación en Durango.

4.2.5. Iluminación artificial

En la figura 15 se muestra el consumo energético del sistema de iluminación artificial por superficie de invernadero para diferentes tiempos de trabajo así como el costo del SFV que suministra esa energía.

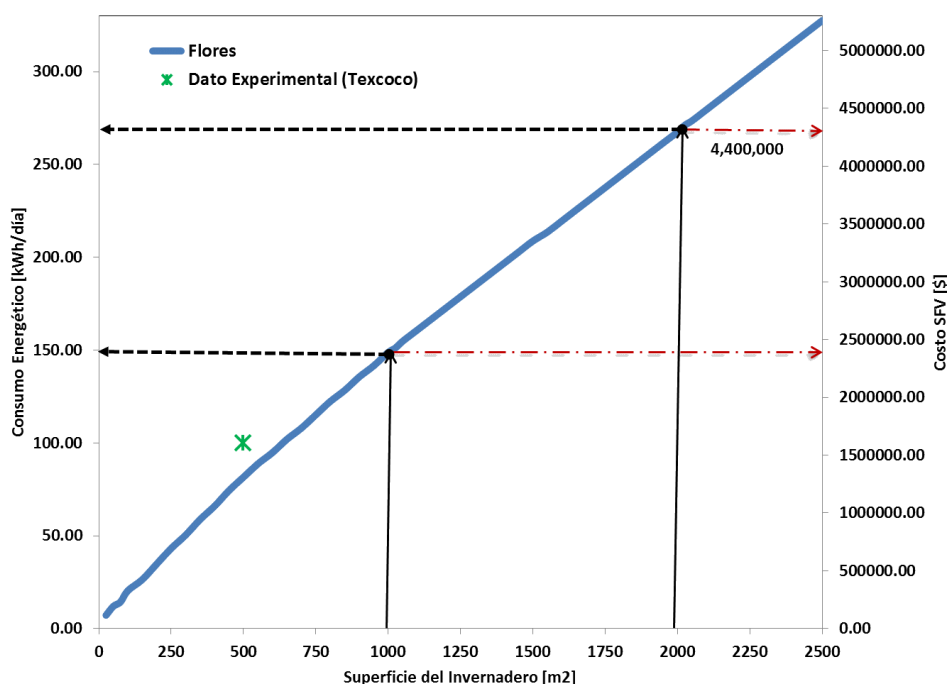


Figura 15. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de iluminación por superficie.

De acuerdo con la figura 15:

- Si el agricultor desea instalar un invernadero de 1000 m² con sistema de iluminación artificial para el cultivo de flores el consumo energético de

este será de 150 kWh por día mientras que el costo del SFV que abastece esta energía es de \$ 2 400 000 aproximadamente.

- b) Si el agricultor desea instalar un invernadero de 2000 m² con sistema de iluminación artificial para el cultivo de flores el consumo energético de este será de 270 kWh por día mientras que el costo del SFV incluyendo instalación que abastece esta energía es de \$ 4 400 000 aproximadamente.

4.2.6. Sombreo

En la figura 16 se muestra el consumo energético del sistema de sombreado por superficie de invernadero para diferentes tiempos de trabajo así como el costo del SFV que suministra esa energía.

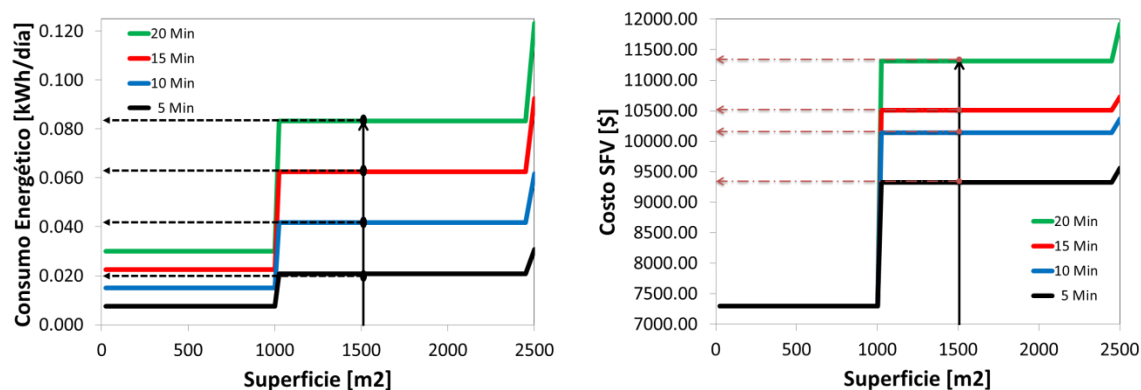


Figura 16. Consumo energético y costo del SFV (con un recurso solar de 3 HSP) para el sistema de sombreado por superficie.

De acuerdo con la figura 16 si el agricultor desea instalar un invernadero de 1500 m² con sistema de sombreado:



- a) Trabajando 10 minutos al día el consumo energético de este será de 0.040 kWh por día mientras que el costo del SFV que abastece esta energía es de \$ 10 200 aproximadamente.
- b) Trabajando 15 minutos al día el consumo energético de este será de 0.060 kWh por día mientras que el costo del SFV incluyendo instalación que abastece esta energía es de \$ 10 500 000 aproximadamente.
- c) La diferencia entre el consumo de energía durante 5, 10, 15 y 20 minutos de los primeros 1000 m² no es significativa por lo cual el costo del SFV para este caso es el mismo.

4.3. Catálogos para software de selección

Para la realización del software es indispensable contar con bases de datos o catálogos donde exista información necesaria para realizar cada uno de los cálculos los cuales se abordan a continuación.

4.3.1. Catálogo de los sistemas del invernadero

Consta de información de potencia necesaria, tiempo de uso y consumo energéticos de cada uno de los 6 diferentes sistemas del invernadero (riego por goteo, calefacción directa, ventilación natural y forzada, enfriamiento, iluminación artificial y sombreo) en función del área del invernadero hasta de 1 Ha con y sin ventana cenital.

La forma de organizar los datos se presenta en el cuadro 13.



Cuadro 13. Disposición de los datos dentro del catálogo.

DE:	Área [m ²]	A:	Potencia del Sistema [kW]	Tiempo de uso [h día ⁻¹]	Consumo energético [kWh día ⁻¹]
-----	---------------------------	----	------------------------------	---	---

4.3.2. Catálogo de ciudades

Consta de 224 ciudades de los 32 diferentes estados de la Republica seleccionados y ordenados por cabecera municipal o ciudades más importantes económica, social y/o políticamente dentro de una región con sus normales meteorológicas y climatológicas útiles para los cálculos.

Los datos que contiene este catálogo son los siguientes:

- Estado (32 estados de la República Mexicana)
 - Ciudad (224 ciudades diferentes)
 - Ubicación geográfica: Latitud, longitud y altitud.
 - Temperatura promedio diaria anual (°C): Máxima, media y mínima.
 - Evaporación *Eto* (mm día⁻¹): Máxima, promedio y mínima.
 - Radiación o recurso solar diario (kWh día⁻¹): Máxima, promedio y mínima.
 - Velocidad del viento (m s⁻¹): Máxima, promedio y mínima.

4.3.3. Catálogo de cultivos

Presenta las condiciones climatológicas para el desarrollo de diferentes cultivos más comunes dentro de la agricultura bajo invernaderos mexicanos.



➤ Cultivo (18 diferentes posibilidades)

- Coeficiente k_c mayor.
- Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$): Mínima, óptima y máxima.
- Nivel de iluminación requerido (luxes).

4.3.4. Catálogo de componentes fotovoltaicos

De acuerdo con el resultado de la búsqueda de diferentes fabricantes y distribuidores se obtuvo una base de datos de equipos fotovoltaicos comerciales pero además certificados compuesta por 265 modelos diferentes de módulos fotovoltaicos, 54 modelos diferentes de baterías, 52 modelos diferentes de reguladores y 150 modelos diferentes de inversores con características diferentes tanto de aplicaciones Isla (Inversor e inversor/cargador) como interconexión a red.

El catálogo de módulos fotovoltaicos contiene la siguiente información:

- Marca
- Tipo (Policristalino, monocristalino, capa fina o flexible)
- Modelo
- Potencia máxima (W)
- Voltaje nominal (V)
- Voltaje de máxima potencia (V)
- Corriente de máxima potencia (A)
- Voltaje de circuito abierto (V)



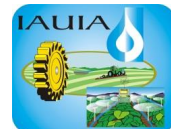
- Corriente de corto circuito (A)
- Especificaciones mecánicas: Largo, ancho, espesor y peso
- Precio y moneda.
- Distribuidor.

El catálogo de baterías contiene:

- Marca
- Modelo
- Capacidad a 100 h (Ah)
- Voltaje (V)
- Especificaciones mecánicas: Largo, ancho, alto y peso
- Precio y moneda

El catálogo de equipos reguladores contiene:

- Marca
- Modelo
- Voltaje nominal (V)
- Voltaje de circuito abierto (V)
- Corriente nominal (A)
- Corriente máxima (A)
- Precio y moneda



Se elaboraron catálogos por separado para cada tipo de inversores de acuerdo a su aplicación (Isla o con interconexión a red). Estos cuentan con la información siguiente:

- Marca
- Modelo
- Potencia (W): Nominal y pico
- Tensión de entrada en CD (V): Mínimo, nominal y máximo
- Tensión de salida en CA (V): Mínimo, nominal y máximo
- Eficiencia
- Tipo de onda
- Peso
- Precio y moneda

4.4. Algoritmo de selección de sistemas fotovoltaicos

Datos como el lugar, cultivo, estructura y área del invernadero que se instalará además de los sistemas que se requieren instalar son empleados como datos de entrada en el algoritmo de cálculo y selección de SFV (figura 17).

Usando estos datos de entrada se realiza el cálculo de la potencia, horas de uso y consumo de energía diario de cada sistema que se elige y posteriormente se calcula y selecciona la cantidad de módulos fotovoltaicos, baterías, reguladores, inversores, sus características, marcas y costo total más económico.

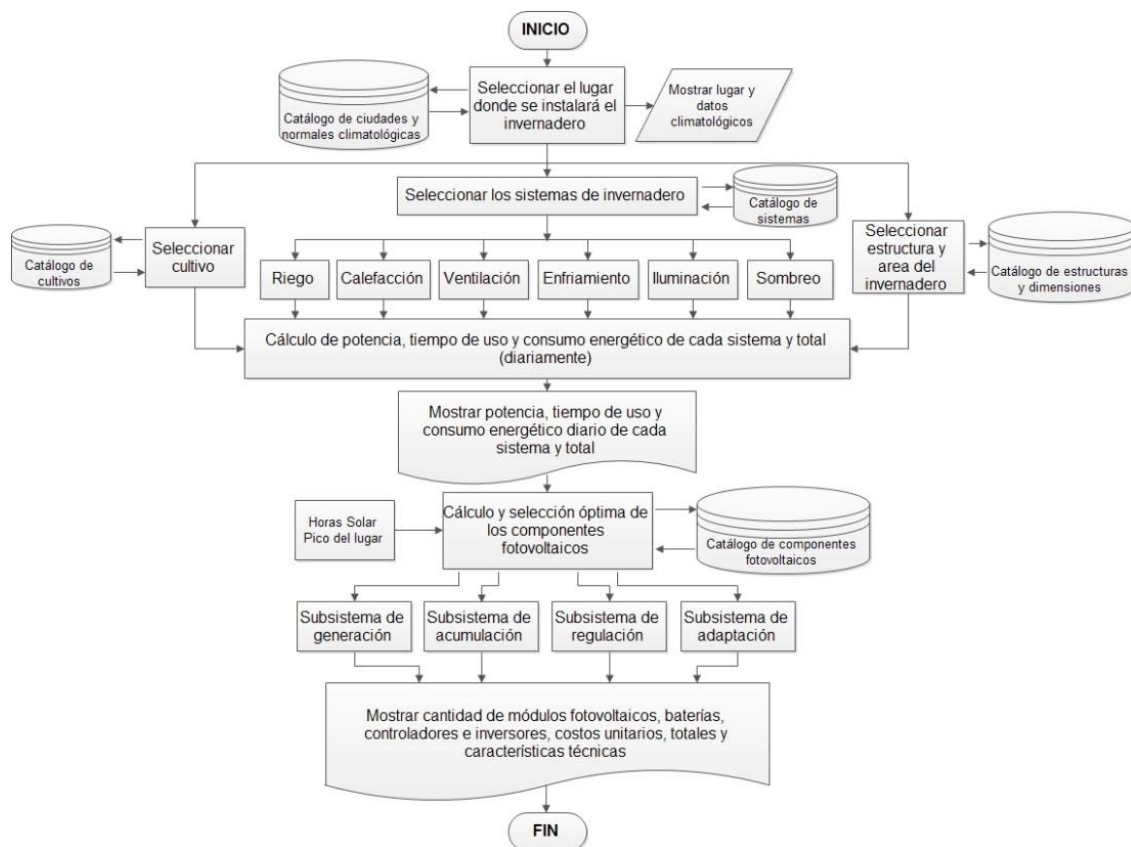


Figura 17. Algoritmo general de cálculo y selección de sistemas fotovoltaicos para invernadero desde la etapa de diseño.

A continuación se detalla el algoritmo de cálculo y selección de cada uno de los subsistemas del SFV.

4.4.1. Generación; cálculo y selección de módulos fotovoltaicos

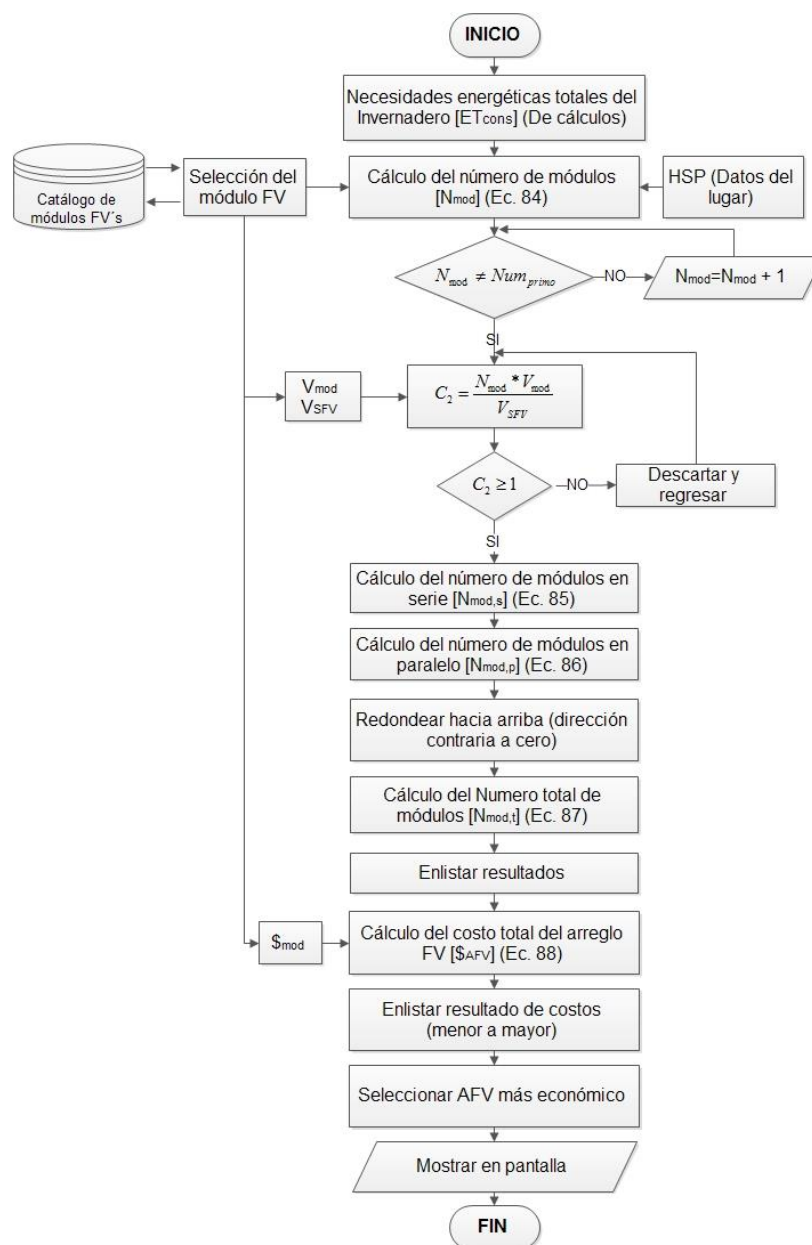
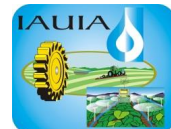


Figura 18. Algoritmo de cálculo y selección del subsistema de generación.

Para el cálculo y dimensionado del arreglo FV es necesario tener en cuenta ciertas restricciones las cuales se describen a continuación:



El número de módulos debe ser diferente a un número primo a partir de 10 módulos debido a que en arreglos de grandes dimensiones es necesario realizar subarreglos para poderlos conectar al número de reguladores y es indispensable que cada subarreglo tenga las mismas características eléctricas de tal forma que necesitaremos de números no primos para este fin. Por lo anterior es necesario colocar la restricción $N_{mod} \neq Num_{primo}$. Es decir si el número de modulo es diferente a un número primo se realiza el siguiente paso, si esto no es así se realiza la suma de un módulo y vuelve a preguntar la restricción hasta que se cumpla.

Uno de los datos que se introducen para iniciar el cálculo del arreglo FV es el voltaje de operación del sistema lo cual acorta la base de datos de módulos FV's solo a los que cumplan con un voltaje menor o igual a este voltaje de operación. De esta forma $C_2 = \frac{N_{mod} * V_{mod}}{V_{SFV}} \geq 1$ se trata de una segunda restricción debido a que existen módulos FV con voltajes menores al voltaje de operación y debemos tener la certeza de que con el número de módulos calculado se pueda realizar la conexión para obtener el voltaje de trabajo que deseamos. Por ejemplo si lo que necesitamos es un voltaje de trabajo de 12 V mientras el número de módulos calculado es de 1 el cual tiene un voltaje de 6 V no podemos realizar de ninguna manera la conexión para cumplir este requisito, por otro lado si contamos con 2 módulos de 6 V podemos realizar una conexión en serie para aportar este voltaje de trabajo, es decir que al tener como resultado de esta operación un número igual o mayor a 1 quiere decir que se

puede realizar una conexión que satisfaga este voltaje de trabajo mientras que un número menor a 1 significa que la conexión no se podrá realizar y entonces este módulo se descarta y se prueba con el siguiente.

Se realizan las operaciones para cada módulo de la base de datos y estos se ordenan de menor a mayor costo y al final se selecciona el arreglo de menor costo.

4.4.2. Regulación; cálculo y selección de reguladores

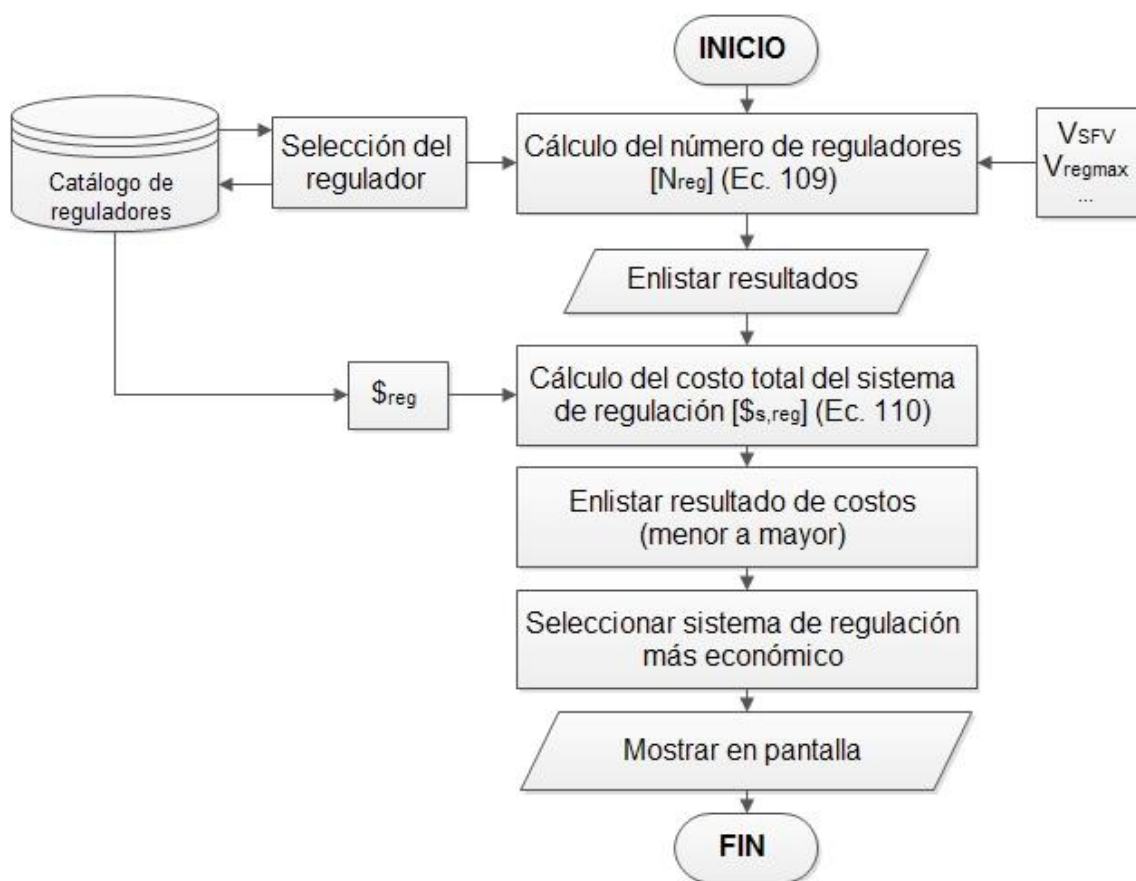


Figura 19. Algoritmo de cálculo y selección del subsistema de regulación.



Es necesario seleccionar cada uno de los reguladores y con sus parámetros eléctricos calcular el número de estos que se requieren y se calcula el costo total para cada caso ordenándolo de menor a mayor y finalmente se elige la opción más económica.

En el algoritmo se puede observar una restricción $\left(\frac{N_{mod,t}}{N_{reg}} = Num_{entero}\right)$ si esto es así quiere decir que se podrá realizar una conexión adecuada entre estos dos sistemas (arreglo FV – regulación) y por lo tanto se salta al siguiente paso de otra forma no es posible realizar este ensamble de una manera adecuada y será necesario sumar un regulador más y se regresara a esta condición hasta que se cumpla. Por ejemplo si tengo 10 módulos y 4 reguladores (10/4 no es número entero) no puedo realizar la conexión entre estos, de otra forma si cuento con 5 reguladores esto se puede realizar con facilidad (2 MFV por cada regulador).

Se realizan las operaciones para cada regulador de la base de datos y estos se ordenan del menor al mayor costo y al final se selecciona la opción de menor costo.

4.4.3. Acumulación; cálculo y selección de baterías

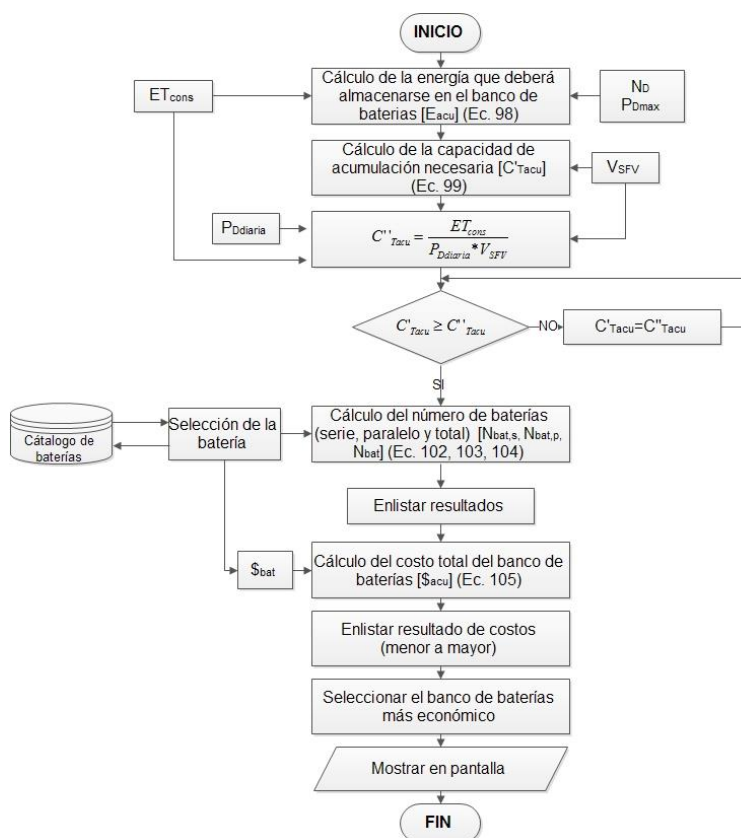


Figura 20. Algoritmo de cálculo y selección del subsistema de acumulación.

En este podemos observar la restricción siguiente $\left(\frac{N_{bat}}{N_{reg}} = Num_{entero}\right)$ lo que significa algo similar al caso de los reguladores, si esto se cumple quiere decir que se podrá realizar una conexión adecuada entre estos dos sistemas (acumulación – regulación) y por lo tanto se salta al siguiente paso de otra forma no es posible realizar este ensamble de una manera adecuada y será necesario sumar una batería más y se regresa a esta condición hasta que se cumpla. Por ejemplo si tengo 15 baterías y 4 reguladores (15/4 no es número entero) no puedo realizar la conexión entre estos, de otra forma si cuento con

16 baterías esto se puede realizar con facilidad (4 baterías por cada regulador). Se realizan las operaciones para cada batería presente en la base de datos y estos se ordenan del menor al mayor costo y al final se selecciona la opción de menor costo.

4.4.4. Adaptación; cálculo y selección del inversor

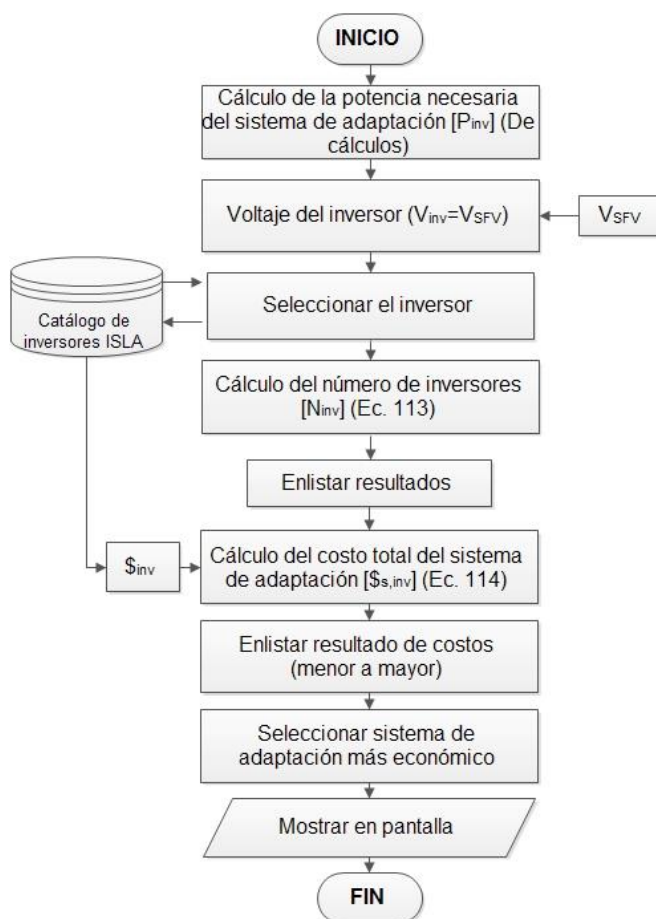


Figura 21. Algoritmo de cálculo y selección del subsistema de adaptación de la energía.

Es imprescindible conocer cuál es potencia total de las cargas instalada en el invernadero con lo cual se inicia el proceso de dimensionado.



Se encuentra también una la restricción siguiente $\frac{N_{reg}}{N_{inv}} = Num_{entero}$ Esto significa algo similar a los casos anteriores, si esto se cumple quiere decir que se podrá realizar una conexión adecuada entre estos dos sistemas (regulación – adaptación) y por lo tanto se salta al siguiente paso de otra forma no es posible realizar este ensamble de una manera adecuada y será necesario sumar un inversor más y se regresa a esta condición hasta que se cumpla. Por ejemplo si tengo 4 reguladores y 3 inversores ($9/2$ no es número entero) no puedo realizar la conexión entre estos, de otra forma si cuento con 4 inversores esto se puede realizar con facilidad (1 regulador por cada inversor). Así que se realizan las operaciones para cada inversor dentro de la base de datos y estos se ordenan del menor al mayor costo y al final se selecciona la opción de menor costo.

4.5. Software de cálculo y selección de sistemas fotovoltaicos para invernadero desde la etapa de diseño

La metodología de cálculo desarrollada, catálogo de ciudades y sus normales climatológicos, cultivos y sus condiciones climáticas, catálogos de potencias que se instalar en invernadero en función del área, componentes fotovoltaicos y algoritmos desarrollados fueron la base para el desarrollo del software “Selección de sistemas fotovoltaicos para invernadero desde la etapa de diseño”.



El usuario debe elegir el lugar donde desea instalar el invernadero (estado y ciudad) e ingresar sus dimensiones (largo y ancho). Una vez realizado esto el software automáticamente muestra los datos climáticos de la ciudad elegida y calcula el área del invernadero. Lo siguiente es elegir los sistemas que se desea tener en el invernadero (riego, calefacción, ventilación natural y forzada, enfriamiento, iluminación y sombreado) e incluso agregar accesorios. El software despliega una ventana mostrando la potencia a instalar de cada uno de los sistemas seleccionados en función del área calculada, calcula y muestra además el tiempo de trabajo y por ende la energía que consume cada sistema.

Los datos calculados de potencia total a instalar y consumo de energía total del invernadero son los datos de entrada para el dimensionado del sistema fotovoltaico es decir el número de módulos fotovoltaicos, baterías, reguladores, inversores, marcas, características, costos unitarios y totales.

El software de selección ofrece un análisis rápido y eficaz del consumo de energía y el sistema fotovoltaico óptimo que suministra esta energía al invernadero así como el detalle de los componentes y el costo del SFV.

El manejo del software es fácil y de dominio público. Brinda al usuario un excelente resultado para que este pueda tomar una decisión de utilizar el SFV para suministrar la energía a su invernadero esto desde la etapa de diseño del mismo.



CONCLUSIONES

Desde del año 2002 a la fecha, existe un incremento anual de 4.4 ± 0.1 % para las tarifas de consumo doméstico básica, intermedia y excedente. Para la tarifa agrícola 9CU (subsidiada por gobierno), el incremento anual fue de 5.24 %, mientras el incremento para la tarifa 9M (no subsidiada) es muy elevado, alcanzando un 27 % anual.

Existen zonas económicamente viables para la instalación de SFV, en función de la energía suministrada, la distancia entre el poste más cercano de CFE y las tarifas de energía. Para consumidores en el sector agrícola que pagan por electricidad, la tarifa 9M (sin estímulo) y para 10 y 15 años de uso de SFV, es económicamente viable para la energía consumida mayor de 4.8 y 1.5 kWh por día en invernaderos correspondientemente, instalar SFV en lugares donde ya existe la red eléctrica de CFE, y para 20 y 25 años de uso de SFV es económicamente viable instalarlos para cualquier consumo, ya que solo los gastos por consumo energético durante estos años, rebasan los costos de instalación de SFV.

Para las tarifas domésticas básica e intermedia, resulta que la distancia mínima de justificación de instalación de SFV va entre los 170 y 70 metros para los 10, 15, 20 y 25 años. Por otra parte, para la tarifa doméstica excedente usada por 10 años, la distancia de justificación es de 200 metros y para 15, 20 y 25 años



de uso de SFV, es económicamente viable, para la energía consumida mayor de 10.2, 6 y 4.8 kWh por día correspondientemente, instalar SFV en lugares donde ya existe la red eléctrica de CFE. Lo anterior debido a que para energías mayores, los gastos por consumo energético durante estos años, rebasan los costos de instalación de SFV's. Es importante que se preste más atención a este tipo de tecnología. El gobierno debería enfocar programas de apoyo tanto para proyectos domésticos como de comercio, industria y agrícolas.

Se desarrolló una metodología de selección de los componentes del sistema fotovoltaico desde la etapa de diseño de los invernaderos, en función del lugar, área, cultivo y los diferentes sistemas a instalar. Para la selección de los componentes fotovoltaicos se realizaron; catálogos de potencia a instalar y consumo de energía de los invernaderos en función de la superficie, ciudades y sus normales climatológicas, así como horas solar pico, módulos fotovoltaicos, baterías, controladores e inversores además de algoritmos para una selección económica.

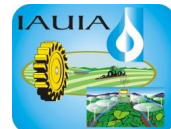
En función de la superficie en m^2 del invernadero, podemos conocer el consumo energético por día de los diversos sistemas para su climatización y con esto, realizar una adecuada selección del sistema fotovoltaico durante la etapa de diseño del invernadero.



Es importante considerar todos los parámetros del lugar y posibles configuraciones entre la potencia a instalar y el tiempo de operación de los sistemas. Aunque se trate de equipos con potencias muy pequeñas, si estos se usan durante varias horas, el consumo de energía puede ser elevado e incluso mayor al consumo de energía de un equipo de gran potencia pero que opera muy poco tiempo, sin embargo el costo del SFV será mayor para este caso. Lo anterior se debe al papel del inversor dentro del sistema, mientras que para el caso contrario la tendencia será el decremento del costo.

Se propone una metodología para calcular el tiempo de trabajo de los sistemas de calefacción, ventilación forzada y enfriamiento en función de las temperaturas mínima y máxima del sitio donde se instalara el invernadero. Es importante mencionar que dichos datos de temperaturas están disponibles en el portal del SMN para cada estación meteorológica existente.

La metodología de cálculo, tiempo de trabajo de los diferentes sistemas, catálogos y algoritmos desarrollados sirvieron como base para el desarrollo del software de “selección de sistemas fotovoltaicos para invernaderos desde la etapa de diseño”, el cual resulta una herramienta útil y eficaz ya que permite realizar el cálculo y dimensionado del sistema fotovoltaico necesario, así como su costo desde antes de instalar el invernadero. Esto es muy útil para aquellas personas que deseen instalar invernaderos con SFV's que suministren toda la energía que requerirán y que desconocen las cargas energéticas que tendrán



en estos. De esta manera el usuario tendrá una idea muy aproximada de la inversión que deberá realizar.

Los factores utilizados de sobredimensionamiento de las instalaciones FV's se debe a que el sistema sea capaz de cubrir la demanda energética considerada en todo momento, considerando incluso los momentos en que la radiación solar es baja o los momentos donde exista una demanda energética mayor inesperada. Este sobredimensionado de la instalación fotovoltaica lleva al uso de más módulos fotovoltaicos y baterías, lo que hace que el costo de la instalación se eleve de manera importante, sin embargo es mejor tener un sistema sobredimensionado que un sistema deficiente.



LITERARURA CITADA

Abd El-Shafy A. Nafeh. (2009) Design and Economic Analysis of a stand-alone PV system to electrify a remote area household in Egypt. The Open Renewable Energy Journal, Vol. (2): 33-37. ISSN: 1876-3871.

AMHPAC (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida). 2009. Estudio de oportunidades externas para el desarrollo de la inteligencia comercial del mercado de exportación de la horticultura protegida. 208 p.

Ángeles M., V. 2002. Fundamentos de hidráulica para diseño y revisión de riego presurizado (Aspectos teóricos). Departamento de irrigación, Universidad Autonoma Chapingo. Chapingo, Mexico. 149 p. ISBN: 968-884-638-4.

Ángeles O., G. 2009. Conservación Ambiental y Desarrollo Rural al aplicarse tecnología fotovoltaica: Estudio de caso en Tapanatepec, Oaxaca. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. 235 p.

ASAE Standards. 2010. Design and Installation of Micro irrigation Systems, ASAE EP405.1. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). St. Joseph, Michigan, USA. 6 p.



ASAE Standards. 2008. Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses, ANSI/ASAE Standard EP406.3. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). St. Joseph, Michigan, USA. 10 p.

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). 2011. ASHRAE HANDBOOK. Heating, Ventilating and Air-Conditioning. Atlanta, Georgia, USA. 1104 p.

Baptista, F. J.; Bailey, B. J.; Randall, J. M. and Meneses, J. F. 1999. Greenhouse ventilation rate: theory and measurement with tracer gas techniques. Journal of Agricultural Engineering Research. 72(4): 363-374. ISSN: 1537-5110.

Bastida T., A. 2006. Manejo y operación de invernaderos agrícolas. Universidad Autónoma Chapingo, serie de publicaciones Agribot. Chapingo, México. 239 p. ISBN: 968-02-0285-2.

Bastida T., A. y Ramírez A., J. A. 2008. Los invernaderos en México. Serie de publicaciones Agribot Chapingo, México. 123 p.

Bailey, B. J. 2000. Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation. Acta Horticulturae 534: 21-30.



Banaeian , N.; Omid, M. and Ahmadi, H. 2011. Energy and economic analysis of greenhouse strawberry production in Tehran province of Iran. Energy Conversion and Management 52(2): 1020-1025. ISSN: 0196-8904.

Bermejo C., M. 2007. La energía solar, una alternativa energética viable para el control climático en invernaderos. España. Vida rural. 248: 28-30.

Boulard, T. 2006. Greenhouse natural ventilation modelling: a survey of the different approaches. Acta Horticulturae 719: 29-40.

Castilla P., N. 2007. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. Madrid. Ediciones Mundi-Pensa. Madrid, España. 2da edición. 462 p. ISBN 13: 978-84-8476-321-5.

CDHCU (Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión). 2012. Ley del Servicio Público de la Energía Eléctrica. México. 24 p. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LSPEE.pdf.

Cengel, Y. A. y Boles, M. A., 2009. “Termodinámica”, sexta edición. Mc Graw Hill. México, D. F. 1008 p.



CFE (Comisión Federal de Electricidad). 2014. [En línea]. Disponible en http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/CFE_y_la_electricidad_en_Mexico/Paginas/CFEylaelectricidadMexico.aspx. Consultado el 12-11-2014.

CFE (Comisión Federal de Electricidad). 2012. Programa de obras e inversiones del sector eléctrico 2012-2026. México. 370 p. Disponible en: http://www.energia.gob.mx/res/216/Poise2012_2026.pdf.

CFE (Comisión Federal de Electricidad). 2009. Diseño de sistemas de alumbrado para centrales hidroeléctricas. México. 66 p.

Contreras M., E. 2012. Calefacción de Invernaderos, Notas del VII curso de especialización y 1er diplomado en horticultura protegida. Universidad Autónoma Chapingo, México.

CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía). s.f. Programa de evaluación técnica económica para sistemas fotovoltaicos en el sector doméstico (ConaeFV2.0T).

De Francisco, A.; Castillo, M. y Torres, J. L. 1993. La energía eléctrica en la explotación agraria y forestal, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 400 p. ISBN: 84-7114-333-X.



Dimitrijević, A.; Đević, M.; Miodragović, R.; Mileusnić, Z. 2011. Energetska produktivnost proizvodnje salate na otvorenom polju i u objektima zaštićenog prostora različite konstrukcije (Energy efficiency of the lettuce open filed and greenhouse production). Savremena poljoprivredna tehnika 37(1): 45-54. ISSN: 0350-2953.

El Financiero. 2014. "Se incrementan hasta 20 % las tarifas eléctricas para los industriales del país". Meana, S. y Becerril I. México, D.F. 04-03-2014. 6 pp. Disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/se-incrementan-hasta-20-tarifas-electricas-para-industriales-del-pais.html>.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2002. El cultivo protegido en clima Mediterráneo. Dirección de Producción y Protección Vegetal 90. Roma. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s00.htm#Contents>. ISBN 92-5-302719-3.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje No. 56. Roma, Italia. 323 p. ISBN 92-5-304219-2 ISSN 1020-4393.



Fernández R., D. S.; Martínez M., M. R.; Tavaréz E., C. A.; Castillo V., R. y Salas M., R. (s.f.). Estimación de las demandas de consumo de agua. SAGARPA - Colegio de Postgraduados, campus Montecillos, México. 33 p.

Fischer, J. R.; Johnson, S. R.; Finnell, J. A. and Price, R. P. 2009. Renewable energy technologies in agriculture - Solar, wind, geothermal, and anaerobic digestion. Resource, April/May: 4-9.

Francescangeli, N. y Mitidieri, M. 2006. El invernadero hortícola. Estructura y manejo de cultivos. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2da edición. Estación experimental Agropecuaria San Pedro, Buenos Aires, Argentina. 63 p.

Ganguly, A.; Misra, D. & Ghosh, S. 2010. Modeling and analysis of solar photovoltaic-electrolyzer-fuel cell hybrid power system integrated with a floriculture greenhouse. Energy and Buildings 42(11): 2036-2043. ISSN: 0378-7788.

García C., I. y Briones S., G. 2011. Sistemas de riego por aspersión y goteo. Editorial Trillas, México. 264 p. ISBN: 978-968-24-8008-9.

García F., J. y Boix, O. 2014. [En línea]. Luminotecnia: Iluminación de interiores y exteriores. Manual por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la



Universidad Politécnica de Catalunya, España. Disponible en:

<http://recursos.citcea.upc.edu/llum>. Consultado 11-11-2014.

González T., F. I. 2013. Computadora Solar. In Memorias del 2do Coloquio de Energía, CU UNAM, México, D. F., 21-25 Octubre. 13 pp.

González R., M. M. y Baille, A. 2005. Notas del curso Tecnología de Invernaderos. Universidad Politecnica de Cartagena. España.

Hahn, F. 2010. Self-powered instrumentation equipment and machinery using solar panels. Chapter 14 - Solar collectors and panels, theory and applications. Dr. Reccab Manyala (Ed.). 293 – 314. InTech. ISBN: 978-953-307-142-8. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/solar-collectors-and-panels--theory-and-applications/self-powered-instrumentation-equipment-and-machinery-using-solar-panels->.

Hatirli, S.A.; Ozkan, B. and Fert, C. 2006. Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. Renewable Energy 31(4): 427-438. ISSN: 0960-1481.

Heidari, M. D. and Omid, M. 2011. Energy use patterns and econometric models of major greenhouse vegetable production in Iran. Energy 36(1): 220-225. ISSN: 0360-5442.



Huertas, L. 2007. El control ambiental en invernaderos: Temperatura. Revista Horticultura 203: 44-47.

Ibáñez P., M.; Rosell P., J. R. y Rosell U., J. I. 2004. Tecnología Solar. Colección Energías Renovables 1ª Ed, Mundi-prensa, España. 259-344 pp. ISBN: 84-8476-199-1.

IESNA (Illuminating Engineering Society of North America). 2000. The IESNA Lighting Handbook. Reference & Application. Illuminating Engineering Society. Ninth Edition. New York. USA. 1000 p. ISBN 0-87995-150-8.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2012. Conociendo México. Folleto Nacional. 23 Aguascalientes, Ags. México. 87 p.

Jara R. Jorge y Valenzuela A. Alejandro. 1998. Necesidades de agua de los cultivos "Desarrollo de sistemas de riego en el secano interior y costero. Componente nacional: capacitación y difusión de tecnologías de riego". Departamento de proyectos de la comisión nacional de riego. Chillan. 28 p.

Kadowaki, M.; Yano, A.; Ishizu, F.; Tanaka, T. & Noda, S. 2012. Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth. Biosystems Engineering 111(3): 290-297. ISSN: 1537-5110.



Kittas, C.; Boulard, T. and Papadakis, G. 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects. Transactions of the ASAE. 40(2): 415-425.

Labouret, A. y Villos, M. 2008. Energía Solar Fotovoltaica-Manual Práctico (Adaptado al código Técnico de Edificación). Ediciones Mundi-Prensa. 1era edición. Madrid España. 334 p. ISBN-13: 978-848476-307-9.

Lacchini, C. and Dos Santos, J. C. 2013. Photovoltaic energy generation in Brazil - Cost analysis using coal-fired power plants as comparison. Renewable Energy 52(1): 183-189. ISSN: 0960-1481.

Llamas, A.; Viramontes, F.; Probst, O.; Reyna, R.; Morones, A. y Gonzales, M. 2004. Situación del sector eléctrico en México. In Reunión de Verano de Potencia-Aplicaciones Industriales, RVP-AI/2004, Acapulco, Gro. México. 6 p. Disponible en:

http://www.mty.itesm.mx/decic/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/UEE/SITUACION_SEM.pdf.

López J.C.; Lorenzo P.; Medrano E.; Sánchez-Guerrero M. C.; Pérez J.; Puerto H. M. y Arco M. 2000. Calefacción de invernaderos en el sudeste español



(Resultados experimentales para cultivos de pepino y judía). Caja Rural de Almería. Almería, España. 47 p.

Lozano L., J. M. y Almazán C., J. H. 2014. Compresor Solar. In IV Congreso Internacional sobre las Energías Renovables, UTVCO, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, 06 al 08-Agosto. 4 p.

Martínez C., T. 2014. Metodología para la selección y aplicación de sistemas fotovoltaicos a invernaderos. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo, México. 136 p.

Martínez C., T.; Romantchik K., E.; Contreras M., E.; Betanzos C., F. y Martínez E., R. 2013. Aplicación de un sistema fotovoltaico a invernaderos experimentales. Memoria del XXII congreso nacional y 1er congreso internacional de ingeniería agrícola. México, D.F. pp: 83-87. ISBN: 978-607-37-0074-0.

Martínez C., T.; Romantchik K., E.; Betanzos C., F.; Contreras M., E.; Martínez E., R. y Poblano O., E. S. 2014. Metodología para la selección de sistemas fotovoltaicos a invernaderos y su aplicación. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 6(1): 15-30. ISSN: 2007-3925.



Matallana G., A. y Montero C., J. I. 1988. Invernaderos. Diseño, construcción y ambientación. Ediciones Mundi-Prensa. 2da edición. Madrid España. 209 p. ISBN: 8471144980, 9788471144980.

Mohammadi, A and Omid, M. 2010. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. Applied Energy 87(1): 191-196. ISSN: 0306-2619.

Montero, J. I.; Stanghellini, C. y Castilla, N. 2008. Invernadero para la producción sostenible en áreas de clima de invierno suaves. Revista horticultura internacional 65: 12-26.

Montero C., J.I.; Antón V., A. y Biel L., C. 1992. Refrigeración de invernaderos. II. Ventilación Natural. Revista HF. Hortofruticultura 3(6): 69-71. ISSN: 1130-1678.

Moya T., J. A. 1998. Riego localizado y fertirrigación. 2da edición. Mundi-prensa. España. 392 p. ISBN: 84-7114-731-9.

NASA (National Aeronautics and Space Administration) and CANMET Energy Technology Centre - Varennes (CETC-Varennes). 2014. Surface Meteorology and Solar Energy: RETScreen. [En Línea]. Washington, D.C., USA. Disponible en: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>.



NFPA (National Fire Protection Association). 2008. NEC. National Electrical Code. Eleventh Edition. Quincy, Massachusetts, USA. ISBN-13: 978-0-87765-793-4.

NGMA (National Greenhouse Manufacturers Association). 2010a. Standards for heat loss in greenhouse structures. NGMA, Harrisburg, PA, USA.

NGMA (National Greenhouse Manufacturers Association). 2010b. Standards for ventilation and cooling greenhouse structures. NGMA, Harrisburg, PA, USA.

Nelson, P. V. 1991. Greenhouse operation and management. Fourth edition. Prentice Hall. Department of Horticultural Science, North Carolina State University, United States of America. 612 p. ISBN: 0-13-365198-3.

NMX-E-255-CNCP-2013. Norma Mexicana. Invernaderos de cubiertas plásticas-diseño y construcción-especificaciones. Diario Oficial de la Federación.

NOM-001-SEDE-2012. Secretaria de Energía. Instalaciones Eléctricas (Utilización). Artículo 690. Sistemas Solares Fotovoltaicos. 1140 p.



Ozkan, B.; Ceylan, R. F. and Kizilay, H. 2011. Energy inputs and crop yield relationships in greenhouse winter crop tomato production. *Renewable Energy*. 36(11): 3217-3221. ISSN: 0960-1481.

Ozkan, B.; Kurklu, A. and Akcaoz, H. 2004. An input-output energy analysis in greenhouse vegetable production: a case study for Antalya region of Turkey. *Biomass & Bioenergy*. 26(1): 89-95. ISSN: 0961-9534.

Pérez de los R., M. C. 2007. Aplicaciones de la energía solar al tratamiento térmico de suelos de invernadero. Tesis doctoral. Dpto. de Ingeniería Gráfica e Ingeniería y Sistemas de Información Cartográfica, Universidad de Córdoba, España. 338 p.

Pérez-Parra, J.; Baeza, E.; Montero, J. I. and Bailey, B.J. 2004. Natural ventilation of parral greenhouses. *Biosystems Engineering* 87(3): 355–366. ISSN: 1537-5110.

Perez-Parra, J.; Montero, J. I.; Baeza, E. J. and Lopez Hernandez, J. C. 2006. Determination of global wind coefficients for the development of ventilation rate calculation models for a parral multi span greenhouse. *Acta Horticulturae* 710: 143-150.



Poblano O., E. S.; Romantchik K., E.; Hahn S., F. F.; Betanzos C., F. y Martínez C., T. 2013. Comparación de los costos de sistemas fotovoltaicos y gastos de energía eléctrica de la red. Memoria del XXII congreso nacional y 1er congreso internacional de ingeniería agrícola. México, D.F. 88-93 pp. ISBN: 978-607-37-0074-0.

Radha M., K. & Igathinathane, C. 2007. Greenhouse Technology and Management. BS Publications. Giriraj Lane, Sultan Bazar, Hyderabad. Second edition. 228 p. ISBN: 978-81-7800-136-4.

Reineke, M. 1993. Photovoltaic power as a utility service: Guidelines for livestock water pumping. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New México. 117 p.

Rezvani M., P.; Feizi, H. and Mondani, F. 2011. Evaluation of tomato production systems in terms of energy use efficiency and economical analysis in Iran. Notulae Scientia Biologicae 3(4): 58-65. ISSN: 2067-3205.

Rocamora, M. C. & Tripanagnostopoulos, Y. 2006. Aspects of PV/T Solar System Application for Ventilation Needs in Greenhouses. Acta Horticulturae 719: 239-246.



Rodrigo L., J.; Hernández A., J. M.; Pérez R., A. y González H., J. F. 1997. Riego localizado. Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación. Mundi-prensa. España. 405 p. ISBN: 84-7114-677-0.

Romantchik K.E.; Gómez D. M.; Romero H. M.; Martínez C. T. 2013. Selección de sistema fotovoltaico para invernadero. Software, ISBN: 978-607-12-0295-6, disponible en:

<http://sistemas.chapingo.mx/empresas/SICF/>.

Salazar M., R.; Cruz M., P. y Rojano A., A. 2012. Eficiencia en el uso de la energía en invernaderos mexicanos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Publicación especial (4): 736-742. ISSN: 2007-0934.

Salvador Escoda S. A. y Soler & Palau. (s.f). Manual práctico de ventilación. Catalogo Técnico. 2da edición.

Sánchez J. A. 2006. Tecnología fotovoltaica aplicada al bombeo de agua. Proyecto de energía renovable para la agricultura. FIRCO-SAGARPA. México. D.F. 262 p.

Sánchez J. A. 2014. Dimensionamiento básico de sistemas autosustentados. Notas del curso-taller Dimensionamiento y diseño de sistemas fotovoltaicos



interconectados a la red. Instituto de Energías Renovables, UNAM. Temixco, Morelos.

Sánchez M., I. 2004. La energía solar y su aplicación a los invernaderos en navarra. Navarra Agraria, España. 142 (Enero-Febrero): 35-44.

SENER (Secretaria de Energía). 2013. Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027. México. 230 p. Disponible en:

http://sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/Prospectiva_del_Sector_Electrico_2013-2027.pdf.

SENER-CFE (Secretaria de Energía – Comisión Federal de Electricidad). 2013. Sector Eléctrico Nacional, Usuarios de energía eléctrica. México. 2 p.

Seif A., F. M.; Ahmad, D.; Mohamed S., A. R.; Aris, I.; Janius, R. & Kamaruddin, R. 2007. Design and Development of a Photovoltaic Power System for Tropical Greenhouse Cooling. American Journal of Applied Sciences 4 (6): 386-389. ISSN 1546-9239.

Sethi V., P. & Sharma S., K. 2007. Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Solar Energy 81(12): 1447-1459. ISSN: 0038-092X.



Shabani, Z.; Rafiee, S. and Mobli H. 2012. Econometric model on energy input and yield in Carnation flower. Journal of Agricultural Science and Applications (JASA) 1(1): 8-12. ISSN: 2227-6475 (Print), ISSN: 2227-6483 (Online).

SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2014. Normales Climatológicas por Estación. [En línea]. Disponible en:

http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75.

Sonneveld, P. J.; Swinkels, G. L. A. M.; Bot, G. P. A. & Flamand, G. 2010. Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse. Biosystems Engineering 105(1): 51-58. ISSN: 1537-5110.

Suazo L., F. 2012. Sistema de riego por goteo. Notas del VII curso de especialización y 1er diplomado en horticultura protegida. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Tradecorp. 2014. Informacion de cultivos. [En línea]. Disponible en: <http://www.tradecorp.com.mx/tradecorp/cultivos/hortalizas/>.

Ureña-Sánchez, R.; Callejón-Ferre, A. J.; Pérez-Alonso, J. & Carreño-Ortega, A. 2012. Greenhouse tomato production with electricity generation by roof-mounted



flexible solar panels. *Scientia Agricola* 69(4): 233-239. ISSN (Online): 1678-992X, ISSN (Print): 0103-9016.

US DOE (United State Department of Energy). 2014. The History of Solar. Disponible en: http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf. Última consulta: 17/11/2014.

Von Zabeltitz, C. 2011. Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates. Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. 363 p. e-ISBN: 978-3-642-14582-7.

Willits, D. H. 2006. Fan ventilated greenhouse cooling: some considerations for design. *Acta Horticulturae* 719: 83-95.

Yano, A.; Tsuchiya, K.; Nishi, K.; Moriyama, T.; Ide, O.; Ishizaka, A. & Toya, M. 2005. Development of a power saving greenhouse side window controller driven by photovoltaic energy. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 67(2): 100-110 (in Japanese with English abstract). ISSN (Online): 1884-6025, ISSN (Print): 0285-2543.



Yano, A.; Tsuchiya, K.; Nishi, K.; Moriyama, T. & Ide, O. 2007. Development of a greenhouse side-ventilation controller driven by photovoltaic energy. *Biosystems Engineering*, 96(4): 633-641. ISSN: 1537-5110.

Yano, A.; Furue, A.; Kadowaki, M.; Tanaka, T.; Hiraki, E.; Miyamoto, M.; Ishizu, F. & Noda, S. 2009. Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north–south oriented greenhouse. *Biosystems Engineering*, 103(2): 228-238. ISSN: 1537-5110.

Yano, A.; Kadowaki, M.; Furue, A.; Tamaki, N.; Tanaka, T.; Hiraki, E.; Kato, Y.; Ishizu, F. & Noda, S. 2010. Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse. *Biosystems Engineering*, 106(4): 367-377. ISSN: 1537-5110.

Yano, A.; Onoe, M. & Nakata, J. 2014. Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. *Biosystems Engineering*, 122: 62-73. ISSN: 1537-5110.

Yeager, C. and Radstake, F. 2012. Greener Pastures from the Sun: Solar Photovoltaic - Driven Irrigation in Qinghai Province. *Knowledge Showcases*, 43 (septiembre) series. Asian Development Bank publications.



Zapata, P. 2009. Optimización energética en invernaderos europeos. Revista Horticultura 214: 46-52.



ANEXOS

A. Tiempo de trabajo de los sistemas de calefacción, ventilación forzada y enfriamiento de acuerdo con el estado y cultivo a instalar

	CALEFACCIÓN		VENTILACIÓN Y ENFRIAMIENTO
	*Grupo (a)	**Grupo (b)	
Aguascalientes	6.00	9.00	3.00
Baja California	4.00	9.00	2.00
Baja California Sur	0.00	5.00	6.50
Campeche	0.00	0.00	5.00
Coahuila	3.00	7.00	4.50
Colima	0.00	4.50	8.00
Chiapas	0.00	7.00	6.00
Chihuahua	9.00	11.00	0.00
Distrito Federal	4.00	9.00	0.00
Durango	9.00	11.00	3.00
Guanajuato	3.50	10.50	3.00
Guerrero	0.00	0.00	7.00
Hidalgo	6.00	9.00	0.00
Jalisco	4.50	10.00	6.00
Estado de México	4.00	9.00	0.00
Michoacán	3.50	7.50	6.50
Morelos	0.00	4.50	7.50
Nayarit	0.00	3.50	8.00
Nuevo León	8.00	11.00	4.50
Oaxaca	0.00	3.50	7.00
Puebla	4.00	8.00	0.00
Querétaro	0.00	6.50	4.00
Quintana Roo	0.00	2.00	8.00
San Luis Potosí	4.50	8.00	4.00
Sinaloa	0.00	4.00	8.50
Sonora	2.00	7.00	7.00
Tabasco	0.00	0.00	10.00
Tamaulipas	0.00	6.00	6.00
Tlaxcala	7.00	10.00	0.00
Veracruz	0.00	0.00	6.00
Yucatán	0.00	0.00	8.50
Zacatecas	5.00	9.00	2.00

* Pertenecen todos los cultivos que soportan una temperatura mínima de 5°C

** Aquellos cultivos cuya temperatura mínima que soportan es de 10 °C



B. Artículos científicos y participaciones en congresos

Poblano O., E. S.; Romantchik K., E.; Hahn S., F. F. y Betanzos C., F. 2014. Metodología para la selección de sistemas fotovoltaicos durante la etapa de diseño de invernaderos. En XI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola y XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. Cancún, Quintana Roo, México. 06-10 de Octubre.

Poblano O., E.S.; Romantchik K., E.; Hahn S., F.F. y Mauricio P., A. M. 2014. Energía solar fotovoltaica para el suministro energético a invernaderos. En IV Congreso Internacional sobre las Energías Renovables (CIER 2014). Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca, Oaxaca de Juárez, Oaxaca. 06-08 de Agosto.

Poblano O., E.S.; Romantchik K., E.; Hahn S., F.F. y Mauricio P., A. M. 2014. Determinación de las cargas energéticas en invernadero para los cálculos de sistemas fotovoltaicos. En II Congreso Internacional y XVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas (Memorias). Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. pp 451 y 452. 23-25 de Abril.

Poblano O., E. S.; Romantchik K., E.; Hahn S., F. F.; Betanzos C., F. y Martínez C., T. 2013. Comparación de los costos de sistemas fotovoltaicos y gastos de energía eléctrica de la red. En XXII Congreso Nacional de Ingeniería



Agrícola y 1er Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola. INIFAP, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. 19-20 de Septiembre.

Poblano O., E. S.; Romantchik K., E.; Hahn S., F. F. y Betanzos C., F. 2014. “Metodología para la selección de sistemas fotovoltaicos durante la etapa de diseño de invernaderos”. Desarrollos de Ingeniería Agrícola en América Latina. **ISBN: 978-607-12-0356-4**, Chapingo, Estado de México, México. pp. 1946-1958.

E. S. Poblano O., E. Romantchik K., F. F. Hahn S., F. Betanzos C. y T. Martínez C. 2013. “Comparación de los costos de sistemas fotovoltaicos y gastos de energía eléctrica de la red”. Memoria del XXII congreso nacional y 1er congreso internacional de ingeniería agrícola. **ISBN: 978-607-37-0074-0**, México, D.F. pp. 88-93.