

INVERNADERO CALEFACIONADO CON ENERGIA SOLAR

J. Fellari, A. Fasulo, L. Odicino, D. Penello y J. Di Genaro

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN LUIS

Chacabuco y Pedernera - 5700 - San Luis

Resumen:

Se plantea la posibilidad de producir verduras y frutas en contraestación en la región centro-oeste de la Argentina, donde, en función de sus características climáticas se requiere calefacción.

Se propone obtener esta con energía solar a través de un sistema compuesto por un colector plano de plástico desplegado sobre el terreno, una cisterna aislada para la acumulación de agua caliente y efectuar la transferencia de calor al invernadero mediante intercambiador que funcione automáticamente.

A partir de un balance energético teórico se dimensionó el sistema invernadero - colector - cisterna.

El invernadero de 100 m² de superficie, se construyó en terrenos provistos por una firma privada mediante convenio con la Universidad y un subsidio de SECyT a través de PRONACOFEA. En él se cultivaron tomates y pimientos.

Se calefaccionó con estufa de kerosene mientras se preparaba el calentador solar. Se determinaron las condiciones de cultivo, rendimiento y rentabilidad para 100 y 1000 m² cuadrados comparando costos solar y convencional.

1.-Introducción:

En San Luis y en general en la zona de clima templado frío, se pueden obtener hortalizas o flores en contraestación siempre que el invernadero sea calefaccionado. En particular, en la zona próxima a la Ciudad de San Luis, las condiciones son de baja precipitación en invierno (7 mm por mes de promedio), con vientos moderados a intensos del E - SE (Chorrillero) y norte cuya frecuencia se intensifica a finales de invierno y primavera y cuya velocidad puede llegar a superar los 100 km/h. Las temperaturas medias de junio y julio rondan los 9,5 °C con medias mínimas de 3 °C y mínimas absolutas de hasta -10 °C.

Nos propusimos estudiar las condiciones de cultivo respecto a temperaturas mínimas aceptables, energía de calefacción requerida, producción obtenible y análisis económico de la explotación. Nos propusimos también estudiar la alternativa de proveer la calefacción con energía solar con el sistema ya mencionado. Realizamos el invernadero en la presente temporada 93, informamos resultados y perspectivas.

2.- Diseño y dimensionamiento teórico

A partir de un conjunto de datos estadísticos disponibles sobre distribución de temperaturas (1) (2), radiación solar (3) dirección y velocidad del viento (4) determinamos la calefacción necesaria para mantener en una temperatura base de 8 °C, un invernadero de 100 m² cuadrados protegido por una película de material plástico de 160 m² cuadrados.

La cantidad de calor que fluye hacia el exterior a través de la cubierta es determinado mediante un programa de cálculo para procesador, desarrollado para este fin, que toma en cuenta todas las formas de intercambio de energía con el medio ambiente.

Las condiciones ambientales empleadas corresponden a los meses de mayo a agosto, período en los cuales se deben efectuara aportes térmicos durante 14 horas nocturnas y en algunos casos durante el día.

Tomando en cuenta las características climáticas locales observadas, con la finalidad de predecir los picos de demanda energética, manteniendo los valores medios correspondientes, se genera un esquema muy simple para analizar las fluctuaciones a través de tres días tipo, caracterizados a partir del salto térmico día - noche:

I) T promedio, las variables ambientales se aproximan a los valores estadísticos correspondientes al mes.

II) T grande, alta radiación y viento intenso (heladas)

III) T pequeño baja radiación y vientos leves

Se postula entonces una variación de la temperatura ambiente diaria siguiendo una sinusoidal.

En la tabla 1 vemos los resultados obtenidos: en la segunda columna el día tipo, en la tercera columna la cantidad de días tipos por mes y en la cuarta la temperatura media diaria, en la quinta el salto térmico diario, en la sexta la velocidad del viento, en la octava la radiación global diaria y en la novena la cantidad de calor que se debe ingresar al invernadero para mantenerlo en la temperatura base seleccionada.

MES	DIA TIPO	N DE DIAS	T DIA	T	VEL. VIENT	H	MJ DIA
				°C	m/seg	MJ/m	
MAYO	2	2	15	16	3,5	15	341,81
JUNIO	1	19	9	6	3,7	8,4	242,68
	2	4	13	18	12	14	560,41
	3	7	10	4	2	4	106,25
JULIO	1	19	9,4	7	4,3	8	294,4
	2	4	14	19	7,5	14	679,81
	3	7	10	5	2,5	4	92,49
AGOSTO	1	19	11,8	7,5	4,8	15	127,73
	2	4	16	16	11	18	314,86
	3	7	10	6	3	10	180,43

TABLA 1

Si tomamos el total de demanda mensual, vemos que julio requiere la mayor calefacción, a un promedio diario de 294 MJ/día.

Tomando entonces 300 MJ/día como demanda teórica máxima, diseñamos el calentador solar.

Calefacción solar

En primer lugar se analizó la posibilidad de usar una poza solar. Para obtener la energía necesaria para el invernadero, se requieren 1100 m

cuadrados de poza de 2 m de profundidad para un invernadero de 1000 m cuadrados. Esta dispondrá, al comenzar la temporada y haber alcanzado la temperatura de régimen, de la mitad de la energía requerida por el invernadero en los meses de junio, julio y hasta el 10 de agosto, o sea la época de demanda principal. El otro 50% de la energía requerida, será el captado por la poza solar durante ese periodo. De acuerdo a los datos experimentales (5-6-8) el rendimiento es del 15% y la radiación media 10 MJ/día-m cuadrado. O sea hay una captación diaria de 1,5 MJ/día-m cuadrado que complementa la reserva de la poza y realiza el aporte antes y después del periodo de tiempo mencionado. Tomamos este módulo de 1000 m² por considerarlo en tamaño productivo, apropiado para el uso de una poza.

Dado el mantenimiento requerido en una poza debido a los vientos, la lluvia y el gradiente salino, que ha merecido la atención manifiesta en numerosos trabajos de investigación, nos llevó a pensar en otra propuesta de mas fácil manejo para el productor pequeño o mediano. Planteamos entonces hacer una cisterna aislada en los 70 cm superiores de sus bordes y arriba. Calentandola en verano, la tierra que se encuentra en los bordes inferiores y debajo alcanzará una temperatura de regimen estacionario y la pérdida de calor entonces a través de 1,5 m de tierra seca es similar a la de 5 cm de aislación de telgopor.

PLANTA

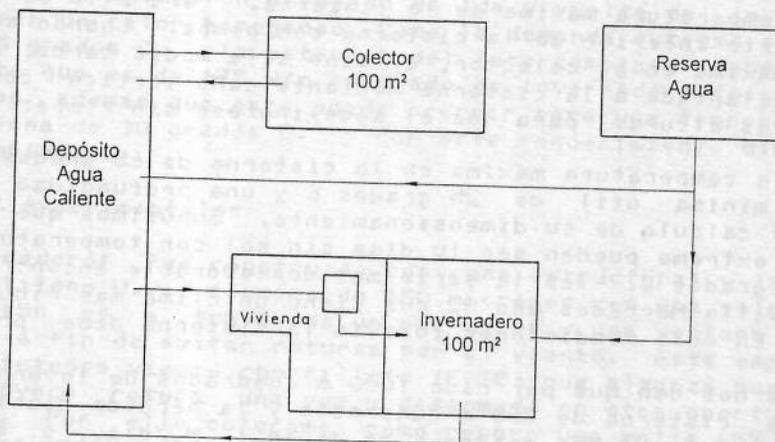


Fig. 1 ESQUEMA DEL SISTEMA VISTO EN PLANTA

Separadamente y en un lugar contiguo se realiza un colector horizontal, colocado sobre terreno nivelado, con 3 cm de aislación, luego el polietileno negro como receptor solar, 7 a 11 cm de agua. Sobre ella flotando un film de polietileno cristal U.V. y otro sostenido 10 cm mas arriba. Los bordes tienen 25 cm de altura para cerrar el colector.

CORTE

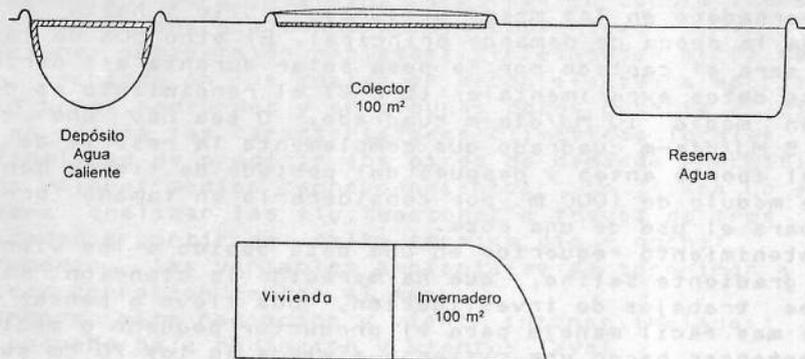


FIG. 2 ESQUEMA DEL SISTEMA EN CORTE

Este colector se llena de agua 1-2 horas después del amanecer, con altura de acuerdo a la radiación de la época para alcanzar al final del día la temperatura máxima de la cisterna. Para ello se extrae el agua de la parte inferior de la cisterna con bomba. Cuando alcanzó la temperatura máxima en el colector, cercano a la media tarde, se devuelve el agua calentada a la cisterna mediante caño vertical con agujeros a distintas alturas, para que el agua ingrese sin romper la estratificación.

Calculando la temperatura máxima en la cisterna de 65 grados C, una temperatura mínima útil de 25 grados C y una profundidad de 2 m realizamos el cálculo de su dimensionamiento. Supusimos que una serie desfavorable extrema pueden ser 10 días sin sol con temperatura media diaria de 0 grados C. (es la serie mas desfavorable encontrada en la Prov., en Villa Mercedes año 82 que tiene un clima mas riguroso que San Luis). En esas condiciones todavía la cisterna debe proveer la energía.

Los cálculos nos dan que por cada 1000 m cuadrados de invernadero se requiere una cisterna de 333 m cuadrados y la pérdida diaria de la cisterna para $T=55$ grados C es de 1421 MJ/día, o sea 1,421 MJ/día-m cuadrado de invernadero.

El colector plano solar para calentar la cisterna, proveer el calor al invernadero y compensar las pérdidas de la cisterna, debería tener una superficie de 1,2 m cuadrados por cada m cuadrado de invernadero, suponiendo un rendimiento de hasta 40%. Con este dimensionamiento estimado previo se hace una simulación del funcionamiento del sistema calefactor solar cisterna - invernadero.

3.- Simulación del funcionamiento térmico del sistema.

Se realizó un programa de computación que simula el funcionamiento térmico del sistema. Este programa tiene en cuenta los siguientes pasos en el proceso:

Toma la temperatura del agua de la parte inferior de la cisterna, la cual es introducida en el colector hasta una cierta altura, dependiendo esta de la época del año y de la temperatura máxima que se desea alcanzar. Tiene en cuenta la eficiencia del colector en función de la temperatura media ambiente, la temperatura media de trabajo y de la radiación del día. Al llegar el atardecer el agua reingresa a la cisterna y calcula la nueva temperatura media. Calcula las pérdidas de la cisterna hacia la tierra y el aire tanto durante el día como la noche. Al día siguiente reinicia el ciclo calculando la nueva temperatura que tendrá la base de la cisterna. El programa además tiene en cuenta los días en los que durante la noche en invernadero necesitará calefacción, lo que hace que se incremente la pérdida de temperatura en la cisterna.

Como el mes mas frío, es julio de acuerdo a la tabla 1, el invernadero de 1000 m cuadrados requiere, 2900 MJ/día de calefacción en promedio. Calculamos para junio y julio, entonces un requerimiento calórico de 3000 MJ/día. Partiendo así el 31 de mayo con la cisterna calentada a 65 grados C, esta irá perdiendo temperatura durante unos veinte días, hasta que la temperatura se estabiliza entre 42 y 44 grados C, donde se equipara la ganancia con la pérdida de calor. Comienza a predominar la ganancia sobre la pérdida a partir de los primeros días de agosto.

4.- Intercambiador.

Como vimos que el suelo no requería calefacción, decidimos colocarlo sobre este. Elegimos un enrejado de ida y vuelta del invernadero a fin de proveer un calor homogéneo. Como la demanda extrema puede ser de un T de 15 grados C., la potencia del intercambiador debe alcanzar este requisito que es de 175 W/m cuadrado de invernadero (sin viento) Suponemos además que esto puede ocurrir para una temperatura baja en la cisterna de 30 grados C. y con este requerimiento dimensionamos el intercambiador.

5.- Datos experimentales

a) Invernadero: Fue construido con caño estructural y la cubierta fue de polietileno U.V. térmico de 150 micrones con una sola puerta. La ventilación es a través de un extractor y una ventana en el lado opuesto a fin de evitar roturas por el viento. Está emplazado en una zona de intenso viento chorrillero (E-SE) que alcanza hasta 100 km/h. Esto provocó rotura una vez y desarmado en otra oportunidad de la cubierta. Por ello colocamos como reparo una malla 65% de sombra a unos tres metros del invernadero que dió buen resultado. Así mismo y para mayor seguridad se cubrió el invernadero con otra malla del tipo de bolsa de cebolla, de menos de un 10% de sombreado para asegurar el plástico contra la estructura. Adn así hubieron desplazamientos del plástico, pero dentro de límites admisibles.

Cultivo: Nos propusimos el cultivo de tomate y pimiento, probando también melones, pepinos, hinojo y algunas flores como claveles y otras.

Para tomate, nuestro principal interés, la temperatura mínima requerida es de unos 8 grados C para no interrumpir el crecimiento de la planta. Si la temperatura es menor deja de desarrollarse y con -2 grados C muere.

Nuestra experiencia nos mostró que después que la planta alcanzó los

20 cm, temperaturas entre 5 y 11 grados C. no la afecta. Si bien, se detectó una demora en el crecimiento, las únicas consecuencias visibles en la cosecha es un menor tamaño en alguno de los frutos, siendo esta una alternativa de cultivo a discutir.

Experimentalmente el consumo del invernadero de 100 m cuadrados, para mantener una diferencia de temperatura de 5 grados C con el exterior las 14 horas nocturnas, se encuentra en 5,5 l por noche de kerosén, unos 280 MJ. Esto al ser promedio real tiene en cuenta el viento. Quiere decir que el aporte de calor solar del suelo al ambiente puede calcularse en 170 MJ por noche (un 17% de la radiación recibida). El exceso en oferta de algo mas del 18% compensa en la práctica el viento que duplica la demanda una vez cada cinco días en promedio del invierno (se acentúa en primavera).

Vale decir que los cálculos previos, cotejados luego con la experiencia en esta temporada, nos indica que para mantener 5 grados C de mínima, se requirieren en la temporada aproximadamente 310 litros de kerosén o su equivalente energético.

Si queremos mantener una mínima de 11 grados C hacen falta 850 litros de kerosén.

Estos cálculos son de acuerdo a la demanda real de la temporada 93, que es más fría que la media histórica.

b) Intercambiador: medimos en el laboratorio potencia disipada por metro de caño de polietileno y manga de polietileno. Esto nos dió para 2 pulgadas de diámetro un valor de $Q = 57 + 3 W/m$, trabajando con temperaturas internas entre 37 y 50 grados C y externa de 18 grados C. Comparando con los datos similares para caño galvanizado (65 W/m) lo que es lógico considerando que la limitante es la convección del aire externo y teniendo en cuenta los costos, decidimos hacer el intercambiador con manga de polietileno de 2 pulgadas.

Calculando entonces el dimensionamiento para las peores condiciones, nos da una manga de ida y vuelta por metro y el caudal debe ser para nuestro invernadero de 100 m cuadrados de 0,25 l/seg o se aproximadamente 900 l/hora.

c) Colector plano: para determinar su comportamiento, construimos uno de 1,5 m cuadrados aproximadamente y lo evaluamos en su rendimiento para diversas temperaturas de entrada y salida y diversas radiaciones. Esto nos dió el rendimiento $= 0,53 + 4,6$ que usamos para el dimensionamiento del colector. Requiere un trabajo mínimo para su funcionamiento (llenado y vaciado del colector plano) ya que la circulación a través del intercambiador en el invernadero funciona con un termostato que conecta la bomba. En esta temporada, por falta de electricidad hasta octubre, no montamos el calentador solar y debimos calefaccionar con kerosén.

d) Resultados del cultivo

El resultado fué en general bueno. Se presentó un problema de hongos que fué resuelto con fungicida y eliminación de tres plantas muy atacadas, sin ulteriores problemas. No entresacamos frutos y se observa mucha dispersión en los tamaños, que van desde 30 a 200 gr con una media de 120 gr por tomate y unos 18 tomates de producción media por planta para los dos primeros meses que es nuestro interés. O sea que cada planta provee aproximadamente 2 kg, habiendo una densidad de seis plantas por m cuadrado. Esto nos da una producción de 12 kg/m cuadrado en los dos primeros meses.

6.-Análisis económico

El análisis económico lo realizamos sobre un módulo de 1000 m cuadrados como tamaño productivo, proyectando costos y beneficios. Comparamos con poza solar.

COSTO POR METRO CUADRADO DE INVERNADERO EN U\$S

	CON CISTENA Y COLECTOR	CON POZA SOLAR
INVERNADERO TERMINADO	3,4	3,4
CISTERNA	2,16	
COLECTOR PLANO	5	
POZA SOLAR		11
INTERCAMBIADOR Y BOMBA	0,6	0,6
TOTAL	11,16	15,0

TABLA 2

El costo de electricidad por temporada es de U\$S 90.

El costo del calentador solar propuesto resulta menor que el de la poza solar como se aprecia.

Los costos y beneficios proyectados en 10 años, comparando con energía convencional y teniendo en cuenta los costos de mantenimiento, sería aproximadamente así.

Cálculo para mantener 8 grados C de temperatura mínima.

Hacemos esta propuesta porque los resultados de cosecha son los esperados y entonces no se justifica una mínima mayor.

COSTOS Y BENEFICIOS COMPARATIVOS PARA MÓDULO PRODUCTIVO DE 1000 M CUADRADOS

INVERN. CON CALEF.:	SOLAR		CON KEROSEN	
	COSTO	BENEFICIOS	COSTO	BENEFICIOS
ANO 1	INVERSION 11160	9600	INVERSION 1000	9600
	CULTIVO Y FUNCIONA- MIENTO 800		CULTIVO Y FUNCIONA- MIENTO 710	
			COMBUSTIB. 1370	
ANO 2	MANTENIMIENTO ANUAL 1600	9600	MANTENIMIENTO ANUAL 750	9600
	CULTIVO Y FUNCIONA- MIENTO 800		CULTIVO Y FUNCIONA- MIENTO 710	
			COMBUSTIB. 1370	
RESULTADOS EN 10 ANOS	33560	96000	30650	96000
BENEF. EN 10 ANOS		62440		65350

Como se observa, los resultados son similares, siendo el convencional un 5% mejor. Esto significa que la solar es una alternativa para la adecuada o no dependiendo del lugar y la disponibilidad de combustible y otros elementos, siendo el costo un tema secundario.

Agradecimiento: Agradecemos la eficiente colaboración técnica de Luis Moleda, aportando soluciones prácticas y un empeño sin límites horarios.

Referencias:

- 1.-Datos 1981-90 del Servicio Meteorológico Nac. estación San Luis
- 2.-Datos estadísticos meteorológicos de la Ciudad de San Luis. Jorge Fernandez - comunicación personal.
- 3.-Datos sobre radiación solar en la Ciudad de San Luis - Lab. de Energía Solar - Univ. Nac. de San Luis
- 4.-El recurso eólico en la Ciudad de San Luis - Odicino, Faculo, Perelló, M. Torres y G. Barbenza.
- 5.-Construcción y operación de la poza de sulfato de sodio de Soc. Minera Pompeya S.A. Lesino - Saravia - Monguzzi - Caso - Gilli y Riera.
- 6.-Poza de sulfato de sodio de 600 m cuadrados. Construcción y mantenimiento. Lesino - Saravia - Cenzano - Biasco - Cadena y Caso. ASADES 83 Santa Rosa - La Pampa
- 7.- Poza de cloruro de sodio. Diseño, construcción y ensayos preliminares. Iriarte - Biagi - Moreno - Segui - Amaya. ASADES 84 - San Juan.
- 8.- Comportamiento experimental de una poza solar de 400 m cuadrados. Iriarte - Biagi - Segui - Garcia - Amaya. ASADES 85 - Neuquén