

## Invernadero geotérmico de baja entalpía para cultivo de jitomates

**Andrea Jasso Rivera y Héctor Aviña Jiménez**

Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas (iiDEA), UNAM, México, DF. Correo:

[AJassoR@iingen.unam.mx](mailto:AJassoR@iingen.unam.mx)

### RESUMEN

Aunque México tiene un importante uso indirecto de la geotermia para generar energía eléctrica, casi no utiliza este recurso en aplicaciones directas. Sin embargo, últimamente ha habido interés en los usos directos de la geotermia en la industria agroalimentaria, principalmente en la deshidratación de alimentos y en la climatización de invernaderos. México cuenta con más de 21 mil hectáreas destinadas a la agricultura protegida con invernaderos (63% del total), casa-sombra (22%) y túneles (15%). El 63% de la superficie total se encuentra en los estados de Sinaloa, Baja California, Baja California Sur y Jalisco. De acuerdo con la SAGARPA, los principales cultivos protegidos en el año 2013 fueron jitomate, pimiento y pepino. México es el décimo país productor de jitomate, y sólo en 2011 exportó 1,182,671 toneladas generando ingresos por 1,638 millones de dólares. El país exporta jitomate industrializado que puede ser almacenado por largo tiempo sin necesidad de refrigeración mediante una gran variedad de productos como el tomate en conserva, jugo de tomate y pasta de tomate.

En el diseño de un invernadero para producir jitomate es necesario seleccionar el tipo de cultivo a plantar, y conocer sus características y requerimientos, pero también deben conocerse bien las condiciones climáticas locales a fin de obtener producciones de alto rendimiento y prever las necesidades nutrimentales del tipo seleccionado, sus enfermedades y plagas. El jitomate es la hortaliza más cultivada en todo el mundo y es capaz de producir frutos que llegan a pesar hasta 750 gramos. Pero si bien es una planta muy común, su cultivo no lo es, ya que su temperatura óptima oscila entre los 13 y 24°C, con una humedad relativa del 60 al 80% y con un pH del suelo entre 6.2 y 6.8; cambios mínimos fuera de esos rangos pueden causar daños al cultivo y proliferación de plagas.<sup>1</sup>

En este trabajo se propone un invernadero que utilice recursos geotérmicos de baja temperatura disponibles en la localidad de Mexicali, Baja California. Mediante balances de masa y energía se cuantificarán los parámetros a considerar en el diseño como son la velocidad del aire, las temperaturas (máximas y mínimas letales), la humedad relativa, niveles de radiación, enriquecimiento carbónico y aireación, con el fin de limitar los factores climáticos que detienen el crecimiento y desarrollo adecuado del cultivo. Actualmente el proyecto sentó las bases para trabajos futuros de selección de equipos en función de la energía ganada y las pérdidas de acuerdo al clima del sitio para el sistema de calefacción y refrigeración, que tendrá como principal fuente de energía un recurso geotérmico de baja entalpía.

*Palabras clave:* Usos directos, invernaderos, calefacción, refrigeración, baja entalpía.

<sup>1</sup> “Jitomate”. Monografía de Cultivos, Secretaría de Fomento de los Agronegocios, Agosto 2010.

## Objetivo

Diseñar un invernadero a construir en Mexicali, BC, que aproveche la energía térmica del subsuelo, la cual será utilizada tanto en el sistema de refrigeración como en el de calefacción y riego con el fin de obtener condiciones óptimas para el cultivo de jitomates.

## Características generales del diseño

El invernadero tendrá una superficie de 186 m<sup>2</sup> para plantar 427 tomateras que deberán producir entre 3.8 y 5.5 toneladas de jitomate en un periodo de seis meses (Fig. 1).

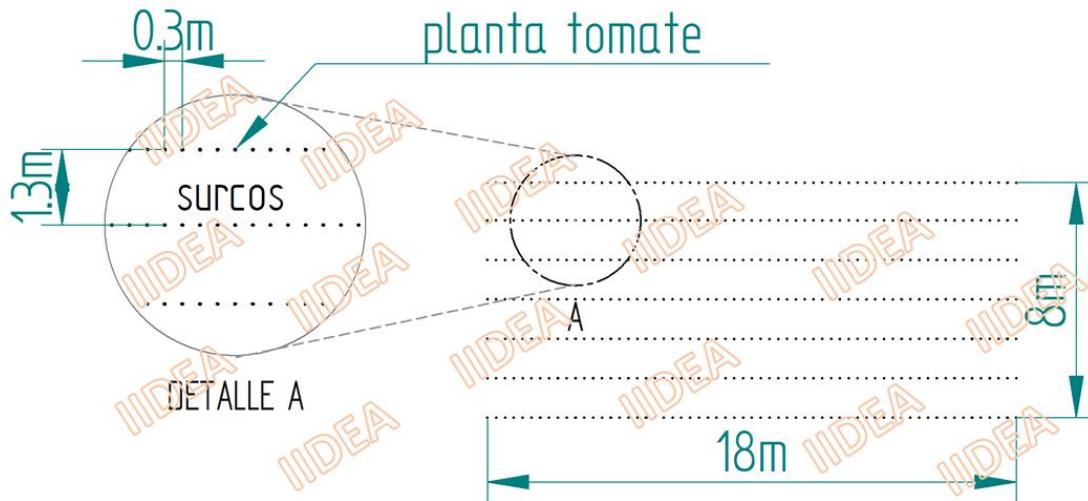


Fig. 1. Marco de plantación propuesto.

Para el diseño del invernadero fue necesario conocer los principales parámetros de operación, que en todos los casos están relacionados con el tipo de cultivo. Estos son: velocidad del aire, temperaturas (máximas y mínimas letales), humedad relativa, niveles de radiación, enriquecimiento carbónico y aireación. Datos recabados por la NASA para la estación meteorológica “Rancho Williams” reportan que el mes más caluroso en Mexicali por lo general es agosto, pero la mayor cantidad de radiación solar se presenta en el mes de junio. El mes con la tasa más baja de radiación y el más es diciembre<sup>2</sup>. Una vez establecidos los períodos más críticos a los que se someterá el invernadero, se definieron las temperaturas más severas que se han registrado en la región (Tabla 1), así como las condiciones óptimas diurnas y nocturnas del cultivo (Tabla 2).

CONDICIONES CLIMÁTICAS EJIDO GUADALAJARA

Temperatura máxima absoluta del año	52	°C
Temperatura media de las máximas diarias del mes más cálido	50	°C
Temperatura promedio diaria del mes más cálido	42.34	°C
Temperatura media mensual del mes más frío	5.34	°C
Temperatura media de las mínimas mensuales	5.28	°C
Temperatura mínima absoluta del año	-5	°C
Velocidad promedio viento	3.7	m/s
Humedad relativa promedio	34.5	%
Radiación promedio	5.3	kWh/m <sup>2</sup> día

Tabla 1. Condiciones climáticas críticas en la zona.

<sup>2</sup> Base de datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM). Disponible en: <<http://clicom-mex.cicese.mx/>>

Especie	Temp. Letal [°C]	Temp. Mín. Biológica [°C]	Temp. óptima [°C]		Temp. Máx. Biológica [°C]	Temp. óptima del suelo [°C]	Humedad Relativa [%]
			noche	día			
Tomate	-2 a 0	8 – 10	13 – 16	22 – 26	26 – 30	15 – 20	55 – 60

**Tabla 2. Exigencias de temperatura del cultivo de jitomate.<sup>3</sup>**

Los sistemas que se proponen emplear para mantener las temperaturas óptimas en el interior del invernadero son: sistemas de calefacción por aire caliente o por agua caliente, ventilación natural y forzada y refrigeración por evaporación de agua. En primera instancia es necesario definir el funcionamiento de los sistemas de climatización en el invernadero, considerando como fuente principal de energía el recurso geotérmico de baja entalpía. Este recurso cederá su energía a un flujo de aire forzado por medio de un intercambiador de calor, mientras que para el sistema de refrigeración se propone la utilización de bombas de calor. Estas que proporcionarán agua fresca al sistema de nebulización, y además con el uso de algún refrigerante sería posible enfriar aire y recircularlo en el interior del invernadero para el mes más cálido (Fig. 2).

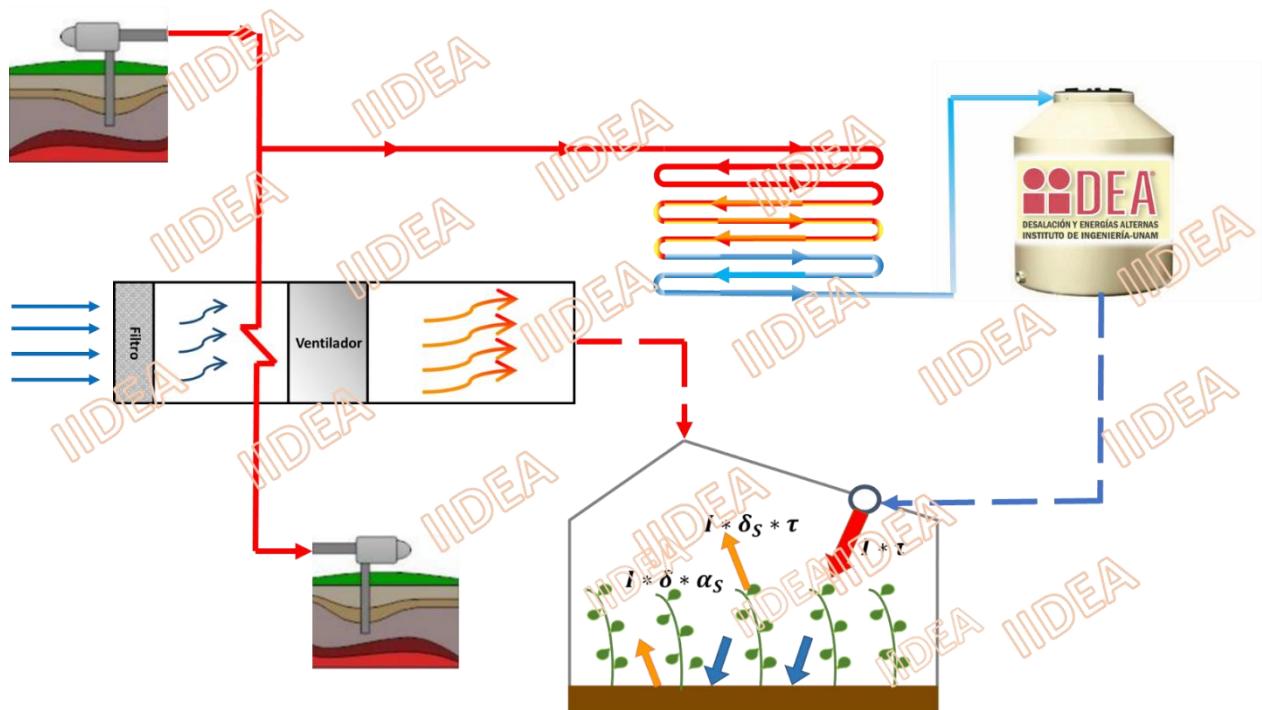


Fig. 2. Diagrama de los procesos térmicos involucrados dentro del invernadero.

Una vez entendido el funcionamiento del Balance de Energía queda de la siguiente manera (ver Fig. 3):<sup>4</sup>

$$R_n + Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} \dots [1]$$

<sup>3</sup> "Medios de protección para la hortoflorofruticultura y el viverismo". TESI, R. Mundi-Prensa, Madrid, 288 pp. 2001.

<sup>4</sup> “Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos”. Diego L. Valera, Francisco D. Molina y Antonio J. Álvarez. Universidad de Almería con la colaboración del Departamento de Biomasa del CENER para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2008.

**donde:**

$R_n$  = radiación neta [W].

$Q_{clu}$  = energía climatización, puede ser de calefacción ( $Q_{cal}$ ) o de refrigeración ( $Q_{ref}$ ) [W].

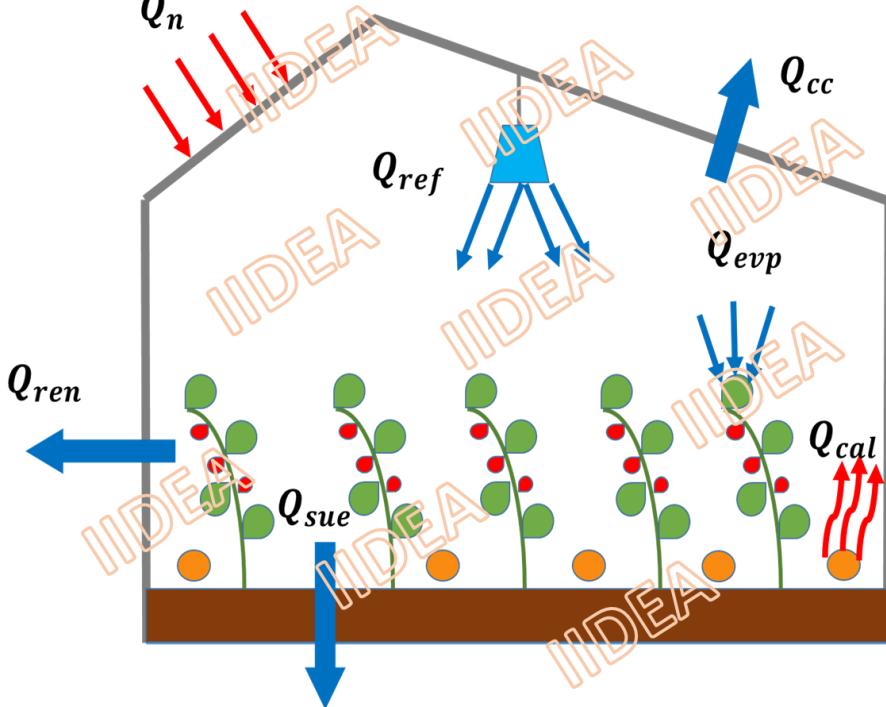
$Q_{cc}$  = calor perdido por conducción – convección [W].

$Q_{ren}$  = calor sencible y latente perdido por la renovación del aire en el interior del invernadero [W].

$Q_{evap}$  = calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo [W].

$Q_{sue}$  = flujo de calor perdido por conducción a través del suelo [W].

**tsue** - May we enter permissibly for consultation a house where there [ ... ]



**Fig. 3. Balance de energía en el invernadero**

Siendo:

$$R_n = S_S [I * (\alpha + \tau * \alpha_s)] + S_C * \sigma * \tau_{ter} * (\varepsilon_{atm} * T_{atm}^4 - \varepsilon_{ter} * T_C^4) \dots \dots \dots [2]$$

$$Q_{ren} = V_{inv} \cdot \frac{R}{3600} \cdot \rho \cdot [c_{pa} \cdot (t_i - t_e) + \lambda_0 \cdot (x_i - x_e) + c_{pv} \cdot (t_i x_i - t_e x_e)] \dots \dots \dots [4]$$

$$Q_{even} = S_C \cdot (0.2 \cdot R_{sol} + 5.5 \cdot DPV_i + 5.3 \cdot u) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots [5]$$

**S<sub>s</sub>** = superficie captadora de la radiación solar [**m<sup>2</sup>**]

**I** = radiación solar incidente  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$\alpha$  = coeficiente de absorción de la cubierta para la radiación solar

$\tau$  = coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar

**S<sub>C</sub>** = superficie de suelo cubierta [ m<sup>2</sup> ]

$\tau_{ter}$  = coeficiente de transmisión del material para la radiación térmica

$\epsilon_{ter}$  = emisividad del material de cubierta para la radiación térmica

$T_c$  = temperatura absoluta en la cubierta

$$\sigma = \text{constante de Stefan - Boltzman} = 5.67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$$

**S<sub>d</sub>** = superficie de la cubierta del invernadero [m<sup>2</sup>]

**t<sub>i</sub>** = temperatura del interior invernadero [°C]

$t_e$  = temperatura del exterior [°C]

**V<sub>inv</sub>** = volumen del invernadero [m<sup>3</sup>]

$$c_{pa} = \text{calor específico del aire} = 1006.9254 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \right]$$

$$c_{pv} = \text{calor específico del vapor recalentado} = 1875.6864 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right]$$

$x_i, x_e$  = humedades absolutas interiores y exteriores [kg]

$\rho$  = densidad del aire

**p** = presión en el inv.

**p** ≡ presión en el invernadero, suele considerarse como la atmosférica [1]

$\lambda_0$  = calor latente de vaporización  $\left[ \frac{J}{kg} \right]$

$$R_{sol} = \text{radiación solar diurna} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

**u** = velocidad del viento  $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

**DPV<sub>i</sub>** = deficit de presión de vapor en el interior del invernadero [kPa]

**K<sub>s</sub>** = conductividad térmica del suelo  $\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$

**S<sub>c</sub>** = superficie del suelo [m<sup>2</sup>]

$t_s$  = temperatura del suelo del invernadero [°C]

**p** = profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura [m]

Despejando de la Ecuación [1]:

$$Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evn} + Q_{sue} - R_n \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots [1a]$$

Una vez cuantificada la energía necesaria de climatización es posible determinar la temperatura necesaria del recurso geotérmico, el flujo másico y una propuesta general de la tubería.

Finalmente el calor emitido por nebulización ( $Q_{ref}$ ) dentro del invernadero genera una caída en la temperatura del aire, que es posible cuantificar con la siguiente ecuación:

donde:

**Q<sub>ref</sub>** = calor de nebulización [W]

**qu<sub>evp</sub>** = caudal emitido por las boquillas de nebulización  $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$

En la Tabla 3 se presentan las cantidades del calor que es necesario suministrar durante el mes de diciembre para el sistema de calefacción. Las mayores pérdidas de calor ocurren debido a la renovación de aire en el interior por aire fresco del exterior. El segundo factor a considerar es la humedad dentro del invernadero, la cual siempre debe mantenerse constante. Por ello, al humidificar el aire del exterior se estará removiendo calor del recinto, de tal manera que los casos más críticos serían casos A y D de la tabla, resultando necesario una carga térmica de entre 522 y 689 [kW].

En el sistema de refrigeración las pérdidas de calor más representativas se deben igualmente a la renovación de aire. Así, en la Tabla 4, al comparar el caso N contra el L, donde el delta de temperatura entre uno y otro varía por 10°C, se observa que la carga a disipar se cuadriplica. El caso L es el más crítico de todos los considerados, ya que la cantidad de energía a disipar es de 1004 [kW].

Calefacción	Ti-Tc	Rn [W]	Qcc [W]	Qren [W]	Qevp [W]	Qevp [W]	Qsue [W]	Q total [kW]
A	21	-64	-17	-759	-28	-31	-4	-745
B	14	-20	-11	-613	-28	-29	-4	-636
C	11	-22	-7	-503	-28	-27	-4	-522
D	15	-64	-11	-510	-57	-22	0	-515
E	8	-20	-5	-355	-57	-19	0	-398
F	5	-22	-3	-259	-57	-16	0	-297

**Tabla 3. Resultados obtenidos del Balance de Energía, para el sistema de calefacción durante el mes de diciembre.**

Refrigeración	Ti-Tc	Rn [W]	Qcc [W]	Qren [W]	Qevp [W]	Qevp [W]	Qsue [W]	Q total [kW]
G	-22	87	23	933	-109	-164	-7	753
H	-20	85	21	755	-109	-154	-7	575
I	-12	77	13	178	-109	-113	-7	215
J	0	66	0	486	-109	0	-7	303
K	4	63	2	-653	-109	-55	-7	-830
L	-26	87	28	1206	-137	-173	-4	1004
M	-24	85	25	1027	-137	-163	-4	826
N	-16	77	17	450	-137	-125	-4	249
O	-4	66	2	214	-137	-55	-4	283
P	0	63	0	381	-137	0	-4	176

**Tabla 4. Resultados obtenidos del Balance de Energía, para el sistema de refrigeración durante el mes de agosto.**

Con el sistema de nebulización es posible reducir 5381 [kW], lo que equivaldría a disipar el calor generado por cincuenta bombillos de 100 [W], con el simple hecho de esparcir agua por todo el invernadero.

### Conclusiones y recomendaciones

Es importante recordar que las temperaturas óptimas no serán siempre las mismas a lo largo del ciclo de crecimiento de la planta de jitomate, sino que variarán en función de la etapa de crecimiento, y que la temperatura en el interior del invernadero no es constante. Aquí se han generalizado los casos para simplificar, seleccionándose sólo los casos más representativos.

Por otro lado, hay varios puntos importantes a destacar a partir de los resultados obtenidos en el Balance Energético. Entre ellos están los siguientes:

Para el sistema de calefacción se consideraron las condiciones más críticas (caso A) y las condiciones promedio (caso B) para el mes más frío del año (ver Tabla 3). La cantidad necesaria de calor a suministrar por metro cuadrado está entre 3.4 y 4 [kW/m<sup>2</sup>]. Ello implica que sería necesario contar con un recurso geotérmico a una temperatura aproximada de entre 70 y 120°C (ver Fig. 4).

Por su parte, para el sistema de refrigeración se propuso la implementación de un sistema de bombas de calor geotérmico, planteándose las bases necesarias a considerar para poder seleccionar más adelante el equipo más adecuado. En este caso, la carga unitaria a disipar, por metro cuadrado, oscila entre 3.7 y 5.4 [kW/m<sup>2</sup>] (ver Fig. 5).

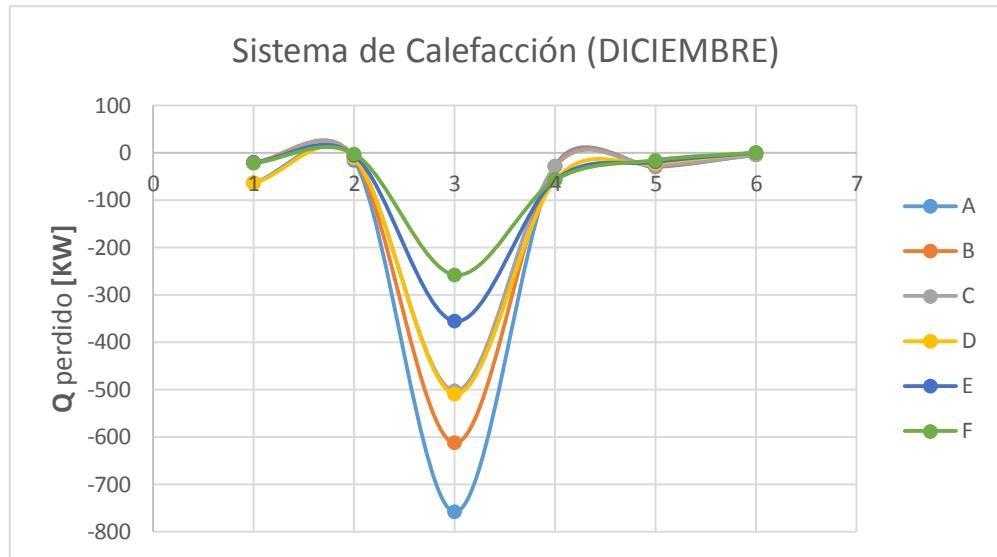


Fig. 4. Sistema de calefacción.

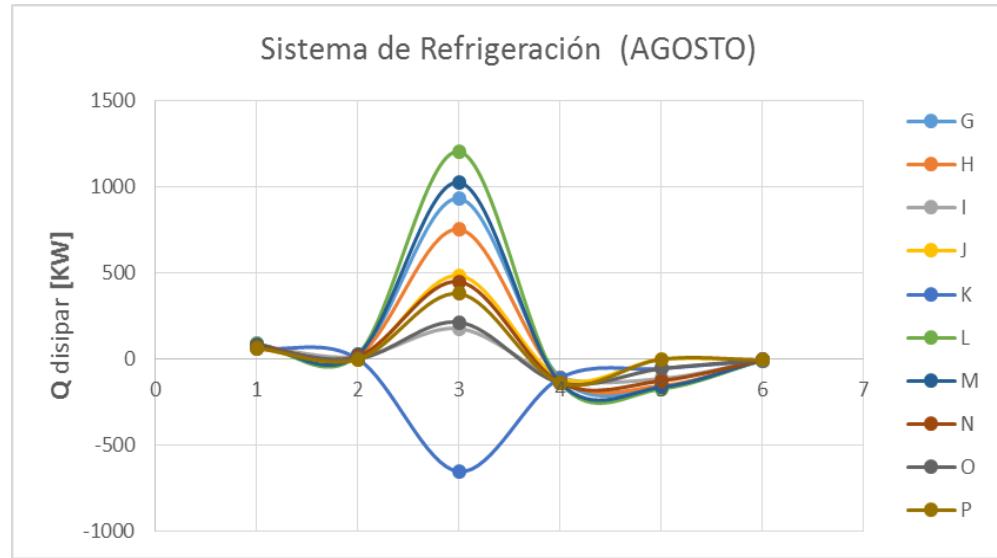


Fig. 5. Sistema de refrigeración.

Implementar estos sistemas de climatización permitiría generar dos producciones de jitomate al año, mientras que con la agricultura convencional solo es posible una cosecha anual.

Como trabajo futuro se recomienda desarrollar sistemas que minimicen cambios bruscos de temperatura, por ejemplo utilizando recubrimientos y aislantes. Actualmente es posible evitar los cambios bruscos con sistemas de pantallas térmicas y de sombreo, mientras que las cubiertas plásticas de doble capa son capaces de modular la cantidad de radiación solar y minimizar las pérdidas de calor por convección. En los invernaderos españoles el uso de estos sistemas ha resultado en un aumento del 30% promedio en la producción, pues es posible mantener el calor recogido durante el día durante la noche, con los consiguientes ahorros de energía, que van de un 20% hasta un 60%.