

Sistemas HVAC para Agricultura en Ambiente Controlado

Dr. Nadia Sabeh, P.E., LEED AP

Agricultural and Mechanical Engineer

Guttman & Blaevoet Consulting Engineers

May 21, 2015



International Congress on
**Controlled Environment
Agriculture**

Sistemas HVAC para AAC

- Definir HVAC y Control de Clima
- Factores que hacen necesario el control del ambiente
- Estrategias y sistemas HVAC



¿Qué es “HVAC” ?

Heating, Ventilation, & Air Conditioning (Cooling)

Calefacción, Ventilación, & Aire Acondicionado (Enfriamiento)



CONTROL DEL AMBIENTE: Para crear y mantener las condiciones climáticas deseables dentro de un espacio cerrado.

- Temperatura (T)
- Humedad (RH, VPD)
- Flujo de Aire (AF)
- Dióxido de Carbono(CO₂)



¿Por qué Controlar Ambiente?

1. Cultivar cultivos en cualquier ambiente
2. Proporcionar ambiente óptimo
3. Cultivar todo el año
4. Control de plagas (hongos, insectos, etc)
5. Maximizar rendimientos de cultivos
6. Maximizar calidad de cultivos
7. Maximizar ganancias \$\$



The background image shows an industrial site. In the foreground, there is a large, white, cylindrical storage tank or silo. To its right, a tall, dark chimney stack rises into the sky. In the background, there are various industrial structures, including a large building with a metal roof and some piping. Two people are visible in the distance on the right side of the image. The overall scene is somewhat hazy or overcast.

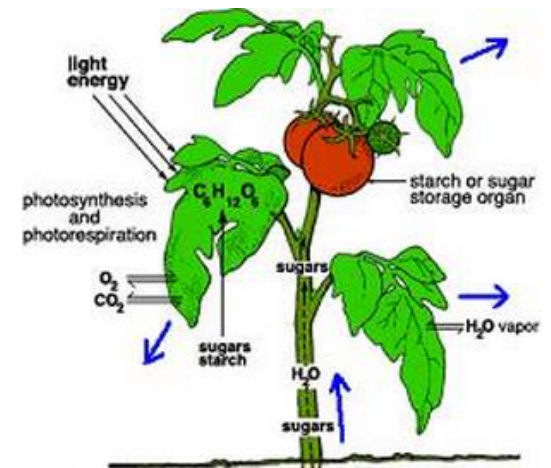
Consideraciones sobre Diseños & Selección de Sistema

Criterio de Selección de HVAC

1. ¿Qué cultivo → condiciones de cultivo?
2. ¿Qué sistema(s) se necesitan?
3. ¿Qué tamaño de equipo (capacidad)?
4. ¿Cómo el equipo se va a controlar y mantener?
5. ¿Cuáles son los costos asociados?
6. ¿Opciones de sistemas/alternativas?

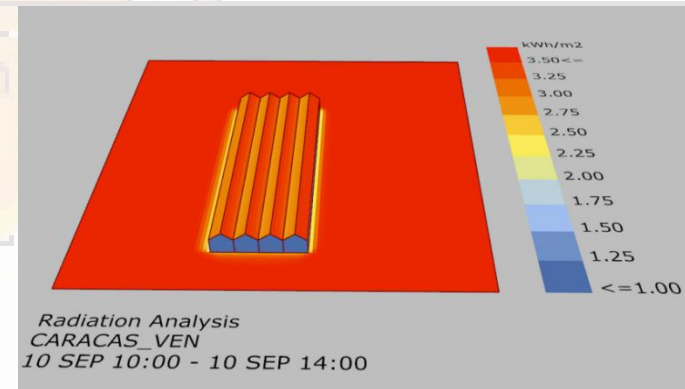
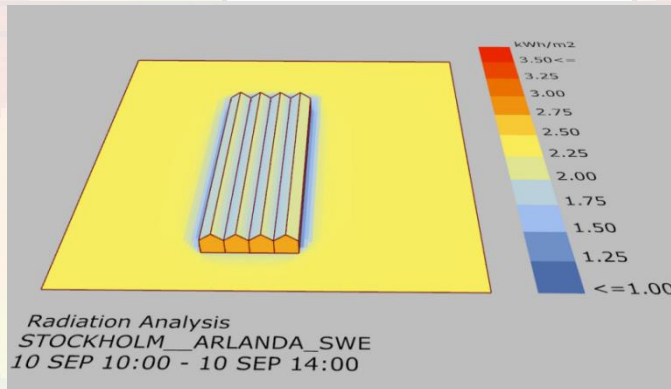
1. Cultivo

- Condiciones de cultivo
 - Temperatura, HR, CO₂, Velocidad del aire, (Luz)
 - Interacciones Planta/Ambiente
 - Transpiración: adición de humedad
 - Intercambio de gases: eliminación de CO₂ /adición de O₂
- Diseño de cultivo
 - Cama o en tierra
 - Llano o Vertical
 - flujo de aire y distribución



2. Localización Geográfica

- Condiciones al aire libre (Ambiente)
 - Temperatura de aire
 - Humedad
 - Radiación solar
 - Viento

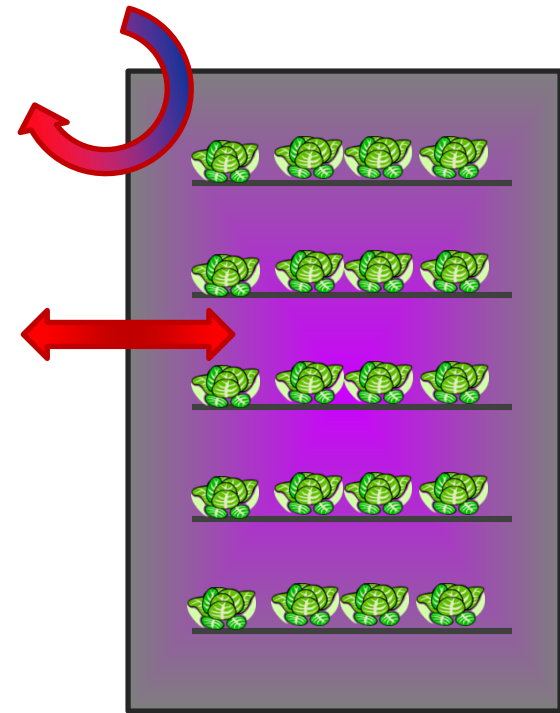


3. Estructura de Cultivo

- Tipo
 - Invernadero (GH)
 - Cultivo en Interior(IG)
 - Granja Vertical(VF), Sistema de Producción de Planta Cerrado(CPPS)
- Envoltura/Cubierta
 - Invernadero: Vidrio, plástico → transparente
 - Interior: Concreto, metal → opaco
- Tamaño
 - Volumen y superficie

4. Fuentes y Pérdidas de Calor

- Condiciones Externas
 - Cubierta/Envoltura
 - Ventilación
- Equipo de Interior
 - Luz
 - Bombas/motores
 - Deshumidificadores



5. Manejo del Cultivo

- Ciclo del Cultivo
 - Temporado de cultivo
 - Rotación de cultivo
- Controlabilidad
 - Mitigar extremos
 - Control ajustado (minimizar desviaciones)
- Personal (complejidad)



6. Costo \$\$

Costo de Compra
Costo de Instalación
(Costo de Diseño)

Costos de Operación
Costos de Mantenimiento





Sistemas de HVAC & Estrategias

Estrategias de Control de Ambiente

1. “Abierto” – todo el aire exterior
2. “Cerrado” – sin aire exterior
3. “Semi-Cerrado” – uso estratégico del aire exterior
4. Presurización
 1. Presión Negativa- Extractores tiran aire al espacio
 2. Positivo – Ventiladores de suministro empujan el aire hacia el espacio
 3. Neutral - Suministro = Escape

Sistemas HVAC para CEA

1. Ventilación
2. Enfriamiento
3. Calefacción
4. Humidificación
5. Deshumidificación
6. Circulación de aire
7. Enriquecimiento de CO₂
8. Manejo del Ambiente
9. Oportunidades & Sinergia



1. Ventilación

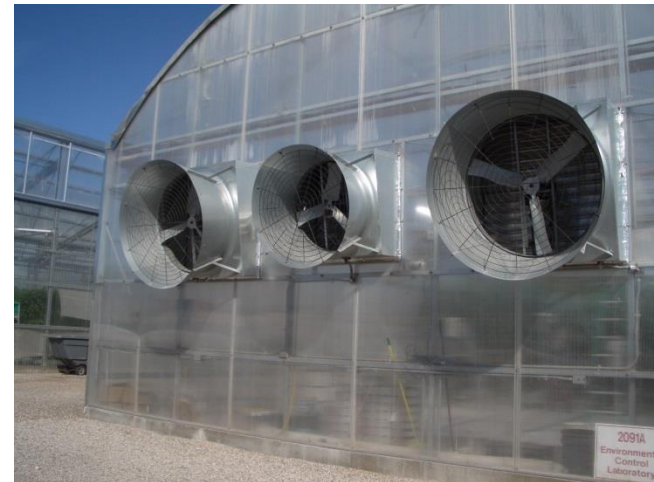
- Intercambio de aire entre el interior y exterior
- 1^{ra} Etapa de Enfriamiento
- Beneficios
 - Reponer CO₂
 - Remover aire húmedo
- Tasa de intercambio de Aire depende de:
 - Ambiente exterior
 - Equipo de calefacción y enfriamiento
- Métodos
 - 1) Ventilación Mecánica(MV)
 - 2) Ventilación Natural(NV)



1. Ventilación

1) Ventilación Mecánica(MV)

- Producido activamente por VENTILADORES
- Ventiladores tiran el aire a través de respiraderos localizados en lado opuesto al final del invernadero, a lo largo de paredes laterales, o en el techo
- Ventiladores llevan/extraen aire de los VF usando difusores en varios lugares



1. Ventilación

2) Ventilación Natural (NV)

- Producido pasivamente por RESPIRADEROS en paredes & techo
- Aire se mueva entre y afuera del invernadero/VF por
 - 1) flotabilidad (“efecto chimenea”)
 - 2) viento



Photo courtesy of Dr. Sadanori Sase

1. Consejo de Diseño: MV (GH, VF)

Pruebe con un ventilador de velocidad variable (de accionamiento directo, VFD)

- Controlar la velocidad Variable de los ventiladores, basándose en la necesidad
- Costo adicional pequeño

1. Uso para las necesidades del Verano e Invierno

2. Limitar Ciclo de encendido/apagado

- Proporciona más condiciones estables
- Reduce desgaste

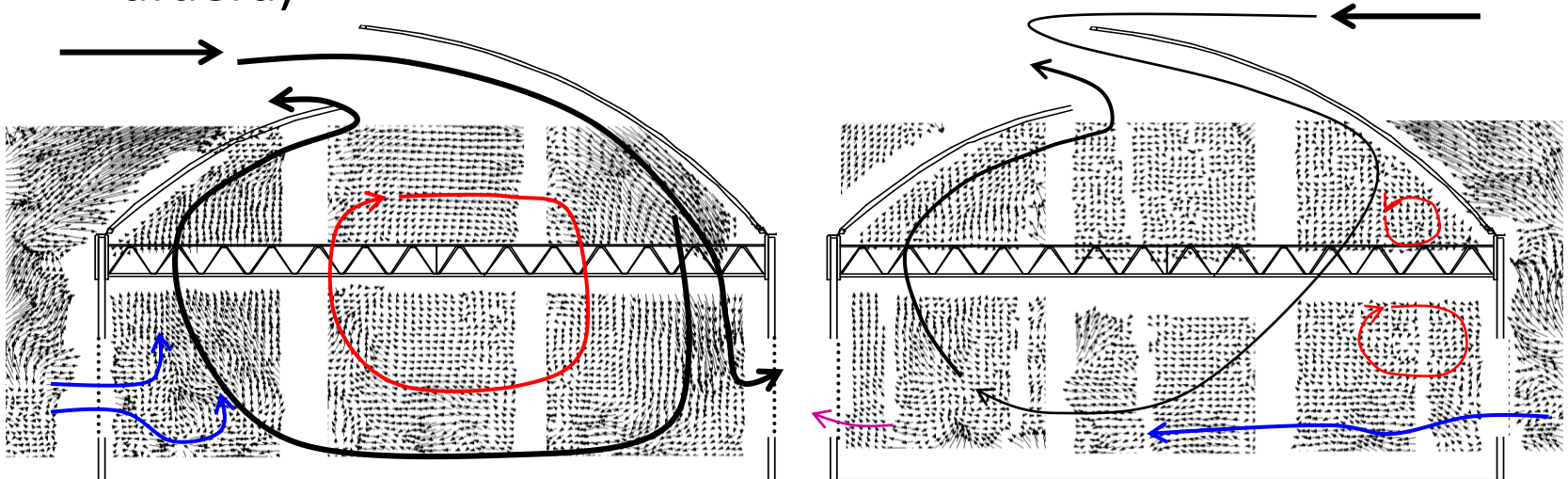
3. Reducir Uso de Energía (costos)

- Operación más eficiente (no operando contra presión estática alta como cuando la abertura del respiradero es reducida)
- Menos energía necesaria para operar ventilador a baja RPM
- Reduce sobrecarga energética de ciclos de encendido/apagado

1. NV(GH): Consejo de Diseño

Localización/Dirección de aberturas de ventilación es importante

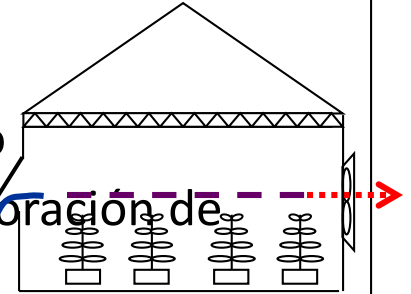
- Abertura cenital hacia el viento → velocidad máxima del aire a GH
- Abertura cenital lejos del viento → mayor uniformidad en GH
- Abertura lateral hacia el viento → más aire a GH
- Abertura lateral lejos del viento → aire atrapado (mucho afuera)



1. Ventilación

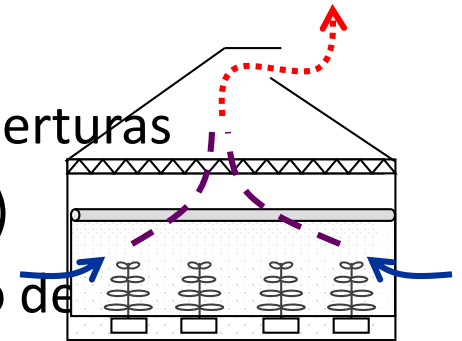
Ventilación Mecánica

- + Fácil de Controlar → Prender y apagar ventiladores
- + Predecible → Saber tasa de ventilación & dirección del flujo
- + Uso con parche húmedo, neblina, or enfriamiento por evaporación de neblina
- Ventiladores al final del invernadero → flujo de aire en una sola dirección
- *Necesita energía: energía usada por ventilador (1-1.5 hp/ventilador)*



Ventilación Natural

- + Muy poca energía es requerida para abrir/cerrar aberturas
- + ↑ Uniformidad con muchas ventanas (techo, pared)
- + Utilizar con neblina o enfriamiento de evaporativo de
- + Mayormente efectivo en condiciones de frío en el exterior
- Poco efectivo en condiciones de calor en el exterior
- Depende de condiciones exteriores
- Se dificulta el control y predicción de la tasas de ventilación



2. Enfriamiento

- Reduce temperatura del aire interior
 - Remueve energía calórica en el área de cultivo
- Métodos comunes
 - a) Ventilación: remoción de aire caliente
 - b) Somreado: impide que calor entre al GH
 - c) Enfriamiento evaporativo: transfiere el calor al agua
 - d) Enfriamiento basado en refrigerante : transfiere el calor al refrigerante



2. Sombreado

- Bloquea radiación solar por encima de espacio acondicionado
 - Bloquea de 10-60% de radiación solar
 - Puede reducir temperatura interior de 1-3C (2-6degF)
- Paño de sombreado/pantalla
 - Permanente o movable
 - Interior o exterior
- Compuestos de sombreado
 - Superficie exterior

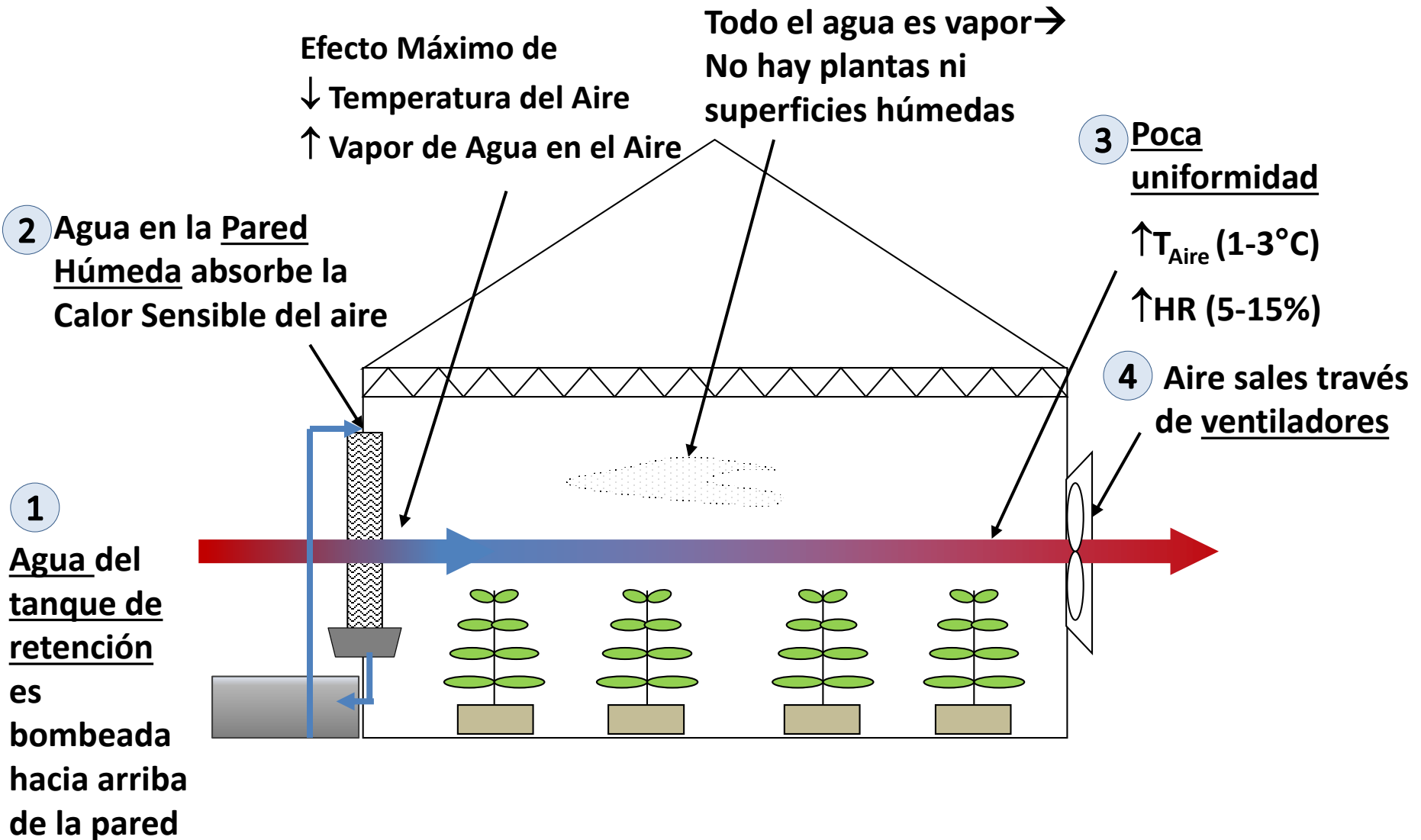


2. Enfriamiento Evaporativo

- Simultáneamente enfriado y humificación
- Mayormente efectivo en climas secos y calientes
 - Poco efectivo en climas húmedos y calientes
- Métodos comunes(GH)
 - 1) Pared húmeda (Wet wall)
 - 2) Niebla de Alta Presión
 - 3) Nieblina de Baja Presión



2. Pared Húmeda (GH)



3. Nebulización y Aspersión

- Aspersor-de-Baja-Presión

- Boquilla de orificios grandes (hoyos)
- Presión de Operación < 0.4 MPa (50 psi)
- Gotas de agua largas ($> 100 \mu\text{m} = 0.1$ mm)

→ *Baja evaporación mayormente en superficies (plantas, suelo, etc)*

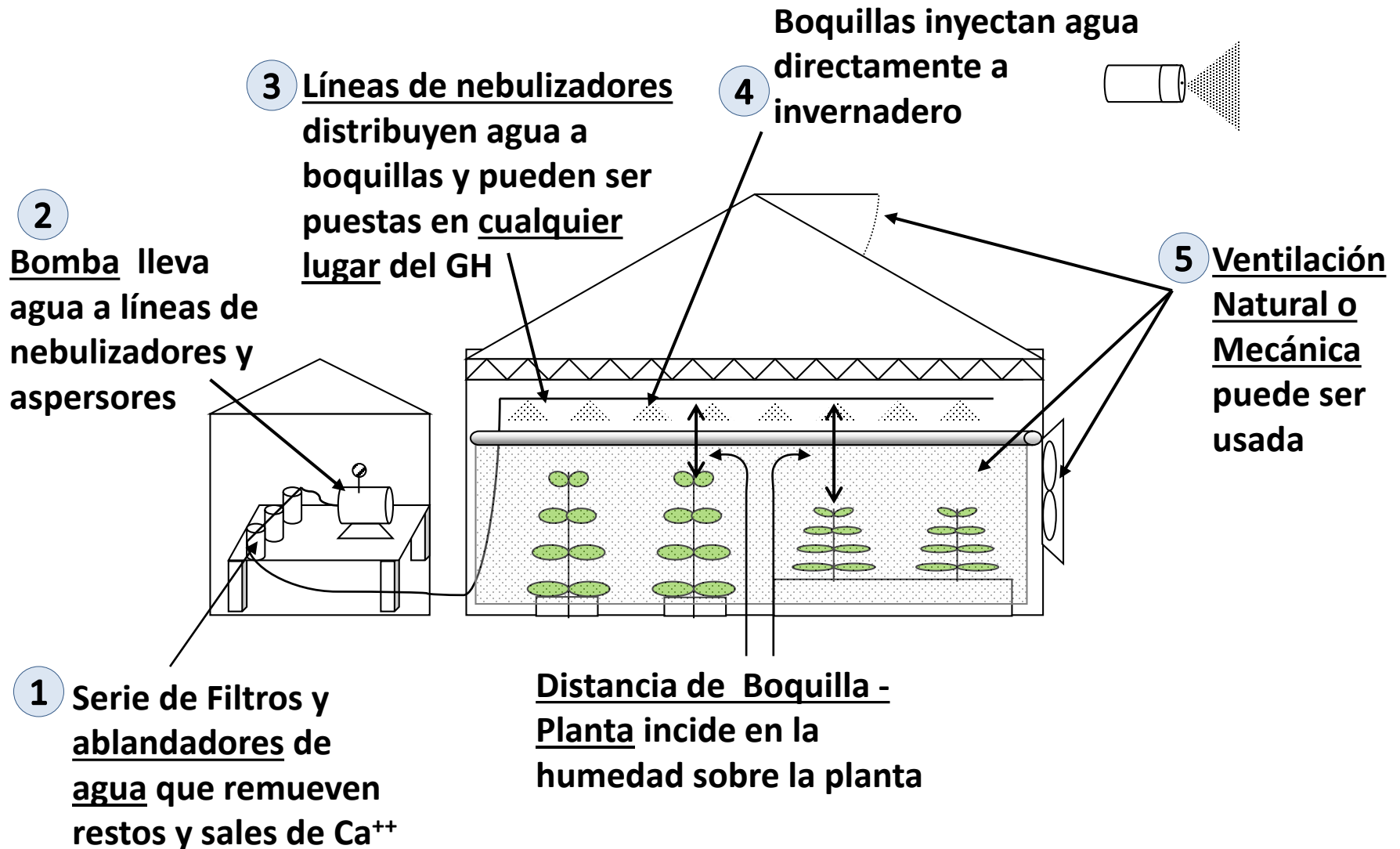
- Nebulizador-de-Alta-Presión

- Boquilla de orificios pequeños(hoyos)
- Presión de Operación = 7-14 MPa (1000-2000 psi)
- Gotas de agua muy pequeñas (5-20 μm)

→ *¡Evaporación rápida...en el aire!*



2. Niebla & Neblina



2. Enfriamiento Evaporativo(VFs)

- “Enfriamiento Evaporativo Directo” (DEC)
 - Agua se evapora directamente en el aire, para luego ser llevada al cuarto de cultivo
- “Enfriamiento Evaporativo Indirecto” (IEC)
 - Rocíe HEX para mejorar la transferencia de calor y aumentar la eficiencia de los equipos
 - “Enfriamiento Evaporativo Directo Indirecto” (IDEC)
 - Hacer ambas

2. Pared Húmeda: Consejo de Diseño

Velocidades de aire mayor no son necesariamente mejores

$$\text{Área de Pared Húmeda (ft}^2\text{)} = \frac{\text{Tasa de Ventilación (ft}^3\text{min}^{-1}\text{)}}{\text{Velocidad con que atraviesa la pared (ft min}^{-1}\text{)}}$$

- Si se quiere más velocidad de enfriamiento, se incrementa el área de pared y, no la velocidad
 - ↑ Velocidad del aire → pared pequeña, pero con menor efecto de enfriamiento
 - ↓ Velocidad del aire → pared grande, mayor efecto de enfriamiento (5-10%)
- Velocidad máxima depende del tipo de material y grosor
 - Celulosa Corrugada:
 - Grosor de pared = 4" → velocidad con que atraviesa la pared = 250 ft min⁻¹
 - Grosor de pared = 6" → velocidad con que atraviesa la pared = 400 ft min⁻¹
 - Fibra Aspen:
 - Grosor de pared = 4" → velocidad con que atraviesa la pared = 200 ft min⁻¹
 - For dry climates → use 250 ft min⁻¹

2. HPF/LPM: Consejo de Diseño

Maximizar evaporación poniendo cuidado en la ubicación de las boquillas

- Neblina es dirigida a la corriente de aire (cerca de aberturas)
- Cuanto más alto sea mejor → reducir el agua que cae en las plantas (probar a 1 m de distancia de la boquilla a la planta)
- Ventilación Mecánica
 - Alternar líneas de aberturas y ventiladores
- Ventilación natural
 - Abertura cenital: inyecta niebla arriba donde la calor es mucha



2. Enfriamiento Evaporativo

Enfriamiento de Pared Húmeda

- + Sistema simple de operar y controlar
- + Fácil de predecir el rendimiento y la eficiencia de enfriamiento
- + Todo el agua se vaporiza
- Todo la evaporación ocurre en la pared húmeda (no hay uniformidad)
- No puede utilizar ventilación natural
- *Energía usada por los ventiladores (1-1.5 hp/ventilador) y bomba de la pared (< 1.0 hp)*

Enfriamiento por Nebulización de Alta-Presión

- + Usa con ventilación natural o mecánica
- + Capacidad de lograr un clima muy uniforme
- Difícil de determinar los mejores procedimientos de control/ operación
- Agua no evaporada puede aumentar el riesgo de patógenos
- *Energía usada por la bomba para nebulizar (> 3 hp) y ventiladores (1-1.5 hp cada uno)*

2. Enfriamiento Basado- en Refrigeración

- Simultáneamente enfriamiento y deshumidificación
- Bien efectivo en
 - Climas Calientes y Húmedos
 - Ambientes cerrados/semi-cerrado (granajas verticales)
- Sistemas Comunes
 - Central
 - Sistema Split

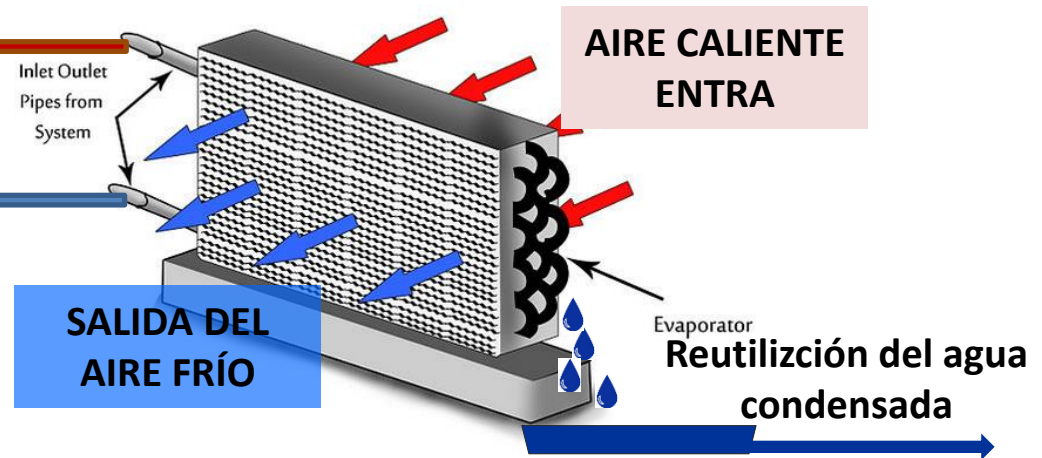
“DX” = Expansión Directa
Calor del aire se transfiere al refrigerante, causando que este se evapore y se “expanda”

2. Enfriamiento Basado- en Refrigeración

3 Repulsión de la Calor: calor absorbido por el refrigerante es enviado afuera del área de cultivo

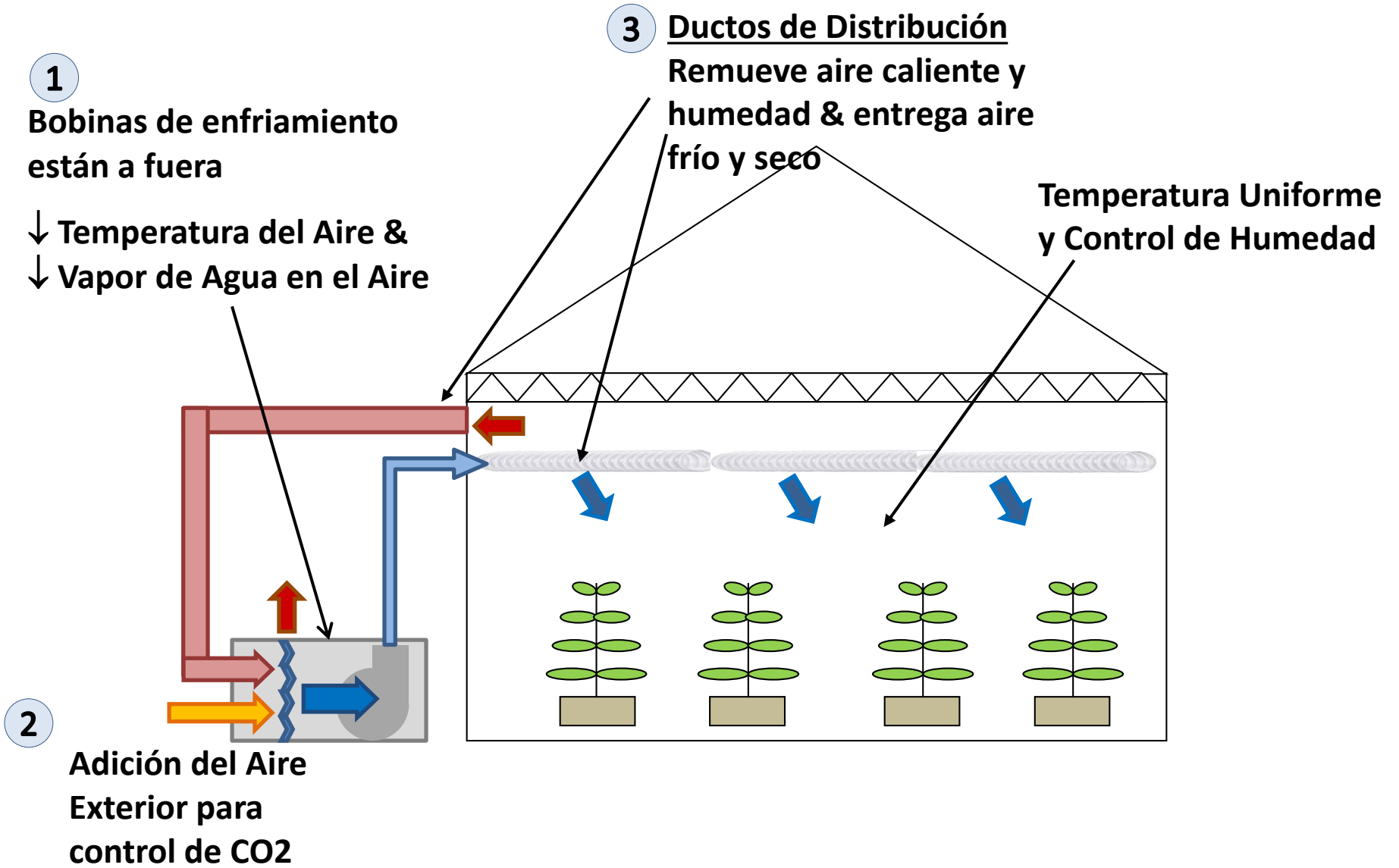


1 Enfriamiento: Calor es transferido del aire al refrigerante en la bobina evaporativa



2 Deshumidificación: Vapor de agua se condensa en la bobina evaporativa

2. Sistema de Enfriamiento Central (GH)



2. Sistema de Enfriamiento Central (VF)

Bobinas de enfriamiento están a fuera

↓ Temperatura del Aire &

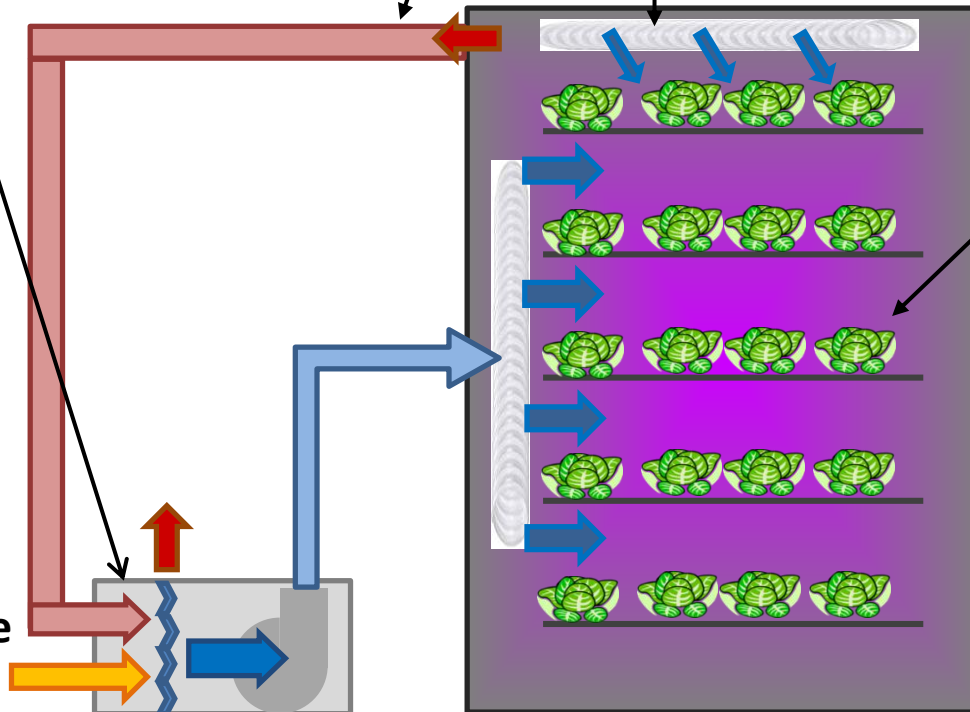
↓ Vapor de Agua en el Aire

1

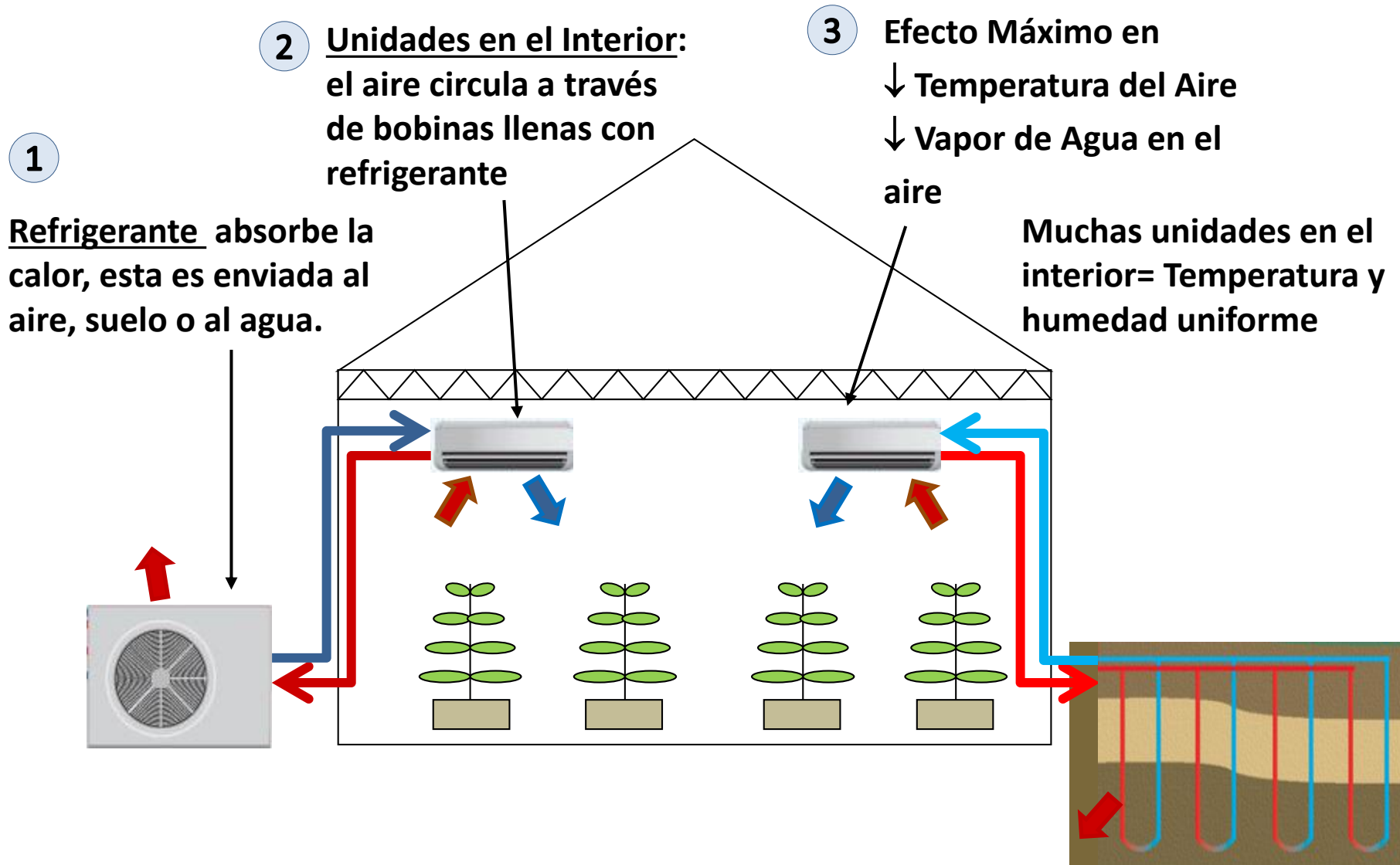
2 Adición del Aire Exterior para control de CO2

3 Ductos de Distribución:
Remueve aire caliente y humedad & entrega aire frío y seco

Temperatura Uniforme y Control de Humedad



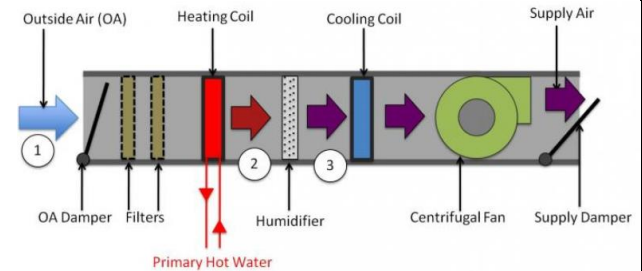
2. Sistema de Enfriamiento Split



2. Enfriamiento Basado- en Refrigeración

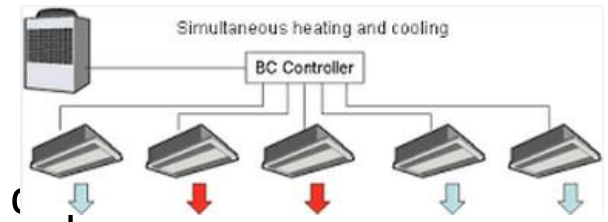
Sistemas Central

- + Fácil de controlar
- + Condiciones uniformes
- + Mejor para VF & CPPS
- + Se puede también usar para calentar
- Ductos sobre el cultivo → Reduce la transmisión de luz en GH
- Control basado en 1 termostato o del promedio de termostatos en el espacio
- Requiere grandes volúmenes de aire para distribuir
- Intensidad Energética: uso de mucha energía por compresores y ventiladores



Sistemas Split

- + Alta eficiencia energética
- + También se usar para calentar
- + Control individual de unidades en el interior → uso local
- + Central o no central → control de ventilación flexible
- Ductos/Unidades de Pared reducen transmisión de luz
- Necesita varias unidades en el interior para lograr uniformidad
- Requiere de un contratista especial para instalar las tuberías de refrigeración



3. Calefacción

- Aumento de la temperatura del aire interior
 - Adición de energía calórica para área de cultivo
- Reduce HR, pero no el contenido de vapor de agua
- Métodos Comunes
 - a) Aire Caliente: Adición de calor directamente al aire
 - b) Agua Caliente: agua caliente entra a tuberías, radiadores, e intercambiadores de calor
 - c) Radiador: emite calor a la superficie (hojas)
 - d) Refrigeración: bomba de calor
 - e) Vapor: Radiadores



3. Calefacción: Aire Caliente

- Tipos

- Unidad de calefacción
- Horno central
- Línea eléctrica
- Bobina de Agua/Vapor caliente



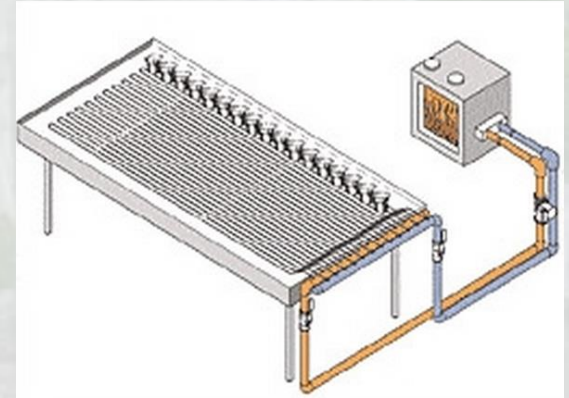
- Distribución

- Por encima, directo al aire del cultivo
- Central con suministro de aire caliente
- Debajo del piso y cama



3. Calefacción: Agua Caliente

- Tipos
 - Caldera/Calentador HW
 - Intercambiador de Calor
 - Renovables: solar, geotermal
- Distribución
 - Calor en cama/ en suelo
 - Línea de tubería
 - Tubería de cultivo
 - Tubería de nieve



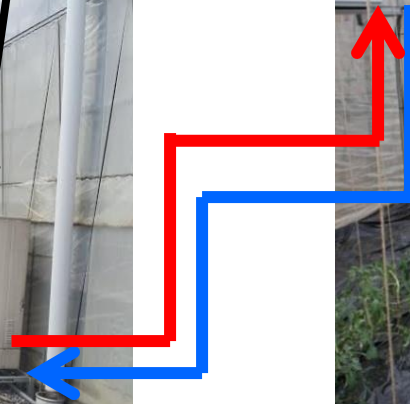
3. Calefacción: Basado-en Refrigeración

- Bombeo de Calor
 - Ciclo de Enfriamiento Inverso

Unidades Exteriores de Condensación



Unidades Internas de Bobinas Ventiladores



Fotos de cortesía por Dr. Tong Yuxin, y Dr. Toyoki Kozai

2. Bombeo de Calor: Consejo de Diseño

“Tamaño adecuado” bombeo de calor para el mejor rendimiento

- COP máximo: $\text{Carga de Calor} / \text{Capacidad de Calor} = 0.6-0.8$
- Calcular ganancia máxima de calor
 - Radiación Solar, Viento, Luces
- Evita sobrecalentar
 - Temperatura de Aire Baja \rightarrow Menos Cargas \rightarrow Menor eficiencia
- Evita grandes tamaños
 - Capacidad mayor \rightarrow Menor eficiencia
- Instalar varias HP
 - Uniformidad máxima, eficiencia máxima

3. Calefacción

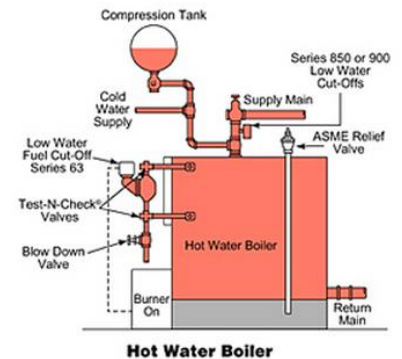
Aire Caliente

- + Combustibles Fósiles son baratos
- + Se puede combinar con la recuperación del calor & HEX
- + Puede usar gases para enriquecer con CO₂
- No centralizado: Circulación pobre
- No centralizado: gas de caldera interior contiene etileno y CO
- Centralizado: reduce transmisión de luzen GH
- Centralizado: energía es requerida para distribuir aire caliente con ventilador



Agua Caliente

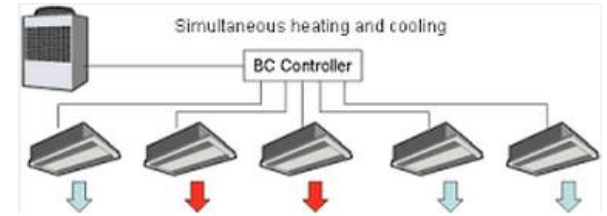
- + Puede usarse energía solar termal, geotermal, recuperación de calor
- + Calor es llevado más cerca de las plantas
- + Mayor eficiencia energética para “mover” agua que aire air
- Tuberías calientes cerca de área de trabajo
- Perímetro de calefacción está lejos de plantas
- Más complicado de diseñar e instalar



3. Calefacción

Refrigeración

- + Eficiencia energética alta
- + Se puede usar el mismo sistema para enfriar
- + Buena uniformidad con muchas unidades internas
- +/- Usa electricidad
- Se reduce la transmisión de luz por unidades de pared/ de techo
- Requiere varias unidades internas para que haya uniformidad
- Requiere de un contratista especial para instalar las tuberías de refrigeración



Radiación

- + Emite calor directamente sobre la superficie de las plantas
- + No requiere del movimiento de aire para su distribución
- Requiere línea de visión directa
- Uso ineficiente de la electricidad
- Se reduce la transmisión de luz por unidades de pared/ de techo
- Necesita varios radiadores para lograr uniformidad



4. Humidificación

- Adiciona humedad al área de cultivo
 - Reduce el estrés en las plantas
 - Facilita la entrega de nutrientes
 - Disminuye irrigación
- Mejores aplicaciones
 - Clima seco
 - Enfriamiento basado-refrigeración
- Métodos Comunes
 - a) Enfriamiento evaporativo (nebulización o aspersión)
 - b) Vapor



4. Humidificación

Rociador/Nebulización/Ultrasónico

- + Puede enfriar simultáneamente
- + Mejor en seco, espacio de cultivo tibio y
- + Uniformidad en humidificación
- Riesgo de humedad sobre las plantas
- Control pobre



Vapor

- + Puede calentar simultáneamente
- + Mejor en frío, climas secos
- + Centralizado o no centralizado
- Mantenimiento intensivo
- Requiere de tuberías para vapor y entrega del vapor (diseño sofisticado)



5. Deshumidificación

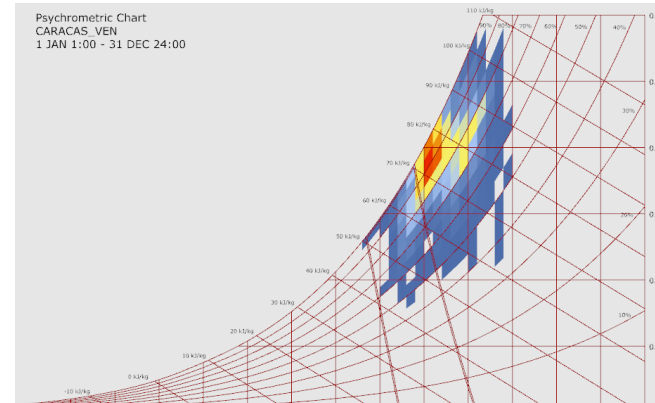
- Remueve humedad del área de cultivo
- Mejores aplicaciones
 - Ambientes húmedos (caliente o frío)
 - Control de la humedad es crítico
 - Control de hongo
- Tres métodos primarios
 - a) Enfriamiento DX
 - b) Ruedas Desecantes
 - c) Salmuera-Sal



5. Deshumidificación: Consejo de Diseño

No se olvide de calentar y enfriar

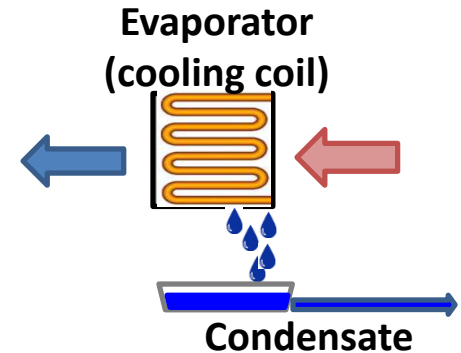
- Deshumidificación → sobre-enfriado/sobre-calentamiento
- Balance de Temperatura/niveles de HR
 - Elija sistema DX con múltiples, variables velocidades de compresores
 - Compensar salida de calor con enfriamiento DX
 - No deshumidificar todo el aire
 - ¡Utilice Psicrometría!



5. Deshumidificación

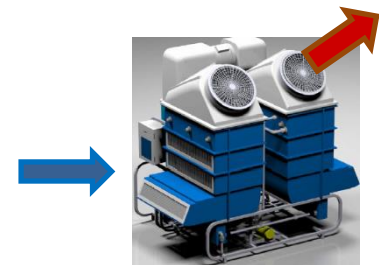
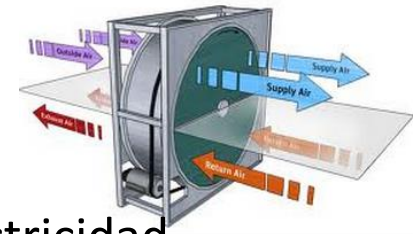
Bobinas de Enfriamiento DX

- + Puede simultáneamente enfriar
- + Mejor en climas húmedos y calientes & VFs
- + Puede coleccionar y reusar condensados
- Enfriamiento y deshumidificación no siempre coinciden
 - puede ser necesario recalentar o rehumidificar
- Requiere de grandes volúmenes de aire para circular
- Intensidad de energía: el uso de mucha energía por compresores y ventiladores



Desecante/ Sal-Salmuera

- + Puede simultáneamente calentar
- + Mejor en climas secos y fríos
- + Producción de calor es generalmente más barata que electricidad
- No puede coleccionar y reusar condensados
- Calefacción y deshumidificación no siempre coinciden
 - puede ser necesario re-enfriar o rehumidificar



6. Circulación del Aire

- Movimiento del aire
 - Mejora intercambio de gases
 - Evita condensación sobre las plantas
- Métodos
 - Ventiladores de Flujo de Aire Horizontales(HAF)
 - Difusores de Air (sistema central)



7. Enriquecimiento de CO₂

- Incrementa crecimiento de las plantas cuando esta en niveles altos
- Ventilación
 - Repone CO₂ a niveles ambientales
- Subproductos de combustión
 - CO₂, pero también etileno y CO
- Fabricación: Cilindros, tanques, rellenos
 - Luz de la mañana, antes de la ventilación
 - Estructuras cerradas o semi-cerradas con ninguna ventilación
- Descomposición de la biomasa
- El aire de escape de edificios comerciales e industriales

8. Manejo del Ambiente

- Métodos de Control
 - Manual
 - PLC (Controlador Lógico Programable)
 - Sistema de Manejo de Edificios

“Punto de Monitoreo”:

Qué se mide.

- T, HR, CO2, etc

“Puntos de Control”:

Qué se controla

- Velocidad de ventilación,
operación de la caldera, etc



9. Oportunidades & Sinergias

- Disminuciones en
 - Uso energético
 - Uso de agua potable
 - Capacidad/tamaño de equipo
 - Polución (GHG, CO₂e)

Utilidad &
Costos de
Operación

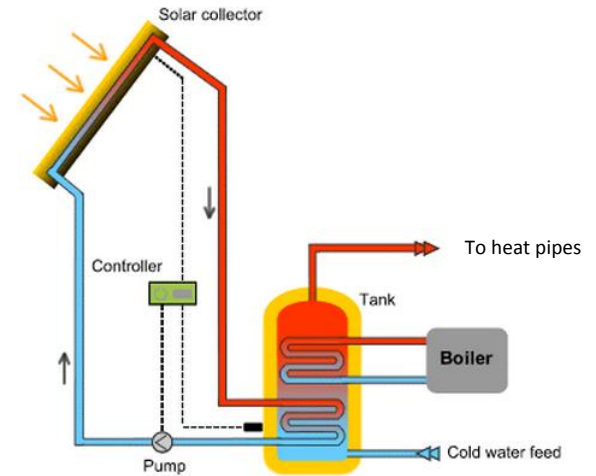


9. Energía Solar

Celdas Solares
Fotovoltaicas
(Electricidad)



Solar Térmica
(Agua Caliente)



Cortesía de Murat Kacira,
University of Arizona

9. Geotermal



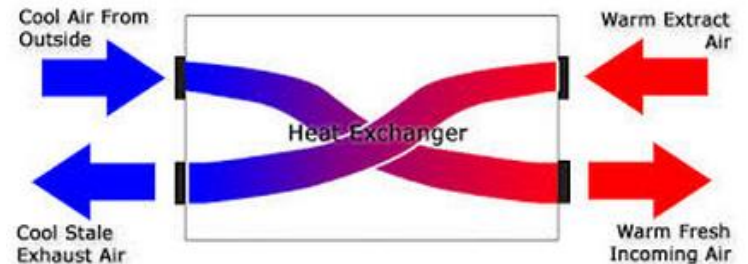
Fuente de Calor
Producción Energía



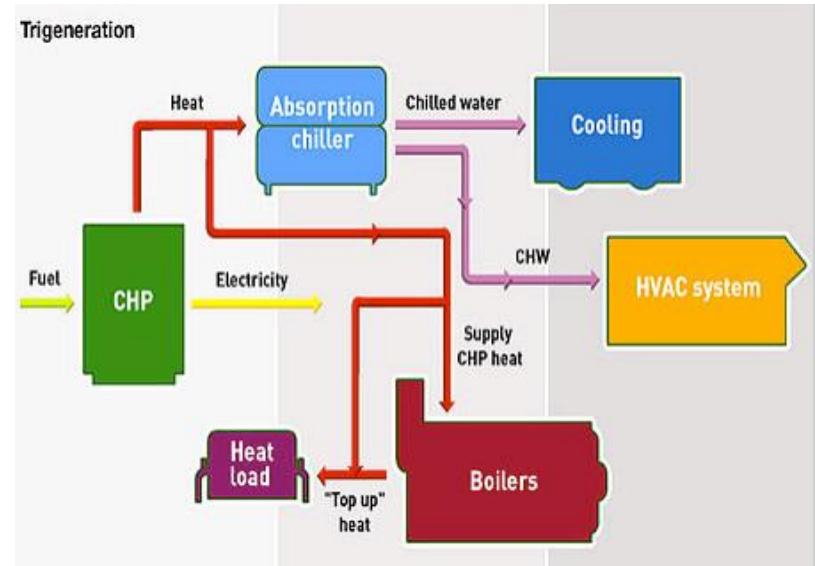
9. Recuperación de Calor

Ejemplos:

- Precalentamiento del aire de combustión
- Precalentamiento del agua de alimentación de la Caldera
- Generación de energía
- Calefacción del espacio
- Precalentamiento del agua
- Generación de vapor



9. Co-generación (Combinación de Calor & Energía)



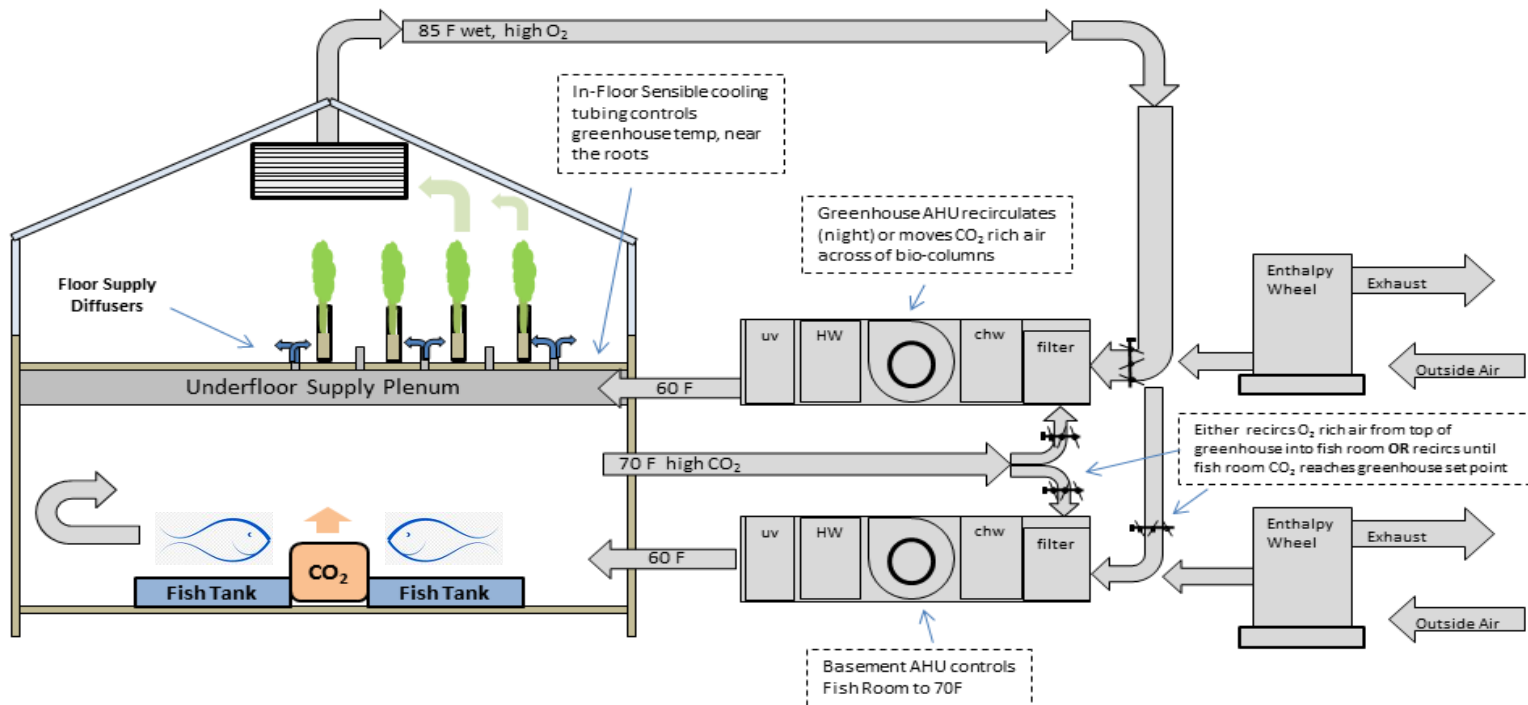
Generación Simultánea de:
Electricidad, Agua Fría, Agua Caliente, (¿y CO₂?)

9. Almacenamiento Térmico



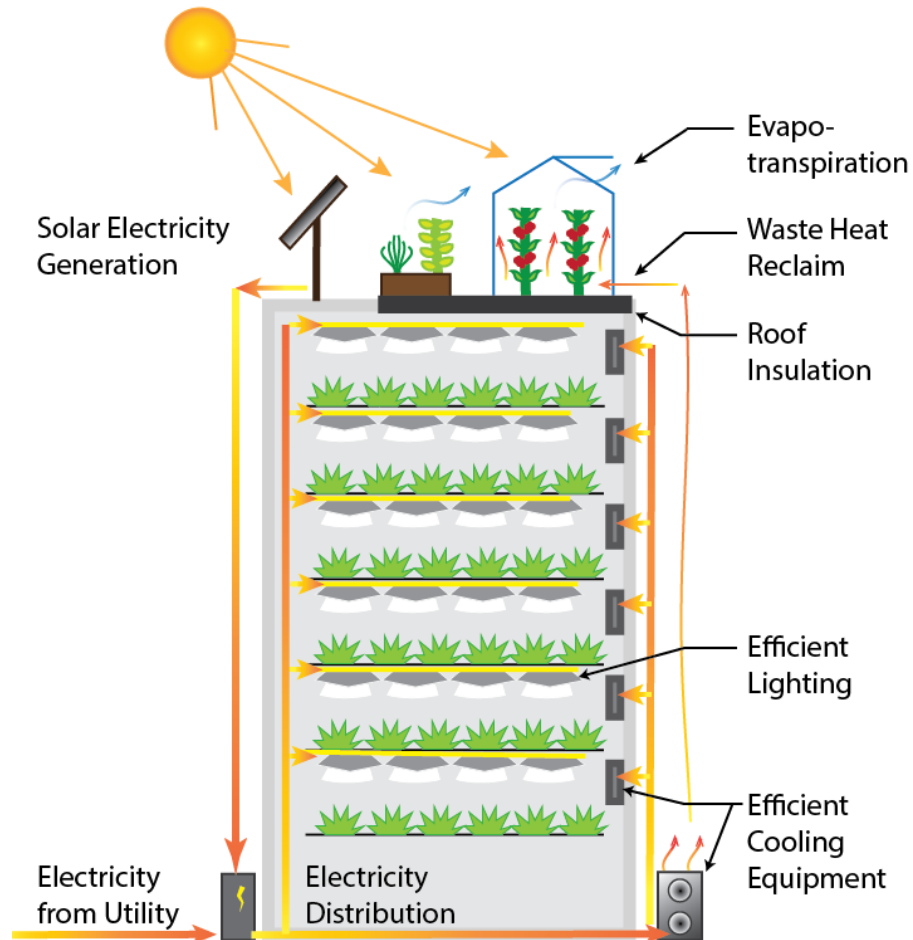
Despazamiento máximo de electricidad

9. Relaciones Simbióticas



Intercambio de gases
Recirculación de agua

9. Integración de Sistemas



9. Energy Cost Savings: Design Tip

Elegir los materiales y equipos que ahorren energía

- Reducir ganancias/pérdidas de calor
- Seleccionar equipo de alta-eficiencia
- Usar renovables
- Usar vapores de agua
- Cambiar uso máximo de energía

Usted puede preguntar: “¿Qué sistema es mejor para mí?”



Voy a responder con mis propias preguntas:

1. “¿Qué plantas cultivas o planeas cultivar?”
2. “¿Dónde se encuentra su producción?”
3. “¿Qué tipo de instalación tiene usted? GH o FV?”
4. “¿Cuándo ud. va estar en producción?”
5. “¿Cuál es tu presupuesto? Su retorno de la inversión deseada? ”
6. “¿Cómo se alinea la sostenibilidad y la reducción de su energía total, el agua y la huella de carbono?”

En otras palabras:

Hay muchos factores a considerar cuando se diseña el sistema de HVAC de sus instalaciones de cultivo.

Diseño de Sistema & Análisis

- Cálculos de carga
- Análisis psicrométrico
- Modelización de energía avanzada
- Costo del Análisis de Ciclo de Vida (ACCV)
- Auditoría Energética (instalaciones existentes)



Sistema HVAC para CEA

¡Gracias!

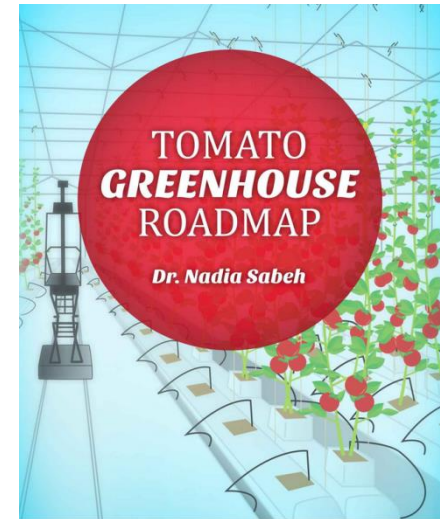
Dr. Nadia Sabe, P.E., LEED AP

Agricultural & Mechanical Engineer  Guttman & Blaevoet
CONSULTING ENGINEERS

Team Leader: Indoor Plant Production Systems

nsabeh@gb-eng.com

www.doctorgreenhouse.com



with  HORT AMERICAS