



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.**

**COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**Diseño y construcción de un sistema de ductos para la  
climatización zonificada de un invernadero de fresa**

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL

**Presenta:**

Víctor Luis Cámara Aranda

**Asesor:**

Dr. Ricardo Beltrán Chacón

**Ciudad de Chihuahua, Chihuahua, agosto de 2017**

## Dedicatoria

## Agradecimientos

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló el diseño, la construcción y la evaluación de un sistema de distribución de aire climatizado para un invernadero de fresa en la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Se inventó y diseñó un sistema que utiliza los microtúneles para la conducción de aire y ofrecer condiciones de confort a las plantas considerando como aspectos fundamentales la temperatura del aire y el flujo volumétrico con el fin de eficientizar el consumo de energía en la climatización. Para tal invención se ha hecho la solicitud de patente ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) con fecha del 6 de diciembre de 2016, número de solicitud MX/a/2016/016082 y folio MX/E/2016/087912. Para llevarlo a cabo, se adecuó el local y se construyó el sistema de acuerdo a los requerimientos de diseño. Se tomaron las mediciones necesarias y se verificó el buen funcionamiento del sistema. El sistema operó durante 5 días registrando temperaturas en diferentes zonas del invernadero con el fin de realizar una comparación entre los sistemas de climatización convencionales y el sistema de climatización por microtúneles propuesto. Se observó que la temperatura durante las horas de funcionamiento del sistema, para cada uno de los instantes registrados, fue mayor en el invernadero tradicional que la temperatura registrada para el sistema de microtúneles. Además, la temperatura de salida de los microtúneles permaneció siempre más cercana al rango de temperatura óptimo para la fresa. En base a los cambios de temperatura, se calculó el cambio de energía ocurrido dentro de cada sistema de manera global, observando un cambio significativamente mayor de la misma en el invernadero tradicional comparado con el sistema de microtúneles, lo que indica un que debe retirarse mayor energía en el sistema convencional que en el sistema propuesto para ofrecer temperaturas dentro del rango de confort para las plantas.

## **ABSTRACT**

This work presents the design, construction, and evaluation of an air distribution system for a strawberry greenhouse. It was developed at the College of Agrotechnological Sciences (*Facultad de Ciencias Agrotecnológicas* in Spanish), Universidad Autónoma de Chihuahua (México). A system that uses micro tunnels for the conduction of air conditioning was invented and designed in order to offer comfort conditions for strawberry plants, considering fundamental aspects such as air temperature and volumetric flow, having as a consequence a more efficient energy consumption in air conditioning. For such an invention, the patent application was filed at El Instituto Mexicano de Propiedad Industrial (IMPI) dated December 6, 2016, application number MX / a / 2016/016082 and folio MX / E / 2016/087912. To carry it out, the work area was adapted and the system was built according to the design requirements. The necessary measurements were taken and the correct functioning of the system was verified. The system operated for 5 days recording temperatures in different areas of the greenhouse in order to make a comparison between conventional air conditioning systems and the proposed microtunnel air conditioning system. It was observed that the temperature during the operating hours of the system, for each of the recorded instants, was higher in the traditional greenhouse than the temperature recorded for the microtunnel system. In addition, the outlet temperature of the micro tunnels remained always closer to the optimum temperature range for the strawberry plant. Based on the temperature changes, the energy change occurred within each system was calculated globally, observing a significantly larger change of the energy in the traditional greenhouse compared to the microtunnel system, indicating that it is required to withdraw more energy from conventional systems than from the system proposed in order to offer temperatures within the comfort range for plants.

## Contenido

RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
1 Introducción.....	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Justificación y problema .....	14
1.3 Hipótesis .....	15
1.4 Objetivo general.....	15
1.5 Objetivos específicos .....	15
2 Marco teórico.....	16
2.1 La agricultura protegida.....	16
2.2 Túneles bajos o microtúneles.....	20
2.3 Conductos de distribución de aire acondicionado.....	22
2.4 La fresa .....	31
2.5 Cosecha.....	37
2.6 Post cosecha.....	37
3 Metodología.....	39
3.1 Localización del espacio de trabajo .....	39
3.2 Descripción del sistema de climatización propuesto .....	43
3.3 Diseño de ductos.....	44
3.4 Selección del ventilador.....	57
3.5 El problema térmico.....	63
3.6 Cámaras de climatización .....	71
3.7 Material y equipo.....	71
3.8 Adaptación del local y construcción del sistema .....	72
3.9 Medición de los parámetros del sistema de ventilación.....	74
3.10 Medición de la Temperatura .....	75
3.11 Operación del sistema y captura de datos .....	76
4 Resultados y discusión .....	78
4.1 Evaluación del sistema de ventilación .....	78
4.2 Datos de temperaturas.....	80
5 Conclusiones.....	86

6	Referencias .....	87
7	Apéndice .....	91

## Índice de tablas

Tabla 1 Velocidades típicas en sistemas de ductos .....	26
Tabla 2 Diámetros equivalentes y secciones transversales en pulgadas (Waptac).....	52
Tabla 3 Dimensionamiento de ductos de alimentación .....	53
Tabla 4 Dimensionamiento de ductos de retorno .....	54
Tabla 5 Características técnicas de la familia de ventiladores HXM S&P .....	59
Tabla 6 Material requerido para una cámara de climatización de 2.5m de longitud.....	71

## Índice de figuras

Figura 1-1 Sistema de distribución de aire a través de conductos y cámaras de climatización .....	13
Figura 2-1 Valores adecuados de humedad para diferentes cultivos (Salvador Escoda S.A., 2011).....	16
Figura 2-2 Producción de fresa en invernadero a), túneles bajos dentro de invernadero b), túneles bajos c), cubierta para cultivo d). (Maughan, 2013) .....	22
Figura 2-3 Caudal, presiones y velocidad. (Salvador Escoda S.A., 2011).....	24
Figura 2-4 Un sistema de ductos de A/C. (Difusión Textil Integral, 2015) .....	28
Figura 2-5 Pérdida de caudal con la longitud. (Salvador Escoda S.A., 2011) .....	29
Figura 2-6 Comportamiento del aire en un local con diferentes posiciones. (Mazariegos, 2007).....	30
Figura 3-1 Orientación recomendada para invernaderos (Robles & Mendoza, 2010).....	40
Figura 3-2 Localización del área de trabajo en FACIATEC. (Google Maps., 2016).....	40
Figura 3-3 Dimensiones del área de trabajo .....	41
Figura 3-4 Separación del área de trabajo en dos secciones.....	42
Figura 3-5 Disposición propuesta para el área de trabajo. ....	42
Figura 3-6 Diseño conceptual del sistema.....	44
Figura 3-7 Ejemplo de un diagrama simplificado del sistema de distribución. (The Engineering ToolBox, 2016a) .....	46
Figura 3-8 Caudal requerido para cada cámara de climatización.....	49



Figura 3-9 Pérdida de carga por rozamiento del aire en conductos circulares. (Isover Saint Gobain, 2009) .....	51
Figura 3-10 Diagrama de caudales en el sistema de alimentación .....	52
Figura 3-11 Caudales en el sistema de retorno.....	54
Figura 3-12 Diámetro equivalente (The Engineering ToolBox, 2016b) .....	55
Figura 3-13 Vista lateral del sistema ducto ramal – microtúnel, invención en estudio.....	55
Figura 3-14 Dimensiones del sistema cámara de climatización - ducto ramal .....	56
Figura 3-15 Curva característica del sistema de distribución de aire .....	58
Figura 3-16 Punto del trabajo en un ventilador. (Soler & Palau, 2011).....	59
Figura 3-17 Superposición de la curva característica del sistema sobre las curvas características de la familia de ventiladores S&P HXM .....	60
Figura 3-18 Dimensiones (mm) de la familia de ventiladores S&P HXM .....	62
Figura 3-19 Diagrama de transferencia de calor en el sistema.....	63
Figura 3-20 Transferencia de calor Q/L para diferentes temperaturas de salida del aire .....	69
Figura 3-21 Transferencia de calor por longitud del ducto .....	70
Figura 3-22 Instalación del hule de invernadero .....	72
Figura 3-23 Instalación del hule en el invernadero .....	73
Figura 3-24 Construcción de microtúneles.....	73
Figura 3-25 Instalación de microtúneles .....	74
Figura 3-26 Manómetro tipo U inclinado (Morrison, 2013) .....	75
Figura 3-27 Sistema de microtúneles .....	77
Figura 4-1 Medición de presión.....	78
Figura 4-2 Medición de la energía eléctrica consumida por el sistema de ventilación .....	79
Figura 4-3 Sensores de temperatura .....	80
Figura 4-4 Variación de temperatura en las diferentes zonas de estudio durante los días de prueba .....	84
Figura 4-5 Grafico cambio en la Energía .....	85

## **1 Introducción**

La agricultura protegida es un sistema en el cual se tiene control del ecosistema clima-suelo modificando las condiciones como el suelo, la temperatura, la humedad, el viento, la radiación solar y la composición del aire. Las plantas se cultivan bajo estas condiciones para alterar los ciclos naturales permitiendo mayores cosechas, mayor calidad y producción garantizada. La agricultura protegida, además, genera un uso más eficiente del suelo, del agua, de la energía, de los nutrientes y del espacio, así como de los recursos climáticos como la radiación solar, la temperatura, la humedad y el CO<sub>2</sub> en el aire (Wittwer & Castilla, 1995).

### **1.1 Antecedentes**

El factor primordial en la producción de hortalizas es el clima y aquellos factores directamente relacionados a él. Para proteger a las plantas del clima, se han desarrollado medidas protectoras tales como cubiertas, rompe vientos y los invernaderos (Castilla, 2013).

Es de importancia mencionar que actualmente, la producción en invernaderos representa una fuerte inversión económica, la inversión en alta tecnología y un negocio de alto riesgo, por lo cual es de importancia generar mejores condiciones que permitan reducir los riesgos y se favorezca a la competitividad de los agricultores que la utilicen.

En general, la mayoría de los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas se ven influidos por la temperatura, por lo que existe una clara influencia de la temperatura sobre diferentes aspectos de la calidad de la planta y de los frutos (Bakker, 1995). Específicamente en el cultivo de la fresa, la temperatura, así como otras variables ambientales influyen en el desarrollo del fruto (Peralta, 1992).

La climatización de invernaderos es una práctica ampliamente utilizada, incluso la Asociación Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés), en su manual Aplicaciones de HVAC de 1995, propone diversos usos del aire acondicionado, entre los que encontramos el control ambiental para animales y plantas (Lopez & Ramirez, 2006).

Para mantener una temperatura adecuada dentro del invernadero que propicie un adecuado crecimiento de la planta es necesaria la climatización. Si la afluencia de calor produce altas temperaturas del aire en el invernadero, es necesaria una rápida remoción de calor, así como la reducción de los efectos de ganancia de energía en el invernadero. Los métodos principales para lograrlo son la ventilación y la refrigeración por evaporación. Si las temperaturas reinantes en el invernadero están por debajo de las óptimas habrá que recurrir a calefaccionarlo. Los generadores de aire caliente con quemadores de aceite pesados suelen ser los más utilizados. (Sabeh, 2007; Soler & Palau, 2017)

El propósito de la ventilación es la descarga de vapor de agua (calor latente) o calor sensible. En algunos casos se aplica ventilación para admitir aire exterior, ya sea con el fin de aumentar o mantener el nivel de CO<sub>2</sub> en el invernadero. La ventilación también desempeña un papel en la dilución de contaminantes gaseosos (Bakker, 1995).

La evaporación da como resultado una pérdida de calor de la planta. La pérdida de calor por evaporación es función del flujo de aire sobre la planta, el gradiente de la presión de vapor entre la planta y el aire circundante y el área del cual el agua está evaporándose. Para este método de enfriamiento, los sistemas usuales son los ventiladores con almohadillas (paneles), la niebla y la bruma, además de otras configuraciones generadas a partir de éstos tres sistemas (Leach-Jr., 1959).

Los sistemas de enfriamiento por evaporación directa se basan en el principio de refrigeración por la evaporación del agua. La evaporación requiere energía (alrededor de 2260 kJ kg<sup>-1</sup> de agua), la cual toma del aire del invernadero, provocando su enfriamiento. El enfriamiento evaporativo en su forma más básica, disminuirá la temperatura del aire tratado, pero aumentará la humedad debido a que el aire del invernadero tratado está en contacto directo con el agua que se evapora (Bakker, 1995).

La eficiencia de los sistemas de evaporación depende de la sequedad del aire utilizado. Con aire de muy baja humedad (HR < 20 %) la temperatura puede decrecer hasta 10 °C (Castilla, 2013). Sin embargo, el enfriamiento por evaporación directa no brinda la posibilidad de tener un control total de humedad del aire del invernadero; mientras que el uso de la refrigeración mecánica es muy caro. Un sistema que más o menos combina las ventajas de la refrigeración

por evaporación (relativamente barato) y enfriamiento mecánico (extracción de calor sensible y latente) es la refrigeración por evaporación indirecta (Bakker, 1995).

En todo caso, se busca un balance de eficiencia y bajo costo en equipos de aire acondicionado para proveer de las condiciones óptimas de los cultivos.

La velocidad del aire y la dirección del flujo son elementos importantes a considerar en la climatización. La velocidad del aire afecta a factores relacionados con el crecimiento de las plantas como la transpiración, la respiración y la fotosíntesis (a través del transporte de CO<sub>2</sub>) (Bakker, 1995). Observaciones muestran que una velocidad de aire entre 0,5 y 0,7 m·s<sup>-1</sup> es óptima para el crecimiento de las plantas. Velocidades por encima de 1,0 m·s<sup>-1</sup> tienen como consecuencia la inhibición del crecimiento de la planta, y por encima de 4,5 m·s<sup>-1</sup> pueden provocar daños mecánicos (Aldrich, Hellickson, & Walker, 1983). En general, el efecto de la dirección del flujo de aire apenas se menciona de forma somera en la literatura.

Los sistemas clásicos de climatización funcionan a causa de diferenciales de presión menores a 30 Pa (Castilla, 2013). En general, la circulación del aire es horizontal y se genera una capa límite que rodea las hojas en las cuales la planta tiene sus procesos de intercambio de energía, vapor de agua y CO<sub>2</sub>. El grosor de la capa límite varía entre 1 y 10 mm (Hanan, 1998). En la capa límite las propiedades como velocidad de aire, temperatura, CO<sub>2</sub> y vapor de agua son diferentes de las del aire circundante.

Para llevar el flujo de aire necesario a cada área a acondicionar, sea para confort humano, animal o vegetal, o procesos industriales, se requiere un sistema de distribución de aire, lo cual se logra a través de ductería cuya sección transversal puede ser de forma circular, rectangular o triangular. El diseño de los ductos implica la consideración de factores como espacio disponible, costo de instalación, pérdidas de aire por fricción, nivel de ruido, fugas en el ducto, y cumplimiento de códigos y estándares (Lopez & Ramirez, 2006).

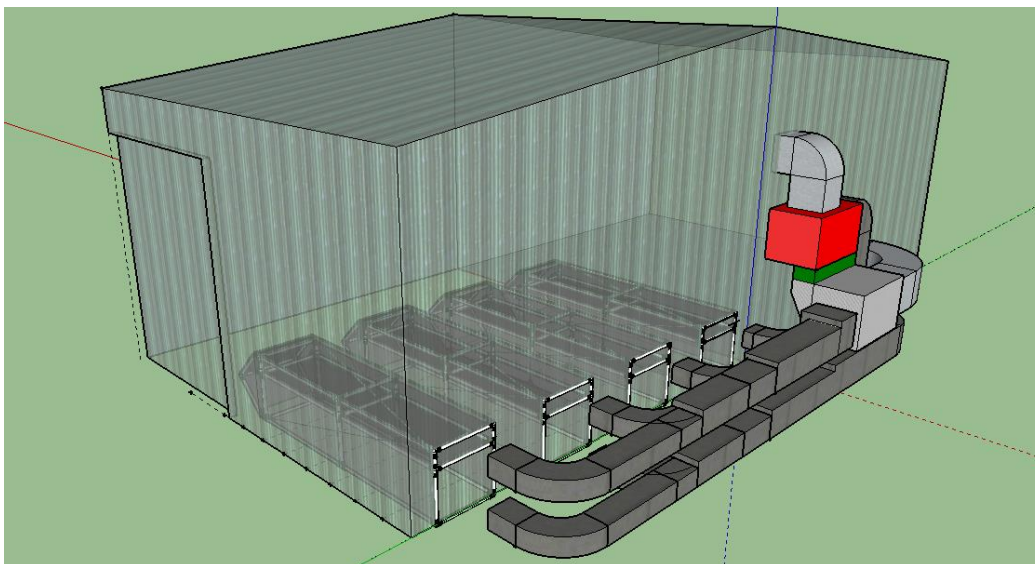
Al respecto se han desarrollado un sinnúmero de investigaciones, sin embargo, ellas se basan en el enfriamiento y la ventilación de la masa total del aire contenido dentro del invernadero. Asimismo, se cuentan con numerosas investigaciones sobre las características fenológicas de

la fresa, sin embargo, aún se conoce poco sobre su cultivo en invernaderos y la generación de las condiciones apropiadas para su máxima eficiencia de producción y calidad.

Estudios realizados recientemente en Italia (Campiottia, 2016), proponen una planta de enfriamiento solar para uso en invernaderos, en cuya configuración se plantea el enfriamiento sólo del volumen de aire que rodea a las plantas, y no al volumen de aire total del invernadero. El sistema propuesto por Campiottia consiste de tubería por la cual circula agua como fluido refrigerante. Dicha tubería está instalada a manera de red, cerca de los cultivos, y logra una disminución en la temperatura absorbiendo calor del medio circundante.

A pesar de la investigación de Campiottia, no se han encontrado investigaciones ni estudios previos que hayan evaluado la posibilidad de enfriar solamente la región de aire circundante a la planta por a través de sistemas de ductos para la distribución puntual del fluido, motivo por el cual se presenta la siguiente propuesta:

La creación y desarrollo de un sistema de climatización compuesto por un sistema de distribución de aire y de un sistema de cámaras de climatización que contenga la masa de aire alrededor y cerca de las plantas (Figura 1-1). Esto requiere el uso de una barrera física translúcida alrededor de los cultivos que permita evite el escape del aire climatizado y que permita la entrada de luz para no afectar la actividad fotosintética de la planta.



*Figura 1-1 Sistema de distribución de aire a través de conductos y cámaras de climatización*

## 1.2 Justificación y problema

Existe literatura con información relevante sobre la climatización de invernaderos, la cual toma en consideración los aspectos más importantes como la temperatura, la humedad y el CO<sub>2</sub>. Así mismo, existen un sinnúmero de investigaciones relacionadas al cultivo de fresa y a las propiedades termodinámicas del ambiente que le permiten a la planta y al fruto tener un crecimiento rápido.

Sin embargo, en la literatura, las opciones de climatización mencionadas consideran el enfriamiento de toda la masa de aire dentro del invernadero, lo cual implica un alto costo energético. Asimismo, se ha encontrado que las alternativas de climatización consideran de manera parcial el confort de la planta, un factor que de ser tomado en cuenta en su totalidad podría ser de gran importancia para elevar aún más la producción, la calidad del fruto y la eficiencia energética.

Mientras los costos de energía continúan su escalada, las alternativas para proveer sistemas más eficientes que permitan reducir los costos seguirán floreciendo. Es importante hacer hincapié en que una forma de reducir el consumo energético del invernadero es climatizando solamente las regiones necesarias, es decir, climatizar únicamente las zonas próximas que rodean a las plantas.

Con la investigación y el desarrollo de un modelo eficiente de distribución y control de aire acondicionado en invernaderos de fresa se busca ofrecer alternativas de acondicionamiento de espacios, que sean de provecho en la industria agrícola. Además, la investigación propuesta generará una herramienta de consulta de utilidad para empresarios, agricultores, académicos y cualquier otra persona interesada en tecnologías que permitan una climatización eficiente para el cultivo de alimentos en invernadero. Asimismo, el trabajo pretende ofrecer información relevante que sirva de base en futuros trabajos de investigación.

### **1.3 Hipótesis**

El análisis, diseño y construcción de un sistema de ventilación un invernadero donde se climatice únicamente el volumen de aire cercano a las plantas con el fin de brindarles condiciones óptimas de confort, disminuirá el consumo de energía comparado con sistemas convencionales.

### **1.4 Objetivo general**

Realizar el diseño y la construcción de un sistema de ductos que propicie la climatización de la región próxima a la planta, en aras de hacer un uso eficiente de la energía en un invernadero de fresa, considerando los aspectos fundamentales en el diseño de ductos, la fenología de la planta, y la temperatura, con el fin de reducir el consumo de energía.

### **1.5 Objetivos específicos**

- Definir los aspectos y características relevantes para el diseño de los conductos de aire que permitan climatizar únicamente la región cercana a la planta (requerimientos para invierno y verano),
- Definir, en base a la literatura, las características fenológicas de la fresa y parámetros de confort para la planta,
- Construir un sistema experimental a pequeña escala y de bajo costo de implementación y mantenimiento y,
- Evaluar el rendimiento del sistema y el consumo de energía requerido

## 2 Marco teórico

### 2.1 La agricultura protegida

La agricultura protegida se define como el desarrollo de la agricultura en ambientes protegidos mediante estructuras y cubiertas generalmente de plástico, policarbonato o vidrio. Su objetivo principal es proteger a los cultivos proporcionando los elementos adecuados para su desarrollo.

#### 2.1.1 Climatización en invernaderos

Con los invernaderos agrícolas se pretende obtener un alto rendimiento en la producción y calidad de los productos a desarrollar, aunque las condiciones ambientales exteriores sean desfavorables (Salvador Escoda S.A., 2011).

La climatización regula la concentración del anhídrido carbónico CO<sub>2</sub>, el oxígeno, la temperatura y la humedad.

La humedad del aire interior de un invernadero es muy importante para la vida de las plantas. Interviene en el crecimiento, la transpiración, la fecundación de flores y el desarrollo de las enfermedades, cuando es excesiva. La Figura 2-1 muestra los valores adecuados para cada cultivo. En esta investigación, el cultivo de trabajo es la fresa, por lo que se observan valores en el rango de 70-80% de humedad.

<u>PRODUCTO</u>	<u>HUMEDAD</u>
Tomate y pimiento	50-60%
Berenjena	50-60
Melón y acelga	60-70
Judías	60-75
Lechuga	60-80
Sandía	65-75
Guisantes	65-75
Calabacín y apio	65-80
Fresones	70-80
Pepino	70-90

*Figura 2-1 Valores adecuados de humedad para diferentes cultivos (Salvador Escoda S.A., 2011)*



### **2.1.2 Renovación del aire**

En un invernadero es indispensable la ventilación ya que tiene como propósito fundamental controlar las altas temperaturas del verano causadas por el flux de radiación solar, además de ayudar a mantener niveles aceptables de humedad relativa, para proveer un flujo de aire uniforme a través de todo el invernadero, y para mantener concentraciones aceptables de gases como CO<sub>2</sub> (Buffington, Bucklin, Henley, & McConnell, 1987).

Si este aire no se remueve, pueden observarse altos niveles de humedad y condensación excesiva, ocasionando problemas de salud para las plantas.

Investigaciones muestran que las funciones principales de un sistema abierto de ventilación para invernadero permiten un control de la temperatura, de la humedad y de la eliminación de contaminantes (Gates & Duncan, 1999).

El sistema abierto permite la entrada de cierta cantidad de aire exterior en el sistema, lo que puede agregar humedad en el aire. El intercambio de aire en el sistema abierto permite ventilar y reemplazar el aire pudiendo eliminar ciertos contaminantes y olores de un cuarto, pero a su vez permite el intercambio de aire tratado y a temperatura de sistema con aire a temperatura ambiente.

El principal propósito de un sistema de ventilación para un invernadero durante el verano es prevenir que la temperatura del aire interior se eleve mucho más que la temperatura exterior. La diferencia de temperatura en el aire dentro y fuera del invernadero se debe al gran flux de radiación solar a través de la barrera protectora del invernadero. El sistema de ventilación debe mover el aire a través del sembradío para prevenir incrementos peligrosos de temperatura para las plantas. En sistemas de ventilación simple, se acepta generalmente un replazo de volumen de aire por minuto (Buffington et al., 1987).

El movimiento de aire es importante para el crecimiento de las plantas dentro del invernadero. Es deseable un movimiento continuo del aire, pues permite una ecualización de la temperatura, del dióxido de carbono y los niveles de humedad dentro del invernadero. A través de condiciones mejoradas del ambiente, se pueden cultivar plantas más fuertes y sin problemas de salud relacionados al estancamiento del aire.

Sin embargo, el sistema de ventilación abierto no es la única opción; puede crearse un sistema recirculante de aire que optimice de la mezcla de aire por medio de elementos como deshumidificadores e inyección de gases con el fin de evitar excesivas renovaciones de aire y reducir el gasto energético utilizado para obtener una temperatura óptima para las plantas.

Tanto en sistemas de ventilación abiertos como en sistemas cerrados, la velocidad óptima del aire nunca se ha investigado a profundidad, pero se sugiere una velocidad mínima de 40 pies por minuto ( $0.2032 \text{ ms}^{-1}$ ) que otorga un ligero, casi imperceptible movimiento de las hojas. Una velocidad inferior no permitiría un correcto mezclado del aire. Para una circulación del aire uniforme es preciso el uso de sistemas mecánicos de ventilación (Buffington et al., 1987).

Para el manejo del sistema mecánico de ventilación y la creación de un ambiente artificial que provea las condiciones adecuadas es necesario un sistema de control (Culler & Katz, 2009) el cual permita:

- 1) Mantener las condiciones de confort térmico
- 2) Mantener una óptima calidad del aire
- 3) Reducir el uso de energía
- 4) Reducir los costos de mano de obra
- 5) Tener procesos eficientes de manejo del invernadero
- 6) Monitoreo del performance del sistema

### **2.1.3 CO<sub>2</sub>**

En días cálidos, en los de invernaderos con sistemas de ventilación natural sería necesario mantener los invernaderos abiertos para reducir las elevadas temperaturas. En el caso de un invernadero cerrado con sistema de control de temperatura y velocidad del aire, el clima exterior no supone mayores problemas. Sin embargo, a causa de la recirculación del aire puede existir un detrimento en la calidad del mismo, en específico de un compuesto fundamental para las plantas; el CO<sub>2</sub>. Esta situación, de acuerdo a investigaciones en la Universidad de Alaska, Fairbanks, retrasará la fotosíntesis y el crecimiento general de los cultivos (Karlsson, 2014). Para solucionar el problema es posible enriquecer CO<sub>2</sub> en el aire que circula dentro del sistema.

Las plantas toman CO<sub>2</sub> del aire y agua de las raíces y luego utilizan energía luminosa para transformar estos componentes en azúcar (carbohidratos) y oxígeno. Si no existe un suministro de CO<sub>2</sub> adecuado y disponible para las plantas, el ritmo de fotosíntesis se reduce (Antón et al., 2011).

La técnica del enriquecimiento carbónico, también denominada fertilización carbónica, aplicada a los invernaderos dedicados a cultivos hortícolas y/u ornamentales y consistente en aumentar el nivel ambiental de CO<sub>2</sub> hasta 7 aproximadamente doblarlo (700-900ppm), es una técnica agronómica empleada desde hace años, particularmente en los países del centro y norte de Europa (Antón et al., 2011).

Para aumentar la producción por fertilización carbónica para la mayoría de las especies se sugieren inyecciones que generen concentraciones finales entre las 900 y las 600 ppm teniendo un efecto positivo en desarrollo y vigor de la planta en general y en tamaño y peso del fruto en particular (Antón et al., 2011).

Las plantas son más activas fotosintéticamente durante las primeras cuatro a cinco horas después del alba y cuando la temperatura del tejido es igual o superior a 19 °C. En este punto es cuando es necesario mantener los niveles más altos de CO<sub>2</sub> (800-900 ppm) en el invernadero. Sin embargo, a medida que se incrementa el estrés debido a temperatura, luminosidad, disponibilidad de agua (y/o alta humedad) hacia la mitad del día, las estomas comienzan a cerrarse en respuesta a dicho estrés y se reduce la toma de CO<sub>2</sub>. En consecuencia, cuando las plantas están estresadas se recomienda reducir o detener el enriquecimiento con CO<sub>2</sub> y mantener un nivel de 350 ppm a través de ventilación natural (si las ventilas están completamente abiertas). Por lo tanto, la óptima estrategia de control de la inyección para este tipo de climas es permitir la mínima ventilación controlando la temperatura y humedad ambiental (Stanghellini, Incrocci, Gázquez, & Dimauro, 2008).

Esto asegura que las plantas tengan la cantidad suficiente de CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis, pero no a un nivel que cause más estrés a las plantas. Cuando el estrés por temperatura, luminosidad y agua desciende en el cultivo por la tarde, puede incrementarse la concentración de CO<sub>2</sub> de nuevo hasta una hora antes del ocaso para tomar ventaja de la luz disponible (Stanghellini et al., 2008).

#### **2.1.4 Fuentes de CO<sub>2</sub>**

El CO<sub>2</sub> está disponible a partir de varias fuentes y normalmente la fuente se relaciona con el nivel de tecnología del invernadero. Sin embargo, sin importar el nivel de tecnología del invernadero, todos los productores podrían beneficiarse de la adición de CO<sub>2</sub> para mejorar el desarrollo de las plantas y obtener rendimientos superiores (Marlow, 2011).

Las técnicas de fertilización carbónicas más utilizadas en la actualidad (Stanghellini et al., 2008) son:

- Aporte de CO<sub>2</sub> puro.
- Aporte per reutilización de los gases ocasionados por la quema de combustibles del sistema de calefacción.
- Aporte por reutilización de los gases generados en una planta de generación eléctrica.

La elección de una u otra técnica dependerá de su disponibilidad y distribución local, del grado de control climático necesario y de la rentabilidad económica del sistema

El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO<sub>2</sub> puro, es el método más idóneo que puede aplicarse. Este método, técnicamente permite la posibilidad de aplicación en cualquier momento, con las dosis que las circunstancias del día o del cultivo requieren. Enriqueciendo con CO<sub>2</sub> puro todo el sistema de control se encuentra totalmente desvinculado del resto de sistemas del invernadero, hecho que permite realizar un control individualizado de las aplicaciones (Marlow, 2011).

#### **2.2 Túneles bajos o microtúneles**

Los túneles bajos, también llamados microtúneles, pueden utilizarse para incrementar la temperatura del aire alrededor de la planta. Los túneles bajos son mucho más pequeños que los macrotúneles o invernaderos, más lo suficientemente amplios para cubrir los montículos y las plantas de fresa. Se utiliza plástico transparente y se suspende sobre las plantas por medio de estructura de alambón o de tubería. Los túneles bajos pueden usarse en conjunto con macrotúneles o invernaderos, lo que provee un incremento de temperatura reportado entre 3 y 5 °C en la noche (Wien, J.E. Reid, C. Rasmussen, & Orzolek., 2008).

La ventilación es un factor crítico tanto en invernaderos como en microtúneles, incluso en invierno cuando las temperaturas exteriores son bajas. La ventilación en túneles altos se puede lograr incluso abriendo una ventila, pero también abriendo ventanas en los extremos del túnel o levantándolo parcialmente durante los días de calor extremo. Los túneles bajos se ventilan levantando el plástico de manera parcial o total y separándolo de la estructura. Conforme incrementa el calor a causa de las estaciones del año, también es necesario incrementar la ventilación. En la primavera, las temperaturas en túneles altos pueden estar por sobre la temperatura optima incluso cuando se cuenta con ventilación natural. Cuando las temperaturas nocturnas se encuentran sobre 10 °C, los túneles pueden ser removidos para procurar la frescura (Maughan, 2013).

La humedad es otro factor relevante que se debe tomar muy en cuenta en la producción de fresa en túnel alto y bajo. Los ambientes cerrados de los túneles tienen como resultado un movimiento pobre del aire lo que incrementa la humedad relativa. Una alta humedad relativa incrementa los problemas con insectos y es ambiente ideal para la proliferación de patógenos (Maughan, 2013).

Los niveles de humedad pueden controlarse por medio de ventilación y del tamaño del túnel. Abrir los túneles para ventilar incrementa el movimiento de aire y reduce la humedad relativa. Desafortunadamente, si las temperaturas para ventilar son muy bajas, poco puede hacerse para reducir la humedad en el túnel, por ejemplo, regar menos para minimizar la evaporación de la humedad desde el suelo (Maughan, 2013).



*Figura 2-2 Producción de fresa en invernadero a), túneles bajos dentro de invernadero b), túneles bajos c), cubierta para cultivo d). (Maughan, 2013)*

La temperatura del suelo también es un factor importante en el crecimiento de la fresa. La temperatura mínima para un crecimiento activo de la raíz es de 5 °C y la máxima es de 31 °C con un rango óptimo de temperaturas entre 10 y 23 °C (Maughan, 2013).

El túnel bajo será, a su vez, utilizado como ducto dentro del invernadero, a través del cual se distribuirá aire a temperatura óptima. Considerando que el sistema ofrece un incremento de temperatura de 5 °C con respecto al invernadero y el invernadero de 5 °C con respecto al exterior, se reduce al mínimo la necesidad de calefacción en invierno, lo que extiende el periodo de producción en todas las fechas del año. Sin embargo, la misma razón exige que en verano sea fundamental la operación del dispositivo de enfriamiento si la temperatura supera los 21 °C, que es la temperatura óptima para la planta de fresa.

### **2.3 Conductos de distribución de aire acondicionado**

El correcto dimensionamiento de la red de conductos y la adecuada disposición y selección de difusores en una instalación de climatización (distribución de aire) es fundamental, ya que si se realiza una buena evaluación de las cargas térmicas, se elige apropiadamente el sistema de climatización y su regulación, y se realiza un reparto correcto del fluido que compensa las cargas del local, el diseño del sistema será capaz de mantener condiciones de confort (Vera-Gil, 2008).

### 2.3.1 Ecuación general de la energía

El aire circula por un conducto gracias a que existe una diferencia de presión entre sus extremos. Esta diferencia de presión es una forma de energía que se explica a través de la ecuación general de la energía.

La energía total por unidad de tiempo de una corriente fluida en un sistema abierto se establece como la suma de su energía interna, su flujo de trabajo, su energía potencial y su energía cinética, por el flujo másico circulante:

$$\dot{E} = \dot{m} \left[ u + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right] \quad (1)$$

Donde:

$\dot{E}$	Energía de la corriente por unidad de tiempo (W)
$\dot{m}$	Flujo másico de la corriente (kg/s)
$u$	Energía interna del fluido (J/kg)
$P$	Presión de la corriente (Pa)
$\rho$	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )
$V$	Velocidad de la corriente (m/s)
$g$	Aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> )
$z$	Elevación (m)

Para diferencias de elevación de hasta 100 m, velocidades inferiores a 50 m/s (flujo incompresible) y régimen estacionario, las presiones obedecen al teorema de Bernoulli (ecuación 2), el cual es una forma especial de la ecuación 1, donde se asume que no varía la energía interna del fluido, al no variar apreciablemente su temperatura ni su fase.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = cte \quad (2)$$

El teorema dice lo siguiente: “se mantiene constante a lo largo de un mismo conducto (sin bifurcaciones o uniones) la energía en forma de presión, más la energía en forma cinética, más la energía en forma potencial.”

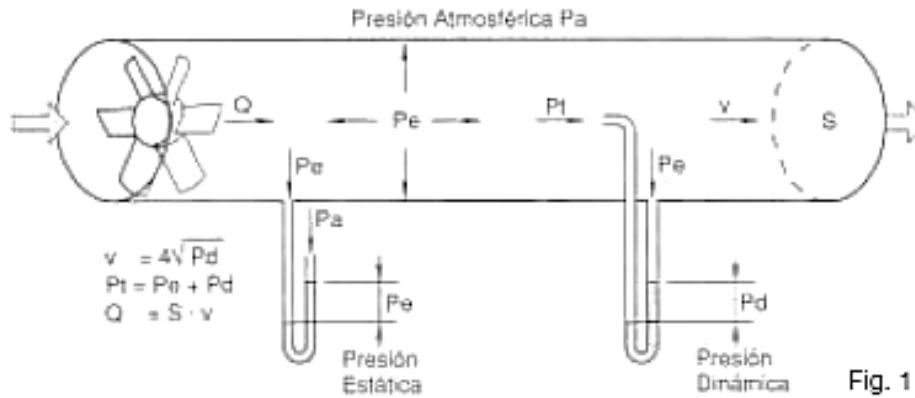


Figura 2-3 Caudal, presiones y velocidad. (Salvador Escoda S.A., 2011)

### 2.3.2 Presión estática, dinámica y total

La presión estática es la fuerza por unidad de superficie ejercida por el fluido sobre las paredes del conducto, se representa por  $P_e$  y se mide en Pascales (Pa) o en mm.c.d.a.<sup>1</sup>

La presión dinámica se representa por  $P_d$  es la correspondiente a la velocidad del fluido y se define como:

$$P_d = \frac{V^2 \rho}{2} \quad (3)$$

La presión total de un sistema se denomina a la suma de la presión estática y dinámica. La Figura 2-3 ilustra las tres presiones presentadas.

En todo momento,

$$P_t = P_d + P_e \quad (4)$$

<sup>1</sup> (1 atm = 101325 Pa = 10332 mm.c.d.a. lo que equivale a que 1 mm.c.d.a = 9,8 Pa ≈ 10 Pa).



### 2.3.3 Pérdida de carga

Se define a la pérdida total de presión del sistema como la pérdida de presión total a través del trayecto del ducto que tiene las mayores pérdidas de presión. Este trayecto es con frecuencia el más largo. Para calcular la pérdida total de presión en el sistema, se suman las pérdidas para cada sección de tubo recto y cada conexión en el trayecto que se haya elegido. Se deben incluir las pérdidas de presión a través de cualquier equipo (Mazariegos, 2007).

Se deben calcular las pérdidas de presión en sistemas de conductos para determinar la capacidad de los ventiladores, verificar el funcionamiento del sistema y balancear las cantidades de aire. La presión del aire necesaria para vencer la fricción en un conducto es la que determina el gasto de energía del ventilador (Mazariegos, 2007).

La pérdida de presión conductos se puede calcular por la fórmula de Darcy que contempla la longitud de la conducción, el llamado diámetro hidráulico, la velocidad y densidad del aire y el coeficiente de frotamiento que, éste, a su vez, depende del número de Reynolds, de rugosidad de las paredes, de las dimensiones y la disposición del mismo. Sin embargo, la forma práctica de hacerlo es recurriendo a tablas obtenidas de experimentos y normalizadas a base de todo el equipo técnico y son válidos para conducciones con la rugosidad corriente en materiales normalmente usados (Mazariegos, 2007).

### 2.3.4 Flujo laminar y turbulento

El flujo del aire se llama laminar cuando su trayectoria es uniforme, las líneas de aire son paralelas y bien definidas. El flujo es turbulento cuando la trayectoria de las partículas del fluido es irregular, constantemente cambiante con la aparición y desaparición de innumerables torbellinos. Calculando un número, llamado de Reynolds, que comprende la densidad del fluido, el diámetro del conducto, la velocidad y la viscosidad, puede conocerse qué régimen tendremos dentro de un conducto.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (6)$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = velocidad del fluido (m/s)

$L$  = longitud característica (m)

$\mu$  = viscosidad ( $\text{N s/m}^2$ )

$\nu$  = viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Un número de Reynolds  $Re$  por debajo de 2.100 será flujo laminar y, por encima de 4.000, manifiestamente turbulento. En ingeniería de ventilación, por razones de economía en la sección de las instalaciones, los regímenes de los flujos de aire siempre son turbulentos. (Mazariegos, 2007; Trott & Welch, 2000).

Trott y Welch mencionan las velocidades típicas para los sistemas de ductos. Los datos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Velocidades típicas en sistemas de ductos

TIPO DE SISTEMA	VELOCIDAD TÍPICA, m/s
Sistema de alta velocidad, ductos principales	20
Sistema de alta velocidad, ductos ramales	15
Sistema de baja velocidad, ductos principales	10
Sistema de alta velocidad, ductos ramales	6
Ductos en áreas silenciosas	3 a 4

### 2.3.5 Criterios de diseño

Se consideran los siguientes aspectos:

- La presión total  $P_t$  en cualquier punto del sistema es la suma de la presión estática  $P_e$  y la presión dinámica  $P_d$ .
- La presión total *siempre* decrece algebraicamente en dirección del flujo.
- Las pérdidas en la presión total entre el ventilador y cada ramal del sistema son la misma.

- La presión estática y la presión dinámica pueden tanto incrementar como decrecer en dirección del flujo.

### **2.3.6 Cálculo de conductos**

De acuerdo a (Vera-Gil, 2008), el cálculo correcto de un sistema de distribución de aire incluye:

#### **1. El dimensionado de la red de conductos, el cual deberá:**

- Repartir el aire en todos y cada uno de los difusores, según las necesidades establecidas en los cálculos.
- Trabajar con una caída de presión total del sistema adecuada a la máquina ventilador seleccionado (la intersección de sus curvas de funcionamiento proporcione el caudal requerido con un rendimiento del ventilador aceptable).
- Cumplir con las características constructivas del inmueble (altura máxima, trazado impuesto, etc.).
- Acercarse en lo posible a un óptimo dimensionamiento económico, minimizando el coste total suma de inversión (conducto + ventilador), operación (energía consumida) y mantenimiento.

#### **2. La distribución de aire, en función de:**

- Caudal de aire requerido (dependiendo de las cargas y las condiciones de impulsión).
- Su proyección o alcance (dependiente de las dimensiones del local y del tipo de difusor).
- Su nivel de ruido que es función de la actividad que se vaya a desarrollar en el local.

Existen varios métodos por el cual se puede dimensionar los conductos como el método de igual fricción, el método de recuperación estática y por medio de ductulador. Generalmente estos métodos proporcionan tamaños de ducto con secciones transversales circulares equivalentes, así como las pérdidas de presión para los elementos del sistema de ductos (Mazariegos, 2007; Meyer, 1990).

### 2.3.6.1 El método de igual fricción

El método de igual fricción es el método más utilizado para el dimensionamiento de ductos de baja presión. Para sistemas de alta presión no es utilizado. El método reduce las velocidades del aire de manera automática en la dirección del flujo (Meyer, 1990).

La base de este método de dimensionamiento de conductos es que se selecciona un valor para la pérdida de presión por fricción por longitud de ducto, y se mantiene constante para todas las secciones de ducto del sistema. El valor que se selecciona se basa en general en la velocidad máxima permisible en el conducto principal para evitar demasiado ruido (Mazariegos, 2007). La principal desventaja de este método es que no prevé la caída de presiones en las ramificaciones del sistema (con excepción de sistemas simétricos) (Meyer, 1990).

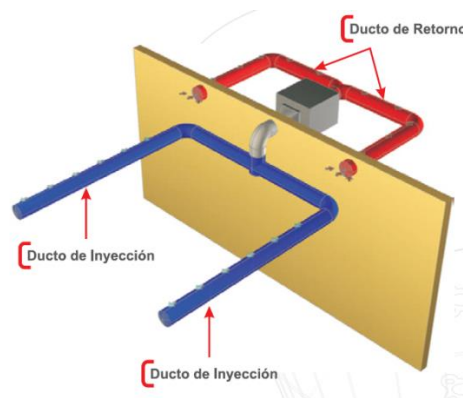


Figura 2-4 Un sistema de ductos de A/C. (Difusión Textil Integral, 2015)

### 2.3.7 Ventiladores

Los conductos nos permiten distribuir el aire en un área determinada, sin embargo, para que el aire fluya a través del conducto es necesaria una diferencia de presión, la cual es generada en primera instancia por un ventilador. El flujo del aire por tal conducto absorbe energía del ventilador que lo impulsa debido al roce con las paredes, los cambios de dirección o los obstáculos que se hallan a su paso. La optimización de una instalación exige que se minimice esta parte de energía consumida (Mazariegos, 2007).

No es suficiente conocer el caudal que es capaz de suministrar un ventilador a descarga libre, es necesario conocer que caudales ira proporcionando según sean las distintas pérdidas de carga que deba vencer (Figura 2-5) (Salvador Escoda S.A., 2011).

El consumo de un ventilador es directamente proporcional a la presión total  $P_t$  a la que trabaja, por esa razón se debe de cuidar el diseño de la canalización, de no ser así, puede darse el caso de gastar un porcentaje más de energía del necesario (Mazariegos, 2007).

Obsérvese que, a descarga libre,  $P_e = 0$ , el ventilador da el máximo caudal que puede mover. En este punto  $P_t = P_d$ . Así mismo, cuando el ventilador esta obturado, es decir que da el mínimo caudal,  $P_t = P_e$ , ya que  $P_d = 0$  (Salvador Escoda S.A., 2011).

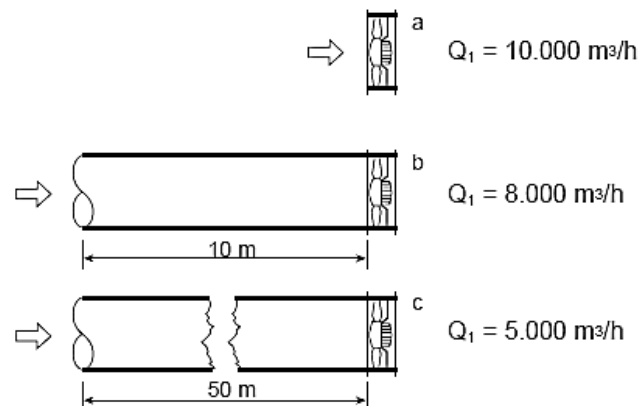


Figura 2-5 Pérdida de caudal con la longitud. (Salvador Escoda S.A., 2011)

### 2.3.8 Importancia de la ventilación

En invernaderos cerrados se vuelve fundamental la ventilación con el fin de controlar la temperatura y la humedad, ya que conforme el aire se calienta incrementa su capacidad de retener humedad. Debe considerarse, así mismo, que el aire propulsado por la unidad enfriadora tiende a bajar a causa de su mayor densidad. A medida que el aire frío se mezcle con el aire del local, cambiará su velocidad y temperatura. Por tal motivo hay que tener muy en cuenta que, al soplar en un local, con velocidades elevadas para que el chorro alcance distancias convenientes, las plantas que ocupan el mismo toleren la corriente de aire (Mazariegos, 2007).

El movimiento de aire continuo mantiene la temperatura uniforme en el invernadero, disminuye la humedad relativa en el dosel y en las superficies de la hoja, y mantiene el intercambio de gases entre la capa límite de las hojas y el aire circundante (Karlsson, 2014).

Se sabe que las tasas de circulación de aire adecuadas deben estar en el rango de 40 a 100 pies cúbicos por minuto (CFM). Las tasas de flujo de aire más bajas pueden dar lugar a humedad y a los problemas relacionados con dióxido de carbono y el flujo de aire por encima de 150 CFM puede dañar las plantas (Karlsson, 2014).

La posición relativa de las bocas de impulsión y la de aspiración pueden ser muy diversas y es importante disponerlas adecuadamente para obtener una buena difusión de aire (Mazariegos, 2007).

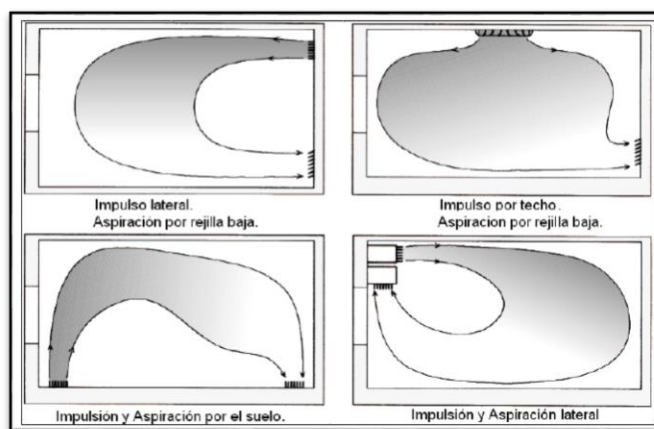


Figura 2-6 Comportamiento del aire en un local con diferentes posiciones. (Mazariegos, 2007)

## 2.4 La fresa

Durante los últimos 60 años, México ha figurado entre los principales 10 países productores de fresa y entre los primeros tres exportadores de fresa congelada. La productividad y calidad de la fruta nacional ha registrado incrementos modestos, aunque en el mercado mundial la presencia del producto se ha basado principalmente en los relativos bajos costos de producción. En las últimas décadas, sin embargo, las demandas de los consumidores han variado significativamente, por lo que se estima que para el futuro inmediato el mercado exigirá solo fruta inocua, producida bajo sistemas orgánicos y con alta calidad nutracéutica (Davalos, Aguilar, Jofre, Hernandez, & Vazquez, 2011).

La competitividad y rentabilidad de la industria de la fresa en México, en el futuro, dependerá de la adopción de mejores técnicas de cultivo, de abatir costos de producción mediante sustitución de insumos importados por productos nacionales, y de la diversificación de los mercados, considerando la ubicación geográfica de las regiones productoras que permiten producir fresa fresca en invierno, época de mayor demanda del producto en el mercado mundial (Davalos et al., 2011).

La fresa es un cultivo importante tanto agrícola como económicamente en nuestro país, siendo los estados de Guanajuato y Michoacán donde se explota principalmente (Peralta, 1992).

La fresa es un fruto muy apreciado por su sabor y aroma, en años recientes esta deliciosa fruta ha recibido mucha atención en algunas regiones productoras de América del Norte y Centroamérica (Peralta, 1992).

Es un cultivo que se ha venido adaptando a diferentes latitudes, es originaria de América, donde los indígenas ya la cultivaban en algunas regiones de Chile, Ecuador y Perú. Son conocidas muchas variedades comerciales y existen más de 100 variedades silvestres (Peralta, 1992).

La producción de fresas bajo condiciones de invernadero, es un sistema práctico para obtener en el período más largo del año altos rendimientos, y producto de calidad; representa posibles valores de venta tres veces superiores al precio normal de oferta (Martinez & Leon, 2004).

### **2.4.1 La planta**

La planta de la fresa es herbácea, de porte bajo, y generalmente no supera los 30 cm de altura; su ciclo vegetativo es perenne en estado silvestre, aunque en plantaciones comerciales presenta dos facetas: en ambientes situados en latitudes frías, el cultivo permanece hasta tres años sin ser renovado, pero solo tiene un periodo de producción de dos meses máximo cada año. En cambio, en ambientes mediterráneos y subtropicales, la fresa registra un ciclo de producción largo (hasta de un año) con alta productividad y calidad de la fruta (Davalos et al., 2011).

El tallo de la planta de fresa, denominado corona, es un órgano corto, fibroso, donde se originan las raíces, hojas, frutas y estolones. La velocidad con que se forman los distintos órganos y su cantidad, son determinadas por la interacción de factores ambientales, por las características genéticas propias de la variedad y por el manejo a que es sometida la planta (Davalos et al., 2011).

#### **2.4.1.1 El sistema radical**

El sistema radical de la fresa se compone por raíces primarias y secundarias. Las primeras son producidas en los nudos que se forman en la corona y son de naturaleza fibrosa; tienen una vida media de uno a dos años. Las secundarias tienen un periodo de vida corto, de algunos días o semanas. Las raíces de la fresa pueden crecer en diversas texturas de suelo, aunque su desarrollo es más profuso en suelos de textura gruesa que en arcillosos. Su sistema radical es superficial, considerando que más del 50% de las raíces se ubica en los primeros 30 cm de profundidad (Davalos et al., 2011; Vergara, 2015).

Cualquier condición que afecte el crecimiento de las raíces, como suelos pesados, exceso de humedad, poca cantidad de oxígeno en el suelo, temperaturas demasiado bajas en invierno o temperaturas muy elevadas en primavera, además de provocar estrés a las plantas, propician condiciones favorables para el ataque de patógenos (Davalos et al., 2011).



#### **2.4.1.2 Corona**

Al órgano de la fresa que botánicamente es un tallo se le denomina corona. Es de tamaño corto, de entre 2 y 3 cm de longitud. La corona está compuesta de tejido leñoso y vascular. La parte central, llamada médula, está constituida por células alargadas, las cuales son altamente susceptibles a daños por bajas temperaturas (Davalos et al., 2011).

Las coronas son importantes porque es ahí donde se originan los racimos florales y los estolones. Por lo tanto, a mayor cantidad de coronas mayor número de flores o estolones primarios. Para cada variedad es deseable estimar su crecimiento vegetativo y la cantidad de coronas, de lo cual depende el máximo rendimiento de fruta. Sin embargo, cuando la planta de fresa registra un crecimiento y vigor excesivos, el rendimiento de fruta y de planta es afectado negativamente (Davalos et al., 2011).

Como en el resto de los órganos de la planta de fresa, la corona está expuesta al daño por agentes abióticos y bióticos. Entre los abióticos, las bajas temperaturas suelen ser uno de los mayores problemas en ambientes fríos (Davalos et al., 2011).

#### **2.4.1.3 Estolón**

El estolón es un tallo rastrero que es emitido por la planta cuando el fotoperiodo y la temperatura son favorables. El estolón o guía es una de las dos formas de propagación asexual de la fresa; la otra forma de propagación asexual convencional es por coronas.

Además de formar nuevas plantas, la función del estolón es conducir los nutrimentos y el agua indispensables para la sobrevivencia de las plantas hijas mientras estas desarrollan su propio sistema radical (Davalos et al., 2011).

#### **2.4.1.4 Hojas**

Las hojas de la fresa varían en cantidad y tamaño de acuerdo a la variedad. Sin embargo, generalmente las hojas aparecen en roseta y se insertan en la corona; además, tienen un gran número de estomas (300-400/ mm<sup>2</sup>), por lo que pueden perder gran cantidad de agua por transpiración (Vergara, 2015).

Asimismo, la producción de hojas es regulada por condiciones ambientales, entre ellas el fotoperiodo y la temperatura. Fotoperiodo largo y temperatura alta favorecen la producción. Fotoperiodo corto y baja temperatura detienen la producción parcial o totalmente. (Davalos et al., 2011).

El ciclo de vida de las hojas es de uno a tres meses, pero puede ser acortado por plagas y enfermedades y al morir son reemplazadas secuencialmente por hojas nuevas a lo largo del ciclo. En virtud de que en las hojas la energía solar, el bióxido de carbono y los elementos se transforman en nutrientes para la planta, resulta comprensible formar y preservar una determinada superficie foliar para el óptimo desarrollo del vivero (Davalos et al., 2011).

#### **2.4.2 Fases fenológicas de la planta**

La fenología es la ciencia que trata de los fenómenos biológicos periódicos de las plantas, como la brotación, floración, maduración del fruto, etc., relacionados con el clima y especialmente con los cambios estacionales a los que se encuentran sometidas las plantas (Aguilar, 2011).

El cultivo de la fresa presenta las siguientes fases fenológicas (Benavides & Cisne, 2012):

- *Fase de reposo vegetativo o dormancia.* – Cuando la planta no tiene crecimiento foliar y las hojas se tornan rojizas y secas. Ocurre en los días cortos y temperaturas bajas (noviembre – diciembre), se detiene el crecimiento hasta que la planta sale del reposo.
- *Fase de crecimiento vegetativo.* - Con temperaturas altas y días largos se reinicia la actividad vegetativa, y se forman hojas nuevas.
- *Fase de floración.* - Cuando se observan de tres a cinco flores abiertas.
- *Fase de fructificación.* - Cuando los frutos verdes inician su desarrollo.
- *Fase de reproducción vegetativa.* - En días largos y temperaturas altas, emergen estolones (julio – septiembre).
- *Inicio de la fase de reposo.* - En días cortos y temperaturas bajas, ocurre la polinización y comienza la floración y la fase de reposo.

### **2.4.3 Clima**

#### **2.4.3.1 Clasificación de la fresa por su respuesta al fotoperiodo**

Desde principios de siglo pasado, Darrow (1936) y otros investigadores propusieron clasificar la fresa cultivada dentro de las especies sensibles al fotoperiodo, término que se refiere a las necesidades de las plantas para inducir la floración. En aquella época se identificaron solamente dos estirpes de plantas genéticamente distintas por su respuesta al fotoperiodo: de día corto y de día largo. Esto significa que las variedades de día corto florecerán si las horas de luz son menos de 12 horas. En cambio, las variedades de día largo sólo florecen en cuando las horas de luz exceden las 12 horas, condiciones que ocurren en verano, en latitudes superiores a los 50° (Davalos et al., 2011).

Con la introducción en 1979 de los primeros cultivares de día neutro se añadió un tercer grupo a las variantes ya conocidas. Estos cultivares tienen la habilidad de florecer bajo un rango amplio de fotoperiodos, siempre y cuando las temperaturas no sean extremas: o demasiado frías para limitar su crecimiento y floración, o demasiado cálidas que estimulen la propagación vegetativa, pero inhiban la floración (Davalos et al., 2011).

Con días largos y temperaturas moderadas (de 20 °C a 25 °C de día y menos de 15 °C de noche) las variedades de día corto pueden seguir floreciendo, por lo que la temperatura juega un papel importante en la floración (Mendieta, 2011).

#### **2.4.3.2 Características climáticas y requerimientos del cultivo**

Los factores ambientales que determinan el ciclo de desarrollo de la fresa de manera determinante son: fotoperiodo y temperatura. Otras variables ambientales como la humedad relativa y la evaporación influyen en menor grado en el ciclo de desarrollo del fruto (Peralta, 1992).

#### **2.4.3.3 Temperatura**

La fresa se adapta muy bien a muchos tipos de climas, aunque es una planta sensible a las condiciones climáticas. Su parte vegetativa es altamente resistente a heladas, llegando a soportar temperaturas de hasta -20 °C, aunque los órganos florales quedan destruidos con

valores algo inferiores a 0 °C. Al mismo tiempo son capaces de sobrevivir a temperaturas estivales de 55 °C. Los valores óptimos para fructificar de manera adecuada se sitúan en torno a los 14 – 24 °C de media anual (Vergara, 2015).

Temperaturas por debajo de 12 °C durante el tiempo de cuajado dan lugar a frutos deformados por el frío, en tanto que un tiempo muy caluroso puede originar un rápido crecimiento vegetativo y una maduración y coloración del fruto muy rápida, lo cual le impide adquirir un tamaño adecuado para su comercialización (Benavides & Cisne, 2012; Martínez & Leon, 2004; Vergara, 2015).

En un invernadero, debido al control climático, técnicamente es posible producir fresas durante la mayor parte del año. Los costos de producción en invierno se incrementan por el gasto de calefacción. Sin embargo, de septiembre a febrero se registran los precios más altos de venta (Martínez & Leon, 2004).

La mayoría de los cultivares de fresa provienen de clima templado, por lo que requieren de cantidades moderadas de calor y no responden a altas temperaturas como otros cultivos (Martínez & Leon, 2004).

En primavera, en invernadero las temperaturas deseables son de 12 °C en el día y 8 °C en la noche para el crecimiento inicial en enero y febrero. Una vez que aparecen yemas la temperatura se incrementa gradualmente a 16 °C en el día y se disminuye a 10 °C en la noche cuando se observan frutos de color verde.

En la floración la ventilación debe operar cuando la temperatura sea mayor a 20 °C, de lo contrario se obtendrá un crecimiento pobre y frutos malformados.

En verano/otoño la temperatura del aire no debe exceder los 24 °C, disminuyéndose con excelente ventilación para evitar se altere la polinización, se reduzca el contenido de materia seca, y aumente la presencia de frutos pequeños. En septiembre, se mantiene a 16 °C durante el día y 10 °C por la noche hasta finalizar la cosecha (Martínez & Leon, 2004).

Las temperaturas mayores a 28 °C pueden estresar a las plantas y reducir la floración, además de causar flacidez y ofrecer una baja calidad de los frutos (Mendieta, 2011).

En el invierno, las plantas deben recibir adecuadas cantidades de frío, de otra manera el crecimiento y vigor de la planta se reducirá en la siguiente primavera con un retraso en el cultivo (Martinez & Leon, 2004).

#### **2.4.3.4 Humedad relativa**

La humedad relativa adecuada ocurre entre 70% y 85% y el suelo requiere de un alto contenido de materia orgánica, amplia disponibilidad de agua y un pH entre 5.5 y 7 (Benavides & Cisne, 2012).

#### **2.4.3.5 CO<sub>2</sub>**

Es posible aumentar de 6 al 10% el rendimiento de las plantas de fresa al inyectar en la atmósfera entre 350 y 900 ppm de CO<sub>2</sub>, poco después del amanecer y una hora y media antes de la puesta del sol. Esta acción propicia un mayor crecimiento de las hojas, que beneficia el tamaño de frutos, su contenido de azúcar y ácido, mejorando el sabor y vida de anaquel (Martinez & Leon, 2004).

### **2.5 Cosecha**

Las fresas deben ser cosechadas a mano con el mayor cuidado, si es el propósito que lleguen al mercado en buenas condiciones. En los meses calurosos, cosechar la fresa durante las horas más frescas del día, de 6:00 am a 12.00 pm, si es necesario continuar, se reanudan las labores a las 5.00 pm (Martinez & Leon, 2004). Usualmente la cosecha tiene lugar cada dos días, durante el periodo que corresponde al pico de producción, muchas veces se hace necesario efectuar la recolección diaria. En el campo no deben quedar frutos que han alcanzado su madurez, pues al mezclarse con los frutos nuevos recolectados en el día pueden llegar a echar a perder el contenido total de un recipiente (Benavides & Cisne, 2012; Vergara, 2015).

### **2.6 Post cosecha**

La fresa es un fruto delicado por lo cual deben seguirse medidas adecuadas (Vergara, 2015) luego de haber sido cosechada. La fresa es una fruta de rápida perecibilidad sobre todo si no hay un buen control de la temperatura. Si está expuesta a temperaturas altas, pierde su calidad

en un corto tiempo. Así la fruta expuesta a 30 ° C por una hora sufre un deterioro equivalente a una semana a 0 ° C.

Al iniciarse la etapa de post cosecha debe propiciarse un enfriado rápido y mantener la cadena de frío hasta el destino final.

El paraenfriamiento puede efectuarse con una inmersión en agua a 10-12 ° C por unos minutos. La desinfección hacerla con productos tales como tiabendazol a la concentración de 1500 ppm (partes por millón) en agua. El secado se realiza mediante una corriente de aire con 22 a 25 ° C de temperatura y 65 a 70% de humedad relativa.

El empaque hacerlo en cajas abiertas tipo bandeja de 40 cm x 30 cm, de cartón corrugado, con capacidad de 2 kg. (8 cavidades de 250 g c/u). El almacenamiento de la fresa en cámaras frías hacerla a temperatura entre 0 °C a 1 °C.

### **3 Metodología**

Para la determinación de las características fenológicas de la fresa y de los parámetros de confort para la planta, se realiza una investigación bibliográfica que considera el cultivo de este fruto en invernaderos, tomando en cuenta de manera especial a aquellos estudios que se hayan realizado en zonas climáticas cercanas y/o de condiciones similares a las del estado de Chihuahua.

La determinación de los aspectos y las características relevantes para el diseño de los ductos, se realiza por medio de una revisión de la literatura tomando como base la teoría de la mecánica de fluidos y considerando los parámetros que influyan de manera importante en el sistema como temperatura, humedad, velocidad de flujo y geometría, entre otros.

Los criterios de diseño del sistema de distribución y la configuración del mismo se establecen en base a las características fenológicas de la planta, a los parámetros de confort de la fresa, y en base a los parámetros de diseño de ductos de distribución para aire de climatización.

Finalmente, para el estudio experimental del sistema de distribución de aire y la evaluación de su rendimiento, se propone la construcción de dos invernaderos a escala; uno climatizado por el sistema convencional y otro con la aplicación del sistema propuesto de manera posterior en este documento. Se evaluarán las diferencias encontradas entre los modelos y se determinará la efectividad del sistema propuesto.

#### **3.1 Localización del espacio de trabajo**

##### **3.1.1 Orientación**

La orientación del invernadero debe depender de la luz y los vientos, por lo que se recomienda que se oriente de Norte a Sur para aprovechar con mayor eficiencia la luminosidad y la radiación solar que ayuda al desarrollo de las plantas por cultivar (Robles & Mendoza, 2010).

Sin embargo, debe minimizarse la resistencia a los vientos, por lo que es necesario que el invernadero sea orientado para cumplir este propósito. Este es el caso de los invernaderos con los que cuenta la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de

Chihuahua, instalaciones que se encuentran a nuestra disposición durante la duración de la investigación. Los mismos tienen una orientación NE – SW, favoreciendo tanto el factor de luminosidad y radiación, como el factor de vientos (Figura 3-1 y Figura 3-2).

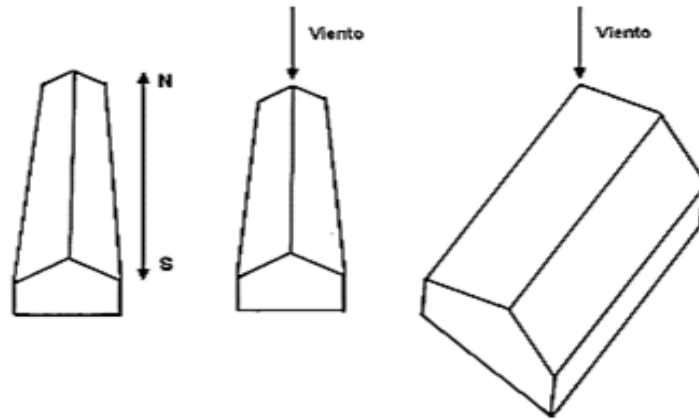


Figura 3-1 Orientación recomendada para invernaderos (Robles & Mendoza, 2010)



Figura 3-2 Localización del área de trabajo en FCIATEC. (Google Maps., 2016)



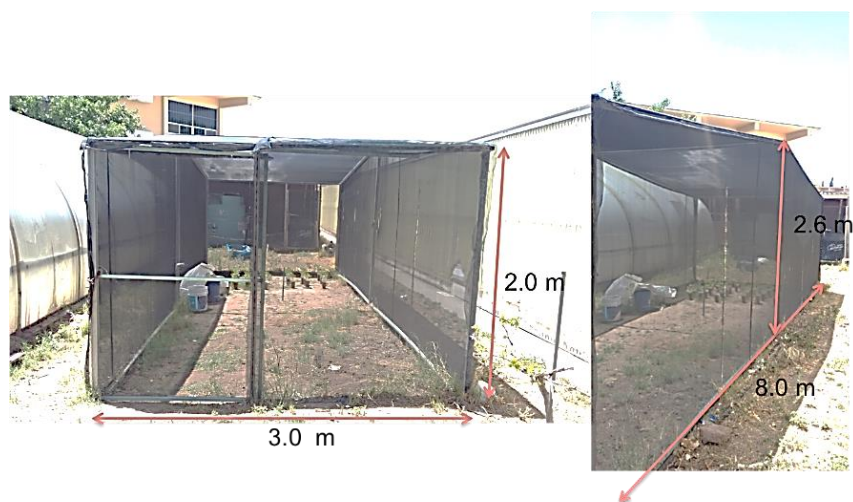
### 3.1.2 Ubicación y características

El área de trabajo se encuentra en la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas (FACIATEC) de la Universidad Autónoma de Chihuahua localizada en las inmediaciones de la Avenida Universidad y Calle Pascual Orozco, en el Campus 1 de la UACH en la Ciudad de Chihuahua.

La localización exacta del área de trabajo es latitud  $28^{\circ}39'26.38''$ N y longitud  $106^{\circ}05'16.01''$  a una elevación de 1440 msnm.

El área está a cargo de la Dra. Teresita de Jesús Ruiz Anchondo y cuenta con una estructura metálica y malla media sombra, por lo que deberá ser adecuado para proveer las condiciones requeridas para el experimento.

Las dimensiones del terreno son 3 m de ancho por 8 m de longitud, además la estructura cuenta con una altura mínima de 2 m y una altura máxima de 2.6 m como muestra la Figura 3-3.



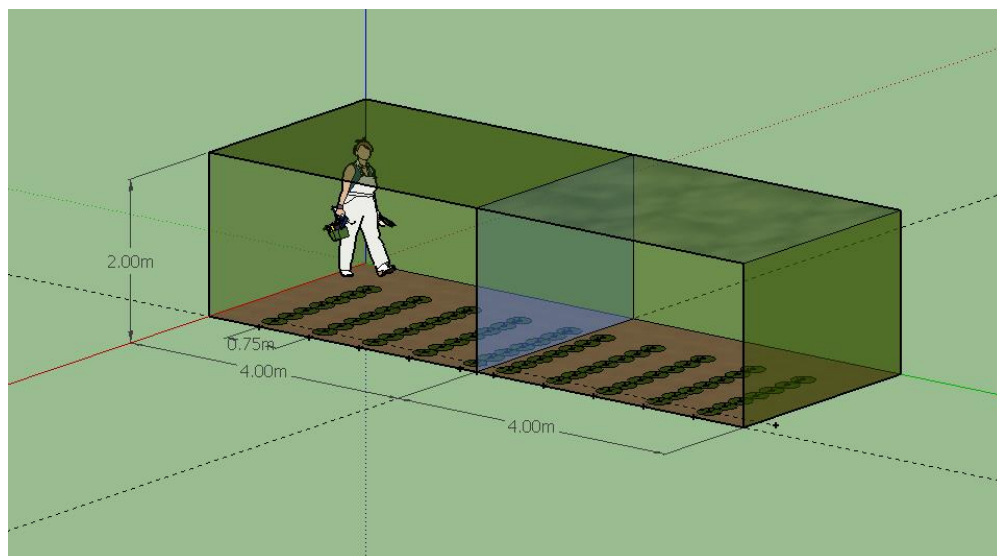
*Figura 3-3 Dimensiones del área de trabajo*

Para llevar a cabo el diseño y la experimentación la zona es dividida en dos secciones de análisis de iguales dimensiones. El sistema de distribución de aire se implementa solamente

en una de las áreas, mientras que la otra se climatiza en su totalidad; de esta manera existe punto de comparación para evaluar la efectividad del sistema (Figura 3-4).



*Figura 3-4 Separación del área de trabajo en dos secciones*



*Figura 3-5 Disposición propuesta para el área de trabajo.*

### **3.2 Descripción del sistema de climatización propuesto**

En base a la necesidad, a los recursos, las limitantes y a la literatura consultada; se propone el desarrollo de un sistema de distribución de aire climatizado en un invernadero que se dispone para controlar la temperatura y las condiciones ambientales. La Figura 3-6 muestra el diseño conceptual del sistema.

La presente alternativa de solución se instala dentro del invernadero; sobre toda la longitud de cada surco o mesa de cultivo se coloca un microtúnel, el cual, para fines de la invención, forma un sistema de distribución de aire a través de conexiones con un sistema de enfriamiento y calefacción colocado en el exterior del invernadero.

Los microtúneles están compuestos de una estructura plástica ligera y una película plástica translúcida, cubriendo la zona de cultivo y funcionando como el habitáculo de climatización.

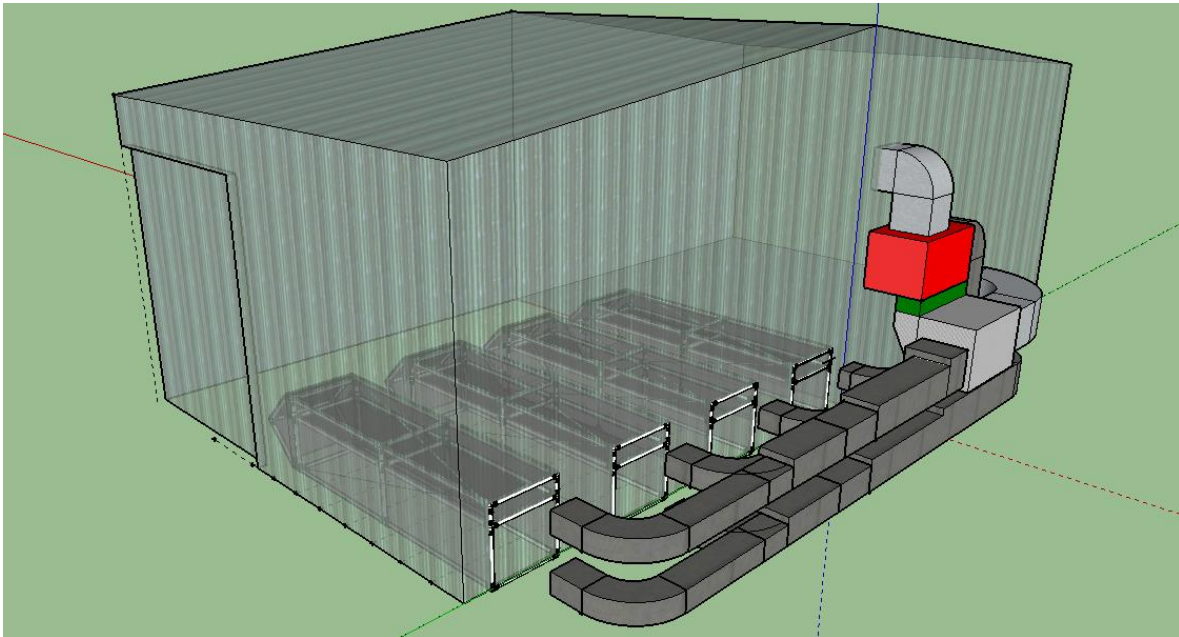
La sección transversal del sistema permite observar dos secciones separadas horizontalmente por una pared plástica. La sección inferior es la cámara de cultivo climatizado, mientras que la sección superior es el conducto de distribución de aire del sistema.

La geometría y el área de ambos componentes (cámara de climatización y ducto de alimentación) de la sección transversal del microtúnel, pueden variar dependiendo de las circunstancias particulares, incluyendo, mas no limitándose a, el clima circundante y a los cultivos del invernadero.

El aparato de enfriamiento y calefacción provee aire a una temperatura determinada, el cual es introducido al sistema de distribución por medio de ventiladores, permitiendo al aire circular a través de los ductos designados y suministrar un flujo de volumen de aire previsto adecuado a la tasa de ventilación requerida para cada cultivo.

Los ventiladores se sitúan en un extremo de la cámara de cultivo climatizado haciendo fluir el aire frío o caliente, dependiendo de las necesidades, a través de la cámara o ducto creado por el microtúnel. Se entiende que los ventiladores pueden situarse en otras posiciones en la cámara y que el número de los mismos dependerá de las características de flujo del mismo.

Para lograr la velocidad de flujo y/o tasa de volumen de flujo determinados, se cuenta con un controlador de velocidad en los ventiladores.



*Figura 3-6 Diseño conceptual del sistema*

### **3.3 Diseño de ductos**

Cuando se diseña un sistema de ductos, se sugiere proceder con siguiente criterio (Goribar, 1997):

- Los ductos deben seguir, en la medida de lo posible, la ruta más directa
- Los cambios de dirección pronunciados deben evitarse
- Si los ductos son rectangulares, no deben ser muy aplanados. En general, no debe excederse una relación de 10 a 1.

Los pasos generales a seguir en el diseño del sistema de ductos deben ser:

1. Calcular las cantidades de aire necesarias para cada salida, ramal o zona
2. Proyectar una ruta conveniente para obtener una distribución adecuada y tener facilidades en el montaje de los ductos

### 3. Calcular el tamaño de cada ducto

Como se trató anteriormente, existen diferentes métodos para el dimensionamiento de sistemas de distribución de aire. Para el sistema en cuestión se utiliza el método de igual fricción, también llamado método de caída de presión constante.

#### **3.3.1 El método de igual fricción**

El método de igual fricción es el método más utilizado para el dimensionamiento de ductos de baja presión. Para sistemas de alta presión no es utilizado. El método reduce las velocidades del aire de manera automática en la dirección del flujo (Meyer, 1990).

La base de este método de dimensionamiento de conductos es que se selecciona un valor para la pérdida de presión por fricción por longitud de ducto, y se mantiene constante para todas las secciones de ducto del sistema. El valor que se selecciona se basa en general en la velocidad máxima permisible en el conducto cabezal que sale del ventilador, para evitar demasiado ruido (Mazariegos, 2007).

La principal desventaja de este método es que no prevé la caída de presiones en las ramificaciones del sistema (con excepción de sistemas simétricos) (Meyer, 1990).

El método de igual fricción para el dimensionamiento de los conductos de aire es fácil de usar. El método puede resumirse de la siguiente manera:

1. Calcular el caudal necesario de volumen de aire en todas las habitaciones y la rama del sistema
2. A partir del caudal obtenido, calcular el volumen total de aire en el sistema principal
3. Determinar la velocidad máxima de flujo de aire aceptable en el conducto principal
4. Determinar la caída de presión importante en el conducto principal
5. Utilice la caída de presión importante para el conducto principal como una constante para determinar los tamaños de conducto a lo largo del sistema de distribución
6. Determinar la resistencia total en el sistema de conductos multiplicando la resistencia estática con la longitud equivalente de la pista más larga

La descripción de los pasos anteriores es la siguiente:

- **Calcular el volumen de aire en todas las habitaciones y ramificaciones**

Utilizar los requisitos reales de calor, refrigeración o de calidad del aire para las habitaciones y calcular el flujo de volumen de aire requerido  $Q$ .

- **Hacer un diagrama simplificado del sistema**

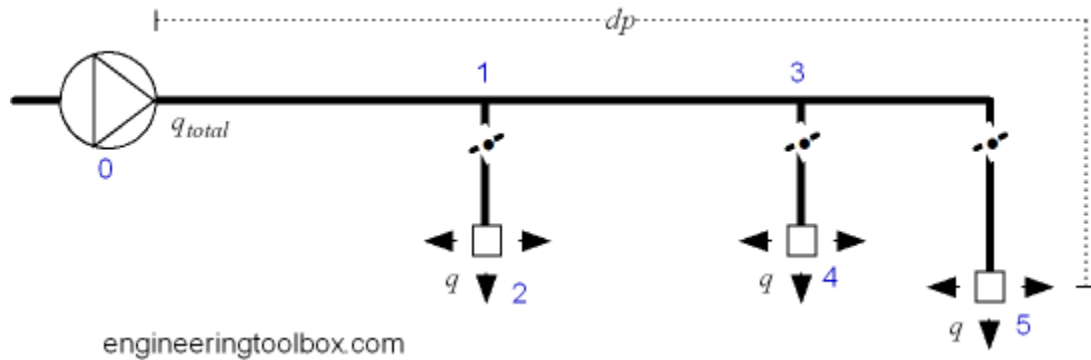


Figura 3-7 Ejemplo de un diagrama simplificado del sistema de distribución. (The Engineering ToolBox, 2016a)

Nota: Tener en cuenta que las condiciones de carga máxima casi nunca se producen en todas las habitaciones al mismo tiempo. Evitar el sobre-dimensionamiento del sistema principal multiplicando el volumen acumulado por un factor menor a uno (esta es probablemente la parte más difícil - y para los sistemas más grandes a menudo se requieren sofisticados cálculos climáticos asistidos por computadora).

- **Determinar las velocidades máximas de flujo de aire en los ductos principales**

Determinar la velocidad máxima en los conductos principales de acuerdo al entorno de aplicación. Para evitar molestar a los niveles de ruido - mantener velocidades máximas dentro de los límites.

- ✓ sistemas de confort - la velocidad del aire de  $4$  a  $7$   $m/s$  ( $13$  a  $23$   $pies/s$ )
- ✓ sistemas industriales - la velocidad del aire de  $8$  a  $12$   $m/s$  ( $26$  a  $40$   $pies/s$ )
- ✓ sistemas de alta velocidad - la velocidad del aire de  $10$  a  $18$   $m/s$  ( $33$  a  $60$   $pies/s$ )

Usar los límites máximos de velocidad al seleccionar el tamaño del conducto principal.

- **Determinar la caída de presión estática en el conducto principal**

Utilizar una tabla de pérdidas de presión o similar para determinar la caída de presión estática en el conducto principal.

- **Determinar el tamaño del conducto a través del sistema**

Utilizar la pérdida de presión estática determinada como una constante para determinar los tamaños de conductos en todo el sistema. Utilizar los volúmenes de aire calculados previamente. Seleccionar el tamaño del conducto con la caída de presión de los conductos reales tan cerca de la caída de presión en el conducto principal como sea posible.

- **Determinar la resistencia total en el sistema**

Usar la presión estática para calcular la caída de presión a través de la parte más larga del sistema de conductos. Utilizar la longitud equivalente que es:

longitud real + longitudes de codos y térs de entradas y salidas

- ***Nota sobre el método de Igualdad de Fricción***

El método igual fricción es sencillo y fácil de usar y proporciona una reducción automática de la velocidad del flujo de aire a través del sistema. Las velocidades reducidas están, en general, dentro de los límites de ruido del entorno de aplicación.

### **3.3.2 Selección de forma**

El modelo de ducto circular es la forma más popular, puede colocarse de forma horizontal o vertical y se instala sobre un sistema de cable o de riel. No existe ninguna limitante en cuanto a los diferentes diámetros que se pueden alcanzar, los cuales se determinan según la velocidad de conducción del caudal dentro del ducto. (Difusión Textil Integral, 2015)

- a) Producen menores pérdidas por fricción pues la sección circular es la que presenta menor perímetro a igualdad de área.
- b) No se requiere ocupar espacios reducidos como en el caso de los conductos rectangulares de aire acondicionado que se instalan en los edificios.

- c) Presentan mayor resistencia mecánica a la deformación cuando su presión interna es menor que la presión atmosférica.
- d) Tienen una distribución de velocidades más uniforme en su sección que la distribución correspondiente a conductos rectangulares, pues las velocidades en sus ángulos inferiores son prácticamente nulas.

### **3.3.3 Dimensionado por el Método de Igual Fricción**

Se busca dimensionar los ductos de tal manera que la pérdida por fricción sea constante. Cuando se utiliza este método, se supone la velocidad del aire a la salida del ventilador; con esta velocidad se calcula la pérdida de presión que se conserva constante en todo el resto del sistema.

El primer paso del método de caída de presión constante es calcular el caudal de aire climatizado necesario para ventilar las diferentes zonas deseadas. En el sistema propuesto, las zonas a ventilar son solamente aquellas que están próximas a las plantas de fresa. Estas regiones se denominarán cámaras de climatización y se fundamentan en la tecnología conocida como túnel bajo o microtúnel.

Cada cámara de climatización toma la geometría de su sección transversal en base a las características de la planta de fresa y a las dimensiones estándar de túneles bajos para plantaciones de fresa reportadas (Rowley, Black, & Drost, 2010). Considerando que la planta puede llegar a alcanzar una altura entre 25 y 30 cm, se establece una altura para cada cámara de 35 cm y una anchura de 50 cm.

Así mismo, es necesario conocer que las velocidades óptimas para el crecimiento de las plantas se encuentran entre  $0.5$  y  $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Aldrich et al., 1983). Por tanto, se considera que una velocidad de  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dentro de cada cámara de climatización es adecuada para el dimensionamiento del sistema.

La ecuación de la continuidad (1) muestra que el flujo volumétrico es igual al área transversal del sistema multiplicada por la velocidad de flujo.



$$Q = A * V \quad (1)$$

Sustituyendo el área transversal de la cámara de climatización y la velocidad de viento óptima para el desarrollo de los cultivos, se obtiene que el caudal requerido para cada una de las cámaras es:

$$Q = (0.35 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}) \times 0.5 \text{ ms}^{-1} = 0.0875 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$$

El segundo paso es calcular el caudal total del sistema. Para este fin es útil contar con un diagrama del sistema.

El sistema cuenta con 4 cámaras, por lo cual el caudal total que debe circular a través del ducto principal antes de cualquier intersección con algún ducto ramal es:

$$Q_{total} = Q \times 4 = 0.35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$$

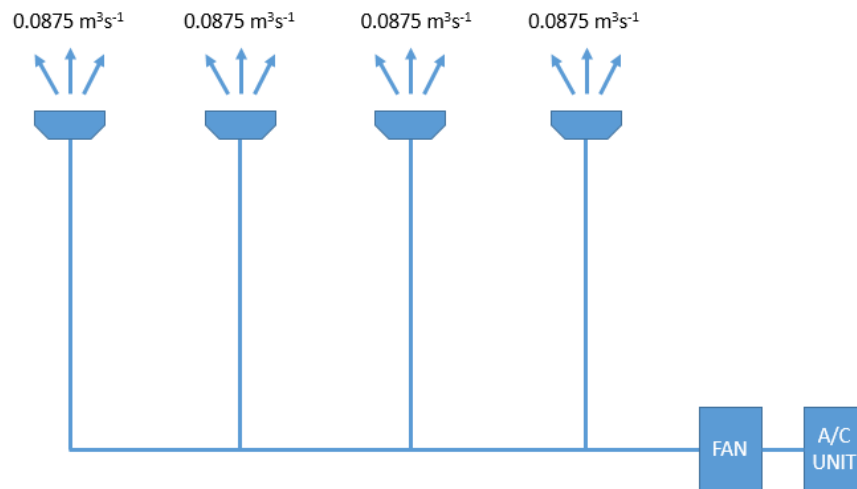


Figura 3-8 Caudal requerido para cada cámara de climatización

El tercer paso dentro del método de caída de presión constante es seleccionar la velocidad máxima de los conductos. Esta se selecciona de acuerdo al ambiente de aplicación para el sistema (The Engineering ToolBox, 2016a). Los diferentes ambientes de aplicación son:

- ✓ Sistemas de confort – velocidad de 4 a 7 m/s
- ✓ Sistemas industriales – velocidad de 8 a 12 m/s
- ✓ Sistemas de alta velocidad – velocidad de 10 a 18 m/s

La velocidad de flujo en conductos de aire debe mantenerse dentro de ciertos límites para evitar el ruido y disminuir la pérdida por fricción y el consumo de energía. Debido a que el sistema tiene como objetivo ofrecer una atmósfera de condiciones óptimas para el confort de las plantas de fresa, se toma la velocidad de 4 m/s como estándar para el ducto principal.

El cuarto paso intenta determinar la pérdida de presión estática por unidad de longitud  $\Delta Pe$ . Esta pérdida de carga se asume constante para todo el sistema y se determina a través del gráfico de rozamiento en base al caudal  $Q_{total}$  y la velocidad de flujo  $V$  en el ducto principal.

Siendo  $Q_{total} = 0.35$  m/s y  $V = 4$  m/s, se tiene que:

$$\Delta Pe = 0.65 \text{ Pa/m}$$

Una vez conocida la pérdida de carga se procede al paso 5, en el cual se determina el diámetro equivalente  $D_e$  de cada sección de ductos tanto ducto principal como ramales.

Esto se determina en base a  $Q$  y a  $\Delta Pe$ . Para ello es útil trabajar una hoja de cálculo y en base a un diagrama donde se especifiquen los tramos y los caudales.

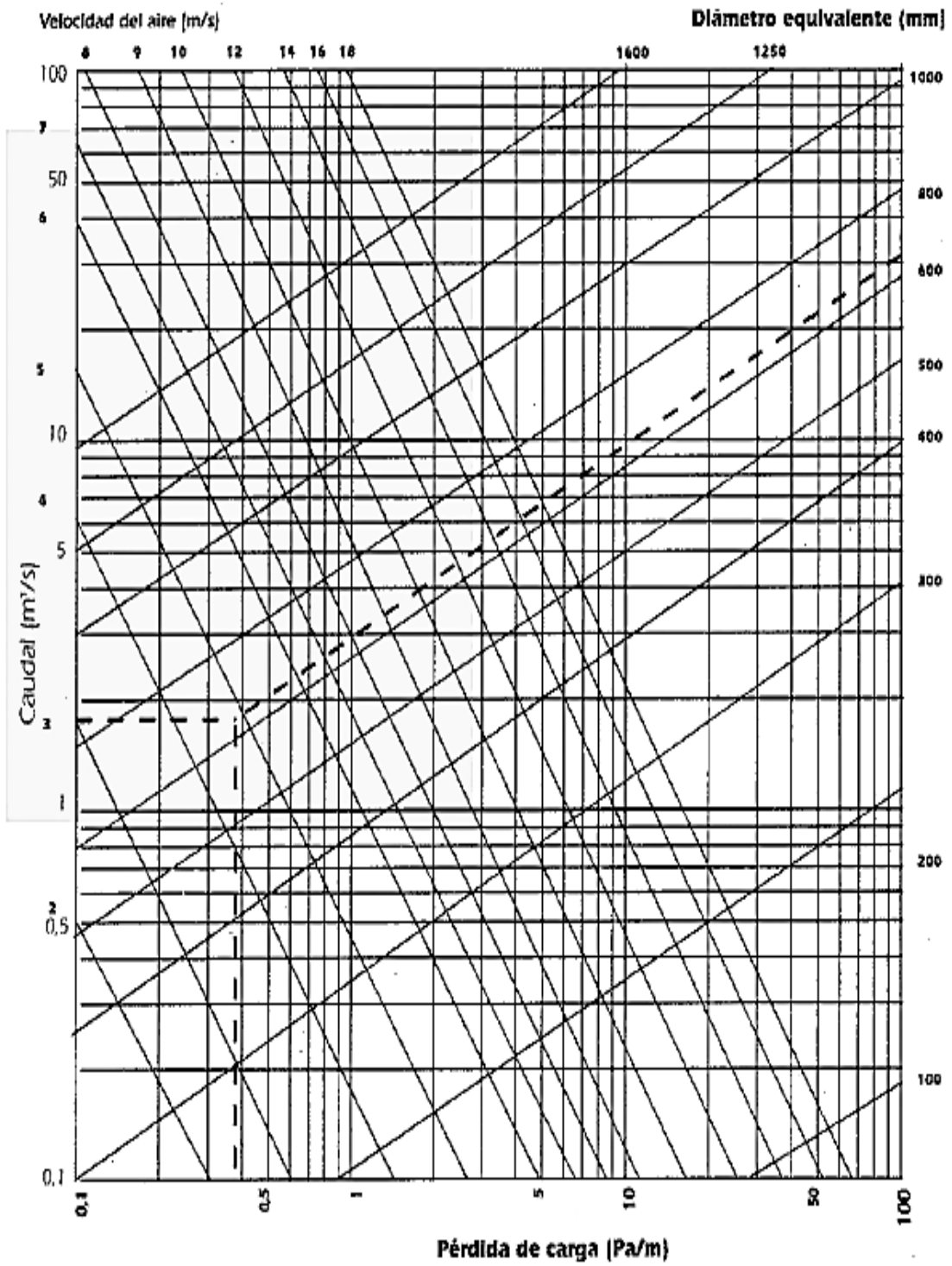


Figura 3-9 Pérdida de carga por rozamiento del aire en conductos circulares. (Isover Saint Gobain, 2009)

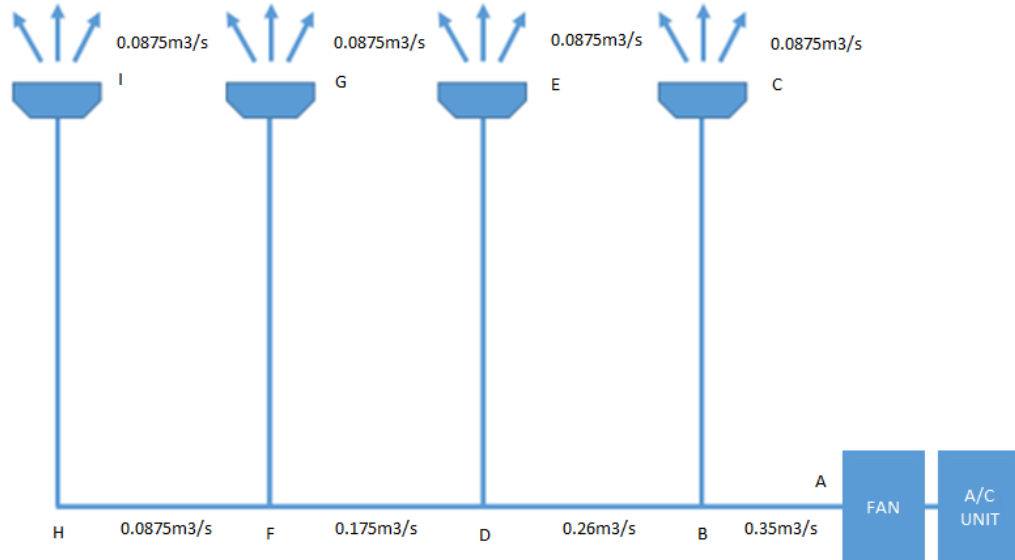


Figura 3-10 Diagrama de caudales en el sistema de alimentación

Tabla 2 Diámetros equivalentes y secciones transversales en pulgadas (Waptac).

FLUJO DE AIRE (CFM)	DUCTO PRINCIPAL DE ALIMENTACION O RETORNO				
	Sección circular	ó	Sección rectangular		
200	8"	ó	6" x 8"		
300	9"	ó	8" x 8"		
400	10"	ó	10" x 8"		
500	11"	ó	14" x 8"	10" x 10"	
600	12"	ó	16" x 8"	12" x 10"	
700	13"	ó	18" x 8"	14" x 10"	12" x 12"
800	14"	ó	22" x 8"	16" x 10"	14" x 12"
1000	16"	ó	28" x 8"	20" x 10"	16" x 12"
1200	17"	ó	32" x 8"	24" x 10"	20" x 12"
1400	18"	ó		28" x 10"	24" x 12"
1600	20"	ó		32" x 10"	28" x 12"
1800	21"	ó			30" x 12"
2000	22"	ó			34" x 12"

Tabla 3 Dimensionamiento de ductos de alimentación

DUCTOS DE ALIMENTACION							
Ducto Principal							
Tramo	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (CFM)	Flujo de aire %	Área ducto %	D <sub>e</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (pulg)	Ducto Rectangular
A-B	0.35	741.039	100	100	340	14	14 x 12"
B-D	0.2625	555.779	75	93.5	300	12	12x10"
D-F	0.175	370.519	50	67	270	10	10x8"
F-H	0.0875	185.26	25	32.5	200	8	6x8"
Ductos Ramales							
Tramo	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (CFM)			D <sub>e</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (pulg)	Ducto Rectangular
B-C	0.0875	185.26			200	8	6x8"
D-E	0.0875	185.26			200	8	6x8"
F-G	0.0875	185.26			200	8	6x8"
H-I	0.0875	185.26			200	8	6x8"

Ya que se desea implementar un sistema de alta eficiencia energética, se pretende reutilizar todo el aire del sistema, es decir retornarlo a la máquina de climatización. Por lo tanto, solo se introducirá aire fresco al sistema si las propiedades de la atmósfera controlada así lo exigen.

Dicho esto, el caudal total suministrado a través del ducto de retorno debe ser también

$$Q_{total} = 0.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se procede de la misma manera para calcular los diámetros equivalentes de los ductos de retorno obteniendo los siguientes datos:

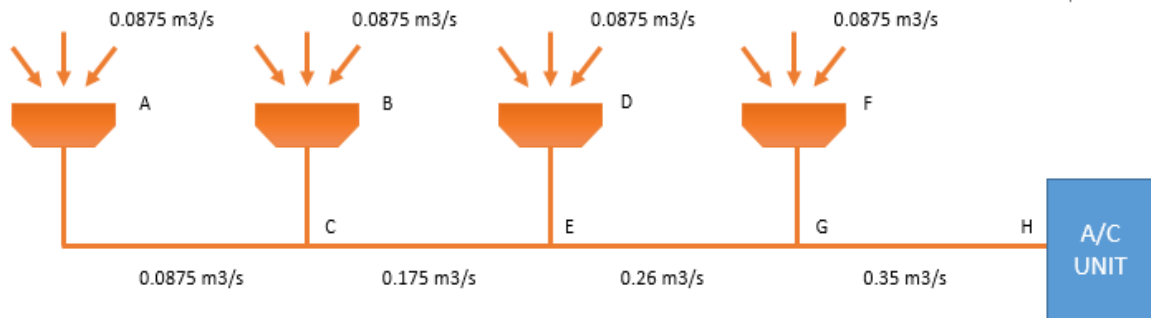


Figura 3-11 Caudales en el sistema de retorno

Tabla 4 Dimensionamiento de ductos de retorno

DUCTOS DE RETORNO					
Ducto Principal					
Tramo	Caudal (m³/s)	Caudal (CFM)	D <sub>e</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (pulg)	Ducto Rectangular
A-C	0.0875	185.26	200	8	6x8"
C-E	0.175	370.519	270	10	10x8"
E-G	0.2625	555.779	300	12	12x10"
G-H	0.35	741.039	340	14	14 x 12"
Ductos Ramales					
Tramo	Caudal (m³/s)	Caudal (CFM)	D <sub>e</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (pulg)	Ducto Rectangular
A-A'	0.0875	185.26	200	8	6x8"
B-C	0.0875	185.26	200	8	6x8"
D-E	0.0875	185.26	200	8	6x8"
F-G	0.0875	185.26	200	8	6x8"

Las secciones transversales de los ductos se han obtenido con un diámetro equivalente  $D_e$ . El diámetro equivalente es el diámetro de un ducto circular que ofrece la misma pérdida de presión o resistencia que un ducto equivalente rectangular (Figura 3-12).

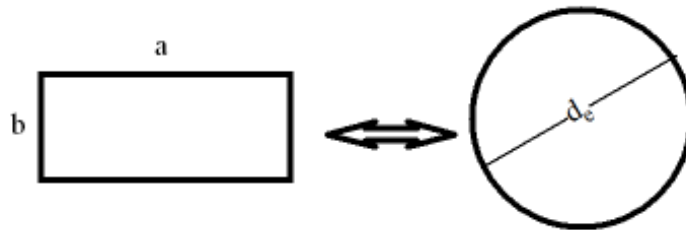


Figura 3-12 Diámetro equivalente (The Engineering ToolBox, 2016b)

Sin embargo, para la aplicación en el sistema se pretende que los ductos ramales de alimentación se integren sobre la parte superior del microtúnel (cámara de climatización) como se ilustra en la Figura 3-13, además que sean construidos con hule de silo transparente para permitir el paso de la luz y evitar de esta manera una reducción de la actividad fotosintética de las plantas de fresa.

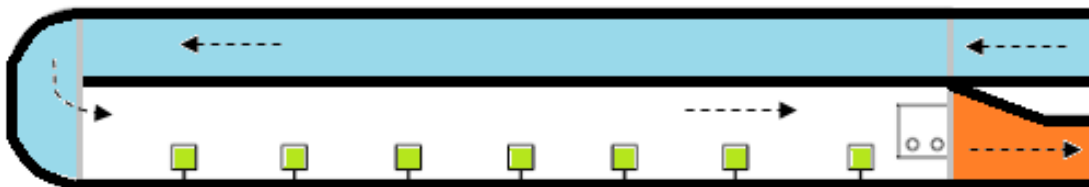


Figura 3-13 Vista lateral del sistema ducto ramal – microtúnel, invención en estudio.

Para ajustar las dimensiones de los ramales a la cámara de climatización utilizamos la fórmula de Huebscher:

$$D_e = 1.30 (a b)^{0.625} / (a + b)^{0.25} \quad (2)$$

Recapitulando, las cámaras de climatización tendrán un ancho de 50 cm, por lo que los ductos ramales que circulen sobre las mismas deberán tener la misma dimensión en anchura para que se ajusten a la estructura de construcción.

Como ya se conoce el diámetro equivalente y uno de los lados de los ductos ramales, a partir de la ecuación (2) se obtiene una altura de 80.5 mm para el ducto, por lo que el sistema ducto-cámara queda integrado con las siguientes dimensiones:

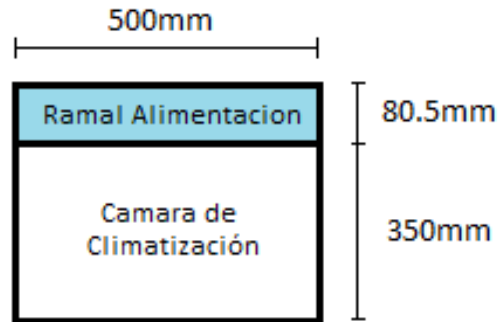


Figura 3-14 Dimensiones del sistema cámara de climatización - ducto ramal

El paso numero 6 permite encontrar la resistencia total del sistema de alimentación. Ésta se obtiene a partir de la pérdida de presión por unidad de longitud multiplicada por la longitud del sistema.

Realizando el ejercicio para el sistema de alimentación se obtiene:

$$Resistencia\ alimentación = 0.65 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \times 6.1 \text{ m} = 3.96 \text{ Pa}$$

Calculando para el sistema de retorno:

$$Resistencia\ retorno = 0.65 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \times 4 \text{ m} = 2.6 \text{ Pa}$$

La resistencia total en el sistema es:

$$Resistencia\ total = (3.96 + 2.6) \text{ Pa} = 10.29 \text{ Pa}$$

Esta se utilizará posteriormente para la selección del ventilador en el sistema.



### 3.4 Selección del ventilador

El ventilador es un dispositivo que transmite su potencia al aire dentro del ducto para vencer la pérdida de carga. Para seleccionarlo es necesario conocer los caudales que ira proporcionando por la longitud del ducto según sean las distintas pérdidas de carga que deba vencer.

A descarga libre, es decir cuando la presión estática ( $Pe$ ) es nula, el ventilador da el máximo caudal que puede mover; en este punto la presión total es igual a la dinámica

$$(Pt = Pd)$$

Asimismo, cuando el ventilador esta obturado, es decir que da el mínimo caudal, la presión dinámica ( $Pd$ ) es nula; en este punto, la presión total es igual a la estática

$$(Pt = Pe)$$

Esta información, además de la potencia y el rendimiento es posible encontrarla en forma de curvas para cada ventilador, y en su conjunto reciben el nombre de característica del ventilador. La característica de un ventilador es la mejor referencia del mismo, ya que siempre nos indicara su comportamiento según sea el caudal y la presión que esté dando.

El punto ideal de funcionamiento del ventilador, aquel para el que ha sido diseñado, es el correspondiente al máximo rendimiento. Cuanto más cerca de este punto trabaje el ventilador, más económico será su funcionamiento.

#### 3.4.1 Punto de trabajo

La curva característica del ventilador depende únicamente del ventilador, y solamente puede variar si el ventilador funciona a una velocidad de rotación distinta.

Puede aceptarse en principio que la curva característica es totalmente independiente del sistema de conductos al que se acople. Sin embargo, hay que considerar que un ventilador puede funcionar moviendo distintos caudales y comunicándoles distintas presiones, de tal

forma que todos los puntos posibles de funcionamiento se hallen representados sobre la curva ( $Pe$ ).

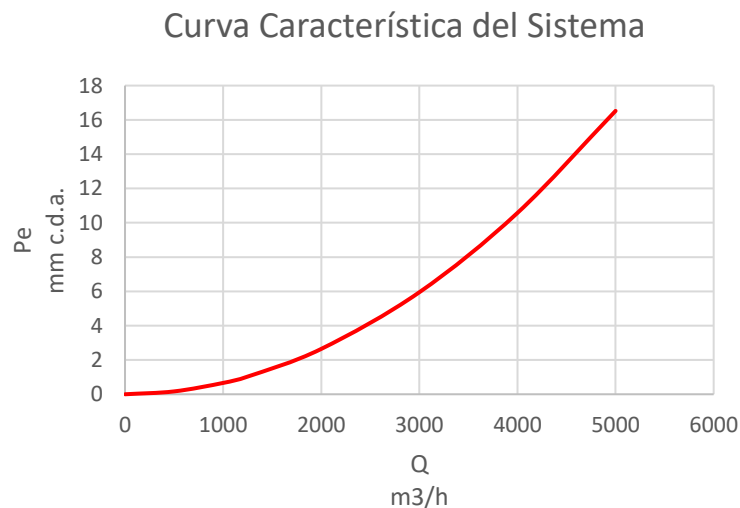
Para saber exactamente en qué condiciones funcionara el ventilador, debemos conocer la curva de resistencia de la instalación, es decir, la curva que relaciona la pérdida de carga de la instalación con el caudal que pasa por ella.

En el caso del sistema, la resistencia total es de 10.29 Pa o 1.05 mm c.d.a y el caudal primario es de 0.35 m<sup>3</sup>/s o 1260 m<sup>3</sup>/h. A través de la siguiente ecuación podemos obtener una serie de puntos que dan forma a la curva de resistencia.

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]^2 \quad (3)$$

De tal manera que para el sistema propuesto se obtiene la curva característica del sistema (Figura 3-155) a partir de la ecuación (3).

El punto de trabajo se encuentra en el punto de intersección entre la curva del ventilador y la curva característica resistente de la instalación como lo ilustra la (Figura 3-166).



*Figura 3-15 Curva característica del sistema de distribución de aire*

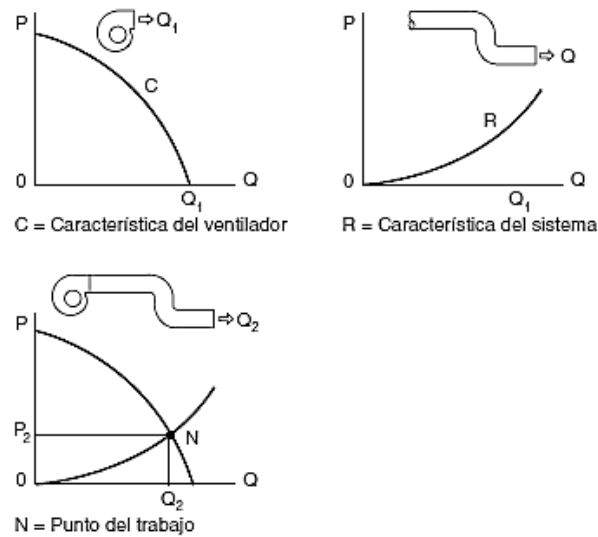


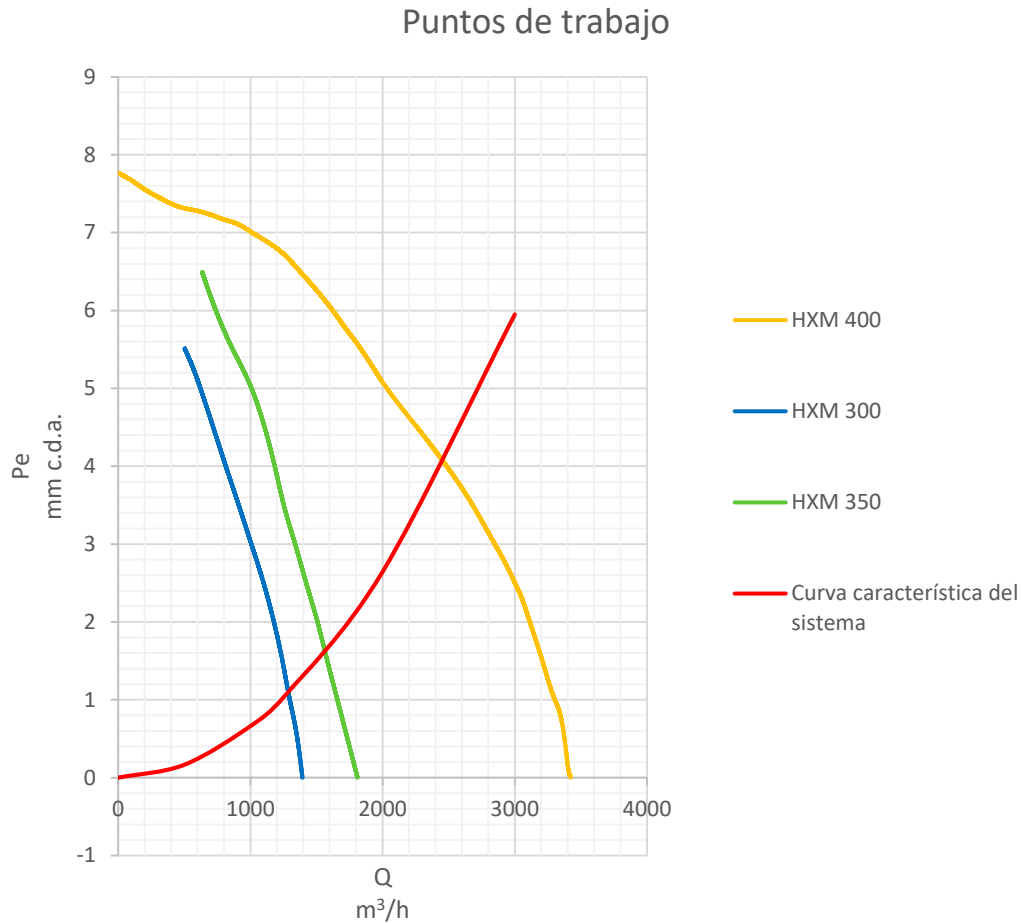
Figura 3-16 Punto del trabajo en un ventilador. (Soler & Palau, 2011)

Se ha seleccionado del catálogo de S&P la familia de ventiladores HXM con las siguientes características técnicas:

Tabla 5 Características técnicas de la familia de ventiladores HXM S&P

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS						
Modelo	Velocidad (rpm)	Potencia absorbida máxima (W)	Intensidad máxima absorbida (A)	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	Nivel de presión sonora (dB(A))	Peso (kg)
<b>HXM-200</b>	1300	30	0.22	500	36	1.7
<b>HXM-250</b>	1300	40	0.30	900	42	2.5
<b>HXM-300</b>	1300	60	0.45	1400	48	3.1
<b>HXM-350</b>	1300	60	0.45	1800	53	4.4
<b>HXM-400</b>	1300	200	1.80	3400	57	7.3

Con el fin de no subdimensionar ni sobredimensionar el sistema, se evalúan las curvas características de aquellos ventiladores cuyos caudales máximos se encuentran cercanos a nuestras necesidades.



*Figura 3-17 Superposición de la curva característica del sistema sobre las curvas características de la familia de ventiladores S&P HXM*

En la Figura 3-17 se sobrepone la curva característica del sistema (línea roja) sobre la característica de los ventiladores; puede observarse que para el ventilador S&P HXM 300 (línea azul) se encuentra el punto de trabajo a  $Q = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $P = 12.5 \text{ Pa}$ , mientras que para el HXM 350 (línea verde) se encuentra en  $Q = 1590 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $P = 16.4 \text{ Pa}$ . El ventilador HXM 400 se aleja de los requisitos y debido a su mayor capacidad tiene un precio mayor.

Para cada ventilador mencionado estas son las condiciones que permitirán un funcionamiento más eficiente y económico.

### 3.4.2 Leyes de los ventiladores

A partir de las leyes de ventiladores es posible determinar cómo los ventiladores varían caudal, presión y potencia absorbida al variar las condiciones de funcionamiento.

El caudal es proporcional a la relación de velocidades:

$$Q_2 = Q_1 \left[ \frac{n_2}{n_1} \right] \quad (4)$$

La presión es proporcional al cuadrado de la relación de velocidades:

$$P_2 = P_1 \left[ \frac{n_2}{n_1} \right]^2 \quad (5)$$

La potencia absorbida es proporcional al cubo de la relación de velocidades:

$$N_2 = N_1 \left[ \frac{n_2}{n_1} \right]^3 \quad (6)$$

Mediante las relaciones anteriores podemos conocer los valores que toman las diferentes variables para diferentes regímenes de giro del ventilador. Variando la velocidad de este podemos conseguir que el caudal y la presión se ajusten a las necesidades de cada momento.

Debe tenerse muy en cuenta que las curvas características de los ventiladores están siempre realizadas a las máximas revoluciones posibles, por lo que la regulación solo se puede realizar disminuyendo la velocidad de giro del ventilador.

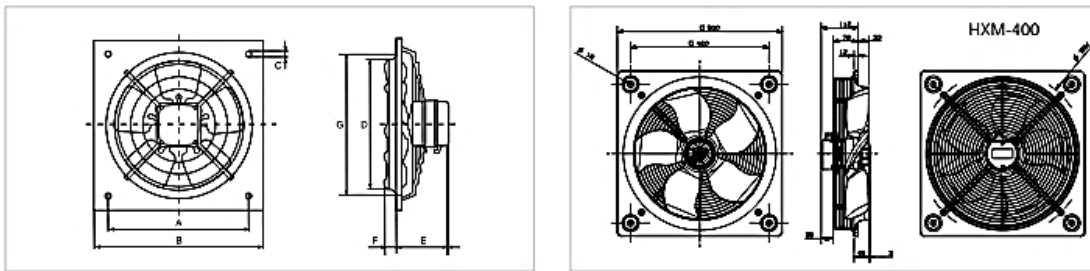
Ya que el modelo 300 tiene poco margen de maniobra, se selecciona el modelo HXM 350, con características de punto de trabajo en relación a la característica del sistema de  $n_1 = 1300 \text{ RPM}$ ,  $Q_1 = 1590 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $P_1 = 1.67 \text{ mm c. d. a}$ , y evaluando la ecuación (4) que relaciona caudal y velocidad, encontramos que para las condiciones de trabajo del sistema propuesto ( $Q_2 = 1260 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $P_2 = 1.05 \text{ mm c. d. a}$ ) por despeje y sustitución:

$$n_2 = n * \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]$$

$$n_2 = 1300 \text{ RPM} * \left[ \frac{1260 \text{ m}^3\text{s}^{-1}}{1590 \text{ m}^3\text{s}^{-1}} \right] = 1030 \text{ RPM}$$

Por lo tanto, para cumplir las condiciones de presión y caudal, el ventilador debe ser regulado para funcionar a una velocidad de 1030 RPM.

■ Dimensiones (mm)



Modelo	∅ A	∅ B	∅ C	∅ D	E	F	∅ G
HXM-200	222	266	9	205	85,5	19	211
HXM-250	275,5	333	9	255	92,5	31	261
HXM-300	336,5	400	10,5	305	92,5	35,5	311
HXM-350	390	465	10,5	361	105,5	34,5	371

Figura 3-18 Dimensiones (mm) de la familia de ventiladores S&P HXM

### 3.5 El problema térmico

El aire enfriado fluye a través de un ducto de paredes de película plástica transparente hacia una cámara de climatización situada dentro de un invernadero.

Esquemáticamente puede representarse el sistema de transferencia mediante la siguiente figura:

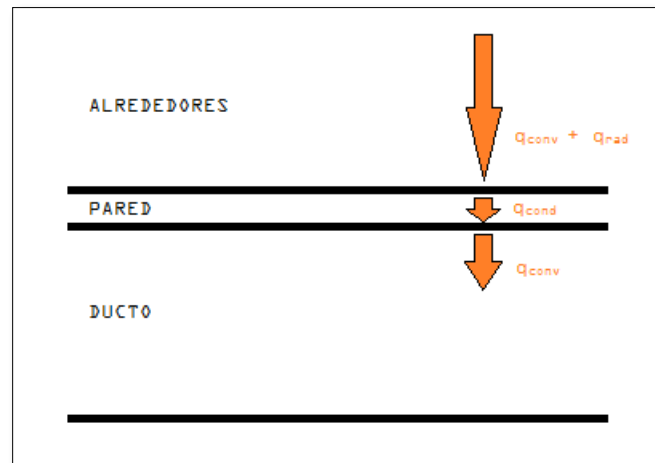


Figura 3-19 Diagrama de transferencia de calor en el sistema

La transferencia de calor a través del sistema puede resolverse mediante la ecuación

$$q = UA\Delta T \quad (7)$$

Donde  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor y se obtiene mediante la relación

$$UA = R_{tot}^{-1} \quad (8)$$

Para obtener  $R_{tot}$  es necesario encontrar las resistencias térmicas de cada elemento del sistema. En el problema propuesto se considera una transferencia de calor de los alrededores del ducto hacia la superficie externa de las paredes del mismo por dos formas; transferencia de calor por convección natural y transferencia de calor por radiación. El calor se transfiere

desde la superficie externa de la pared hacia la superficie interna mediante conducción. Finalmente, el calor se transfiere desde las paredes hacia la masa de aire que fluye dentro del conducto por la forma de convección forzada.

La resistencia  $R$  se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

- Convección y radiación

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (9)$$

- Conducción

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (10)$$

### 3.5.1 Solución al problema térmico

Para poder resolver el problema es necesario encontrar las resistencias térmicas para cada sección del sistema de transferencia de calor.

*Transferencia de calor desde los alrededores hacia el exterior de las paredes del sistema*

**R<sub>1</sub>**

- **Transferencia por convección natural**

Se toma como referencia la temperatura media anual en la ciudad de Chihuahua de 19 °C. En el invernadero el aumento de temperatura con respecto a la temperatura ambiente es de 5°C. Se considera entonces que la temperatura dentro del invernadero es de 24°C. Para la superficie externa de las paredes de los conductos se considera una temperatura de 22°C.

Para el aire a 20°C

$$Cp = 1007 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$k = 0.02514 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$$



$$Pr = 0.71$$

$$\nu = 15.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Se procede a obtener el número de Rayleigh ( $Ra$ ) por la ecuación

$$Ra = -\frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} Pr \quad (11)$$

Donde

$$\beta = 1/T$$

Sustituyendo

$$Ra = \frac{9.81(0.00336)(24 - 22)(1/5)^3(0.71)}{0.00005111} = 24.78$$

Se obtiene el número de Nusselt ( $Nu$ ) por la relación

$$Nu = 0.54Ra^{1/4}$$

El resultado obtenido es

$$Nu = 0.54(24.78)^{1/4} = 1.205$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección es:

$$h_{conv} = \frac{Nuk}{L} = \frac{1.205(0.02514)}{(1/5)} = 0.15144 \text{ W/m}^2\text{k}$$

- **Transferencia por radiación**

El coeficiente de transferencia de calor por radiación se obtiene por

$$h_{rad} = \frac{\epsilon\sigma(T_{\infty}^4 - T_{s.ext}^4)}{(T_{\infty} - T_{s.ext})} \quad (12)$$

Para una película de plástico transparente,  $\epsilon = 0.94$  (Infrared Services Inc., 2000).  
Sustituyendo valores en la ecuación (12):

$$h_{rad} = \frac{0.94(5.67 \times 10^{-8})(24^4 - 22^4)}{24 - 22} = 2.5711 \times 10^{-3}$$

La resistencia  $R_1$  es

$$R_1 = \frac{1}{(h_{conv} + h_{rad})A} = \frac{1}{(0.15144 + 2.5711 \times 10^{-3})A}$$

$$R_1 = \frac{1}{0.15401A}$$

### ***Transferencia de calor a través de la pared plástica transparente $R_2$***

La pared plástica de los ductos tiene un grosor de 700 galgas y el material tiene las siguientes características:

$$\rho = 910 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 0.12 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$Cp = 1925 \text{ J/kgK}$$

La resistencia térmica por conducción viene dada por la ecuación (10):

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} = \frac{700 \text{ galgas} \times \left[ \frac{0.001 \text{ mm}}{4 \text{ galgas}} \right] \times \left[ \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right]}{0.12 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \times A}$$

$$R_2 = R_{cond} = \frac{7}{4800A}$$

### ***Transferencia de calor por convección forzada de la pared hacia la masa de aire R<sub>3</sub>***

El diámetro hidráulico del ducto puede obtenerse por la relación

$$D_h = \frac{2ab}{(a + b)} \quad (13)$$

Siendo  $a = 0.35m$  y  $b = 0.5m$ . Entonces,

$$D_h = \frac{2(0.35)(0.5)}{0.85} = 0.412 \text{ m}$$

La velocidad del flujo de aire es  $V = 0.5 \text{ m/s}$  y el número de Reynolds puede conocerse por

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (14)$$

Dando como resultado

$$Re = \frac{0.5(0.412)}{15.11 \times 10^{-6}} = 13633.35$$

$Re > 2300$  por lo tanto, el flujo es turbulento.

El número de Nusselt se encuentra con la ecuación de Gnielinski para flujo turbulento en ductos

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (15)$$

Donde  $f$  es el factor de fricción y se obtiene con la correlación de Petukhov

$$f = (0.79 \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad (16)$$

$$f = (0.79 \ln(13633.35) - 1.64)^{-2} = 0.02891$$

Sustituyendo en la ecuación (15)

$$Nu = \frac{(0.02891/8)(13633.35 - 1000)(0.71)}{1 + 12.7(0.02891/8)^{1/2} (0.71^{2/3} - 1)} = 38.39$$

El coeficiente de transferencia de calor es:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h} = \frac{38.39(0.02514)}{0.412} = 2.342 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Entonces

$$R_3 = \frac{1}{hA} = \frac{1}{2.323A}$$

Rearreglando y sustituyendo en (8) los valores de las resistencias obtenidas previamente, se obtiene el coeficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{1}{A} R_{tot}^{-1} = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{0.154A} + \frac{7}{4800A} + \frac{1}{2.343A} \right)^{-1} = 0.1445 \text{ W/m}^2\text{K}$$

La temperatura de entrada al sistema ya es conocida, pero aun es necesario encontrar la temperatura de salida del aire  $T_{out}$  para poder calcular el calor transferido. Para conocer  $T_{out}$  se procede de la siguiente manera.

El caudal en cada cámara de climatización es conocido y tiene el valor  $\dot{V} = 0.0875 \text{ m}^3/\text{s}$ . El flujo másico dentro de cada cámara de climatización es

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (17)$$

Siendo

$$\dot{m} = 1.204(0.0875) = 0.1053 \text{ kg/s}$$

La temperatura de salida del aire al final de la cámara de climatización es:

$$\frac{T_{out} - T_{in}}{T_s - T_{in}} = 1 - \exp\left(-\frac{UPL}{\dot{m} \cdot Cp}\right) \quad (18)$$

$$\frac{T_{out} - T_{in}}{T_s - T_{in}} = 1 - \exp\left(-\frac{0.1445 \cdot 3}{0.1053 \cdot 1007}\right) = 1.011$$

Despejando

$$T_{out} = 1.011(T_s - T_{in}) + T_{in} = 1.011(20 - 19) + 19 = 20.01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

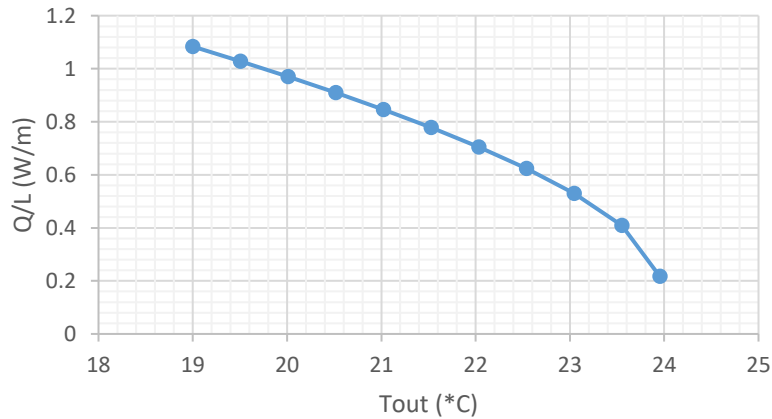


Figura 3-20 Transferencia de calor Q/L para diferentes temperaturas de salida del aire

El calor transferido en el sistema está dado por la ecuación (7). El cálculo de  $\Delta T_m$  es

$$\Delta T_m = \frac{\theta_A - \theta_B}{\ln\left(\frac{\theta_A}{\theta_B}\right)} = \frac{(24 - 19) - (24 - 20.03)}{\ln\left(\frac{(24 - 19)}{(24 - 20.03)}\right)} = 4.4653 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por sustitución de los valores  $U$  y  $\Delta T_m$  en la ecuación (7) encontramos la tasa de transferencia de calor por unidad de área ( $Q/A$ ) y también es posible conocer la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud del conducto ( $Q/L$ ):

$$\frac{Q}{A} = (0.1445)(4.4653) = 0.6452 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{Q}{L} = \frac{Q}{A}P = 0.6452(1.5) = 0.9678 \text{ W/m}$$

El rango de temperatura óptimo para la productividad de la planta de fresa tiene como temperatura máxima el valor de 24 °C. La temperatura ambiente de referencia para la resolución del problema térmico se estableció con base en la temperatura media anual en la ciudad de Chihuahua, la cual es a su vez de 24 °C.

Teniendo una cámara 2.5 m de longitud, se estarían intercambiando con el ambiente 2.42 W de energía en forma de calor.

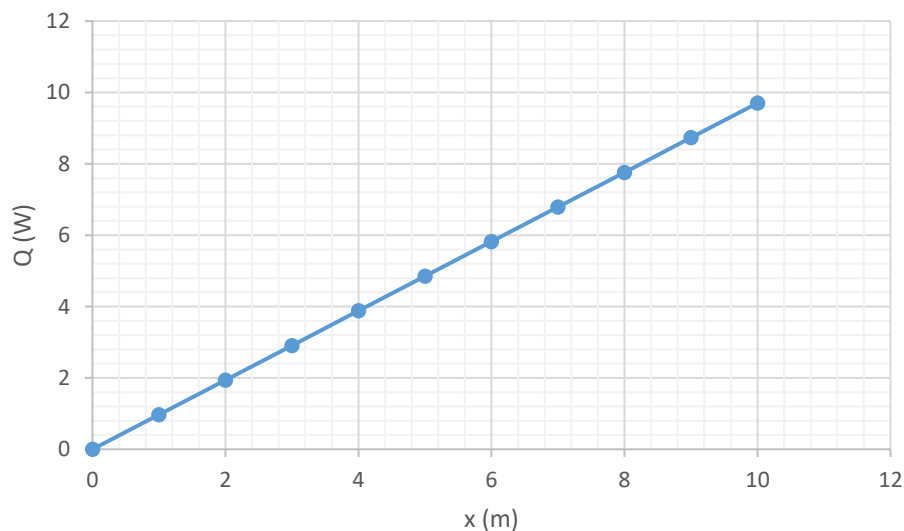


Figura 3-21 Transferencia de calor por longitud del ducto

### 3.6 Cámaras de climatización

Con los datos obtenidos sobre las dimensiones de las plantas de fresa, de los microtúneles, y de los conductos es factible la construcción de las cámaras de climatización.

Debido a la innovación que representan, las cámaras deben construirse pues no es posible adquirirlas de algún proveedor. Teniendo esto en cuenta se determina utilizar tubería hidráulica de PVC de ½ pulgada, por su bajo costo y adaptabilidad a proyectos creativos, además de durabilidad en ambientes de humedad y temperaturas moderadas.

Para cada cámara de climatización de 2.5 m de longitud se requieren:

*Tabla 6 Material requerido para una cámara de climatización de 2.5m de longitud*

CANTIDAD	DESCRIPCION
6 unidades	Codo tres lados 90°
6 unidades	Codo 45°
16 m	Tubería hidráulica PVC ½''
5 m <sup>2</sup>	Cubierta plástica translúcida
25 m	Cinta adhesiva reforzada para ductos

### 3.7 Material y equipo

Se ha procedido a la adquisición de los siguientes equipos y materiales necesarios para el desarrollo y operación del sistema a través del contacto con distintos proveedores nacionales:

- Mini Split Inverter (frio-calor) Friikko, Capacidad 1 ton, 110V
- Hule blanco lechoso para invernadero 30% sombra
- Cubierta plástica translúcida para microtúnel
- Cubierta plástica negra para el suelo del invernadero
- Ventiladores axiales HXM 350, 1550 RPM, 12W, 127V, para un caudal de 2,144M3/HR, Soler y Palau
- Ductos de lámina galvanizada con secciones transversales rectangulares para alimentación y retorno
- Material eléctrico para la instalación del sistema de A/C (cables, switches, etc.)
- Sensores de temperatura y CO<sub>2</sub>

- Material para la instalación del sistema de sensado y control (gabinetes, glándulas, dimmers, etc)
- Tubería hidráulica de PVC para la fabricación de las cámaras de climatización

### **3.8 Adaptación del local y construcción del sistema**

La adaptación del área de trabajo y la construcción del sistema comenzó en el mes de enero de 2017, conforme los materiales necesarios fueron recabados.

Las actividades principales son:

- Conversión de sombreadero en invernadero mediante la colocación de hule blanco para invernadero
- División de la zona de trabajo en dos secciones
- Construcción e instalación del sistema de ductería
- Instalación de la máquina de aire acondicionado
- Construcción e instalación del sistema de microtúneles
- Construcción e instalación del sistema de sensores



*Figura 3-22 Instalación del hule de invernadero*





*Figura 3-23 Instalación del hule en el invernadero*



*Figura 3-24 Construcción de microtúneles*



*Figura 3-25 Instalación de microtúneles*

### **3.9 Medición de los parámetros del sistema de ventilación**

Una vez operando el sistema los parámetros fundamentales para comprobar su correcto funcionamiento son la medición de la caída de presión y la velocidad del flujo.

El tramo más largo de conducto es el que presenta mayor caída de presión, por lo cual se procede a medir la caída de presión estática  $P_e$  por medio de un manómetro inclinado (Figura 3-26) de alcohol fabricación propia.

Los principios utilizados para derivar las ecuaciones del manómetro siguen siendo válidos para esta disposición. Sin embargo, la diferencia entre el manómetro inclinado y el vertical es que mientras que  $h$  sería pequeño y difícil de leer en un manómetro vertical para una pequeña caída de presión,  $L$  puede hacerse bastante grande para la misma caída de presión a medida que se reduce el ángulo de inclinación  $\Theta$  (Morrison, 2013).

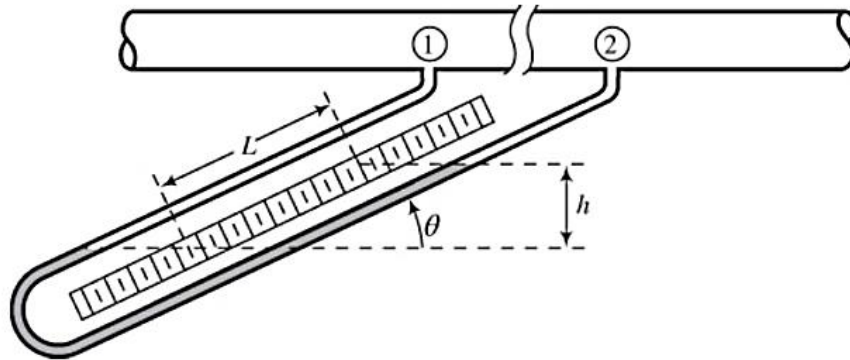


Figura 3-26 Manómetro tipo U inclinado (Morrison, 2013)

Para mejorar la capacidad de lectura del instrumento con respecto a la utilización de agua, se propone que el fluido indicador dentro del manómetro sea alcohol tintado  $\rho = 789 \text{ kg/m}^3$ .

A partir de la ecuación de presión hidrostática,

$$P = \rho g h \quad (19)$$

Se tiene la posibilidad de conectar el manómetro en distintos puntos del sistema para obtener la presión estática en los puntos revisados.

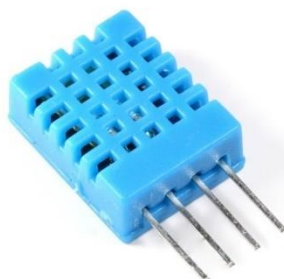
Para la medición de la velocidad, se puede utilizar un anemómetro o un tubo de Pitot que indicará la presión dinámica del fluido y se encontrará la velocidad de manera indirecta por medio de la ecuación de Bernoulli.

### 3.10 Medición de la Temperatura

Para todas las plantas la temperatura juega un papel relevante en el desarrollo de la misma, así como de sus frutos. La fresa no es la excepción. Los valores óptimos para fructificar de manera adecuada se sitúan en torno a los  $14 - 24 \text{ }^\circ\text{C}$  de media anual (Vergara, 2015).

Se realizan mediciones de temperatura a través de sensores DHT11 para el microcontrolador Arduino. El DHT11 es un sensor que proporciona una salida de datos digital. Tiene como

ventaja principal su bajo costo y el despliegue de datos digitales a diferencia de los sensores análogos donde las fluctuaciones en el voltaje alteran la lectura de datos. Como desventaja principal, el sensor DHT11 solo lee enteros.



*Ilustración 3-1 Sensor DHT11 - Galería de Imágenes de Google*

### **3.11 Operación del sistema y captura de datos**

El sistema de ventilación enciende diariamente a las 8 y se apaga a las 6 pm obteniendo de esta manera el comportamiento de la temperatura en las diferentes zonas de estudio.

Las zonas de estudio y la localización de los sensores es la siguiente:

- La entrada de aire al sistema de microtúneles
- La salida de aire del sistema de microtúneles
- El invernadero con el sistema de microtúneles (parte externa de los microtúneles)
- La salida de aire del invernadero testigo.

Los datos se recuperan diariamente.



*Figura 3-27 Sistema de microtúneles*



## 4 Resultados y discusión

### 4.1 Evaluación del sistema de ventilación

Una vez instalado el sistema se procedió a evaluar su funcionamiento de acuerdo a los requerimientos de diseño. Para ello era indispensable medir la presión estática por lo cual se utilizó un manómetro diferencial de alcohol con una inclinación de  $3^\circ$ ; al tratarse de presiones manométricas tan pequeñas, la inclinación en el manómetro permite una mejor visualización de la diferencia en la columna de fluido.

De acuerdo al diseño, se tiene una presión estática a la salida del ventilador  $P_e = 1.05$  mm. c.d.a, lo que equivale a 10.29 Pa. Las mediciones realizadas arrojaron resultados entre 7.72 Pa y 11.59 Pa, con un valor promedio de 10.14 y una desviación estándar de 1.85.



*Figura 4-1 Medición de presión*

Así mismo, se encontró, con la ayuda de un anemómetro, la velocidad del aire proporcionado por el ventilador, siendo esta de 3.31 m/s.

Recordando que el segmento principal de ducto tiene dimensiones de 14x12" ( $A = 0.1083 \text{ m}^2$ ), se encuentra el flujo volumétrico a partir de la ecuación  $Q = VA$ , siendo este de  $Q = 0.3584 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este valor supera en un 2.4% al caudal establecido en el proceso de diseño.



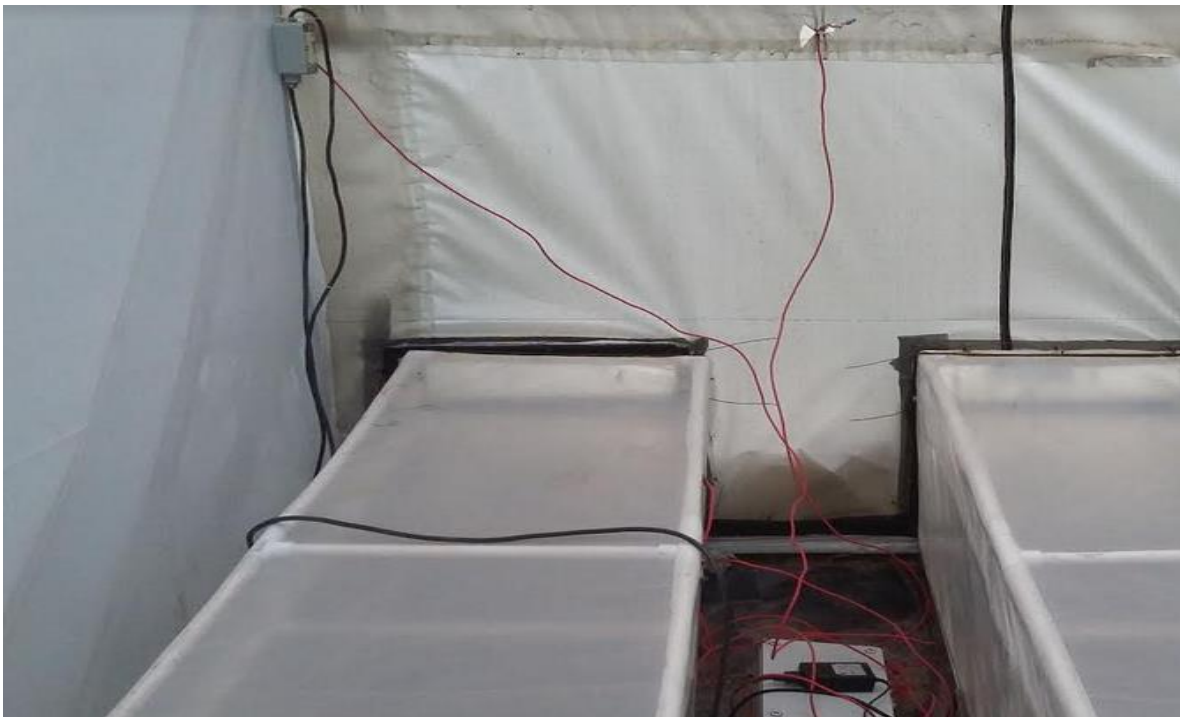
*Figura 4-2 Medición de la energía eléctrica consumida por el sistema de ventilación*

Por medio del dispositivo cuantificador de consumo eléctrico *Kill-A-Watt*, se registró el consumo eléctrico de los ventiladores instalados, arrojando un consumo total de 0.95 kWh durante un periodo de operación de 9.15 horas. A partir de esta información es posible conocer la potencia utilizada por cada ventilador siendo esta de 51.84 W.

## 4.2 Datos de temperaturas

El sistema de captura de datos registró el comportamiento de las temperaturas durante el periodo comprendido entre el 11 y el 15 de agosto de 2017 en las diferentes zonas de estudio del invernadero. Estas zonas se definieron en la metodología y se identifican en los gráficos como:

- Testigo (temperatura de salida del invernadero testigo)
- Microtúnel (temperatura de salida en el microtúnel)
- T. Alimentación (temperatura de entrada al invernadero testigo y al microtúnel)
- Zona no Climatizada (temperatura en el invernadero fuera del sistema de microtúneles)



*Figura 4-3 Sensores de temperatura*



Así mismo, se identifican tanto la temperatura ambiente tomada de WU (Weather Underground) en la estación Ciudad Deportiva Chihuahua UACH-ICHIHUAH14<sup>2</sup>, como el rango óptimo de temperatura para la planta de fresa.

El sistema de ventilación operó durante los siguientes periodos:

<b>Dia</b>	<b>Periodo de operación</b>
<b>11 de agosto</b>	10:28 – 18:47
<b>12 de agosto</b>	8:59 – 18:08
<b>13 de agosto</b>	8:54 – 18:00
<b>14 de agosto</b>	9:13 – 18:45
<b>15 de agosto</b>	9:08 – 19:39

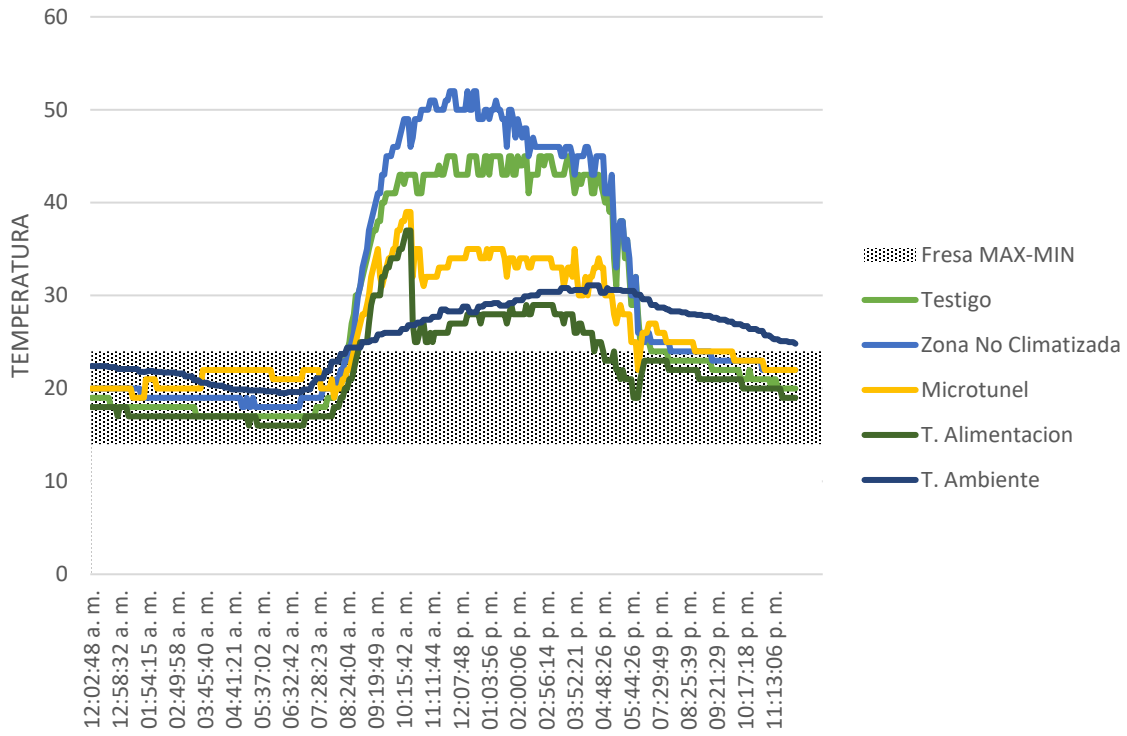
De acuerdo a la captura de datos, en la Figura 4-4, se observa que la temperatura durante las horas de funcionamiento en cada uno de los instantes fue mayor para la salida de aire del invernadero testigo que la temperatura de salida registrada para el sistema de microtúneles, lo cual es el primer indicio de una mayor eficiencia del sistema propuesto. Además, la temperatura de salida de los microtúneles permaneció siempre más cercana al rango óptimo para la fresa.

A continuación, se muestra los gráficos de temperatura diarios:

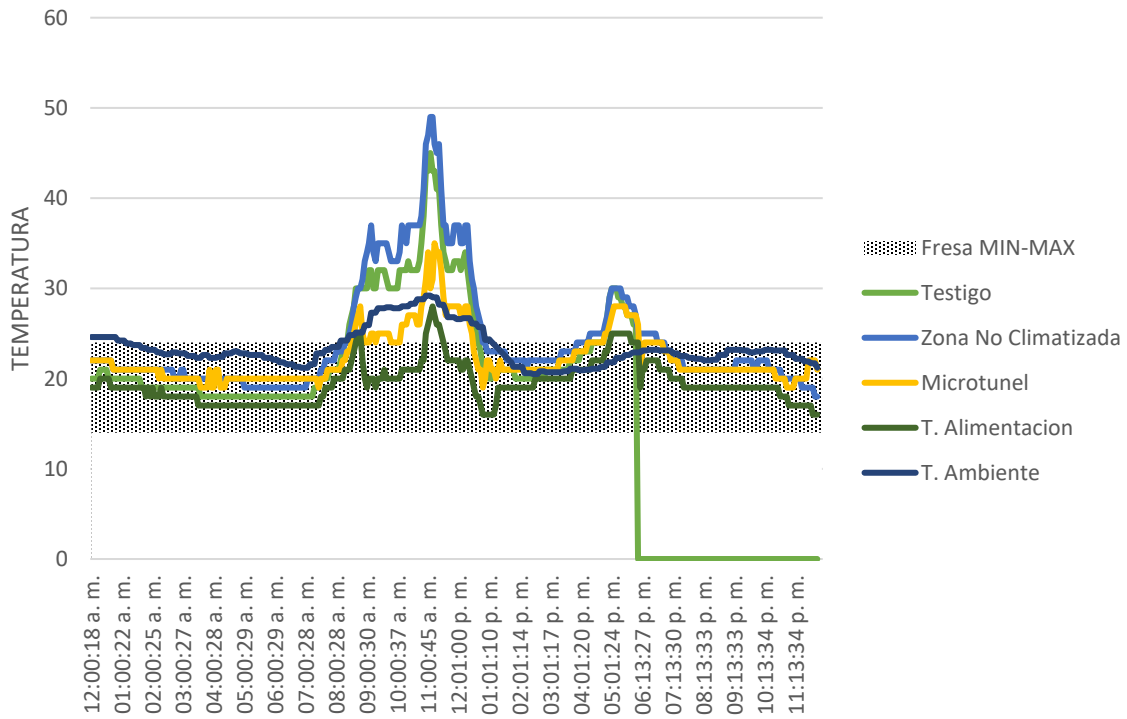
---

<sup>2</sup> <https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=ICHIHUAH14>

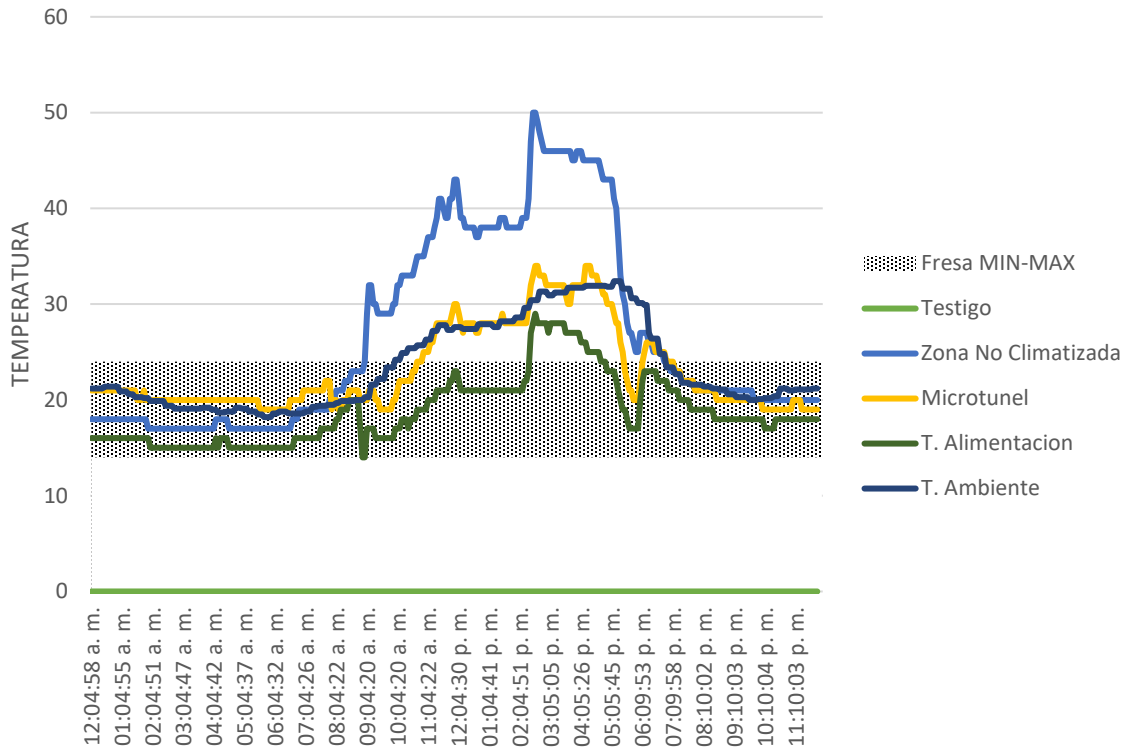
### 11 DE AGOSTO



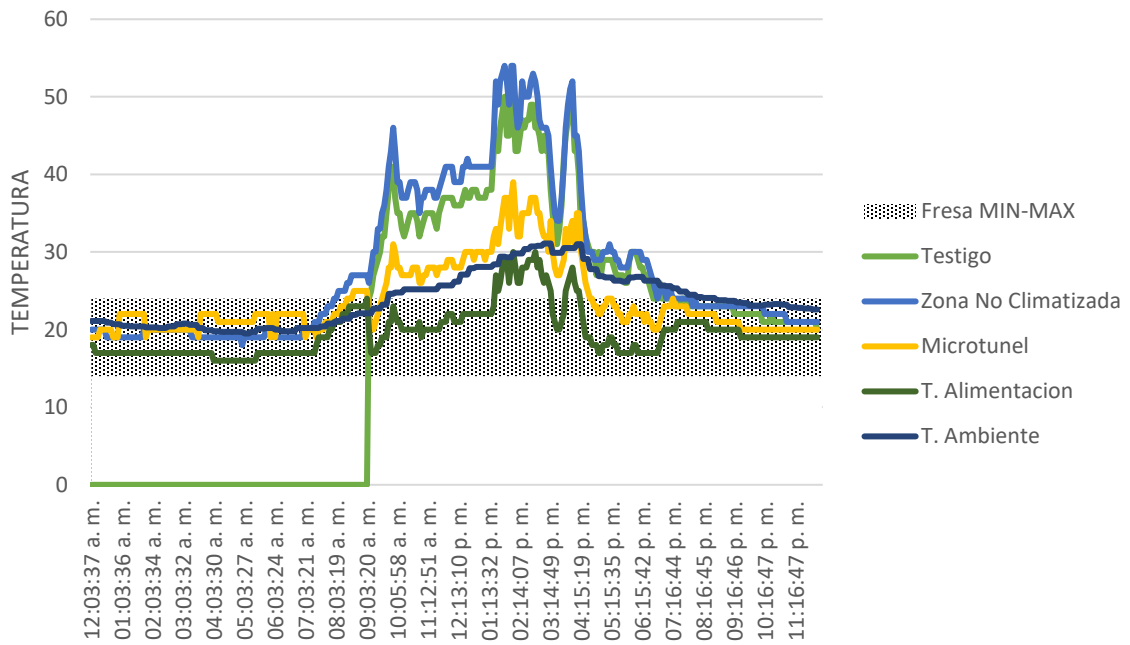
### 12 DE AGOSTO



### 13 DE AGOSTO



### 14 DE AGOSTO



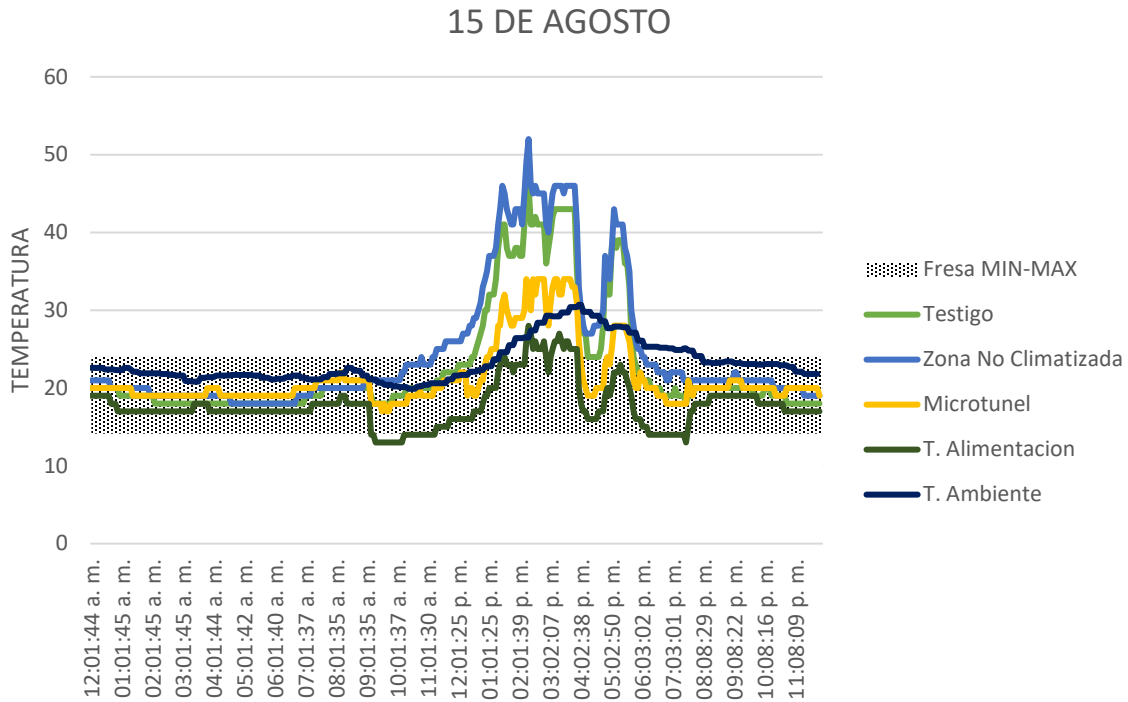


Figura 4-4 Variación de temperatura en las diferentes zonas de estudio durante los días de prueba

Con el registro de temperatura fue posible obtener la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del aire en cada ambos sistemas de estudio. Estas diferencias, en general son mayores para para el invernadero testigo, cuya diferencia promedio es de 11.27 °C con una desviación estándar  $\sigma = 5.54$ , mientras que la diferencia promedio para el sistema de microtúneles es de 5.3 °C, con una desviación estándar  $\sigma = 1.93$ .

La diferencia de temperaturas es fundamental para conocer el cambio de la energía ocurrido desde que el aire entra hasta que sale de cada uno de los sistemas.

Tanto al invernadero testigo como al sistema de microtúneles se les considera volúmenes de control pues la masa cruza su frontera durante el proceso. Se observa que para cada uno de ellos solo hay una entrada y una salida de aire, por lo que  $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m}$ .

La energía se obtiene por:

$$\Delta E = c_p \Delta T \quad (20)$$

O por:

$$\Delta \dot{E} = \dot{m} c_p \Delta T$$

De acuerdo a los menores incrementos de temperatura ocurridos dentro del sistema de microtúneles, los incrementos de energía también son menores cuando se comparan con los del invernadero testigo.

Estos incrementos en la energía se representaron gráficamente de manera global, comparando ambos sistemas de estudio. En este grafico se observa una tendencia creciente en el cambio de energía conforme las diferencias de temperatura se incrementan para ambos sistemas, sin embargo la pendiente del invernadero testigo es mayor, lo que significa que de acuerdo a la primera ley de la termodinámica (balance de energía) se requiere un mayor trabajo por parte de los equipos de climatización para que el cambio de temperaturas entre la entrada y la salida al invernadero sea menor y que se logren las temperaturas de confort para las plantas.

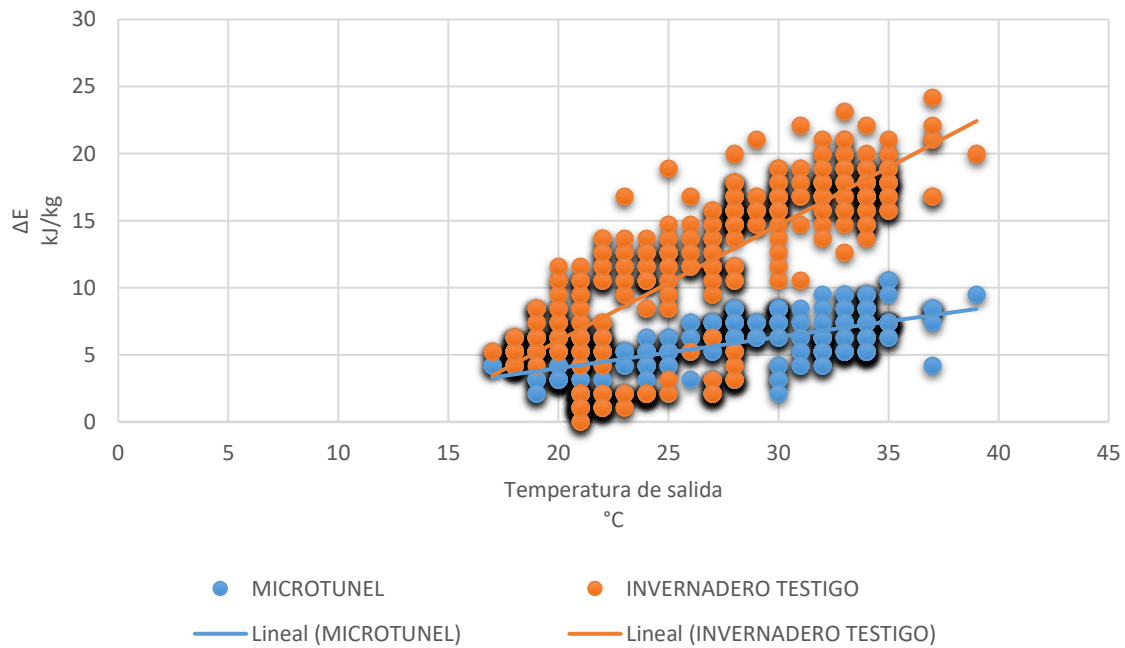


Figura 4-5 Grafico cambio en la Energía

## **5 Conclusiones**

El método de igual fricción para el diseño de ductos se seleccionó por ser el más utilizado y demostró una buena representatividad contra los datos medidos.

La operación del sistema de ventilación y conductos permitió obtener parámetros de funcionamiento similares a los parámetros de diseño lo cual indica que el proceso se realizó de una manera adecuada.

La diferencia de temperaturas entrada-salida para el sistema de microtúneles es menor que en el invernadero testigo.

Con respecto a la eficiencia del sistema de microtúneles para la ventilación, de manera global, se observó que ocurre un menor incremento de energía (calor) en el sistema de microtúneles, lo cual significa que para mantener su temperatura dentro del rango de confort para la planta de fresa se requiere retirar menos calor en el sistema propuesto que en los sistemas convencionales y, por consecuencia, menor potencia por parte de la máquina de climatización.

## 6 Referencias

- Aguilar, M. (2011). *Demanda nutrimental de cuatro variedades de fresa (fragaria x annanasa), cultivadas en la region de Zamora Michoacán*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Texcoco, Estado de México.
- Aldrich, R. A., Hellickson, M. A., & Walker, J. N. (1983) *Ventilation of Agricultural Structures*: American Society of Agricultural Engineers.
- Antón, A., Aranda, X., Biel, C., Herralde, F. d., Montero, J., Montero, J., . . . Savé, R. (2011). Manual del aplicador de CO<sub>2</sub> en cultivos hortícolas. In R. I. T. Agroalimentàries (Ed.), (Vol. ). España: Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.
- Bakker, J. C. (1995). *Greenhouse climate control*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Benavides, A., & Cisne, J. (2012). *Fresa Organica en Nicaragua* (U. N. A. Desarrollo Participativo Integral Rural. Facultad de Agronomía Ed.). Managua, Nicaragua.
- Buffington, D. E., Bucklin, R. A., Henley, R. W., & McConnell, D. B. (1987). *Greenhouse ventilation*. Agricultural and Biological Engineering.
- Campiottia, C. A. (2016). Performance evaluation of a solar cooling plant applied for. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 664 – 669.
- Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management*. Croydon: CABI.
- Culler, D., & Katz, R. (2009). Fundamentals of HVAC Controls *The Electronics Research Lab*. Retrieved from
- Davalos, P., Aguilar, R., Jofre, A. E., Hernandez, A. R., & Vazquez, N. (2011). *Tecnologia para sembrar viveros de fresa*. Celaya, Gto: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Difusión Textil Integral. (2015). Diseño de ductos. In D. T. Integral (Ed.). Irapuato, Gto.
- Gates, R. S., & Duncan, G. A. (1999). Ventilation System Design Parameters for Greenhouses for Tobacco Production. *Biosystems and Agricultural Engineering, University of Kentucky*.
- Goribar, E. H. (1997). *Fundamentos de aire acondicionado y refrigeracion*: Editorial Limusa.

- Hanan, J. J. (1998). *Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Infrared Services Inc. (2000). Emissivity Values for Common Materials. Retrieved from <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>
- Isover Saint Gobain. (2009). Manual de Conductos de aire acondicionado CLIMAVER. In I. S. Gobain (Ed.): Saint-Gobain Cristalería S.A. Division Aislamiento.
- Karlsson, M. (2014). *Controlling the Greenhouse Environment*. Retrieved from Fairbanks, Alaska:
- Leach-Jr., A. D. (1959). *A STUDY OF GREENHOUSE COOLING*. Retrieved from Ithaca, New York:
- Lopez, A., & Ramirez, R. (2006). *Desarrollo de un control para cajas VAV con interoperabilidad en sistemas de aire acondicionado con protocolo BacNet*. Retrieved from Mexico, DF:
- Marlow, D. (2011). Aporte de CO2 en un invernadero. *Horticultura Protegida*. Retrieved from <http://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/invernadero/aporte-de-co2-en-un-invernadero/>
- Martinez, J., & Leon, H. (2004). Produccion de fresa en invernadero. *Simposio Nacional de Horticultura(IV)*.
- Maughan, T. L. (2013). *Optimizing Systems for Cold-Climate Strawberry Production*. Utah State University. (Paper 2034)
- Mazariegos, E. L. (2007). *Diseño e instalación del sistema de ducteria para la distribución de aire acondicionado dado por cuatro manejadoras en Almacenes Carrión*. Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Mendieta, L. (2011). *Distribución espacial de nutrimentos en la solución del suelo para la producción intensiva de fresa*. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México.
- Meyer, B. A., Paul; Chaisson, William; DelVecchio, Robert; Nemitz, Keith; Smith, James; Bevirt, David; Reynolds, Douglas. (1990). *HVAC SYSTEMS - DUCT DESIGN (I. SHEET METAL AND AIR CONDITIONING CONTRACTORS NATIONAL ASSOCIATION Ed. 3 ed.)*.
- Morrison, F. A. (2013). *An Introduction to Fluid Mechanics* Cambridge University Press.



- Peralta, A. R. (1992). Efecto de algunas variables climáticas sobre la fenología y rendimiento del cultivo de la fresa. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*(6).
- Robles, P. E., & Mendoza, L. E. (2010). Invernaderos rústicos. In G. Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Ed.), *Sistema de Agronegocios de Traspatio*. Mexico.
- Rowley, D., Black, B., & Drost, D. (2010). La producción de las fresas utilizando el túnel alto. *UtahStateUniversity Horticulture*(2010-01).
- Sabeh, N. C. (2007). *EVALUATING AND MINIMIZING WATER USE BY GREENHOUSE*. Retrieved from Phoenix, Arizona:
- Salvador Escoda S.A. (2011). Manual Práctico de Ventilación, Catalogo técnico. In S. Escoda (Ed.), (2 ed.). Barcelona: Salvador Escoda.
- Soler & Palau. (2011). Manual Práctico de Ventilación de Soler & Palau. In S. Palau (Ed.): Soler & Palau.
- Soler & Palau. (2017). Hojas Técnicas - La climatización de invernaderos. Retrieved from <http://www.solerpalau.es/es-es/hojas-tecnicas-la-climatizacion-de-invernaderos/>
- Stanghellini, C., Incrocci, L., Gázquez, J. C., & Dimauro, B. (2008). CARBON DIOXIDE CONCENTRATION IN MEDITERRANEAN GREENHOUSES: HOW MUCH LOST PRODUCTION? *Acta Horticulturae*(801), 1541-1550.
- The Engineering ToolBox. (2016a). Equal Friction Method. Retrieved from [http://www.engineeringtoolbox.com/equal-friction-method-d\\_1028.html](http://www.engineeringtoolbox.com/equal-friction-method-d_1028.html)
- The Engineering ToolBox. (2016b). Equivalent Diameter. Retrieved from [http://www.engineeringtoolbox.com/equivalent-diameter-d\\_205.html](http://www.engineeringtoolbox.com/equivalent-diameter-d_205.html)
- Trott, A., & Welch, T. (2000). *Refrigeration and Air-Conditioning* (3 ed.). Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
- Vera-Gil, B. (2008). *Conductos de Aire*
- Vergara, S. (2015). *Ficha técnica para el cultivo de fresa*. Retrieved from La Libertad, Peru:
- Waptac. Duct System Sizes and Airflow Quick Chart. In D. S. S. a. A. Q. Chart (Ed.).

Weather Underground. Forecast for Chihuahua, CHIHUAHUA > 28.658 -106.088 > 1437  
m Retrieved from [https://www.wunderground.com/personal-weather-  
station/dashboard?ID=ICHIHUAH14](https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=ICHIHUAH14)

Wien, H. C., J.E. Reid, C. Rasmussen, & Orzolek., D. (2008). *Use of low tunnels to  
improve plant growth in high tunnels*. Retrieved from Ithaca, New York:

Wittwer, S., & Castilla, N. (1995). Protected cultivation of horticultural crops, worldwide.  
*HortTechnology* 5(1), 6-23.

## 7 Apéndice

### Patente

Se ha trabajado en el desarrollo de una patente con respecto a la innovación que implica el sistema propuesto.

La invención se refiere a un sistema para la micro climatización de cultivos en invernaderos que permite reducir el consumo de energía mediante la reducción del espacio a climatizar, limitándolo a la región circundante próxima a las líneas de cultivo; de esta manera se reducen los recursos requeridos para mantener condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos en términos de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>. El sistema comprende una máquina de enfriamiento-calefacción de aire, ventiladores, ductos de distribución de aire, sensores de concentración de gases, y equipo de inyección de gases, permitiendo la generación de un ambiente idóneo para la producción de hortalizas en cualquier temporada del año con un mínimo consumo de energía.

Para tal invención se ha hecho la solicitud de patente ante el IMPI con fecha del 6 de diciembre de 2016, numero de solicitud MX/a/2016/016082 y folio MX/E/2016/087912.

	
<b>INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL</b> Dirección Divisional de Patentes	
<input checked="" type="checkbox"/> Solicitud de Patente <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad	OFICINA REGIONAL DEL NORTE
<input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cual: <input type="checkbox"/> Modelo Industrial <input type="checkbox"/> Dibujo Industrial	Solicitud: <b>MX/a/2016/016082</b> Expediente: <b>MX/a/2016/016082</b> Fecha: 6/DIC/2016 hora: 09:10:51 Folio: <b>MX/E/2016/087912</b> 500992
Antes de llenar la forma lea las consideraciones generales al reverso	
<b>I DATOS DEL (DE LOS) SOLICITANTE(S)</b>	
El solicitante es el inventor <input type="checkbox"/> El solicitante es el causahabiente <input checked="" type="checkbox"/>	
1) Nombre (s): <b>CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.</b>	
2) Nacionalidad (es): <b>MEXICANA</b>	
3) Domicilio: calle, número, colonia y código postal: <b>MIGUEL DE CERVANTES N° 120 COMPLEJO INDUSTRIAL CHIHUAHUA, C.P.31136</b>	
Población, Estado y País: <b>CHIHUAHUA, CHIHUAHUA, MÉXICO</b>	
4) Teléfono (clave): <b>(614) 439-11-89</b> 5) Fax (clave): <b>(614)481-08-12</b>	
<b>II DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES)</b>	
6) Nombre (s): <b>Ricardo Beltrán Chacón; Victor Luis Cámara Aranda.</b>	
7) Nacionalidad (es): <b>Mexicanos</b>	
8) Domicilio: calle, número, colonia y código postal: <b>AV. MIGUEL DE CERVANTES N° 120 COMPLEJO INDUSTRIAL CHIHUAHUA</b>	
Población, Estado y País: <b>CHIHUAHUA, CHIHUAHUA, MÉXICO, C.P. 31136</b>	
9) Teléfono (clave): <b>(614)439-11-89</b> 10) Fax (clave): <b>(614)439-48-23</b>	

**Diagramas esquemáticos para la construcción del sistema de ductos de retorno y alimentación**

