

Estimación de costos para refrigeración emergente en invernadero para cultivar tomate (*Solanum lycopersicum*)

FLORES-VELAZQUEZ, Jorge y ROJANO-AGUILAR, Abraham

J. Flores' y A. Rojano''

´ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso 62550. Jiutepec, Morelos.

'' Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carr Mex-Tex. Chapingo Mex.

jorge_flores@tlaloc.imta.mx

. Sepúlveda, F. Rérez, D. Sepúlveda, E. Figueroa, R. Salazar, L. Godínez (eds.) Matemáticas Aplicadas. Handbook T-I. -©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2016.

Abstract

It was developed a numerical model using computational fluid dynamics (ANSYS 14.5) and once validated, it was used to generate the profiles that describe the movement of air and distribution of temperature gradients that allowed the characterization of the microclimate in a typical zenithal greenhouse of three ships under local climatic conditions in the town of Soledad de Graciano Sanchez, San Luis Potosi and whose analysis allowed alternative management improvement in the performance and operability thereof. Numerical simulations showed that CFD is a suitable tool for the study and improvement of natural ventilation in greenhouses and also that a validated model can generate alternatives and assumptions that manage climate inside the greenhouse by controlling environmental factors in order to increase crop production.

7 Introducción

La producción en los invernaderos mexicanos se caracteriza mayormente por la aplicación de conocimientos empíricos en la mayoría de los procesos de producción. Es innegable que aplicando conocimientos científicos no solo se pueden mejorar muchos aspectos del cultivo sino también obtener un producto de la mejor calidad con relativamente menor costo para el agricultor y que le permita cumplir los estándares que el mercado nacional e internacional exige. La producción de hortalizas puede hacerse de tal forma que el control del clima en el invernadero permita optimizar la producción, es decir, obtener la más alta productividad, pero minimizando los costos de operación del invernadero y del cultivo. Como ha sido mostrado recientemente, una opción para la producción en condiciones de invernadero es la aplicación de la teoría de control óptimo en la operación y manejo del ambiente. Sin embargo, la aplicación de cualquier estrategia de control, la optimización y la generación de estrategias de manejo del sistema invernadero requiere de modelos matemáticos. La generación de un modelo matemático requiere la síntesis del conocimiento existente y generación de conocimientos nuevos sobre un proceso o sistema.

En cultivos en invernadero, una herramienta numérica que se ha extendido para el análisis de los sistemas de ventilación es aquella que utiliza las ecuaciones básicas del movimiento del aire (fluidos) para explicar su comportamiento, y con ello mostrar las variaciones en las propiedades físicas de ese aire; esta técnica es lo que se conoce como dinámica de fluidos computacional o CFD, el cual pretende, mediante el planteamiento de condiciones de frontera predecir la distribución del flujo del aire en el interior del invernadero.

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La ventaja que ofrece la técnica de CFD, es la oportunidad de sustituir los valores de las variables dependientes como incógnitas primarias en un número finito de lugares, luego entonces se derivan las actuaciones algebraicas a partir de las ecuaciones fundamentales aplicadas al dominio y son resueltas mediante algoritmos preestablecidos. Tres principios físicos fundamentales soportan las conocidas ecuaciones de Navier-Stokes: conservación de masa, momento y energía. Estas se obtienen a partir de un balance de energía de un volumen de control. La ecuación de conservación generalizada es:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S \quad (7)$$

Donde los cuatro términos son conocidos como transitorios, convección, difusión y fuente respectivamente. La variable ϕ representa cualquier variable dependiente como masa, velocidad, especie química o temperatura que describen las características de un flujo en todos los lugares en un tiempo determinado ($\phi = \phi(x,y,z,t)$), en un sistema cartesiano bajo una descripción de flujo de Euler. Los estudios computacionales del flujo y transferencia de calor se basan principalmente en la solución de estas ecuaciones, junto con las condiciones iniciales particulares y de frontera que complementan el problema. En el inicio de esta herramienta, se desarrollaron programas comerciales de dinámica de fluidos computacional bajo un esquema todo en pantalla, que le da el aspecto más amigable para el usuario, con el cual se resolvieron problemas tipo (benchmarks) para minimizar la posibilidad de especificar erróneamente la configuración del modelo numérico (Allen et al, 1998). No obstante, de las primeras versiones se han reescrito códigos, de tal suerte de hacer el funcionamiento eficiente en la solución de las ecuaciones (Flores-Velázquez et al., 2008), pero, sobre todo, la facilidad para interactuar con el programa y que el usuario pueda programar sus propias rutinas.

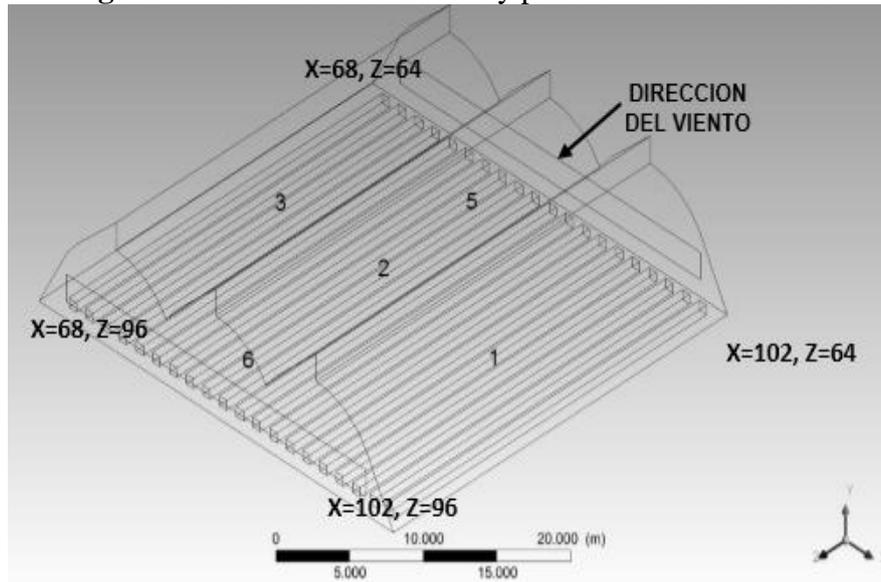
Con el uso de CFD, se optimizaron el tamaño del invernadero, su área de ventilación, localización, tipo de ventanas, así como diferentes en efecto de diferentes mallas anti-insectos, sobre la ventilación natural en invernaderos tipo Almería, mediante Dinámica de Fluidos computacional se han estudiado el efecto del tamaño de las ventanas laterales y cenitales sobre las tasas de ventilación natural de invernaderos. Asimismo, se ha aplicado dinámica de fluidos computacional para estudiar la ventilación natural de un invernadero en el centro de México y encontró que los tamaños de ventanas laterales y cenitales tienen un papel crítico sobre la temperatura del invernadero. Evaluó el efecto que las mallas anti-insectos sobre la velocidad del viento, empleando un túnel de viento para caracterizar las propiedades aerodinámicas de las mallas. Ventilación mecánica y la combinación de ventilación mecánica y natural son incipientes (Flores-Velazquez, 2008) sin embargo donde se ha aplicado se observa buena concordancia y los resultados indican un incremento en la tasa de ventilación cuando se combina la ventilación cenital natural con la mecánica.

7.1 Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

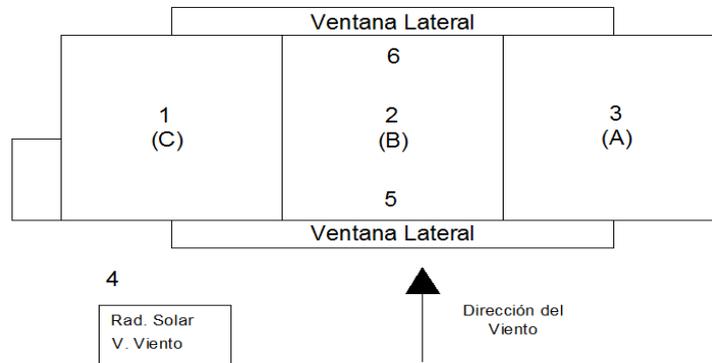
El experimento se desarrolló en un invernadero de 1000 m², sus dimensiones son 34 metros de largo, 32 de ancho y una altura desde el suelo a la cubierta cenital es de 7.3 metros (Figura 1). Está cubierto de polietileno translúcido y cuenta con cortinas retractables de cada lado, así como en cada ventana cenital, como sistema de ventilación natural. Para la caracterización del ambiente del invernadero se colocaron una estación climática en el exterior. En el interior se colocaron sensores de temperatura (°C), humedad (%), y radiación (W m²) en 5 puntos distribuidos en el área del invernadero. En el exterior además se colocó un anemómetro para medir dirección y velocidad del viento (m s⁻¹). Para modelar el clima se usó la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) específicamente ANSYS Fluent. Para validar el modelo se usaron datos experimentales como condición de frontera (T= 295.7 K y VV=2.6 m s⁻¹).

Figura 7 Invernadero de estudio y posición de los sensores



Como instrumental de medición, se contó con tres sondas colocadas en el centro de cada capilla o nave. La sonda 1 en la capilla que está cerca de la cabina de controles (C). La sonda 2 en la capilla central (B) y una más colocada en la capilla opuesta (A). En el centro del invernadero se colocan dos sensores cerca de las paredes laterales (5 y 6) y uno más fuera del invernadero (4), como se observa en la *Figura 2*.

Figura 7.1 Ubicación del instrumental de medición climática (Vega, 2015)



Dentro del invernadero, se trabajó con el tomate rojo (*Solanum lycopersicum*) tipo bola sembrado a tres bolillo, con una densidad de población: 4.4 plantas /m², 60 cm de camellón de cultivo (20 camas; 7 camas en dos de las naves y 6 camas en la otra nave) y 1.8 m de pasillo (de mitad de cama a mitad de cama; a partir de la cintilla usada como sistema de riego) con 1.2 m de espacio libre entre camellones

Para medir temperatura, el invernadero está equipado con seis sondas, cinco de estas, registraron la temperatura y la humedad relativa dentro del Invernadero (Sondas 1, 2, 3, 5 y 6). La sonda de velocidad y dirección de viento (4), al igual que la de radiación solar están colocadas en el mástil afuera del invernadero, a 8 metros de altura. Esta registró la temperatura y la humedad relativa fuera del Invernadero.

Para la realización del proceso de validación, se utilizó el registro de lecturas ambientales, obtenidas del instrumental instalado en el invernadero. Estas lecturas fueron registradas y almacenadas desde las 6:16 am del día 21 de junio del 2014, hasta las 14:52 del 19 de julio del 2014. Las lecturas de estos datos fueron de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación tanto en el interior del invernadero, como en el exterior.

La información almacenada fue descargada y posteriormente procesada en el Paquete Office de Microsoft®; Excel®, en donde a partir de los datos correspondientes se realizó un enfoque a dos intervalos de tiempo específicos considerados; de las 12:30 a las 13:30 como periodo cálido del día, y de las 4:30 am a las 5:30 am como el periodo frío. Se obtuvieron los promedios totales de temperatura, radiación, humedad relativa, velocidad del viento para cada sonda, los cuales se utilizaron para determinar las condiciones iniciales del modelo.

Para el desarrollo y simulación numérica del modelo CFD, se utilizó el software ANSYS® Fluent® V.15. Como fase previa (pre proceso) se generó la geometría y malla del modelo en la que se definieron las condiciones de frontera. En este trabajo, el análisis de la ventilación se realizó en 3 dimensiones. La geometría del modelo se elaboró totalmente en ANSYS® *Workbench*, haciendo uso correspondiente de las herramientas *Design Modeler* y *Meshing* para el trazo de la geometría del invernadero y el dominio y el mallado de los mismos respectivamente.

Figura 7.2 Geometría del modelo computacional

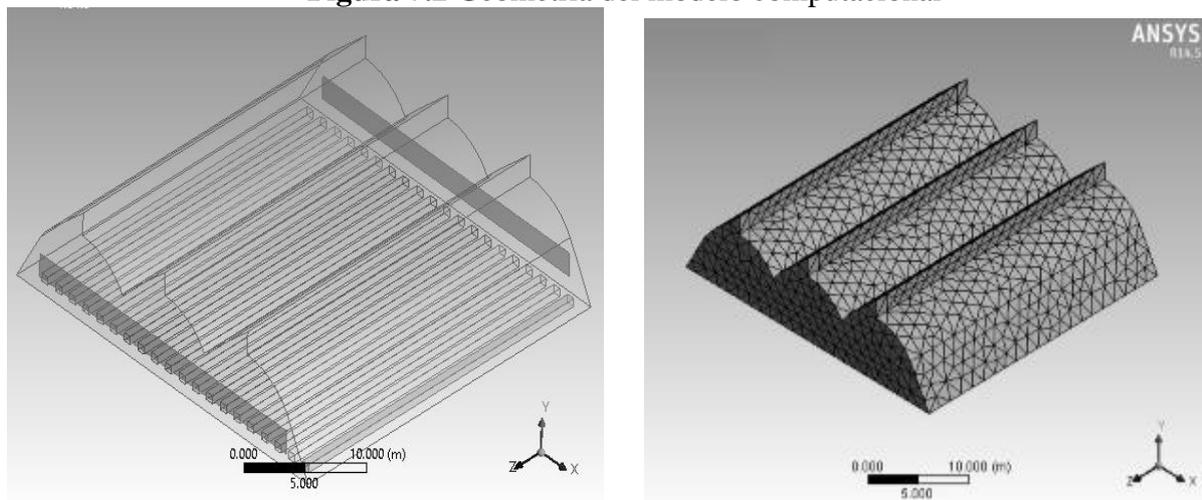


Tabla 7 Dimensiones de la geometría del modelo computacional

Dimensiones del Invernadero	Dimensiones del dominio exterior	Dimensiones de la zona de cultivo
34x32x4.75	170x192x22.35	31x30x0.7

Dentro de la fase de proceso, se da solución a las ecuaciones de transporte, las cuales, para su solución son discretizadas en ecuaciones algebraicas y calculadas mediante métodos numéricos. El invernadero experimental fue simulado mediante el modelo CFD, en donde se diseñaron las ventanas como entradas y salidas del flujo de aire basadas en los valores de velocidad del aire previamente medidos mediante los sensores en el invernadero. El espacio ocupado por el cultivo fue simulado, al cual se le asignaron propiedades de medio poroso.

Se establecieron las hipótesis correspondientes respecto a la configuración de la simulación considerando las condiciones del modelo y de las variables que intervienen para conseguir la solución; todo esto resumido en el *Tabla 7.1*.

Tabla 7.1 Hipótesis de simulación, características de contorno y propiedades físicas usadas como parámetros en la solución del modelo

Hipótesis de Simulación				
	Segregado			
Solver (Solución)	3-D Simulación			
	Formulación implícita			
	Velocidad Absoluta			
Condición de Tiempo	Estacionario (Segundo orden)			
	Estándar k-ε (2 ecuaciones)			
Modelo de viscosidad	Efecto de flotación activado			
	Tratamiento estándar en las paredes			
Ecuación de energía	Activada			
Formulación de poros	Velocidad superficial			
Opción de los gradientes	Basado en la celda			
Características de Contorno				
	Velocidad de entrada CONSTANTE			
Dominio de entrada	<i>Momentum</i> , ortogonal a la frontera			
	Turbulencia, intensidad e incremento en la viscosidad			
Dominio de salida	Presión de salida (<i>Pressure outlet</i>) CONSTANTE			
	Presión cero y misma condición de turbulencia			
Velocidad del viento	Perfil constante (m s ⁻¹)			
	Malla: <i>Porous jump</i>			
Tratamiento de medios porosos	Cultivo: <i>Porous Zone</i>			
Fuente de calor	Constante desde el suelo, hipótesis de Boussinesq			
Propiedades Físicas de los Materiales				
Propiedad(unidades)	Aire (295.7 K)	Aire (288.04 K)	Suelo	Polietileno
Densidad(kgm⁻³)	1.225	1.224	1400	925.5
Calor específico(Jkg⁻¹°K⁻¹)	1006.43	1004.52	1738	1900
Conductividad térmica (Wm⁻²°K⁻¹)	0.0242	0.0240	1.5	0.3
Coefficiente de expansión térmica (°K⁻¹)	0.003389	0.003278		

Los escenarios simulados consistieron en el invernadero en cuestión, usando un sistema de ventilación natural en el que se describió el comportamiento de la temperatura, la velocidad del viento y su efecto sobre la tasa de ventilación en el ambiente generado al interior del invernadero. Se planteó y se describió una alternativa para el manejo de altas temperaturas usando ventilación natural con ventilación mecánica (combinada) y se evaluó su uso en base al costo y tiempo de operación en el día.

Tabla 7.2 Escenario de simulación del modelo. Ventilación natural

Zona	Momento	Turbulencia	Temperatura
Velocidad de entrada	Método de especificación de velocidad: Magnitud, normal a frontera	Método: k-ε	295.7 K
	Marco de referencia: Absoluto	Energía cinética turbulenta: 10 m ² /s ²	
	Velocidad del viento: 2.41 m/s (cálido) y 1.67 (frío)	Tasa de disipación turbulenta: 5 m ² /s ³	
Presión a la salida	Dirección de flujo: normal a frontera	Método: k-ε	

Tabla 7.3 Escenario de simulación del modelo. Ventilación combinada

Variable	Valor
Temperatura exterior (K)	Constante 295.7
Velocidad del viento exterior (m s ⁻¹)	Constante 2.41
Fuente de calor (W m ²)	Constante desde el suelo 200
Potencia del ventilador	Constante 10 Pa (<i>carga vs caudal</i>)

7.2 Resultados y Discusión

Validación del modelo

La validación del modelo se determinó en base a los datos obtenidos experimentalmente mediante los sensores dentro y fuera del invernadero y con los datos simulados en Fluent®. La comparación se realizó para los dos periodos; cálido y frío, en un escenario de ventilación natural, tomando como factores principales a la temperatura (° C) y la velocidad del viento (m s⁻¹). Con base en la posición de los sensores dentro del invernadero se elaboraron los perfiles longitudinales y transversales dentro del invernadero.

Para concluir estadísticamente si es o no válido el modelo, se usó el estimador S²p, relacionando los parámetros de los datos experimentales (X) y los datos simulados (Y) como son sus medias (\bar{X} , \bar{Y}), las varianzas (Sx², Sy²) y los tamaños respectivos de las muestras (m y n), se determinó la aceptación o rechazo de las pruebas de hipótesis, conduciendo a la validación o rechazo del modelo.

$$S^2p = \frac{(n-1)Sx^2 + (m-1)Sy^2}{n+m-2} \quad (7.1)$$

Donde:

$$Sx^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (Xi - \bar{X})^2 \quad (7.2)$$

Y

$$Sy^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^m (Yi - \bar{Y})^2 \quad (7.3)$$

El estimador S^2_p puede usarse para obtener una estadística t_o para probar hipótesis sobre la diferencia de las medias de los datos experimentales y simulados ($\delta=\mu_x-\mu_y$). En efecto, la estadística:

$$t_o = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - \delta_o}{\sqrt{\frac{S^2_p}{n} + \frac{S^2_p}{m}}} \sim t_{(m+n-2)} \quad (7.4)$$

Se calcularon los parámetros anteriormente descritos y las correspondientes estadísticas de prueba además de intervalos de confianza.

$$\underline{L} = \bar{X} - \bar{Y} - \sqrt{S^2_p \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)} t_{\alpha/2(n+m-2)} \quad (7.5)$$

$$\bar{L} = \bar{X} - \bar{Y} + \sqrt{S^2_p \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)} t_{\alpha/2(n+m-2)} \quad (7.6)$$

Tabla 7.4 Datos de Temperatura (°C) simulados y experimentales

Sensor	Experimentales	Simulados (Fluent)	Error
1	25.50	24.63	0.87
2	25.68	25.31	0.37
3	28.54	24.85	3.69
5	26.34	23.65	2.69
6	25.71	26.43	-0.72

Los datos comparados presentan una similitud que es más clara en la segunda parte del invernadero; en la zona inmediata a la pared de entrada, existe una menor correlación, lo cual puede ser debido a los flujos turbulentos que ocurren debido a la caída de presión, producto de la pared porosa.

Tabla 7.5 Estadística de prueba para el modelo

	Experimentales	Simuladas
Media	26.35	24.97
Varianza	1.278	0.824
Desviación Estándar	1.130	0.907
n	5	
m	5	
Juego de hipótesis	Ho: $\delta=0$ vs Ha: $\delta \neq 0$	Ho: $\mu_x=\mu_y$ vs Ha: $\mu_x \neq \mu_y$
Sp2	1.051	
t_o	2.127	
$\alpha=0.05$	Grados libertad	8
$\alpha/2$	0.025	
De tablas t 0.025 (8)=	2.306	
Regla de rechazo	Rechazar Ho si $t_o \geq t_{\alpha/2} (n+m-2)$ o $t_o \leq - t_{\alpha/2} (n+m-2)$	

Puesto que $t_0 = 2.127$ es menor a $t_{0.025}(8) = 2.306$ se acepta H_0 con $\alpha = 0.05$

Tabla 7.6 Intervalos de confianza en el modelo en periodo cálido

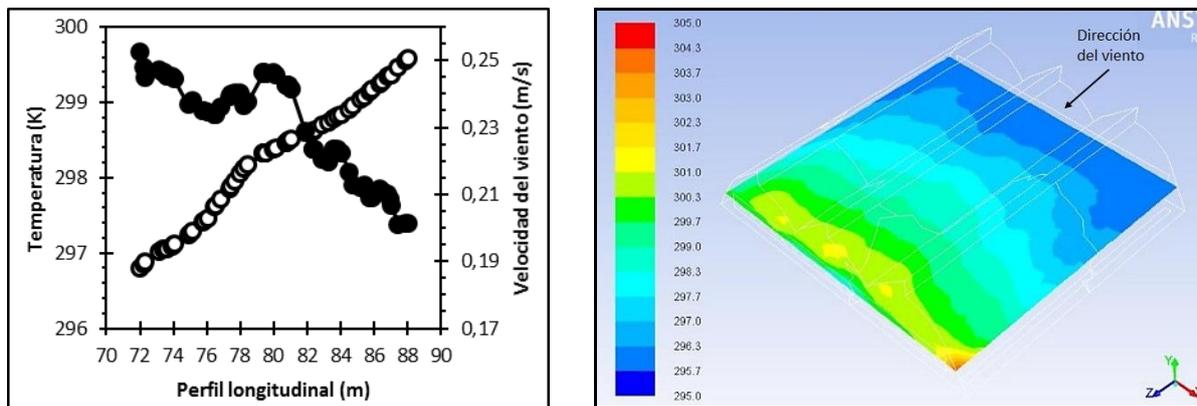
Intervalos de confianza	
El intervalo con nivel de confianza $1-\alpha$ para $\mu_x - \mu_y$ tiene límites	
L inferior	-0.116
L superior	2.874
Por lo tanto, los límites del intervalo de confianza al 95% para $\delta = \mu_x - \mu_y$	
(-0.116, 2.874)	
Se concluye que las medias son estadísticamente iguales y se acepta el modelo simulado	

Simulación del Ambiente del Invernadero

Una vez validado el modelo, se describió el comportamiento de las velocidades del viento en el interior del invernadero y la distribución espacial de los gradientes de temperatura en los escenarios simulados, sobre los perfiles longitudinales y transversales con planos generados al interior del invernadero a una altura de 0.7 (a nivel de cultivo) y 2.5 metros sobre el suelo (a nivel de los sensores). Se calcularon las tasas de ventilación y se realizó un análisis basado en la interacción de los factores climáticos del ambiente exterior en la generación de un ambiente al interior del invernadero. Se discutieron las condiciones ambientales para el desarrollo del cultivo de tomate y para el manejo de los factores de temperatura y velocidad del viento, se propusieron alternativas de mejora en cuanto a la ventilación del invernadero usando ventilación combinada.

La figura 7.3 muestra los resultados de la simulación del ambiente del invernadero cuando en el exterior existen 295.7 K de temperatura y la dirección del viento es perpendicular a la ventana de entrada con 2.4 m s^{-1} . La figura 4A muestra que al ingresar el aire por la ventana lateral debido a las mallas anti insecto hay una caída de presión y en consecuencia una reducción de velocidad del 90 %, siendo 0.24 m s^{-1} , la cual disminuye hacia la salida del invernadero hasta 0.2 m s^{-1} , debido al cultivo. Consecuentemente la temperatura se incrementa de los 295.7 K ambientales se observa un gradiente de 4 K (Figura 7.3B). Dado los 34 m que tiene el invernadero 4 K pueden ser significativos en periodos críticos de alta insolación.

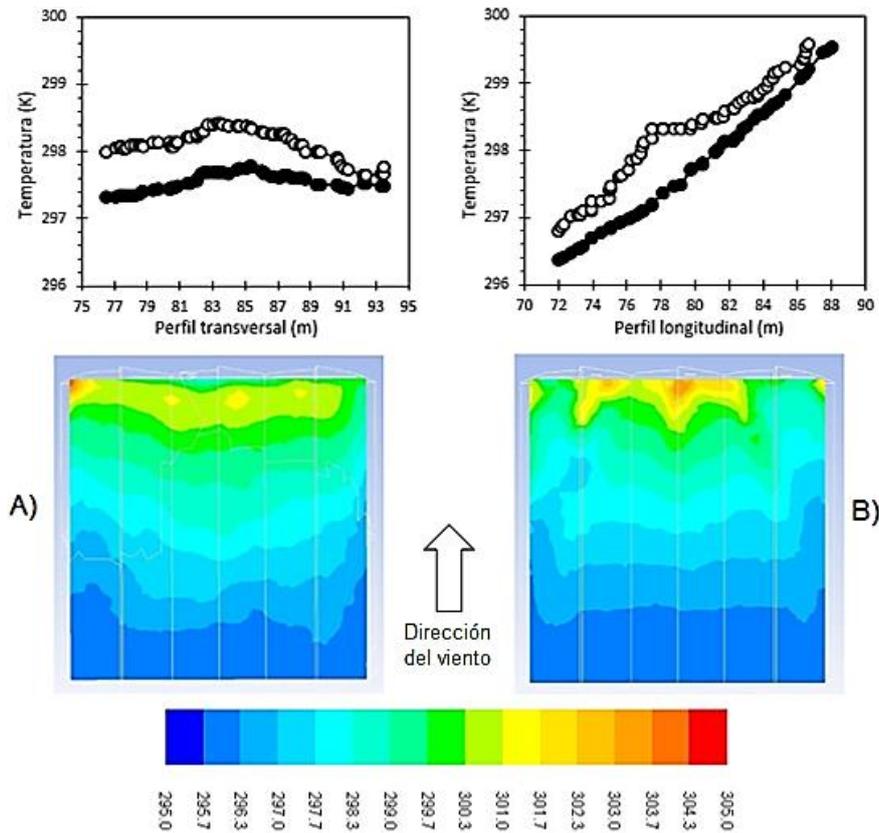
Figura 7.3 A) Perfil longitudinal de temperatura (\circ) y velocidad del viento (\bullet) con datos simulados y B) vista en planta de la distribución de temperatura A 2.5 m.



Alternativa de manejo de altas temperaturas: ventilación combinada

Se colocaron tres motores en el modelo; uno en cada una de las naves a una altura sobre el suelo de 2.5 metros en el modelo computacional con dimensiones de 1 metro por un metro obtenidos en base al modelo EX 36"-0,5 del catálogo de sistemas de extracción de aire *Exafan*.

Figura 7.4 Gradientes de temperatura (K) medidos a 2.5 m del suelo. Ventilación combinada (●) y ventilación natural (○). A) Ventilación natural B) Ventilación combinada (Vega, 2015)



El análisis se enfocó en la distribución de los gradientes de temperatura dentro del invernadero a 2.5 metros sobre el suelo, haciendo una comparación entre el sistema de ventilación natural y el combinado bajo las mismas condiciones de frontera del periodo cálido (temperatura de 295.7 K y velocidad del viento de 2.41 m s^{-1}) más 10 Pa de potencia en los motores.

El perfil transversal de la Figura 9 muestra que los gradientes de temperatura para ambos tipos de ventilación son muy similares entre sí (aproximadamente 0.4 K), y la distribución de esa temperatura de igual modo, se ve incrementada en el centro del invernadero, mientras que en los pasillos existe una reducción de la temperatura. Aunque la temperatura se va incrementando para ambos escenarios de ventilación, el incremento para el caso combinado está por debajo de los niveles térmicos presentados en la ventilación natural. El efecto de succión de los ventiladores influye directamente en el flujo del aire al interior del invernadero, disminuyendo ligeramente los niveles térmicos (Figura 9B). La ventilación combinada permite una homogenización del microclima al interior del invernadero, con un movimiento del aire que diversifica la temperatura en niveles más frescos, entendiéndose que no se tiene más aire al interior del que se puede contener dentro del invernadero.

Tabla 7.7 Tasas de ventilación medidas con CFD. Ventilación combinada

Ventilación Combinada				
Frontera	Rango de flujo de masa	Valor (kg s ⁻¹)	Caudal (m ³ h ⁻¹)	Tasa N (h ⁻¹)
Fan (Ventilador)	Ventilador 1 (<i>Fan1</i>)	3.46	10168.2	1.9
	Ventilador 2 (<i>Fan2</i>)	2.82	8287.3	1.6
	Ventilador 3 (<i>Fan3</i>)	3.04	8933.9	1.7
	Ventana lateral de entrada	-62.12	-182556.7	-35.1
	Ventanas cenitales	52.8	155167.4	29.8
	Total		0.0	0.0

Aunado al incremento de la tasa de ventilación con respecto a la ventilación natural, el Cuadro 12 muestra que la ventilación cenital produce una mejor mezcla del aire interior, lo que implica una ligera variación en el gradiente de temperatura a lo largo del invernadero.

Análisis económico de la ventilación mecánica

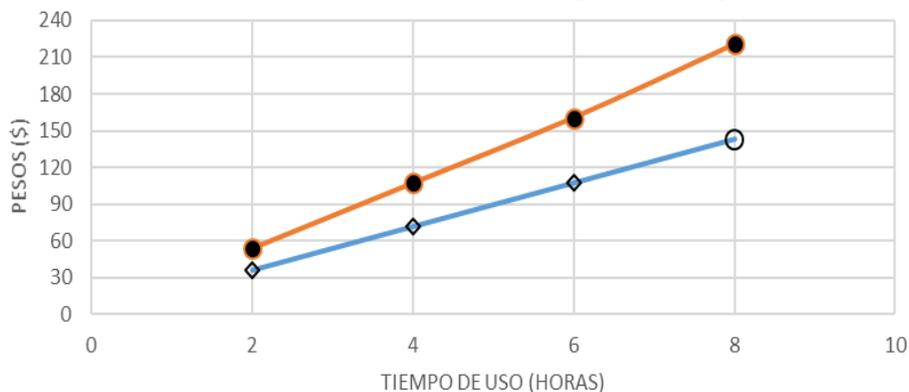
Con el fin de mostrar las implicaciones del uso de un motor en este tipo de sistemas, se realiza un análisis del costo implicado en el control del microclima del invernadero; para tal caso se usó la tarifa agrícola 9-N y la tarifa doméstica. Si la necesidad de usar ventiladores es variable o solo se requieren durante un tiempo en específico, los costos serían los siguientes:

Tabla 7.8 Costo de uso de ventiladores. Tarifa agrícola

Costo total por tiempo de uso de los 3 ventiladores (\$)				
Tarifa	2 horas	4 horas	6 horas	8 horas
9 N (Agrícola)	35.70	71.41	107.11	142.82

Tabla 7.9 Costo de uso de ventiladores. Tarifa domestica

Costo total por tiempo de uso de los 3 ventiladores		
Tiempo de uso (hr)	KWh consumidos	Costo de uso (\$)
2	22.04	53.49
4	44.08	106.98
6	66.12	160.47
8	88.16	220.56

Figura 7.10 Costo de ventilación mecánica. Tarifa agrícola (●) y tarifa doméstica (○).

La Figura 10 muestra que, a mayor tiempo de uso, se tiene un mayor costo con el entendimiento de que durante el día, el sistema es de ventilación, mientras que, durante la noche, si es necesario, el sistema será de calefacción. El tiempo de uso de la ventilación mecánica o calefacción, está en función de las características climáticas exteriores locales y por consiguiente del comportamiento del clima al interior del invernadero.

Ante esta situación se propone la introducción de un sistema mecánico de extracción de aire basado en un extractor de aire modelo EX 36"-0,5. Se simula con estas modificaciones y los resultados se muestran en la figura 5. A pesar que la reducción de temperatura es de 0.5 K, lo importante es que el sistema auxiliar mantiene por abajo la temperatura de la condición natural. Este motor tiene un consumo de 0.38 Kw, por lo que de acuerdo a datos de la CFE cuesta el costo energético de este sistema oscila los 220 pesos por mes.

7.3 Conclusiones

La tasa de ventilación estimada con el modelo indica un favorable intercambio de aire, que favorece velocidad de viento y temperatura dentro de los óptimos para cultivar tomate. Cuando los límites de temperatura son excedidos de manera puntual en específicos periodos del día o del año, la colocación de un sistema mecanizado de ventilación es útil, y en función del tiempo de operación, valores que no impacten sobre el costo de producción y si puedan mantener la calidad de la cosecha. Para un mayor ajuste del clima, se recomienda la incorporación al modelo de elementos como el cultivo, por su intervención en el balance de energía y de humedad del invernadero, modelos de radiación solar que permitan simular esta al interior del invernadero y diferentes materiales de cubierta son retos de esta herramienta.

7.4 Referencias

- Castilla P., N. 2007. Invernaderos De Plástico. Tecnología Y Manejo. (Ed.) Mundi-Prensa. 2a Ed.
- García M., C., S. Balasch F., M. Alcon A., Z. Fernández. 2010. Characterization of technological levels in Mediterranean horticultural greenhouses. Spanish Journal of Agricultural Research 8(3): 509-525.
- Allen R.G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irr. and drain. paper 56. Roma, Italia.
- Flores-Velazquez, J., W. Ojeda., I. Lopez, A. Rojano y I, Salazar. 2007. Requerimientos de riego de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero mediante lisímetro y medidores de flujo de savia. TERRA Latinoamericana, 25,2, 127-134.
- Flores-Velazquez, J., and J.I. Montero. 2008. Computational fluid Dynamics (CFD) Stud of Large Scale Greenhouses. Acta Horticulturae. 797. 117-122.