

SIMULACIÓN DE ESCENARIOS CRÍTICOS PARA EL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADEROS DE LA PLATA

SIMULATION OF CRITICAL SCENARIOS FOR TOMATO CULTIVATION IN GREENHOUSES IN LA PLATA

Santiago Aguilar Ferraro^a, Natalia Muñoz Vasquéz^b, Micaela Del Sole^a, Mariana Garbi^c, Susana B. Martínez^c, Jorge E. Colman Lerner^d, Andrés Porta^a, Pablo M. Demetrio^a & Yanina Sánchez^b

^aCentro de Investigación del Medioambiente (CIM), Universidad Nacional de La Plata, BBv. 120 n° 1489 -1er. piso <https://cim.conicet.gov.ar/>

^bCentro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN). Campus Universitario, Tandil. Argentina. <http://www.cificen.gob.ar/>

^cFacultad De Ciencias Agrarias Y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. <https://www.agro.unlp.edu.ar/>

^dCentro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA), Universidad Nacional de La Plata. <https://cindeca.quimica.unlp.edu.ar/>

Palabras clave: ANSYS CFD, Energy Plus, climatización, ventilación natural y forzada.

Resumen. En el cinturón frutihortícola de La Plata, una de las prácticas más frecuentes es el cultivo de tomate en invernaderos. Este cultivo es sensible a los cambios bruscos en las condiciones ambientales, afectando su normal crecimiento y desarrollo. Partiendo de mediciones *in situ*, para el período de cultivo, se analizaron escenarios críticos para el crecimiento de la planta y el desarrollo del fruto. Se ejecutaron simulaciones en EnergyPlus y ANSYS CFD con el objetivo de evaluar las condiciones ambientales que se presentaron en diferentes etapas del ciclo del cultivo y posibles escenarios de optimización. Se observa que, en situaciones de temperatura externa mayor a 35 °C la ventilación natural y la forzada sin refrigeración, no son suficientes para alcanzar temperaturas internas óptimas para el cultivo por lo que, sería necesario incorporar mecanismos de refrigeración.

Keywords: ANSYS CFD, Energy Plus, climate control, natural and forced ventilation.

Abstract. In the fruit and vegetable belt of La Plata, one of the most frequent practices is the cultivation of tomatoes in greenhouses. This crop is sensitive to sudden changes in environmental conditions, affecting its normal growth and development. Based on *in situ* measurements for the growing period, critical scenarios for plant growth and fruit development were analyzed. Simulations were run in EnergyPlus and ANSYS CFD in order to evaluate the environmental conditions at different stages of the crop cycle and possible optimisation scenarios. It is observed that, in situations of external temperatures higher than 35 °C, natural ventilation and forced ventilation without cooling are not sufficient to reach optimal internal temperatures for the crop, so it would be necessary to incorporate cooling mechanisms.

1 INTRODUCCIÓN

El cinturón frutihortícola de La Plata es una región productiva clave en Argentina, que se encuentra en la zona IIIb según la norma IRAM 11603, caracterizada por veranos relativamente cálidos con temperaturas máximas superiores a 30 °C, inviernos que rara vez descienden por debajo de 0 °C, y una amplitud térmica que no supera los 14 °C. Esta región se destaca, además, por el uso predominante de la tecnología de invernadero. Según una estimación hecha con imágenes satelitales, la superficie de invernaderos agrícolas del área del Gran La Plata en 2016, fue de 5462 ha (Miranda, 2017).

Uno de los principales cultivos que se implementa bajo cubierta en esta zona, es el tomate (Martínez *et al.* 2019). Cuya temperatura óptima para el crecimiento en invernaderos oscila entre 21°C y 35°C, con un rango de humedad entre 60-85% (Lenschak e Iglesias, 2019) y la ventilación debe exceder las 40 renovaciones de aire por hora, según las buenas prácticas (ASAE, 1981).

A nivel nacional existe poca información en lo referente al tipo de estructuras utilizadas y su relación existente con los factores ambientales internos. En particular, los invernaderos de los productores locales se han construido aprovechando estructuras existentes o copiando modelos de otras zonas de producción ya desarrolladas, como lo son. España y Chile, pero rara vez se recurre a estudios científicos específicos de la región para lograr el mejor aprovechamiento climático de cada zona en particular (Lenschak e Iglesias, 2019).

En los últimos años los productores agrícolas se han visto sorprendidos por temperaturas anómalas tanto en invierno como en verano y esto repercute en el óptimo crecimiento del cultivo. Se han documentado eventos en los que los productores han tenido que retirar los cultivos con anticipación debido a las altas temperaturas sostenidas durante varios días consecutivos, impactando esto en la calidad del producto y en pérdidas en la producción, entre otros (Diario El Día, 2024).

El contexto presentado, nos invita a profundizar en el estudio de tales escenarios críticos, buscando alternativas para la adaptación al cambio climático acelerado que se evidencia día a día. Para esto, el uso articulado de herramientas de simulación nos permite diagnosticar eventos pasados y predecir situaciones hipotéticas. En Argentina se han realizado diversos trabajos a largo del territorio que involucran a herramientas para determinar pérdidas de calor en invierno (Iriarte *et al.*, 2001), mejoras y diseños de invernaderos en climas fríos patagónicos (González, 2012; Juanicó *et al.*, 2011) y diseños integrados de secado y aprovechamiento térmico (Quiroga *et al.*, 2013). Las simulaciones numéricas, también han tenido avances en los últimos años, postulándose como una herramienta para describir, evaluar y predecir el comportamiento térmico en invernaderos teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales (Chiarito *et al.* 2022; Ávalos y Miguel, 2023).

Entre las herramientas a destacar, se presenta a EnergyPlus que es un software que permite realizar cálculos simultáneos de los efectos radiativos y convectivos en las superficies interiores y exteriores, posibilitando ejecutar simulaciones anuales hora a hora que combinan los efectos de calefacción, refrigeración, ganancias internas, ventilación cruzada y natural, entre otras opciones (EnergyPlus, 2024; Marino *et al.*, 2019). Por otra parte, la simulación computacional de la dinámica de los fluidos (CFD) permite alcanzar la solución simultánea de ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, considerando las condiciones turbulencias causadas por obstáculos, y permitiendo observar zonas de estancamiento y recirculación de aire (Aguilar *et al.*, 2023). ANSYS CFD, se presenta como un software comercial de punta para el estudio detallado del flujo generado por la presencia de ventiladores en ambientes, además de permitir estudiar el efecto de la incorporación de aires acondicionados a dichos ambientes y considerar también el efecto de la presencia de cultivo en los escenarios de estudio.

En función de las capacidades descritas, Energyplus permite estimar la cantidad de energía necesaria para ventilar o refrigerar un ambiente, y ANSYS complementa el estudio con la descripción de los flujos dentro del invernadero y la estimación de los tiempos asociados a alcanzar las condiciones óptimas.

La hipótesis de trabajo radica en que, frente a eventos de temperatura interna crítica (mayor a 35°C y menor a 21°C) en los que la temperatura externa está dentro del rango de temperatura óptima para el cultivo de tomate, la ventilación natural es una opción viable para alcanzar dicha temperatura. Sin embargo, cuando la temperatura externa está fuera de los rangos óptimos se debe pensar en la climatización forzada (enfriamiento o calefacción, según corresponda) para alcanzar una temperatura interna adecuada.

El objetivo de este trabajo consiste en identificar situaciones críticas de temperatura interna/externa durante el último periodo de cultivo de tomate en un invernadero agrícola de la región de La Plata y evaluar alternativas de climatización que optimicen los ciclos de cultivo y la producción regional.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Identificación de escenarios críticos para el cultivo de tomate.

El invernadero bajo estudio se ubica en la Estación Experimental Julio Hirschhörn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, en La Plata, Provincia de Buenos Aires (Lat.: 34°52' S – Long.: 57°58' O). Tiene una longitud de 40 metros de largo por 24 metros de ancho, formando 3 módulos de 8 metros cada uno, como se observa en la Figura 1. Cada módulo cuenta con ventilación cenital, además presenta ventanas enrollables en los laterales. Tiene una altura de 4,5 metros en los laterales, y 6 metros en su parte más alta de cada módulo, dando un volumen total de 5756 m³. Tiene cubierta de polietileno de 150 µm de espesor. Aledaño a este invernadero experimental (hacia la derecha en la vista frontal), se encuentran dos invernaderos tipo capilla.



Figura 1: Vista satelital del invernadero (izquierda). Vista frontal del invernadero (derecha). Estación Experimental Julio Hirschhörn.

La ventilación natural del invernadero se opera manualmente a través de una puerta principal, dos aberturas laterales y tres aberturas cenitales. Esta operación se activa cuando el sensor de temperatura, ubicado en la parte central del invernadero, a 1.5 m de altura, registra una temperatura de 23 °C. Las características de los diferentes tipos de aberturas, que serán insumo para las simulaciones con Energy Plus y/o ANSYS CFD, se indican en la Tabla 1. El ángulo efectivo, medido en grados, se determina desde el norte en el sentido de las agujas del reloj hasta la línea normal exterior de la abertura. La diferencia de altura Δh , se calcula restando, la altura del punto medio de la abertura con respecto al nivel de presión neutral, que

es el punto donde no hay movimiento de aire porque las presiones del aire interior y exterior son iguales (ASHRAE, 2017). En este trabajo, se considera que el nivel de presión neutral del invernadero es igual a 3 m.

Tipo	Cantidad	Área apertura (m ²)	Ángulo efectivo (°)	Δh (m)
Puerta	1	7.42	315	1.4
Lateral 1	1	116	45	1.5
Lateral 2	1	116	225	1.5
Cenital	3	60	45	3.0

Tabla 1: Características de las áreas efectivas de ventilación natural del invernadero.

En el interior del invernadero se encuentra un sensor que registra datos horarios de temperatura, humedad, presión, evapotranspiración, entre otras variables. La base de datos utilizada para este estudio abarca del 1/1/2023 al 8/2/2024 y fue provista por la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP. Luego de un análisis estadístico, teniendo en cuenta los requerimientos óptimos para el cultivo de tomate, se seleccionaron diferentes fechas en las cuales la temperatura interna del invernadero llegaba a valores máximos durante una temporada de cultivo, considerando un escenario crítico y de estrés para la planta. De aquí surgió la información necesaria para realizar la simulación CFD y EnergyPlus.

2.2 Simulación con EnergyPlus

Se emplea el software EnergyPlus para analizar el ciclo completo de cultivo de tomate, aprovechando su capacidad para realizar simulaciones hora a hora durante un año. Esta herramienta permite evaluar el desempeño térmico de estrategias de ventilación mecánica como ventiladores y/o sistemas de climatización y ventilación conocidos HVAC (heating, ventilation and air conditioning). El archivo de datos de entrada para EnergyPlus es posible descargarlo en formato .epw para EnergyPlus. Desde POWER - Prediction of Worldwide Energy Resources (2021), se descargaron mediciones satelitales hora a hora de: radiación solar medida sobre una superficie horizontal IH en W/m² (incluyendo tanto la radiación solar que proviene directamente del Sol sin dispersión atmosférica significativa, así como la radiación solar difusa que se dispersa en la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre), radiación solar difusa IDH en W/m², Temperatura externa Te en °C, Humedad relativa externa He en %, presión del aire externo Pe en Pa, velocidad del viento en m/s y dirección del viento en grados.

Se realizaron simulaciones del invernadero para un periodo de un año, desde el 8/2/2023 hasta el 8/2/2024. Sin embargo, en este trabajo se analiza un día de verano en particular, con el objetivo de integrar los resultados obtenidos en EnergyPlus y ANSYS CFD. Primero se realizaron simulaciones del funcionamiento real del invernadero, tanto cuando el invernadero se encuentra completamente cerrado como la incorporación de la ventilación natural. Posteriormente, se consideró la ventilación forzada con ventiladores. Finalmente, para simular el efecto de sistemas HVAC, se utilizó el grupo Fan:ZoneExhaust como condición de entrada, el cual se caracteriza por ubicarse dentro de una zona térmica en lugar de funcionar como una parte de un sistema de aire acondicionado y calefacción.

Para dimensionar la cantidad de equipos necesarios para alcanzar la temperatura interna deseada a partir de las simulaciones con EnergyPlus, se consideraron las características de ventiladores y sistemas HVAC para invernaderos disponibles comercialmente. En el caso de los ventiladores, se utilizó el caudal en m³/s a una diferencia de presión de 50 Pa, requerida por EnergyPlus para igualar las temperaturas interna y externa en las horas más calurosas del

día. Para los sistemas HVAC, se empleó el consumo calculado por las simulaciones en kWh con el objetivo de mantener la temperatura interna en 23 °C durante las horas más calurosas.

Normalmente, los ventiladores tienen un diámetro entre 0.4 y 0.5 m y producen un caudal de entre 1.9 y 2.6 m³/s, generando una diferencia de presión de 50 Pa a flujo pleno. Los sistemas HVAC, por su parte, miden aproximadamente 5 m de ancho, 4 m de alto y 3 m de profundidad. Estos sistemas tienen caudales aproximados de 6 m³/s, operan en un rango de temperatura entre 10 y 40 °C, y tienen un consumo aproximado de 12 kWh.

Teniendo la cantidad de equipos estimados, éstos pueden ser simulados en ANSYS CFD con el objetivo de evaluar que la distribución aire de manera uniforme dependiendo de la ubicación de los equipos, también es posible obtener el tiempo que tarda en disminuir la temperatura interna una vez encendidos los equipos.

2.3 Simulación con ANSYS CFD

Dado un escenario sin ventilación y con temperatura crítica dentro del invernadero, se realizó la primera corrida (Caso 1), en estado estacionario, con el objetivo de evaluar la máxima temperatura alcanzada dentro del invernadero en la simulación. Este resultado es utilizado en las próximas corridas para evaluar el tiempo en que se tarda en llegar a la temperatura óptima objetivo, dadas diferentes condiciones de ventilación o refrigeración. Luego, se realizan 3 corridas transientes, a fin de evaluar los diferentes métodos de ventilación o climatización en la búsqueda de opciones para los productores. Además, se calcula el tiempo que insume alcanzar la temperatura objetivo y el costo asociado. Estas 3 corridas son:

Caso 2: Simulación transiente con ventilación natural.

Caso 3: Simulación transiente con ventilación forzada.

Caso 4: Simulación transiente con aire acondicionado.

Para elegir las variables climáticas a introducir como condición de contorno, se consideran el valor promedio de las horas de mayor temperatura para el día crítico seleccionado y el conjunto de horas consecutivas en los que la dirección del viento se mantiene aproximadamente constante ($\pm 22.5^\circ$). En base a esta selección se obtiene la dirección del viento a simular y luego se procede a realizar la geometría en Spaceclaim. El modelo computacional fue construido en 3 dimensiones, a escala real. La simulación se realiza con ANSYS CFD 2022 R2 software (Academic Research CFD license) en un HPC server (2 procesadores Intel Xeon Silver 4310 12C/24T 2.1GHz, 96 GB RAM) emplazado en el Centro de Alto Cómputo de la UNCPBA. Para ello, se representó el dominio de estudio como un recinto que incluye a la estructura e interior del invernadero, a fin de obtener una buena definición de la capa límite atmosférica, y con ello una buena descripción del aire que ingresa al invernadero. La malla de buena calidad, según los estadísticos *Skewness* y *Orthogonal Quality*, se construyó con el método *patch independence*, utilizando ANSYS Meshing. ANSYS Fluent resolvió numéricamente el sistema de ecuaciones que describe la dinámica del fluido en cada celda del dominio computacional. Las ecuaciones clásicas de masa, cantidad de movimiento, energía y concentración se pueden representar para un flujo tridimensional.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (\text{Ec. 1})$$

donde ϕ representa las variables de interés, es decir, las componentes de velocidad μ_j (m s⁻¹), la temperatura T(K) y la humedad específica. Γ_ϕ y S_ϕ representan el coeficiente de difusión y el término fuente (Boulard 2000).

Se utilizaron esquemas de discretización espacial de segundo orden para todas las ecuaciones. Se empleó un método de acoplamiento de presión-velocidad con un esquema SIMPLE. Se adoptó el modelo de turbulencia k epsilon realizable (Launder & Spalding, 1974). En la entrada del fluido al dominio (inlet), a partir de los datos de campo, se incorpora un perfil de viento logarítmico a fin de describir de manera representativa las variaciones de la velocidad del viento con la altura. Los límites laterales y el límite superior del dominio se establecieron como condición de simetría. Para este primer abordaje no se tuvo en cuenta el intercambio de calor y humedad entre el cultivo y su entorno.

En lo que respecta a la representación del cultivo, para una velocidad del aire u , las fuerzas de arrastre inducidas que corresponden al término fuente (S_ϕ) para la ecuación de movimiento, se incluyen por medio del enfoque de medio poroso regido por la ecuación de Darcy - Forchheimer (Ec. 2):

$$S_\phi = - \left(\left(\frac{\mu}{K_p} \right) u + \left(\frac{C_F}{\sqrt{K_p}} \right) \rho u^2 \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

donde ρ (kg m^{-3}) y μ ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-1}$) representan la densidad del aire y la viscosidad dinámica, respectivamente. Con respecto al cultivo, se generan hileras de 2 metros de altura por 0,80 m de ancho y 34 m de largo, con una separación de las líneas de cultivo de 2 m. Esta es representada como una zona porosa, que se describe con tres parámetros: permeabilidad (α), coeficiente de resistencia inercial (C_2) y porosidad (γ). Para los fines de este trabajo, se utilizaron los valores encontrados por Haxaire, Boulard y Mermier (2000) en túnel de viento con plantas de tomate. Sus valores fueron $\alpha = 0,017 \text{ m}^2$ ($1/\alpha=58,825$), $C_2=0,31 \text{ m}^{-1}$ y $\gamma=20\%$ (0,2) (Molina-aiz, 2010).

La simulación global fue previamente validada, con datos de campo, presentada por Aguilar *et al.* (2023), en donde se estudió la capacidad de renovación del aire para diferentes configuraciones estructurales del invernadero bajo estudio.

Para configurar la incorporación de los ventiladores en ANSYS se lo debe representar geoméricamente para luego darle la condición de "Fan" en Fluent. Para el caso de los aires acondicionados, se los debe representar también geoméricamente para luego darles la condición de contorno "Velocity-Inlet" en Fluent, configurando posteriormente la velocidad y la temperatura del aire deseados. La simulación con aire acondicionado fue realizada tipo flujo interno, sin recinto. Esta corrida fue ajustada con otras corridas de flujo externo (o recinto) realizadas previamente para alcanzar la misma representación con ambos enfoques.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como caso práctico para este estudio, se seleccionó el día 13/1/2024 como día crítico para el cultivo de tomate, ya que la temperatura máxima interna del invernadero medida para ese día, al mediodía fue 49.3 °C.

Los resultados de las simulaciones en EnergyPlus muestran una buena correlación con las mediciones realizadas en invierno y verano, en función de los datos disponibles. La figura 2 muestra la evolución de la temperatura para los días comprendidos entre el 12 y el 15 de enero del 2024 del invernadero totalmente cerrado. La línea azul representa la temperatura externa, la línea roja representa la temperatura interna medida y las líneas negras representan los resultados de las simulaciones. La línea negra continua corresponde a las simulaciones sin ninguna ventilación natural, mientras que las líneas negras punteadas muestran los resultados de las simulaciones con la puerta abierta.

En los escenarios descritos, la condición de $T_{\text{int}} \gg T_{\text{ext}}$, sugiere la necesidad de ventilación o climatización forzadas para mantener rangos óptimos de temperatura para el cultivo. En este contexto, el día 13/1/2024 es posible notar una ventilación escasa o nula.

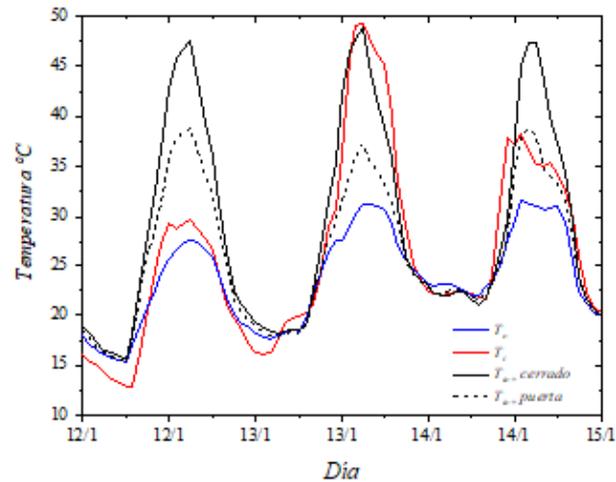


Figura 2: Evolución de las temperaturas externa e interna del invernadero. Azul: Temperatura externa, rojo: temperatura interna medida, negro: resultados de las simulaciones (sin ventilación línea continua y con la puerta abierta línea punteada).

Las simulaciones de la ventilación natural mostraron que la puerta principal tiene un fuerte impacto en la disminución de la temperatura interna. Además, las simulaciones en ANSYS CFD deben considerar esta abertura para realizar cálculos precisos. A partir de las simulaciones en EnergyPlus, es posible concluir que se requieren 38 ventiladores para reducir la temperatura interna hasta alcanzar la temperatura ambiente. Sin embargo, dado que los ventiladores no enfrían el aire interior, en días donde la temperatura externa no sea favorable, su uso carece de sentido si el objetivo es evitar el estrés térmico del cultivo.

La simulación de un sistema ideal de cargas tipo HVAC utiliza un termostato configurado para mantener temperatura interna en 23 °C. Considerando que la puerta principal permanece abierta, la figura 3 muestra los resultados de la energía necesaria en kWh, para mantener dicha temperatura en el invernadero durante las horas de más calor entre el 12 y el 15 de enero del 2024. Los equipos deberían funcionar entre las 9:00 y las 22:00 hs. Para cumplir con esta demanda, se necesitaría suministrar 1412.74 kWh durante esas 11 horas, lo que requeriría la instalación de al menos 10 equipos para cubrir la demanda energética.

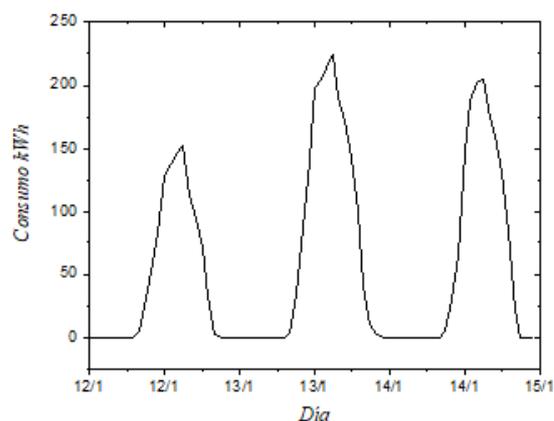


Figura 3: Resultados de las simulaciones en EnergyPlus del consumo de energía necesario para reducir a 23 °C la temperatura interna durante las horas más calurosas del día.

La simulación con ANSYS del Caso 1, muestra que, bajo las condiciones ambientales externas dadas, cuando el invernadero está cerrado, casi sin ventilación, la temperatura máxima alcanzada con CFD en la simulación es de 309,2 K (36,2 °C) en el sitio de observación del sensor (centro del invernadero a una altura de 1.5 m). La diferencia entre este

valor, el valor que arroja Energyplus y el observado de 43 °C, puede deberse a que en ANSYS no se han considerados los efectos de la radiación. En la siguiente Tabla 2 se muestra la información utilizada como condición de contorno en ANSYS.

Datos utilizados en ANSYS	Valor ingresado
Velocidad de viento (perfil)	$(0.38[\text{m/s}]/0.4)*\log(\text{Position.y}/0.2[\text{m}])$
Dirección de viento	NORTE
Temperatura externa del aire	29 °C
Temperatura suelo externa	26°C

Tabla 2: Información meteorológica utilizada como condición de contorno en ANSYS CFD.

La simulación con ANSYS del Caso 2 (Figura 4), corresponde al invernadero con ventilación natural, es decir, presenta sus ventanas laterales y cenitales completamente abiertas. Para este caso, se hizo una simulación transiente y se “patcheo” toda la zona interna del invernadero con la temperatura obtenida en la corrida del Caso 1.

En esta simulación se observa que la temperatura en el sitio de observación (localización del sensor) desciende hasta alcanzar la temperatura externa. Esto se logra en aproximadamente 4.5 segundos, tal como lo muestra la Figura 3. O si vamos a la práctica, se logra en 4.5 segundos posteriores al tiempo en el que se logre abrir completamente las aberturas del invernadero.

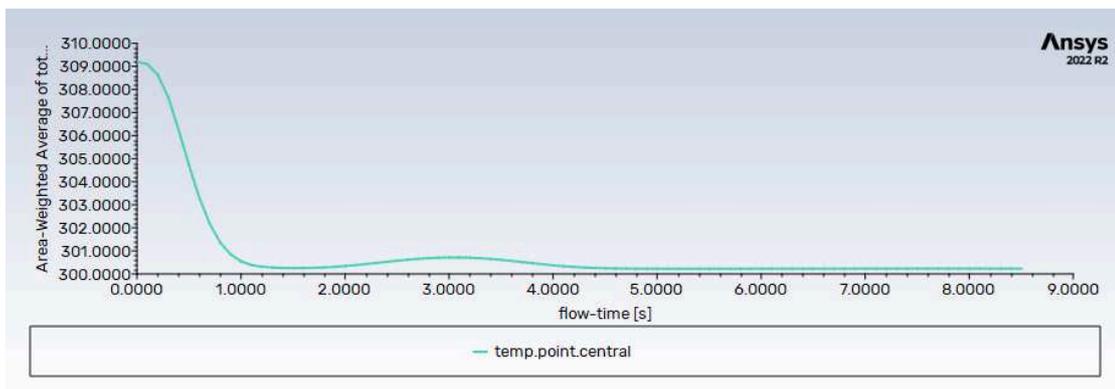


Figura 4: Temperatura promedio en sitio de observación (localización del sensor) en función del tiempo, para el caso de ventilación natural.

A continuación, se simuló con ANSYS CFD la incorporación de 38 ventiladores a una diferencia de presión de 50 Pa, se configuró una distribución a 2.5 m de altura en todo el perímetro del invernadero. Esta simulación en estado transiente, patcheando la zona como se nombró anteriormente, arrojó que el interior del invernadero alcanza la temperatura externa en aproximadamente 40 segundos, tal como lo muestra la figura 4. Hay que tener en cuenta que 38 ventiladores es una gran cantidad y requeriría un gran costo energético.

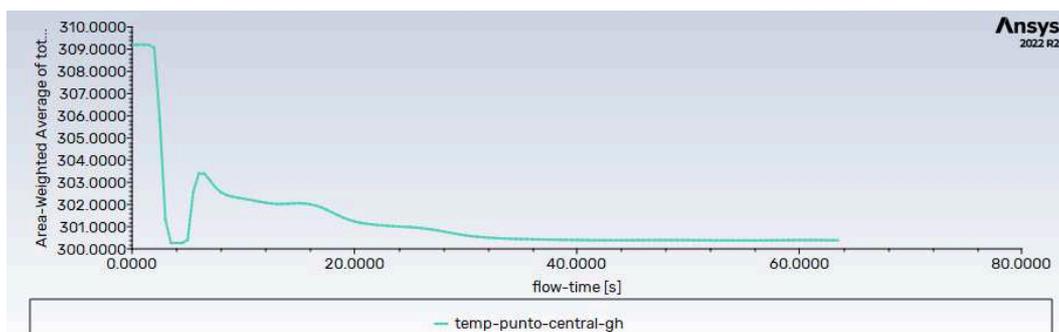


Figura 4: Temperatura promedio en sitio de observación (localización del sensor) en función del tiempo para el caso de ventilación forzada con 38 ventiladores.

Como era de esperar, los resultados mostraron que, el uso de ventiladores, no puede reducir la temperatura interna por debajo de la temperatura externa. En general los ventiladores tienen el efecto de acelerar la evaporación del agua y así generar una sensación de refrescamiento. Por lo cual, llevar la temperatura interna hasta la temperatura de confort del cultivo (entre 23 y 25 °C) requiere de la simulación de un sistema de refrigeración.

Realizando la simulación del Caso 4 con ANSYS se observa que efectivamente se reduce la temperatura, hasta alcanzar la temperatura óptima deseada para el cultivo de tomate, tal como lo muestra el gráfico de la Figura 5. Esta reducción se da en aproximadamente 7000 segundos (116 minutos, lo que sería casi 2 horas).

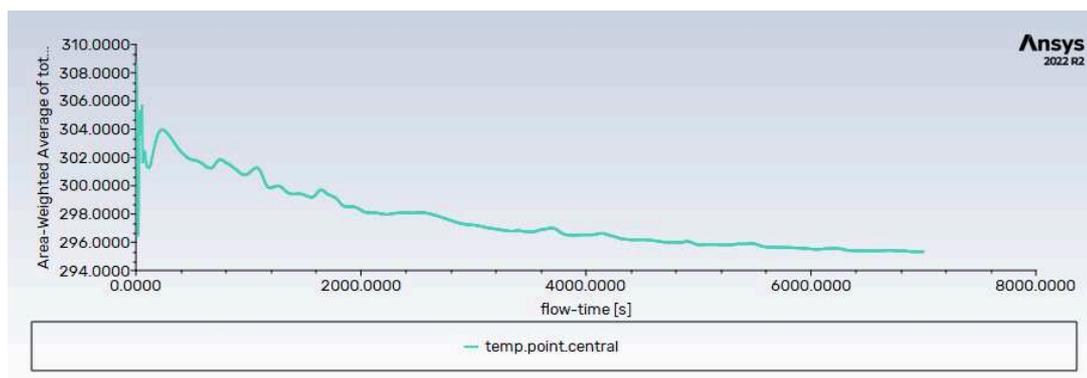


Figura 5: Temperatura promedio en sitio de observación (localización del sensor) en función del tiempo para el caso de aire acondicionado en el interior del invernadero.

Un análisis final de los resultados presentados hasta aquí, evidencian que aunque EnergyPlus permite tener en cuenta el efecto de la radiación solar en los cálculos, las simulaciones de la evolución de la temperatura interna y el consumo energético de los equipos de ventilación forzada presentan ciertas limitaciones. Entre ellas, se destaca que no es posible visualizar con dicha herramienta los patrones de flujos de aire debido a la disposición de la ventilación forzada dentro del invernadero. Asimismo, en el caso de los sistemas HVAC, no es posible analizar el tiempo de enfriamiento ni la distribución uniforme del aire. Una opción para mejorar la fiabilidad de las simulaciones, describir los procesos físicos de transferencia de calor y masa que ocurren en el invernadero y analizar las diferencias en la interpretación de los flujos asociados al uso de ventiladores en días críticos de temperatura, es el uso de ANSYS CFD como herramienta complementaria a Energy Plus.

5. CONCLUSIONES

En los últimos años los productores agrícolas se han visto sorprendidos por temperaturas anómalas tanto en invierno como en verano y esto repercute en el óptimo crecimiento de los cultivos. Se realizaron simulaciones de un invernadero cerrado y con ventilación natural, comparándolas con mediciones tomadas en su interior. Se afirma la hipótesis de que la ventilación natural es efectiva siempre y cuando las condiciones externas sean favorables, es decir, que la temperatura externa se encuentre en el rango de temperatura de confort para el cultivo. Los resultados evidencian que, en situaciones de temperatura externa mayor a 35 °C la ventilación natural y la forzada sin refrigeración, no son suficientes para alcanzar temperaturas internas óptimas para el cultivo por lo que, sería necesario incorporar de mecanismos de refrigeración, encontrando un situación de compromiso entre el objetivo de climatización, la inversión económica y la reducción de pérdidas de producción. Esta opción se presenta en la actualidad como una alternativa en alza dado por las frecuentes olas de calor y frío que se presentan en el territorio. Los sistemas de refrigeración pueden ser útiles tanto para verano, como para calefacción en invierno, reduciendo el riesgo de heladas y mejorando las condiciones

laborales en las etapas iniciales del cultivo.

Se destaca en este trabajo, el uso complementario de Energy Plus y ANSYS CFD. Luego de establecer en EnergyPlus la cantidad de equipos de ventilación y/o el enfriamiento que permitan reducir la temperatura interior hasta la temperatura óptima, se realizaron simulaciones ANSYS CFD para visualizar los flujos de aire y su efecto en la temperatura interior. Con esto es posible proporcionar a las partes interesadas una evaluación eficaz del rendimiento energético de nuevas tecnologías o soluciones innovadoras que permitan mejorar el clima interior de los invernaderos ya existentes aumentando el ahorro de energía y la óptima producción de los cultivos. ,

REFERENCIAS

Aguilar Ferraro, S; Del Sole, M; Demetrio, P, M; Colman Lerner, J, E; Garbi, M; Martínez, S, B; Porta, A. & Sánchez, E, Y. (2023). Aplicación De ANSYS CFD Como Herramienta Para La Gestión De Sistemas Hortícolas Bajo Cubierta Utilizados En La Plata Y Alrededores. Congreso Mecánica Computacional (MECOM 2023).

ASAE (American Society Of Agricultural Engineers), 1981.- Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph (EE.UU.), ANSI-ASAE Standard. pp: 401-404.

ASHRAE (2017). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Handbook of Fundamentals. Chapter 16.

Avalos A. S., Miguel S. (2023). Diseño y simulación térmica de un invernadero andino escolar en estación solar Pocitos, Provincia de Salta. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 27, 33-44.

Boulard T; Wang S; Haxaire R (2000). Mean and turbulent air flows and microclimate patterns in an empty green-house tunnel. Agricultural and Forest Meteorology,100,169–181.

Chiarito G., Gómez C. W., González G., Nuruel A., Turdó E. (2022) Análisis de demanda térmica invierno/verano comparada en módulos habitacionales sometidos a condiciones variables en Rosario. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 26, 169-180.

Diario El Día, 26 de febrero de 2024, La Plata, Buenos Aires, Argentina. <https://www.eldia.com/nota/2024-2-26-3-31-59-fuerte-golpe-del-calor-a-las-cosechas-de-la-region-la-ciudad>

González. A. D. (2012). Estudio de la temperatura en un invernadero adosado con orientación norte en la Patagonia Argentina. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 16, 35-42.

IRAM. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento Térmico de Edificios. (2011). Clasificación bioambiental de la República Argentina. IRAM, Argentina.

Iriarte A., García V., Saravia L. (2001). Modelo para la predicción de pérdidas nocturnas y necesidades de calefacción de invernaderos. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 5, 55-60.

Juanicó L.E., Piacentini R., La Mattina G. (2011). Desarrollo de invernaderos con sistemas sustentables de confort térmico. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 15, 1-8.

Molina-Aiz, F. D. (2010). Tesis Doctoral. *Simulación y modelación de la ventilación en invernaderos de Almería mediante la utilización de Dinámica Computacional de Fluidos*. Universidad de Almería. Departamento de Ingeniería Rural.

Haxaire, R.; Boulard T. y Mermier M., 2000. Greenhouse natural ventilation by wind forces. Acta Horticulturae, 534: 31-40.

Launder B E; Spalding D B (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,3,269–289.

Lenscak, M. P., & Iglesias, N. B. (2019). Invernaderos: tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino (del paralelo 23 al 54). INTA Ediciones..

Miranda, M. 2017. Superficie de cultivo bajo cubierta en el Gran La Plata, análisis espacial son Sistemas de Información Geográfica -SIG. Periurbanos hacia el consenso. Córdoba.

Martínez, S.; Garbi, M.; Andreau, R. (2019). Situación actual de la producción en invernaderos en el cinturón hortícola de La Plata, provincia de Buenos Aires. Libro Invernaderos,Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino (del paralelo 23 al 54). INTA Ediciones.

Quiroga M., Condorí M., Durán G., Martínez C., Echazú R. (2013) Sistema integrado de secado y acondicionamiento térmico en un sustrato de propagación. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. 17, 27-34.