



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE EXTRACTORES
DE AIRE EN CONJUNTO CON UNO Y DOS AEROGENERADORES**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

CLAUDIA RAMÍREZ GARCÍA

Bajo la supervisión de:

EUGENIO ROMANTCHIK KRIUCHKOVA, DR.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025

**SELECCIÓN Y ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO DE EXTRACTORES
DE AIRE EN CONJUNTO CON UNO Y DOS AEROGENERADORES**

Tesis realizada por el C. CLAUDIA RAMÍREZ GARCÍA bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:  _____

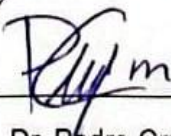
Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

ASESOR:  _____

Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs

ASESOR:  _____

Dr. Eduardo Ríos Urbán

ASESOR:  _____

Dr. Pedro Cruz Meza

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL	X
ABSTRACT	XI
1 INTRODUCCION GENERAL	12
1.1 Introducción	12
1.2 Hipótesis	13
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo General	13
1.3.2 Objetivos Particulares	13
1.4 Organización de la tesis	14
2 REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1 Ventilación forzada en invernaderos	15
2.1.1 Extractores de aire	16
2.1.2 Leyes de los extractores de aire.	17
2.1.3 Eficiencia de los extractores de aire	18
2.2 Metodología multicriterio	19
2.2.1 Proceso analítico Jerárquico (AHP)	19
2.3 Literatura citada	20
3 ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN EXTRACTOR DE AIRE CON UNO Y DOS AEROGENERADORES SIMPLES	23
3.1 Resumen	23
3.2 Introducción	24
3.3 Materiales y métodos	24

3.3.1	Equipos de prueba	25
3.3.2	Instrumentación	27
3.3.3	Tratamientos	27
3.3.4	Parámetros	29
3.4	Resultados y Discusión	31
3.4.1	Velocidad de entrada y salida en extractor con cono	31
3.4.2	Caudal de entrada.....	32
3.4.3	Potencia de aire	32
3.4.4	Potencia del motor del extractor de aire.....	33
3.5	Conclusiones	34
3.6	Literatura citada	35
4	METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE UN EXTRACTOR DE AIRE PARA INVERNADERO	36
4.1	Resumen	36
4.2	Introducción	37
4.3	Materiales y métodos.....	41
4.3.1	Criterios de selección	43
4.4	Resultados y Discusión	45
4.4.1	Características del invernadero	45
4.4.2	Aplicación de la metodología en criterios de selección	45
4.4.3	Aplicación de la metodología multicriterio para la selección del modelo de extractor.....	48
4.4.4	Alternativas resultantes de la aplicación de la metodología	51

4.5	Conclusiones	52
4.6	Literatura citada	53

Lista de Cuadros

Cuadro 1 – Distancia del centro al punto de medición	29
Cuadro 2 - Potencia del motor	34
Cuadro 3. Escala de evaluación	41
Cuadro 4 - Criterios de selección.....	44
Cuadro 5 – Alternativas de invernaderos	45
Cuadro 6 - Matriz 6x6 de comparaciones pareadas de los criterios	45
Cuadro 7 – Matriz 6x6 para determinar el Peso Individual del criterio	46
Cuadro 8 – Matriz 6x1 de M1 con el criterio de potencia del motor	47
Cuadro 9 – Matriz 6x1 de M2 con el criterio de potencia del motor	47
Cuadro 10 – Resultados de las comparaciones de las matrices 6x1.....	47
Cuadro 11 - Cociente de consistencia de la matriz	48
Cuadro 12 - Aplicación de la metodología a modelos de 15,000 m^3h	48
Cuadro 13 - Aplicación de la metodología a modelos de 30,000 m^3h	49
Cuadro 14 - Aplicación de la metodología a modelos de 60,000 m^3h	50
Cuadro 15 - Alternativas para invernadero de 1500 m^3	51

Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo del motor de extractor de aire N00218OS1P56	25
Figura 2 - Tamaño del cono en el extractor de aire	25
Figura 3 - Resistencia y primer aerogenerador simple	26
Figura 4 - Aerogenerador simple.....	26
Figura 5 - Segundo Aerogenerador (a) y primer aerogenerador (b).....	26
Figura 6 - Anemómetro	27
Figura 7 - Multímetro Truper Mut - 202	27
Figura 8 - Mediciones a la entrada del extractor en conjunto con un aerogenerador y una resistencia.....	28
Figura 9 - Distancia del centro a cada anillo (radios) a la entrada del extractor	28
Figura 10 - Velocidad promedio de aire en extractor con cono	31
Figura 11 - Caudal de aire en la entrada del extractor en los diferentes tratamientos	32
Figura 12 – Potencia de aire de entrada en los diferentes tratamientos.	33
Figura 16 – Escala evaluativa a la inversa (Rivera Aguilar et al. 2010)	42

DEDICATORIA

A mis padres Alberto Ramirez Alegría y Rosalba Garcia Guzmán por su apoyo y confianza incondicional.

A mis hermanas Ivonn Alejandra y Luz Andrea por su motivación y compañía en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, que me ha brindado la oportunidad de continuar mis estudios y me ha brindado su apoyo durante todo este proceso.

Al posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua que me ha ayudado a culminar mis estudios de maestría.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo financiero durante mis estudios.

Al Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova por todo su apoyo y conocimiento durante el desarrollo de la investigación.

Al Dr. Gilberto de Jesús López Canteñas, Dr. Eduardo Ríos Urban y al Dr. Pedro Cruz Meza por su dedicación y paciencia durante esta investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Claudia Ramírez García
Fecha de nacimiento	30 de agosto de 1999
Lugar de nacimiento	Ciudad de México
CURP	RAGC990830MDFMRL07
Profesión	Ingeniería en Desarrollo Comunitario
Cédula profesional	13393874

Desarrollo académico

Bachillerato	Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de México, Chicoloapan
Licenciatura	Ingeniería en Desarrollo Comunitario, Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan

RESUMEN GENERAL

SELECCIÓN Y ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO DE EXTRACTORES DE AIRE EN CONJUNTO CON UNO Y DOS AEROGENERADORES

El sistema de ventilación de un invernadero es uno de los factores más importantes a considerar, permitiendo el control del clima dentro del invernadero, el cual afecta directamente a los cultivos que están desarrollándose. En consecuencia, es necesario la selección de un extractor de aire que cumpla con las necesidades que demanda el invernadero. Un modelo de extractor de aire Multifan 130 se evaluó en una serie de pruebas con cono, con una resistencia a su salida, un aerogenerador simple, y un segundo aerogenerador a distintas distancias, midiendo las velocidades de aire presentadas en diferentes puntos a la entrada del extractor para después compararlas con los resultados presentados en el extractor de aire individual, así como el amperaje del motor con el aerogenerador en movimiento, posteriormente se realizó lo mismo con los caudales calculados a partir del área y la velocidad de aire de cada punto en donde se determinó que el caudal de entrada del extractor no se ve afectado a partir de la distancia de 60 cm mientras que si el aerogenerador se acerca demasiado se pudo apreciar una variación en el caudal de entrada. Continuando con el objetivo de encontrar el mejor extractor se desarrolló una metodología de selección multicriterio, donde se priorizó y comparó cada uno de los criterios. Se realizó una base de datos con todas las alternativas de modelos de extractores (Acme, S&P, Vendepot y Sodeca) con un total de 165, los criterios que se utilizaron son siete en total, basados en sus parámetros técnicos, comerciales y algunos que se consideran para la instalación de aerogeneradores a la salida del extractor, de los catálogos que se usaron para la base de datos se extrajeron los criterios: caudal, potencia de motor, masa y diámetro, así como se calcularon los criterios velocidad y potencia de aire de entrada del extractor, y eficiencia. Al final se obtuvieron las mejores alternativas para los tres tipos de invernaderos, cumpliendo con el caudal requerido y teniendo la mejor evaluación en los demás criterios. Esto facilita la selección del extractor de aire además de que genera confianza en el modelo obtenido.

Palabras clave: Extractor de aire, ventilación, metodología multicriterio, aerogenerador.

ABSTRACT

The ventilation system in a greenhouse is one of the most important factors to consider, as it allows for climate control inside the greenhouse, which directly affects the crops being grown. Therefore, it is necessary to select an exhaust fan that meets the needs of the greenhouse. A Multifan 130 exhaust fan model was evaluated in a series of tests with a cone, a resistance at outlet, a single wind turbine, and a second wind turbine at different distances, measuring the air speeds presented at different points at the exhaust fan's inlet and then compared them with the results presented in the single exhaust fan, as well as the motor amperage with the wind turbine in motion, the same was done with the airflow rates calculated from the area and air speed of each point where it was determined that the exhaust fan's inlet airflow was not affected from a distance of 60 cm, while if the wind turbine gets too close, a variation in the inlet airflow could be noticed. Continued with the objective of finding the best exhaust fan, a multicriteria selection methodology was developed, in which each of the criteria was prioritized and compared. A database was created with all the alternative exhaust fans models (Acme, S&P, Vendepot, and Sodeca), in total 165, seven criteria were used in total, based on their technical and commercial parameters, and some that are considered for the installation of wind turbines at the exhaust fan outlet, the criteria were extracted from the catalogs used for the database: airflow, engine power, mass and diameter, as well as the criteria of air speed and power of the exhaust fan inlet and efficiency. In the end, the best alternatives for the three types of greenhouses were obtained, meeting the required airflow and receiving the best evaluation in the other criteria. This simplifies the selection of the exhaust fan and builds confidence in the model obtained.

Palabras clave: Exhaust fan, ventilation, multicriteria methodology, wind turbine.

Master's Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural Engineering and Integrated Water Use, Chapingo Autonomous University.

Author: Claudia Ramírez García

Thesis Director: Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

1 INTRODUCCION GENERAL

1.1 Introducción

Un invernadero es una estructura que protege al cultivo de la lluvia y el viento mediante una cubierta transparente, que permite el paso de la radiación solar y dificulta la pérdida de calor. La combinación de factores climáticos facilita que los cultivos en un invernadero se encuentren por más tiempo en su zona de confort ambiental y en consecuencia son más suaves, tiernas y succulentas, en comparación con las cultivadas a campo abierto. Esta modificación climática permite adelantar cosechas, aumentar rendimientos o cultivar permanentemente en una región agrícola (Flores-Velázquez & Ojeda-Bustamante, 2015).

El sistema de ventilación se vuelve entonces uno de los factores más importantes que considerar de un invernadero, ya que un mal sistema podría impactar en los cultivos, este sistema se da por la renovación del aire del invernadero ya sea natural o forzada (ventiladores eléctricos). Las necesidades de ventilación expresadas en número de renovaciones del volumen de aire por hora varían con la intensidad de la radiación solar y con el nivel aceptable de aumento de temperatura dentro del invernadero, siendo la implementación de un extractor de aire la forma más eficiente de mantener el control climático en el invernadero, el principio de los ventiladores es crear un flujo de aire dentro de la estructura: estos situados en un extremo del invernadero, extraen el aire y las ventanas situadas en el lado opuesto lo dejan entrar (FAO, 2002).

Para que el sistema sea lo más óptimo posible se busca la mejor posible del extractor de aire, además de la instalación del modelo más óptimo posible para las características y necesidades del invernadero.

La selección de un extractor de aire actualmente es una problemática que no se ha abordado en su totalidad ya que existen varios parámetros que considerar propios de cada modelo, por ello se aplicó una metodología multicriterio para priorizar y considerar cada uno de ellos, también se realizaron pruebas en un extractor de aire para analizar si al instalarle un aerogenerador simple a su salida puede mejorar sus características.

1.2 Hipótesis

Si se analiza el funcionamiento del extractor en diferentes condiciones se puede desarrollar una metodología que permita seleccionar el modelo más óptimo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar cómo influye la instalación de uno y dos aerogeneradores simples en funcionamiento del extractor de aire y desarrollar una metodología de selección de extractor para invernadero.

1.3.2 Objetivos Particulares

- Desarrollar metodología de pruebas y evaluación del extractor de aire (voltaje y amperaje del extractor, velocidad de aire; calcular potencias eléctrica, eólica, eficiencia; análisis de balance de energía).
- Instalar e instrumentar el extractor de aire con uno y dos aerogeneradores simples.
- Probar y evaluar el funcionamiento del extractor de aire en invernadero con uno y dos aerogeneradores simples.
- Definir los criterios para selección de un extractor de aire.
- Desarrollar la metodología de selección multicriterio de un extractor de aire.

1.4 Organización de la tesis

El presente trabajo está dividido de la siguiente manera:

En el capítulo I se presenta la Introducción General, el capítulo II incluye la revisión de Literatura, el cual incluye la importancia de la ventilación en los invernaderos, y la necesidad de seleccionar la alternativa de extractor de aire óptimo, además de una descripción sobre el uso de una metodología multicriterio y en los capítulos III y IV se encuentran los artículos científicos que pertenecen al trabajo de investigación.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Ventilación forzada en invernaderos

La ventilación es esencial en un invernadero. Mantener un clima favorable al interior implica evacuar el exceso de calor producido. En consecuencia, un buen diseño de los sistemas de ventilación de un invernadero ha de permitir un mejor control del clima (Flores-Velázquez et al., 2011). El principal parámetro en el balance energético de un invernadero es la temperatura exterior, que determina de forma directa las necesidades de refrigeración y calefacción. La ventilación de un invernadero puede realizarse de manera natural, a través de ventanas, llamada ventilación pasiva o estática, o bien artificialmente utilizando ventilación forzada, por medio de extractores (Juárez, 2019).

La mejor manera de mantener una buena climatización en el invernadero y predecir los gradientes como temperatura, humedad y CO₂ es la extracción. Por lo tanto, un buen diseño de los sistemas de ventilación permite un mejor control del clima, lo que repercute en un mejor desarrollo del cultivo y su rendimiento (Flores-Velázquez et al., 2011).

La ventilación del invernadero es fundamental para el correcto funcionamiento de la estructura. El intercambio de aire entre el interior y el exterior juega un papel importante en la determinación de las condiciones ambientales dentro de las estructuras utilizadas para el cultivo protegido. Tiene múltiples funciones: controla la temperatura y la humedad y reduce la probabilidad de enfermedades. Puede ser pasiva: influenciada por el viento y los gradientes de temperatura, o forzada/mecanizada: realizada mediante extractores de aire (Revathi et al., 2021).

La ventilación de los invernaderos depende de la estructura del propio invernadero siendo que la ventilación mecánica incluye un ventilador que incrementa el flujo de salida del aire, dada que el uso de los ventiladores permite un control más preciso de la temperatura del invernadero (Flores-Velázquez & Villarreal-Guerrero, 2015). Los ventiladores succionan el aire exterior al interior del invernadero, por medio de las aberturas situadas en el lado opuesto de los mismos (Romantchik et al., 2020), cuando los ventiladores funcionan a una velocidad de rotación constante, el caudal y la dirección del flujo en el invernadero generalmente son constantes con el tiempo (Teitel et al., 2010).

2.1.1 Extractores de aire

El trabajo de Romantchik et al. (2019) presenta los resultados y conclusiones de simulaciones en 2d y 3d, en el cual se analizó el comportamiento de flujo del aire de un extractor axial con un difusor eólico y deflector cónico. Se diseñaron un conjunto de extractores de aire con diferente número de aspas y ángulo de ataque y por CFD se realizaron simulaciones del flujo de aire al interior de un túnel eólico, presentando los resultados y análisis de velocidad, par y potencia del motor, así como los ángulos de apertura y flujo generado en el sistema. En el trabajo se concluyó que la velocidad del aire en la salida del sistema siempre será superior que en la entrada debido al impulso proporcionado por las aspas del extractor. La implementación de un difusor eólico en la salida de estos sistemas permite direccionar la corriente de aire con una menor dispersión que sin difusor, obteniendo mayores valores de potencia del aire a una determinada distancia del extractor. Si se requiere instalar un sistema de recuperación de energía eólica residual a 0.5 m de la salida del sistema de extracción, se recomienda utilizar extractores axiales de tres aspas, pues en ese punto los valores de caudal generado y potencia eólica disponible son superiores para ese tipo de configuración.

El documento de Flores-Velázquez & Villarreal-Guerrero (2015) está conformado por la presentación del diseño de un conjunto de extractores con diferente número de aspas y ángulo de ataque del aire, con los que se analizó el patrón de

flujo del aire generado por simulaciones CFD al interior de un túnel de viento también se presentan los resultados de la simulación y el análisis del comportamiento de la velocidad del aire dentro del sistema. En la conclusión se demuestra que al obtener los valores de velocidad y flujo en los extractores de aire, se podrá estimar la cantidad de renovaciones del volumen de aire dentro de los invernaderos, lo cual permitirá controlar el gradiente térmico, humedad y presión del aire en este tipo de estructuras, por lo tanto, se podrá establecer la relación de parámetros geométricos de los extractores (número y ancho de aspas, ángulo de ataque y velocidad de rotación), acorde a los requerimientos de velocidad o caudal del aire en la aplicación a instalar.

Gil, (1988) hace una pequeña mención de los criterios a considerar en el invernadero para la cantidad y emplazamiento de extractores de aire necesarios en un invernadero y a partir de un ejemplo se dan recomendaciones para mejorar el funcionamiento de los extractores considerando su instalación y cantidad.

En el trabajo Flores-Velázquez et al, (2011), se realiza un análisis de funcionamiento de un extractor de aire a partir de la tasa de renovaciones del sistema de ventilación haciendo uso de un método de balance de masa del gas trazador y se considera robusto para determinar la tasa de ventilación. En las conclusiones se hace mención que la tasa de renovación de aire es insuficiente como parámetro para definir la eficiencia del sistema de ventilación, pues aun cuando ésta aumente, puede existir una distribución heterogénea de temperaturas producto del movimiento del aire.

2.1.2 Leyes de los extractores de aire.

Las leyes de los ventiladores están especificadas en la norma UNE 100-230-95, estas mencionan que las variables que comprenden a un ventilador son la velocidad de rotación el diámetro de la hélice o rodete, las presiones total, estática y dinámica, la potencia absorbida, el rendimiento y el nivel sonoro. Las leyes de los ventiladores están indicadas, bajo forma de relación de magnitudes,

en ecuaciones que se basan en la teoría de la mecánica de fluidos y su exactitud es suficiente para la mayoría de las aplicaciones (S&P, 2015).

2.1.3 Eficiencia de los extractores de aire

La selección de un extractor de aire algunos autores la realizan a través de la eficiencia cada uno explicando su propio concepto de dicho criterio, la eficiencia como criterio se puede definir como la relación entre la potencia transferida al flujo de aire y la potencia utilizada por el ventilador.

El Laboratorio de Sistemas Bioambientales y Estructurales (BESS), en su Departamento de Ingeniería Agrícola y Biología, Universidad de Illinois, es un laboratorio de investigación, el cual proporciona datos de ingeniería imparciales para ayudar en la selección y el diseño de edificios agrícolas. Las pruebas del laboratorio son de rendimiento para:

- Ventiladores agrícolas.
- Ventiladores circulantes agrícolas.

En las pruebas de rendimiento se considera una eficiencia, la cual es la relación entre caudal (Q) y potencia (P), con las unidades $\frac{cfm}{Watt}$ respectivamente. Los modelos de extractores evaluados se sometieron a pruebas con distinta presión estática, obteniendo así distintos caudales y por lo tanto diferentes eficiencias.

En la actualidad no existe realmente una única metodología o un único criterio para la selección de un ventilador/extractor, algunas fuentes de información considera el parámetro de eficiencia o en algunos casos solo el caudal, pero en realidad se cuentan con varios criterios que deberían ser considerados para obtener un resultado más confiable. Por ello se emplea una metodología por multicriterio de selección, misma que ya ha sido utilizada en diferentes trabajos como selección.

La eficiencia de un ventilador también se puede encontrar siendo mencionada en las “Leyes de los ventiladores”, siendo especificada por la norma UNE 100-230-

95, esta dice que la potencia absorbida por un ventilador varía con el cubo de su velocidad. Esto significa que, para una pequeña variación de velocidad de giro, la potencia se modifica considerablemente. Esto tiene grandes implicaciones desde el punto de vista de la eficiencia energética (EE), por ejemplo, al reducir 23.7% la velocidad de giro de las aspas del ventilador (en rpm), la potencia mecánica (en W) suministrada al ventilador se reduce un 56%. Las variables de potencia (W) y velocidad (RPM) están determinadas según las Normas Internacionales ISO 5801-96 (E) y WD 13348-1998 (Anderson, 2022).

2.2 Metodología multicriterio.

El uso de una metodología multicriterio es de utilidad cuando se debe tomar una decisión y se cuentan con varias alternativas, priorizando cada una de ellas para obtener la mejor selección.

Generalmente este proceso consta de tres pasos, en el primero se aplican los criterios de selección para descartar aquellas alternativas que no cumplan los criterios, en el segundo paso, se evalúan las alternativas en base a los criterios ya establecidos, el tercer paso es la priorización de las alternativas que han superado la etapa de evaluación para determinar qué alternativa es la más adecuada para el propósito (Pérez & Martínez, 2020).

2.2.1 Proceso analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP en sus siglas en inglés) fue desarrollado por Saaty y se ha identificado como un enfoque importante para la toma de decisiones multicriterio en materia de elección y priorización. Los procedimientos del AHP son aplicables tanto a la toma de decisiones individual como grupal (Lai et al., 2002).

El AHP utiliza comparaciones por pares entre los criterios de decisión y sigue los principios de condición recíproca, homogeneidad, dependencia y expectativas para priorizar cada criterio. Saaty como sus principales ventajas: unidad al proporcionar un modelo para la resolución de problemas, enfoque analítico y sistemático para resolver problemas complejos, capacidad de resolución de

problemas al abordar la interdependencia de los criterios, respeto de las estructuras jerárquicas en la toma de decisiones, medición de casos intangibles y cualitativos, coherencia en las prioridades, deseabilidad de las alternativas (Tavana et al., 2023).

El Proceso Analítico Jerárquico es uno de los sistemas más inclusivos considerados para la toma de decisiones con múltiples criterios, ya que permite formular el problema de forma jerárquica e integrar criterios tanto cuantitativos como cualitativos. El primer paso consiste en crear una jerarquía del problema. El segundo paso consiste en asignar un valor nominal a cada nivel de la jerarquía y crear una matriz de comparación por pares (Taherdoost, 2017).

2.3 Literatura citada

Anderson, I. F. (2022). Diseño industrial y electromecánico de un extractor de aire centrífugo de alta eficiencia energética para ambientes con Covid-19. Investigación Aplicada e Innovación I+i, 16. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/147583>

FAO. (2002). El cultivo protegido en clima mediterráneo. 14–53.

Flores Velázquez, J., & Ojeda Bustamante, W. (2015). Consideraciones agronómicas para el diseño de invernaderos típicos de México (1st ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. www.imta.gob.mx

Flores-Velázquez, J., Mejía-Saenz, E., Montero-Camacho, J. I., & Rojano, A. (2011). Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. Agrociencia, 45(5), 545–560. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/899>

Flores-Velázquez, J., & Villarreal-Guerrero, F. (2015). Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 6(2), 303–316. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Flores-Velázquez Jorge, Mejía-Saenz Enrique, Montero-Camacho Juan I., & Rojano Abraham. (2011). Analisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. Agrocienia. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n5/v45n5a2.pdf>
- Gil Ortega Ramiro. (1988). Refrigeración de invernadero. Retrieved April 13, 2025, from https://citarea.cita-aragon.es/bitstream/10532/991/1/10532-112_1.pdf
- Juárez Plata, A. Y. (2019). Diseño de un sistema de climatización para invernaderos utilizando energía solar [Instituto Tecnológico de Pachuca]. https://itp.itpachuca.edu.mx/pdf/repositorio_tesis/06200410.pdf
- Lai, V. S., Wong, B. K., & Cheung, W. (2002). Group decision making in a multiple criteria environment: A case using the AHP in software selection. *European Journal of Operational Research*, 137(1), 134–144. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00084-4)
- Pérez Ramírez, R., & Martínez Damián, M. Á. (2020). Modelo de decisión multicriterio para seleccionar los mejores proyectos productivos en el medio rural mexicano. 13. <https://doi.org/https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1470>
- Revathi, S., Sivakumaran, N., & Radhakrishnan, T. K. (2021). Design of solar-powered forced ventilation system and energy-efficient thermal comfort operation of greenhouse. *Materials Today: Proceedings*, 46, 9893–9900. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.409>
- Romantchik, E., Terrazas Ahumada, D., Isaias Martinez, J., & Santos Hernandez, A. M. (2020). Recuperación de energía eólica residual de extractores de aire en invernaderos. CIES2020 - XVII Congresso Ibérico e XIII Congresso Iberoamericano de Energia Solar, 3. <https://doi.org/10.34637/cies2020.1.3077>
- Romantchik Kriuchkova, E., Santos Hernández, A. M., Ríos Urbán, E., & Terrazas Ahumada, D. (2019). Air flow analysis of greenhouse extractors using CFD

- simulation. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(1), 1–14.
<https://doi.org/10.22201/FI.25940732E.2019.20N1.012>
- S&P. (2015). *Leyes de los ventiladores*. Soler & Palau: Hojas Técnicas.
<https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-leyes-de-los-ventiladores/>
- Taherdoost, H. (2017). Decision Making Using the Analytic Hierarchy Process (AHP); A Step by Step Approach. *International Journal of Economics and Management Systems*, 2. <http://www.ahooraltld.com><http://www.hamta.org>
- Tavana, M., Soltanifar, M., & Santos-Arteaga, F. J. (2023). Analytical hierarchy process: revolution and evolution. *Annals of Operations Research*, 326(2), 879–907. <https://doi.org/10.1007/S10479-021-04432-2>
- Teitel, M., Atias, M., & Barak, M. (2010). Gradients of temperature, humidity and CO₂ along a fan-ventilated greenhouse. *Biosystems Engineering*, 106(2), 166–174. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2010.03.007>

3 ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN EXTRACTOR DE AIRE CON UNO Y DOS AEROGENERADORES SIMPLES

3.1 Resumen

Siendo la ventilación de un invernadero uno de sus parámetros más importantes es necesario evaluar el funcionamiento del extractor de aire, con los antecedentes de un ensamble con aerogenerador se sometió al extractor a distintas pruebas. La instalación de un aerogenerador a la salida del extractor es con el objetivo de observar la forma en que podría afectar al funcionamiento del extractor de aire la instalación de uno y dos aerogeneradores. Las pruebas se realizaron con usando una resistencia, y dos aerogeneradores, los cuales se colocaron a la salida del extractor con cono a distintas distancias de el, las mediciones que se obtuvieron fueron de velocidad de aire y amperaje, con dichas mediciones se calcularon el caudal y la potencia del motor, comparando los resultados entre los diferentes tratamientos que se efectuaron. Se concluyó que la instalación de uno y dos aerogeneradores no afecta de manera negativa en funcionamiento y parámetro del extractor a partir de la distancia de 60 cm.

Palabras clave: Extractor de aire, ventilación, aerogenerador.

Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Claudia Ramírez García
Director de Tesis: Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

3.2 Introducción

La capacidad de mantener la temperatura ideal para la producción de cultivos es una de las principales ventajas de los invernaderos (Kalbasinia et al., 2025), es por ello que es necesario un buen manejo de la ventilación, siendo así que las diversas variables ambientales, como la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, pueden afectar la producción de cultivos en invernadero. Entre ellas, las condiciones adecuadas de viento y temperatura son cruciales para el crecimiento de las plantas (Zhao, 2024).

La ventilación siempre ha sido un problema importante para los operadores de invernaderos en climas cálidos, ya que puede limitar la producción y las ganancias. Esto se logra generalmente mediante ventilación, ya sea mecánicamente, a través de extractores, o naturalmente, mediante el viento y la flotabilidad (Willits, 2003).

El uso de ventiladores para ventilar invernaderos es presente en varias partes del mundo y generalmente su instalación es en un extremo del invernadero, aspirando el aire ambiente a través de aberturas en el extremo opuesto (Teitel et al., 2010).

Un ventilador es una bomba de aire: una máquina que crea una diferencia de presión y provoca el flujo de aire. El impulsor realiza trabajo sobre el aire, proporcionándole energía estática y cinética, cuya proporción varía según el tipo de ventilador. Los ventiladores se clasifican generalmente como centrífugos o axiales, según la dirección del flujo de aire a través del impulsor (Buffington et al., 2018).

3.3 Materiales y métodos

El desarrollo de las pruebas de los extractores de aire en conjunto con uno y dos aerogeneradores se realizaron en el campo experimental de energías renovables y biosistemas, perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, ubicado dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México.

3.3.1 Equipos de prueba

El dispositivo extractor-aerogenerador consta de:

- Multifan 130 (Figura 1) de eje horizontal con un número de aspas de 5, el cono, la estructura que se realizaron en el taller de mecánica agrícola de la UACH y aerogenerador.
- El motor eléctrico de modelo N00218OS1P56 (Figura 1) monofásico de potencia 2 hp, 4 polos y voltaje de 127 V/220 V a 1725 rpm, el extractor con 5 aspas y un diámetro de 130 cm, nivel acústico de 65 dB, largo de aspas de 1.2 m.



Figura 1 - Modelo del motor de extractor de aire N00218OS1P56.

- El cono (Figura 2) está fabricado de lámina galvanizada calibre 26 acero ASTM A653, manufacturado en cuatro secciones y tiene un diámetro de la base menor de 1.2 m y un diámetro de la base mayor de 1.5 m con una altura de 0.605 m. La estructura está fabricada de PTR cuadrado de 1 pulgada calibre 18 de acero ASTM A513, consta de cuatro brazos que en sus extremos se comunican extractor y aerogenerador (Balderas Rivas, 2021).

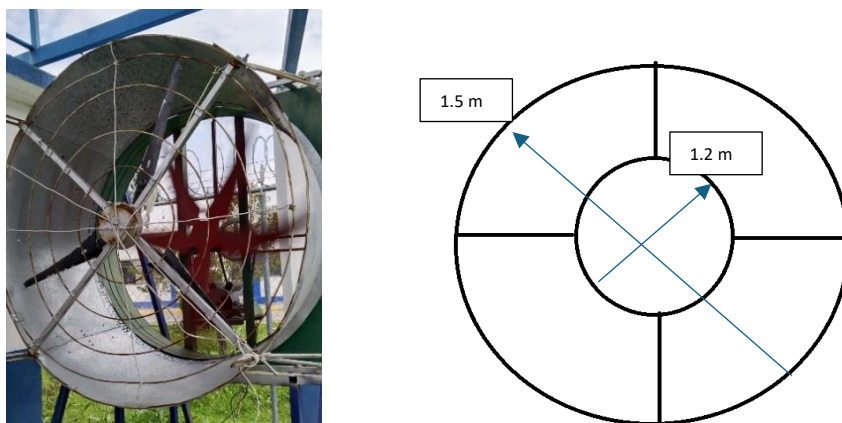


Figura 2 - Tamaño del cono en el extractor de aire.

- Resistencia (Figura 3) de 1.5 m de diámetro acorde al diámetro grande del cono a la salida del extractor de aire.



Figura 3 - Resistencia y primer aerogenerador simple.

- Aerogerador simple (Figura 4). Aerogenerador Air X de tres aspas, genera una potencia nominal de 400, una velocidad nominal de $12 \frac{m}{s}$, un diámetro de rotor de 1.2 m, se agregaron extensiones de 0.15 m para crear un diámetro de rotor de 1.5



Figura 4 - Aerogenerador simple.

- Segundo Aerogenerador (Figura 5). Aerogenerador Air X de 5 aspas, genera una potencia nominal de 500, una velocidad nominal de $12 \frac{m}{s}$, un diámetro de rotor de 1.2 m.

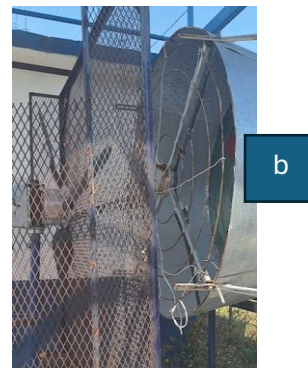


Figura 5 - Segundo Aerogenerador (a) y primer aerogenerador (b).

3.3.2 Instrumentación

- Para realizar las mediciones de velocidad de aire en los experimentos se utilizaron dos anemómetros, el modelo Steren HER-445 (Figura 6) con un alcance hasta $30 \frac{m}{s}$, y una resolución de 0.01 m/s.



Figura 6 – Anemómetro.

- Las mediciones de amperaje se realizaron con el multímetro de gancho Truper Mut-202 (Figura 7) con un rango de medición de 60 A – 1,000 A. En el caso del voltaje se hace uso del especificado en el modelo del motor del extractor de aire.



Figura 7 - Multímetro Truper Mut – 202.

3.3.3 Tratamientos

Las pruebas en las que se realizaron las mediciones son las siguientes:

- 1- Extractor con cono
- 2- Extractor con cono y aerogenerador simple en movimiento
- 3- Extractor con cono, aerogenerador simple sin movimiento y resistencia
- 4- Extractor con cono, aerogenerador simple en movimiento y resistencia
- 5- Extractor con cono y dos aerogeneradores.

Las mediciones de velocidad de aire (Figura 8) en cada prueba se repitieron tres veces con cada instrumento de medición en entrada de aire, cambiando la resistencia a diferentes distancias del extractor (20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm y 140 cm), colocando el anemómetro en cada punto de medición durante 10 segundos, grabando video y vaciando todos los datos que aparezcan en un documento Excel, a partir de estos se realizó un promedio de velocidad de aire para cada uno de los anillos en cada punto de medición, este resultado fue usado para el cálculo del caudal de entrada.



Figura 8 - Mediciones a la entrada del extractor en conjunto con un aerogenerador y una resistencia.

Los puntos de medición (Cuadro 1) se realizaron en la entrada del extractor a diferentes distancias, considerando el diámetro de salida de 1.5 m y un diámetro de entrada de 1.2 m, dividiendo las circunferencias en 4 anillos (Figura 9), donde se colocó el anemómetro justo a la mitad, y se midió del lado izquierdo, en cuatro puntos diferentes, uno por cada anillo.

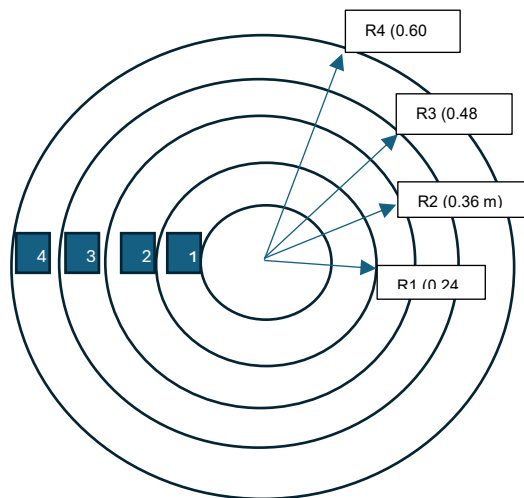


Figura 9 - Distancia del centro a cada anillo (radios) a la entrada del extractor.

Cuadro 1 – Distancia del centro al punto de medición

Puntos de medición (m)		
Entrada	4	0.54
	3	0.48
	2	0.24
	1	0.12

Las mediciones en cada tratamiento se realizaron en horario similares, retirando y agregando después de cada repetición el aerogenerador del extractor con cono.

Después de cada repetición sin aerogenerador y obteniendo las mediciones se agregó el aerogenerador justo fuera del cono tomando las mediciones con él y así sucesivamente hasta lograr tres repeticiones de cada tratamiento, estos dos tratamientos se realizaron el mismo día y en el mismo horario para asegurar que los resultados sean los más precisos posibles sin verse muy afectados por los factores ambientales.

3.3.4 Parámetros

Las mediciones obtenidas en cada una de las pruebas se comparan entre sí, obteniendo los valores máximos y mínimos, y en qué circunstancias se presentan.

3.3.4.1 Parámetros que manipular

- a) Las distancias de la resistencia (0.20 m, 0.40 m, 0.60 m, 0.80 m, 1 y 1.2 m).
- b) Las distancias del segundo rotor (0.20 m, 0.40 m, 0.60 m, 0.80 m, 1 y 1.2 m).
- c) Aerogenerador simple.
- d) Segundo aerogenerador.

3.3.4.2 Parámetros que medir

- 1. Amperaje del motor del extractor de aire
- 2. Velocidad del aire de entrada del extractor

3.3.4.3 Parámetros por calcular:

A continuación, se presentan los parámetros que se calcularon con los datos obtenidos a través de las mediciones.

Caudal (Q): Calculando el área de cada anillo (A_i) donde se realizan las mediciones multiplicando por la velocidad promedio en anillo (v_{ip}) sumando. Utilizando las ecuaciones:

$$Q = \sum_{i=1}^{n=5} (A_i * v_{ip}) \quad (1)$$

$$A_i = \pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad (2)$$

Donde Q es caudal ($\frac{m^3}{s}$); A_i = área donde pasa una velocidad (m^2); v_{ip} es velocidad de aire promedio del área de medición ($\frac{m}{s}$), en tres repeticiones en el punto de medición; r_i^2 = radio de anillos de medición; n es número total de anillos de medición; nd es número total de mediciones.

Para calcular la potencia eólica se debe primero calcular la velocidad promedio, ya que se miden las potencias de cada punto.

En el caso de la potencia eólica se detectó que una parte de la fórmula es parecida a la formula del caudal, en dado caso, lo que se realizo fue sustituir esa parte y directamente agregar la formula del Q , adecuándola a la fórmula de la P_{eo} .

Para el cálculo de la potencia eólica se usó la formula:

$$P_{eo} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^{n=5} (A_i * v_{ip}^3) \quad (3)$$

Donde P_{eo} es Potencia eólica (W); ρ es densidad a nivel del mar ($1.22 \frac{kg}{m^3}$); A_i es área donde pasa la velocidad de aire (m^2); V_{ip} es velocidad de aire promedio en un punto de medición ($\frac{m^3}{s}$);

- Potencia eléctrica: En este caso se estarán usando los resultados obtenidos en las mediciones.

$$P_e = A * V$$

(4)

Donde P_e es potencia eléctrica (W); A es amperaje (A); V es voltaje (V).

3.4 Resultados y Discusión

3.4.1 Velocidad de entrada y salida en extractor con cono

Los caudales de entrada y salida son iguales entre sí, pero sus velocidades son distintas, siendo la de salida mayor y la de entrada (Figura 10) menor, pero gracias a su ángulo de giro de la velocidad de aire de salida los caudales son iguales, lo mismo sucede con las potencias de aire, que al existir un impulso la potencia de aire de salida termina por ser mayor.

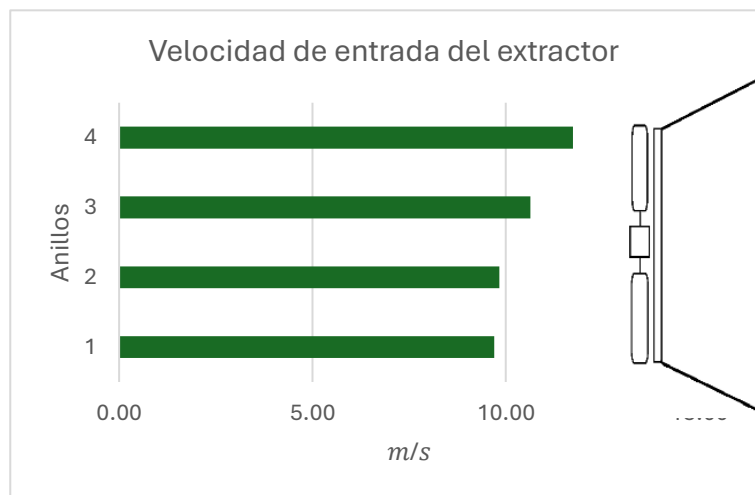


Figura 10 - Velocidad promedio de aire en extractor con cono.

3.4.2 Caudal de entrada

En el caudal de entrada en las diferentes pruebas (Figura 11), se observó que en la distancia de 60 cm (la resistencia y el segundo aerogenerador) es cuando el caudal de entrada empieza a aumentar en cada uno de los tratamientos, siendo el más alto en la prueba con el segundo aerogenerador con $12.49 \frac{m^3}{s}$, se vio un aumento de $0.37 \frac{m^3}{s}$, equivalente al 3%, en comparación con el caudal de entrada del extractor únicamente con el cono.

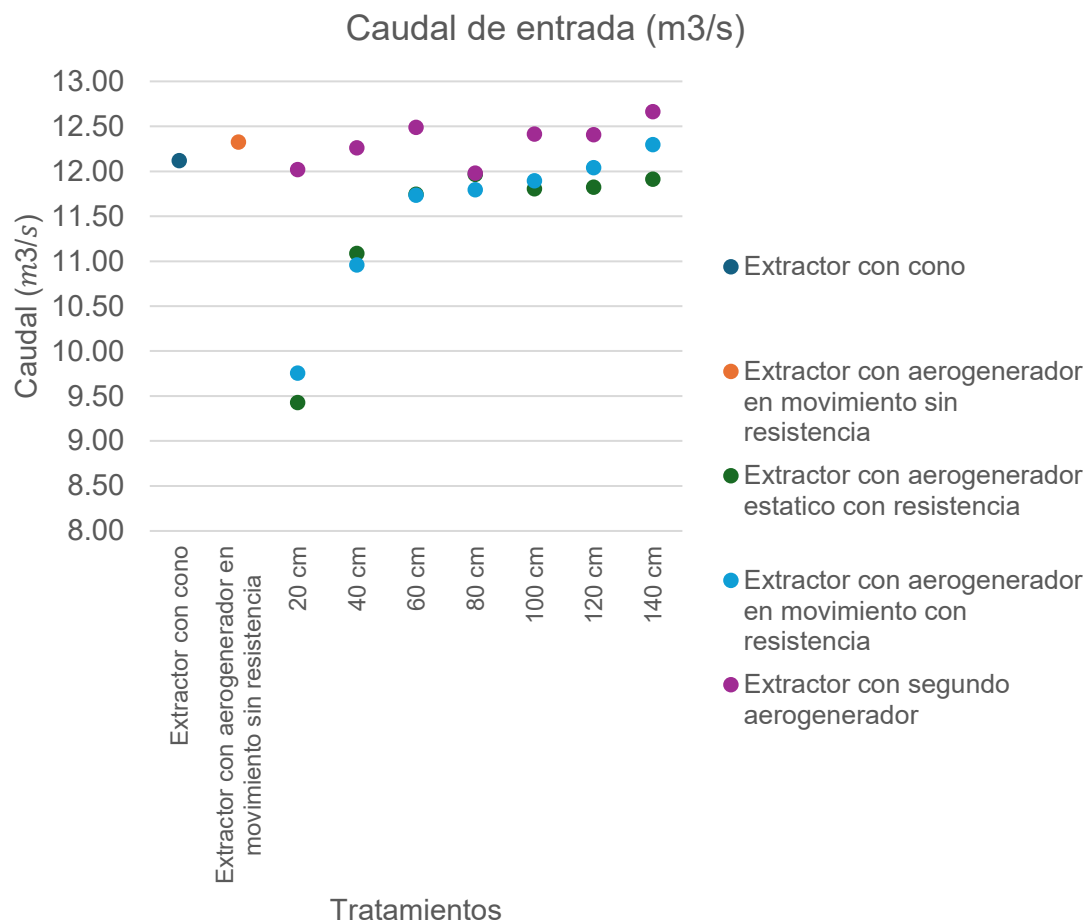


Figura 11 - Caudal de aire en la entrada del extractor en los diferentes tratamientos.

3.4.3 Potencia de aire

Los resultados de la potencia de aire de entrada del extractor de aire en los diferentes tratamientos (Figura 12), se observó que la menor potencia de aire se

presentó en los 20 cm (resistencia y segundo aerogenerador), y se empezó a ver un aumento en los 60 cm, siendo el tratamiento más alto con dos aerogeneradores, la potencia de aire de entrada más alta se presentó en los 140 cm alejado el segundo aerogenerador del extractor con 999 W, un aumento de más del 17%, la segunda potencia más alta se encontró en el mismo tratamiento pero a 60 cm con 964 W con un aumento de 114 W, equivalente al 13%, a comparación del extractor únicamente con cono.

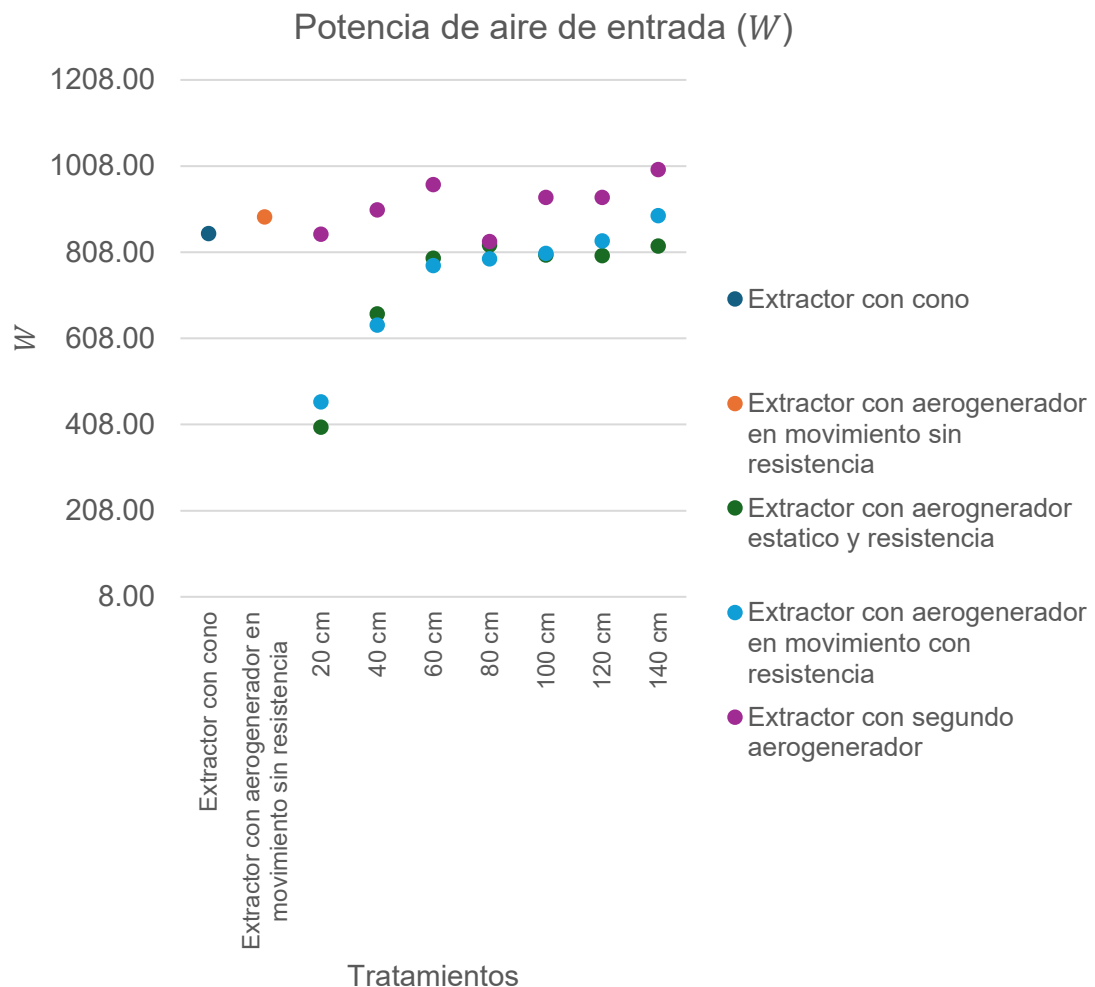


Figura 12 – Potencia de aire de entrada en los diferentes tratamientos.

3.4.4 Potencia del motor del extractor de aire

El amperaje se midió en el extractor con un aerogenerador en movimiento a su salida tomando tres repeticiones y obteniendo un promedio de ellas (Cuadro 2),

conociendo el amperaje se pudo deducir que el motor se encontró trabajando a 120 V, esto permitió obtener la potencia del motor durante este tratamiento (Cuadro 2).

En los dos tratamientos presentes la menor potencia se encuentra en el tratamiento con los aerogeneradores a 80 cm de distancia del extractor de aire con 1635 W de potencia.

Cuadro 2 - Potencia del motor.

Tratamientos	Amperaje	Voltaje	Pm (W)	
Un aerogenerador en movimiento a la entrada del extractor	14	120	1697	
Distancias (cm)				
Extractor con dos aerogeneradores	20	13.7	120.0	1639.1
	40	14.0	120.0	1681.4
	60	13.9	120.0	1666.7
	80	13.6	120.0	1635.5
	100	14.2	120.0	1702.7
	120	14.1	120.0	1694.4
	140	14.2	120.0	1700.7

3.5 Conclusiones

- Al acercarse una resistencia al extractor de aire se empieza a afectar el caudal de entrada desde los 40 cm que disminuye hasta un 9% en el tratamiento con aerogenerador en movimiento y una resistencia a comparación del caudal presentado en el extracto únicamente con cono
- El caudal de entrada se ve aumentado en un 3% en el tratamiento de extractor con dos aerogeneradores en movimiento en la distancia de 60 cm
- En la potencia de aire la más alta se presentó en el tratamiento con dos aerogeneradores a una distancia de 140 cm con un aumento de 17%
- La potencia del motor no sufre cambios negativos al agregarle uno y dos

aerogeneradores a la salida del extractor, incluso teniendo una disminución con dos aerogeneradores comparado con un solo aerogenerador.

- El actual extractor que se está utilizando puede ser sustituido por una alternativa obtenida a partir de una metodología multicriterio lo cual permitirá obtener mejores resultados que los presentados durante las pruebas

3.6 Literatura citada

Buffington, D. E., Bucklin, R. A., Henley, R. W., & McConnell, D. B. (2018). Fans For Greenhouses. EDIS, 2018(2). <https://doi.org/10.32473/EDIS-AE020-2002>

Kalbasinia, A., Jafari, M., Kouhikamali, R., Sadeghi, M., Nikbakht, A., & Tayefi, A. (2025). Application of computational fluid dynamics (CFD) for optimal temperature sensor placement in a greenhouse equipped with a pad-fan cooling (PFC) system. Smart Agricultural Technology, 12, 101109. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2025.101109>

Teitel, M., Atias, M., & Barak, M. (2010). Gradients of temperature, humidity and CO₂ along a fan-ventilated greenhouse. Biosystems Engineering, 106(2), 166–174. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2010.03.007>

Willits, D. H. (2003). Cooling Fan-ventilated Greenhouses: a Modelling Study. Biosystems Engineering, 84(3), 315–329. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00270-2](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00270-2)

Zhao, H. (2024). Comprehensive Evaluation and Design Research on Greenhouse Fans Based on Response Surface Methodology. BIO Web of Conferences, 142. <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/202414201019>

4 METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE UN EXTRACTOR DE AIRE PARA INVERNADERO

4.1 Resumen

La selección adecuada de un extractor de aire permite una mejor eficiencia en el control de la temperatura, humedad y CO₂ en el invernadero, usando una metodología para su selección multicriterio y el método AHP, tomando en consideración diversos parámetros (caudal, potencia del motor, presión, etc.), analizando cada uno de los resultados en cuatro marcas diferentes. El objetivo del trabajo es desarrollar una metodología multicriterio de selección para un óptimo extractor de aire en un invernadero. El método AHP consta de realizar comparaciones de matrices pareadas de los criterios para definir el peso de cada uno y así conocer cual tiene mayor relevancia para la selección del extractor. Posteriormente se valoró cada una de las alternativas de la misma manera con comparaciones entre ellas por cada uno de los criterios para al final conocer cuál es el mejor entre modelos de 4 marcas distintas (Sodeca, Ventdepot, Acme y S&P) con alternativas de invernaderos. Los resultados demostraron la mejor alternativa de extractor de aire para cada alternativa de invernadero. Al evaluar los criterios de selección deben considerarse diferentes ponderaciones. En la actualidad no existe una única metodología o un único criterio para la selección del extractor, algunas fuentes consideran el parámetro de eficiencia o en algunos casos el caudal, pero en realidad se cuentan con varios criterios que deberían ser considerados para obtener un resultado más confiable. Se puede concluir que el uso de una metodología multicriterio facilita la selección de un óptimo extractor de aire

Palabras clave: Extractor de aire, metodología multicriterio, proceso analítico jerárquico.

Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Claudia Ramírez García
Director de Tesis: Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

4.2 Introducción

La ventilación es esencial en un invernadero. Mantener un clima favorable al interior implica evacuar el exceso de calor producido. En consecuencia, un buen diseño de los sistemas de ventilación de un invernadero ha de permitir un mejor control del clima (Flores-Velázquez et al., 2011). Por lo tanto, la distribución adecuada de los parámetros climáticos como la temperatura, la humedad y la concentración de CO₂ es uno de los principales factores que influyen en la uniformidad del crecimiento de los cultivos.

La ventilación de los invernaderos depende de la estructura del propio invernadero siendo que la ventilación mecánica incluye un ventilador que incrementa el flujo de salida del aire, dada que el uso de los ventiladores permite un control más preciso de la temperatura del invernadero (Flores-Velázquez & Villarreal-Guerrero, 2015). Los ventiladores succionan el aire exterior al interior del invernadero, por medio de las aberturas situadas en el lado opuesto de los mismos (Romantchik et al., 2020), cuando los ventiladores funcionan a una velocidad de rotación constante, el caudal y la dirección del flujo en el invernadero generalmente son constantes con el tiempo (Teitel et al., 2010).

Entonces la selección de un óptimo extractor de aire se vuelve de mayor importancia para mantener estable el clima dentro del invernadero, existen varias empresas de extractores que presentan sus productos para ser seleccionados, con sus características y es difícil de seleccionar. En la actualidad no existe realmente una única metodología o un único criterio para la selección de un ventilador/extractor, algunas fuentes de información considera el parámetro de eficiencia o en algunos casos solo el caudal, pero en realidad se cuentan con varios criterios que deberían ser considerados para obtener un resultado más confiable. Por ello el objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología de selección de un extractor tomando en cuenta sus parámetros, indicadores y criterios.

La selección multicriterio lejos de ser considerados elementos infalibles y certeros, cuya utilización permite encontrar una solución óptima y definitiva, son

una base, sustentada en elementos científicos, que aporta mejoras distintivas para asumir una decisión (Berumen & Llamazares Redond, 2007).

Existen diferentes tipos de métodos de decisión multicriterio discretos siendo los principales: Ponderación lineal (scoring), utilidad multiatributo (MAUT), relaciones de sobreclasificación, análisis jerárquico (AHP). En la selección del extractor se utiliza la metodología de análisis jerárquico (AHP) ya que optimiza la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios o atributos, mediante la descomposición del problema en una estructura jerárquica (Berumen & Llamazares Redond, 2007), dicha metodología se basa en la ponderación y comparación de variables que van a influir de manera positiva o negativa sobre la actividad u objeto de decisión, en este caso del extractor de aire (Benítez & Bojórquez Tapia, 2021).

Diferentes autores han hecho uso de una metodología de multicriterio de selección, en este contexto en específico en la metodología AHP, por ejemplo, Curchod et al. (2021) realizaron una decisión multicriterio para facilitar la tarea de decidir la selección de candidatos a un determinado puesto de trabajo, consideraron 4 criterios y 11 subcriterios, considerando 11 alternativas, siendo los postulantes, permitiendo así obtener un orden de desempeño de cada uno, y emitir un dictamen correspondiente al objetivo. El grupo decisor es acordar un orden de mérito de los aspirantes. En el modelo propuesto se utiliza distancia a un ideal para lograr un orden mérito individual. Se sintetizan e integran las prioridades individuales proporcionadas por los múltiples evaluadores en una decisión única mediante la aplicación de la media geométrica.

De la misma manera Molina Pfennig & González-Baheza, (2020) aplicaron la metodología multicriterio para evaluar el índice de aptitud de los municipios de Baja California Sur para la instalación de concentradores fotovoltaicos, usando 6 criterios socioambientales, red de carretera, pendiente del terreno, red eléctrica, radiación solar anual promedio, Tipo de localidad y Temperatura anual promedio con 5 alternativas, se determinaron los indicadores predominantes del modelo y se asignó un valor a cada criterio, obteniendo el municipio muy alta aptitud para

la instalación, a diferencia de Churchod et al. (2021) se delimitaron los criterios, para la reducción de alternativas, definiendo un mínimo y un máximo de cada uno.

Hernández Zaragoza et al. (2019) en su trabajo realizaron una evaluación de multicriterio para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en el estado de Durango, México considerando criterios y subcriterios climáticos, edafológicos y topográficos. Los valores asignados fueron estandarizados, ponderados y ordenados mediante matrices de comparaciones pareadas. En su trabajo combinando el multicriterio con un multiobjetivo para identificar la mejor especie a plantar en la zona bajo cuatro escenarios de decisión: turno de producción, calidad de la madera, supervivencia y susceptibilidad a plagas y enfermedades.

Rivera et al. (2010) aplicaron una metodología multicriterio AHP en imágenes SIG generando mapas temáticos (climáticos y edafológicos) relacionados con las variables del cultivo de caña para conocer la productividad del cultivo y aptitud agroclimática en la región de Huasteca.

Herbas Baeny & Linera Canedo. (2023) establecen las bases teóricas y metodológicas para un modelo de Análisis Multicriterio (AMC) en la Evaluación Integrada de Impactos Sociales y Ambientales (EISA) en proyectos hidroeléctricos en Bolivia, se subraya el AMC como un enfoque integrado, considerando criterios sociales, económicos y ambientales sin reducirlos a una sola métrica. Se destacan criterios clave como la biodiversidad, uso del suelo, ruido, reducción de gases de efecto invernadero, área de influencia, consulta previa y pueblos indígenas. El enfoque AMC proporciona una herramienta adaptable y estructurada para evaluar proyectos hidroeléctricos, considerando su viabilidad económica, impacto ambiental y aceptación social.

Javez Valladares et al. (2025) utilizan el método AHP en la selección de proveedores mejorando así su eficiencia operativa y su respuesta a las

variaciones del mercado al gestionar proactivamente el inventario y optimizar la selección de proveedores.

Aguirre González et al. (2022) hicieron uso de un método multicriterio para la selección de docentes universitarios, utilizando el método se ofrece flexibilidad en la cantidad de perfiles y criterios que sean considerados por parte de la administración central de la institución al momento de dar apertura a la convocatoria, por lo cual se concibió como un mecanismo de selección viable para ser replicado en casos similares, dentro o fuera de la institución. La implementación de estas metodologías multicriterio permitió acercarse a la objetividad requerida frente a los procesos de selección en cualquier contexto, particularmente, la selección de perfiles docentes.

Mendoza et al. (2019) aplicaron el método AHP para la toma de decisión con juicios de expertos y se concluyó que la aplicación de un juicio de expertos enfocado en un Proceso analítico jerárquico (AHP) constituyó un elemento de gran utilidad y de soporte en la elección del modelo matemático analítico como la técnica ideal para el diseño de un modelo de inventario administrado por el proveedor (VMI) que cumpliera con todos los criterios y elementos establecidos.

Rivera Aguilar et al. (2010) utilizaron la metodología AHP de multicriterio para las zonas con potencial de producción del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca en un ambiente SIG, los resultados demostraron que el uso de las dos herramientas puede servir además como herramienta efectiva de bajo costo.

Algunos autores realizan la selección del extractor a través de la eficiencia, la cual se puede definir como la relación entre la potencia transferida al flujo de aire y la potencia utilizada por el ventilador. En el laboratorio Bionvironmental and Structural Systems Laboratory & Universitu of Ilinois (BESS) considera parámetros de rendimiento, con una propuesta de eficiencia, en donde hacen uso de una relación entre caudal (Q) y potencia (P), con las unidades $\frac{cfm}{Watt}$ respectivamente.

El objetivo general de la investigación fue desarrollar una metodología multicriterio utilizando el método AHP, el cual permite modificar el rango de los criterios dependiendo su importancia por lo tanto se pueden generar distintas situaciones.

4.3 Materiales y métodos

En la aplicación de la metodología de selección AHP se hizo uso de las recomendaciones presentadas en documento realizado por Departamento Nacional de Planeación de Colombia y la Universidad Autónoma de México (Benítez & Bojórquez Tapia, 2021).

El método se centra en las comparaciones pareadas, esto quiere decir que se priorizan los criterios de dos en dos, para la asignación de los valores numéricos para cada comparación se utiliza la escala de Saaty (1987) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Escala de evaluación.

Importancia	Valor
C1 es igual de importante a C2	1
C1 es entre igual y moderadamente más importante que C2	2
C1 es moderadamente más importante que C2	3
C1 es entre moderado y fuertemente más importante que C2	4
C1 es fuertemente más importante que C2	5
C1 es entre fuerte y muy fuertemente más importante que C2	6
C1 es muy fuertemente más importante que C2	7
C1 es entre muy fuerte y extremadamente fuerte más importante que C2	8
C1 es extremadamente más importante que C2	9

Para la construcción de la matriz de comparaciones pareadas (M1) de 6x6 se utiliza también una escala de jerarquías (Figura 15) ya que si se supone que “C1 es moderadamente más importante que C2” entonces le corresponde el valor numérico de 3, y cuando se evalúan a la inversa entonces es “C2 es moderadamente menos importante que C1” le corresponde el valor 1/3.



Figura 13 – Escala evaluativa a la inversa (Rivera Aguilar et al. 2010)

Para la realización de la Matriz de peso individual del criterio (M2) se debe obtener la suma vertical de cada uno de los criterios en la M1, para posteriormente dividir cada una de las comparaciones pareadas entre el resultado de la suma correspondiente, los resultados de esto corresponderán a la M2 formando una matriz de 6x6.

Una de las razones por la que la metodología AHP es tan útil para la selección multicriterio es por la capacidad de definir si es consistente o no en sus comparaciones pareadas, comprobando que las matrices que se construyen son de manera lógica, la forma de lograrlo es cuando esta consistencia denominada Cociente de consistencia (*CR*) es menor a 0.1.

Para el cálculo de dicho cociente se realiza el siguiente procedimiento con las ecuaciones (1,2)

Primero se debe calcular el índice de consistencia (*CI*) con la ecuación (5) esto después de obtener la Matriz de comparaciones pareadas (M1), la cual se somete a comparaciones de matrices entre la M1 y la matriz con el peso individual del criterio (M2), esta comparación se realiza por criterio, esto significa que las comparaciones se realiza fila por fila, una fila de la M1 con una fila de la M2 para después dividirlo entre el peso individual de cada criterio, representada por de los valores que se obtengan se realiza un promedio y el resultado corresponde al valor máximo de la M1.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1} \quad (5)$$

Donde CI es el índice de consistencia; λ_{max} es el promedio de la comparación de la $M1$ por la $M2$, para esta comparación se utiliza dos matrices de 6×1 , correspondientes a las filas de la $M1$ y las filas de la $M2$, las comparaciones se realizan fila por fila; y n es el número de criterios.

Posteriormente se puede obtener el CR con la ecuación (6), deberá ser menor a 0.1 para demostrar que la $M1$ es lógica y aceptable:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Donde CR es el cociente de consistencia; CI es el índice de consistencia; RI es índice de azar, este dependerá del número de criterios y está dado por la escala fundamental de Saaty (1987) en este trabajo se manejan 6 criterios que corresponde a 1.24.

4.3.1 Criterios de selección

Los criterios utilizados para la selección del ventilador extractor en este proyecto se basan en información obtenida de artículos y manuales de ventilación, centrándose en aspectos técnicos y comerciales, “Las Leyes de los ventiladores” mencionan los aspectos técnicos que se deben cumplir en un ventilador, esto considerando las normas UNE 100-230-95, ISO, 5801-96 (E) y WD 13348-1998, las cuales consideran aspectos técnicos (S&P, 2015), y también se agregan aspectos económicos dentro de los criterios (Cuadro 4: C1-C4). Algunos criterios son seleccionados y calculados como se menciona Romantchik et al. (2020), con el propósito de incorporar un aerogenerador al sistema de extracción para la recuperación de energía o mejorar el rendimiento de las características del extractor (Cuadro 4: C6-C7).

Cuadro 4 - Criterios de selección

Catalogo		Calculados	
C1	Caudal (Q)	C5	Potencia del aire de entrada
C2	Potencia del motor (W)	C6	Velocidad media del aire de entrada
C3	Precio (MXN)	C7	Eficiencia útil
C4	Masa (kg)		

La potencia de aire de entrada del extractor se calculó con la ecuación (7):

$$Pa = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (7)$$

Donde $\rho = 1.24 \frac{kg}{m^3}$ correspondiente a la densidad de aire; $A = \pi * \frac{d^2}{4}$, m^2 correspondiente al área del extractor; v es velocidad promedio del aire en la entrada del extractor en $\frac{m}{s}$.

El cálculo de la velocidad de aire se obtiene a partir de la ecuación (8)

$$v = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

Donde Q es Caudal de aire que presenta el extractor en $\frac{m^3}{s}$.

En el cálculo de la eficiencia útil se utiliza la ecuación (9), desarrollada por Romantchik et al. (2020):

$$\eta_{util} = \frac{P_{util}}{P_{usada}} = \frac{P_a}{P_m} \quad (9)$$

Donde η_{util} es eficiencia útil; P_{util} es la potencia utilizada para mover el aire y disminuir la temperatura del invernadero siendo su equivalente la Potencia de aire de entrada correspondiente a P_a ; P_{usada} es la potencia eléctrica consumida

por el motor del extractor siendo su equivalente la Potencia del motor representada por P_m

4.4 Resultados y Discusión

4.4.1 Características del invernadero

Para la metodología multicriterio, se consideran tres alternativas de invernadero con diferentes dimensiones y características, seleccionando los modelos de extractor, de tres marcas distintas (Acme, Soler&Palau y Sodeca) que cumplieran con el caudal de aire en cada alternativa (Cuadro 5).

En el cálculo del caudal se consideraron los valores registrados en Inglaterra y Holanda muestran que es necesaria una capacidad de ventilación de 40 renovaciones de aire por hora (40 volúmenes de invernadero por hora), para alcanzar condiciones deseables en un invernadero con ventilación mecánica (Arellano-García et al., 2011.).

Cuadro 5 – Alternativas de invernaderos

Num.	Dimensiones (a x b x c) (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Caudal (m ³ /h)
1	30 x 10 x 5	300	1500	60,000
2	20 x 10 x 4	200	750	30,000
3	10 x 10 x 3	100	375	15,000

4.4.2 Aplicación de la metodología en criterios de selección

Obteniendo la Matriz de comparaciones pareadas (M1) de los criterios (Cuadro 6) con la ayuda de los expertos en el tema, al asignarle un valor a cada uno de los criterios al comparar en pares, se presentan de la siguiente manera:

Cuadro 6 - Matriz 6x6 de comparaciones pareadas de los criterios

Criterio	P_m (W)	Precio (MXN)	Masa (kg)	P_a (W)	V_a (m/s)	Eficiencia
P_m (W)	1	1/3	2	1/8	1/7	1/6
Precio (MXN)	3	1	5	1/5	1/7	1/3
Masa (kg)	1/2	1/5	1	1/5	1/9	1/3

Pa (W)	8	5	5	1	1/3	3
Va (m/s)	7	7	9	3	1	4
Eficiencia	6	3	3	1/3	1/4	1
Suma	25.50	16.53	25.00	4.86	1.98	8.83

Pm: Potencia del motor, Pa: Potencia del aire, Va: Velocidad del aire

La M2 (6x6) que se obtiene es con el peso del criterio, realizando el procedimiento con las divisiones de las comparaciones de criterios entre la suma. En la construcción de la M1 (Cuadro 7) se realiza la comparación pareada de los criterios de acuerdo con las Cuadros 1 y 2, posteriormente se suma verticalmente los resultados. Para la realización de la Matriz de peso individual del criterio (M2), que se muestra en el Cuadro 6, se divide cada una de las comparaciones pareadas entre el resultado de la suma correspondiente de M1, y posteriormente promedian horizontalmente obteniendo así el peso individual del criterio. El producto con mayor número sale seleccionado como mejor entre la base de datos. En los resultados se puede apreciar que los tres criterios que se priorizan son Potencia del aire, Velocidad de aire y eficiencia

Cuadro 7 – Matriz 6x6 para determinar el Peso Individual del criterio

Criterio	Pm (W)	Precio (MXN)	Masa (kg)	Pa (W)	Va ($\frac{m}{s}$)	Eficiencia	Peso del criterio
Pm (W)	0.04	0.02	0.08	0.03	0.07	0.02	0.04
Precio (MXN)	0.12	0.06	0.20	0.04	0.07	0.04	0.09
Masa (kg)	0.02	0.01	0.04	0.04	0.06	0.04	0.03
Pa (W)	0.31	0.30	0.20	0.21	0.17	0.34	0.25
Va ($\frac{m}{s}$)	0.27	0.42	0.36	0.62	0.51	0.45	0.44
Eficiencia	0.24	0.18	0.12	0.07	0.13	0.11	0.14

Después de obtener los pesos de los criterios se evalúa su cociente de consistencia, demostrando que es lógica al obtener un resultado menor a 0.1, por lo tanto, pueden ser usados para evaluar las alternativas de modelos de extractores para cada una de las alternativas de invernadero. Primeramente, se

debe considerar el cálculo de λ_{max} con las comparaciones de matrices 6x1 obtenidas de la M1 y M2 (Cuadro 8 y 9).

Cuadro 8 – Matriz 6x1 de M1 con el criterio de potencia del motor

Criterio	Pm (W)	Precio (mxn)	Masa (kg)	Pm (w)	Va (m/s)	Eficiencia
Pm (W)	1	1/3	2	1/8	1/7	1/6

Cuadro 9 – Matriz 6x1 de M2 con el criterio de potencia del motor

Criterio	Pm (W)	Precio (mxn)	Masa (kg)	Pm (w)	Va (m/s)	Eficiencia
Pm (W)	0.04	0.02	0.08	0.03	0.07	0.02

Con las comparaciones de dichas matrices criterio por criterio se obtiene los resultados de lo cuales se calcula el promedio para obtener λ_{max} .

Cuadro 10 – Resultados de las comparaciones de las matrices 6x1.

Potencia del motor	6
Precio	6
Peso	6
Potencia del aire	7
Velocidad promedio de aire	7
Eficiencia	7

Con la obtención de dicho promedio se puede calcular el cociente consistencia de la matriz (Cuadro 11).

Cuadro 11 - Cociente de consistencia de la matriz

λ_{max}	7
IC	0.11
CR	0.09

4.4.3 Aplicación de la metodología multicriterio para la selección del modelo de extractor

La metodología se aplicó a los modelos agrupados para cada alternativa de invernadero, con caudales de 15000, 30000 y 60000 $\frac{m^3}{h}$.

Para cada alternativa se formaron grupos de seis modelos (Matriz de 6x6) que cumplen con el caudal necesario y de ellos se selecciona el mejor modelo, y después se comparan entre ellos para finalmente obtener el mejor extractor de la base de datos para instalación.

Para obtener el peso individual de cada modelo se aplica el mismo procedimiento que con los criterios creando una matriz de 6x6 comparando por pares las seis alternativas de modelos, esta comparación se realiza por cada criterio. Posteriormente se multiplica por el Peso Individual de Criterio (M2) para obtener el Peso Global de las alternativas y por lo tanto cual es la mejor de todas.

Cuadro 12 - Aplicación de la metodología a modelos de 15,000 $\frac{m^3}{h}$.

Criterio Modelos	Pm (W) PICM	Precio (MXN) PICM	Masa (kg) PICM	Pa (W) PICM	Va ($\frac{m}{s}$) PICM	Eficiencia PICM	Peso global
hXA/P-4- 800/L1	<u>1491</u> 0.0225	<u>22,896</u> 0.0149	<u>32</u> 0.0107	<u>219</u> 0.0267	<u>9</u> 0.0514	<u>0.15</u> 0.0062	0.1125
HC-80-6T/H	<u>750</u> 0.0062	<u>21,849</u> 0.0123	<u>48</u> 0.0028	<u>543</u> 0.0654	<u>12</u> 0.1070	<u>0.72</u> 0.0458	0.3724
AXI BREEZE MXBRE-005	<u>249</u> 0.0148	<u>19,751</u> 0.0159	<u>45</u> 0.0045	<u>113</u> 0.0110	<u>7</u> 0.0248	<u>0.61</u> 0.0183	0.1299

HCH HFT	<u>550</u>	<u>24,191</u>	<u>47</u>	<u>233</u>	<u>9</u>	<u>0.42</u>	0.1366
HCT 80-8T-0.75	0.0093	0.0066	0.0033	0.0220	0.0419	0.0079	
hXA/P-6-800/h	<u>746</u>	<u>34,785</u>	<u>22</u>	<u>478</u>	<u>12</u>	<u>0.64</u>	0.2872
	0.0074	0.0033	0.0294	0.0396	0.0862	0.0270	
HXT-630/H	<u>1119</u>	<u>19,727</u>	<u>29</u>	<u>651</u>	<u>16</u>	<u>0.58</u>	<u>0.4969</u>
	0.0025	0.0330	0.0166	0.1366	0.2870	0.0213	

Pm: Potencia del motor; Pa: Potencia del aire; Va: Velocidad del aire; PIC: Peso Individual del Criterio con respecto al modelo

Para el invernadero número 3, de 375 m^3 de volumen, se seleccionaron extractores de entre 165 modelos que cumplieran con el caudal requerido de $15\,000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, obteniendo una matriz de 6x6, como se muestra en la Cuadro 11. Posteriormente, se aplicó la metodología multicriterio, resultando la mejor opción el modelo HXT-630/H de Soler & Palau, con un caudal de $15,930 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, una potencia del motor de 1119 W, un precio de 19,727 MXN, una potencia de 651 W en Pa y una potencia de $16 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ en Va, y una eficiencia de 0,58.

De igual forma, entre los 165 modelos de extractores, se seleccionaron 6 para el invernadero número 2 (Cuadro 13)

Cuadro 13 - Aplicación de la metodología a modelos de $30,000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.

Criterio Modelos	Pm (W) PICM	Precio (MXN) PICM	Peso (kg) PICM	Pa (W) PICM	Va (m/s) PICM	Eficiencia PICM	Peso Global
HCH HFT	<u>3000</u>	<u>28,243</u>	<u>65</u>	<u>1711</u>	<u>11</u>	<u>0.57</u>	0.1823
HCT 90-4/8T-4	0.0094	0.0187	0.0060	0.0576	0.0577	0.0330	
HC-100-4T/H	<u>7500</u>	<u>104,413</u>	<u>193</u>	<u>1592</u>	<u>17</u>	<u>0.21</u>	0.1826
	0.0027	0.0069	0.0023	0.0295	0.0669	0.0096	
AEROWING MXAEW-013	<u>1491</u>	<u>29,399</u>	<u>65</u>	<u>592</u>	<u>9.6</u>	<u>0.4</u>	0.1412
	0.0148	0.0089	0.0042	0.0147	0.0400	0.0140	
HTP-100-4T-20	<u>3000</u>	<u>26,045</u>	<u>60</u>	<u>1831</u>	<u>18</u>	<u>0.61</u>	0.2898
	0.0067	0.0156	0.0088	0.0459	0.0838	0.0281	
HCH HFT	<u>4000</u>	<u>23,626</u>	<u>64</u>	<u>2623</u>	<u>21</u>	<u>0.66</u>	<u>0.4015</u>
HCT 80-6T-1	0.0045	0.0355	0.0076	0.1096	0.1844	0.0599	
HC-100-4T/L	<u>3729</u>	<u>22,895</u>	<u>49</u>	<u>1553</u>	<u>17</u>	<u>0.42</u>	0.2148
	0.0045	0.0481	0.0139	0.0398	0.0821	0.0265	

De igual manera, entre los 165 modelos de extractores, al seleccionar 6 para el invernadero número 2, el modelo mejor evaluado es el “HCH HFT HCT 80-6T-1”, con un caudal de $37,200 \frac{m^3}{h}$, una potencia de motor de 4000 W, un precio de 23,626 MXN, Pa 2623 W, Va $21 \frac{m^3}{s}$ y una eficiencia de 0.66.

Comparando resultados del Cuadro 11 y Cuadro 12 se puede considerar la instalación de dos extractores HXT-630/H, en lugar de HCH HFT HCT 80-6T-1.

Entre los 165 modelos examinados, y entre los 6 modelos correspondientes al invernadero número 3 (Cuadro 14).

Cuadro 14 - Aplicación de la metodología a modelos de $60,000 \frac{m^3}{h}$.

Criterio Modelos	$\frac{Pm (W)}{PICM}$	$\frac{\text{Precio (MXN)}}{PICM}$	$\frac{\text{Masa (kg)}}{PICM}$	$\frac{Pa (W)}{PICM}$	$\frac{Va (\frac{m^3}{s})}{PICM}$	$\frac{\text{Eficiencia}}{PICM}$	Peso Global
HCH HFT HCT 100-4T-15	$\frac{11,000}{0.0069}$	$\frac{48,127}{0.0315}$	$\frac{185}{0.0059}$	$\frac{6562}{0.0546}$	$\frac{24}{0.0985}$	$\frac{0.6}{0.0479}$	0.2452
HCH HFT HCT 100-4T-20	$\frac{15,000}{0.0033}$	$\frac{76,011}{0.0202}$	$\frac{179}{0.0070}$	$\frac{7741}{0.0686}$	$\frac{25}{0.1241}$	$\frac{0.52}{0.0399}$	0.2630
AXIMONSTER MXAMT-002	$\frac{3,729}{0.0167}$	$\frac{83,497}{0.0142}$	$\frac{148}{0.0127}$	$\frac{1706}{0.0187}$	$\frac{12}{0.0458}$	$\frac{0.46}{0.0262}$	0.1344
HGT/ HGTX-125-4T/6-20	$\frac{15,000}{0.0047}$	$\frac{163,621}{0.0081}$	$\frac{414}{0.0033}$	$\frac{4103}{0.0407}$	$\frac{18}{0.0760}$	$\frac{0.27}{0.0153}$	0.1482
HGT/ HGTX-125-4T/3-15	$\frac{11,000}{0.0083}$	$\frac{155,509}{0.0106}$	$\frac{394}{0.0044}$	$\frac{3971}{0.0303}$	$\frac{18}{0.0581}$	$\frac{0.36}{0.0205}$	0.1322
HCH HFT HCT 100-4/8T-20	$\frac{15,500}{0.0028}$	$\frac{71,508}{0.0216}$	$\frac{175}{0.0087}$	$\frac{7936}{0.0811}$	$\frac{26}{0.1491}$	$\frac{0.51}{0.0329}$	0.2962

Entre los 165 modelos examinados, y entre los 6 modelos correspondientes al invernadero número 1, el mejor modelo es el HCH HFT HCT 100-4/8T-20 de la marca SODECA, con un caudal de $72.450 \frac{m^3}{h}$, una potencia del motor de 15.500

W , un precio de 71.508 MXN, una Pa de 7.936 W , una Va de $26 \frac{m^3}{s}$. y una eficiencia de 0,51.

4.4.4 Alternativas resultantes de la aplicación de la metodología

Comparando los resultados de los Cuadros 12,13 y 14, se puede considerar que para caudal de $60,000 \frac{m^3}{h}$. la instalación de 4 extractores HXT-630/H o también la instalación de 2 de HCH HFT HCT 80-6T-1.

Esto dependerá de las necesidades del invernadero, ya que al analizar los resultados de la aplicación de la metodología se apreció que al instalar un numero adecuado de cada modelo se cumple el parámetro de cauda para el invernadero de volumen de $1500 m^3$

Cuadro 15 - Alternativas para invernadero de $1500 m^3$

Q (m ³ /h)	Modelo	Num.	$\frac{Pm}{(W)}$ PICM	Precio (MXN) PICM	$\frac{Masa}{(kg)}$ PICM	$\frac{Pa}{(W)}$ PICM	$\frac{Va}{(m/s)}$ PICM	$\frac{Eficiencia}{PICM}$	Peso Global
72,450	HCH HFT HCT 100- 4/8T-20	1	$\frac{15500}{0.0018}$	$\frac{71,508.49}{0.0086}$	$\frac{175}{0.0015}$	$\frac{7936}{0.0787}$	$\frac{26}{0.0558}$	$\frac{0.51}{0.0329}$	0.1463
74,400	HCH HFT HCT 80- 6T-1	2	$\frac{8000}{0.0056}$	$\frac{47,252.00}{0.0257}$	$\frac{128}{0.0058}$	$\frac{5246}{0.0304}$	$\frac{42}{0.0656}$	$\frac{0.66}{0.0599}$	0.1930
63,720	HXT- 630/H	4	$\frac{4476}{0.0120}$	$\frac{78,910.40}{0.0113}$	$\frac{116}{0.0088}$	$\frac{2604}{0.0137}$	$\frac{64}{0.1113}$	$\frac{0.58}{0.0213}$	0.1783

Nota: Las cantidades fueron multiplicadas por el número total de extractores necesarios para cada modelo.

La metodología multicriterio se aplicó a diferentes grupos de extractores: el primer grupo con caudales de $15.000 \frac{m^3}{h}$., el segundo con $30.000 \frac{m^3}{h}$., el tercero con $60.000 \frac{m^3}{h}$. y el cuarto grupo con dos extractores por cada caudal de los grupos anteriores. Los resultados son satisfactorios en los grupos con caudales similares, ya que se necesita el mismo número de extractores en el invernadero y, por lo tanto, los parámetros no se modifican por la cantidad. Sin embargo, al aplicarlo al último grupo, la selección no fue precisa, ya que la cantidad de extractores necesaria es diferente. Si se considera el número total de extractores

del modelo seleccionado, este no resulta ser la mejor opción entre los presentados en ese grupo. Por lo tanto, se recomienda utilizar la metodología multicriterio solo entre grupos de ventiladores con un caudal similar, ya que se necesitaría la misma cantidad. Si se utiliza en un grupo variado de modelos y caudales, se debe considerar el número de ventiladores que se deben adquirir para satisfacer el caudal requerido en el invernadero donde se instalarán.

Terrazas Ahumada (2018) utiliza un ventilador de eje horizontal de pared Multifan 130 con tres aspas, un consumo de potencia de 1118 W, un diámetro de 1.3 m, para un invernadero que corresponde a la alternativa 1, de $15,000 \frac{m^3}{h}$. de caudal requerido, se puede considerar el cambio de extractor por el modelo HXT-630/H de Soler & Palau, con un caudal de $15,930 \frac{m^3}{h}$, una potencia del motor de 1119 W, un precio de 19,727 MXN, una potencia de 651 W en Pa y una potencia de $16 \frac{m^3}{s}$. en Va, y una eficiencia de 0,58.

4.5 Conclusiones

- Se desarrolló una metodología multicriterio para seleccionar la mejor opción de extractor entre un grupo diverso de modelos con diferentes características.
- La metodología se basó en la comparación pareada de los criterios de los extractores de aire, lo cuales son, caudal potencia del motor, potencia del aire, velocidad de aire, eficiencia, masa y precio, así como su comparación entre modelos
- Se aplicó la metodología multicriterio para tres alternativas de invernaderos, seleccionando el mejor extractor considerando sus siete criterios.
- En los invernaderos con mayor volumen la metodología permite seleccionar los 2,3 o más extractores con las mejores características.
- El uso de los criterios como potencia de aire y velocidad de aire permiten la selección de un extractor para las nuevas alternativas de uso con aerogenerador.

4.6 Literatura citada

- Aguirre González, E. F., Vargas, V. M., López López, L. A., Rivera, J. P., & Candelo, F. (2022). Aplicación de técnicas de decisión multicriterio para la priorización de perfiles docentes universitarios. *Revista Científica y Tecnológica*. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11967>
- Arellano-García, M. A., Valera-Martínez, D. L., Urrestarazu-Gavilán, M., del Rosario Quezada-Martín, M., Murguía-López, J., & Zermeño-González, A. (2011). Ventilación natural y forzada de invernaderos tipo almería y su relación con el rendimiento de tomate. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 379-386. Recuperado en 19 de noviembre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000400379&lng=es&tlng=es.
- Benítez, M. T., & Bojórquez Tapia, L. A. (2021). Manual: Proceso Analítico Jerárquico (AHP). http://www.apc.lancis.ecologia.unam.mx/modulos/ordenamiento/docs/buil/html/_downloads/73b3745ed92d4949588f7d085d575059/ahp_manual_rua.pdf
- Berumen, S. A., & Llamazares Redond, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el ahp) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, Bogotá (Colombia, 20, 65–87).
- Curchod, M. A., Carignano, C. E., & Alberto, C. L. (2021, October 12). Un modelo multicriterio para la selección de candidatos: aplicación a un concurso docente en la Universidad Nacional de Córdoba. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22201/fca.24488410e.2022.2609>
- Flores-Velázquez, J., Mejía-Saenz, E., Montero-Camacho, J. I., & Rojano, A. (2011). Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia*, 45(5), 545–560. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/899>

- Flores-Velázquez, J., & Villarreal-Guerrero, F. (2015). Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(2), 303–316. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Herbas Baeny, E., & Linera Canedo, C. del R. (2023). Análisis multicriterio para la evaluación integrada de impactos sociales y ambientales en proyectos hidroeléctricos en Bolivia: bases conceptuales y metodológicas. *ACTA NOVA*, 11, 1683–0768. <https://doi.org/10.35319/acta-nova.20239>
- Hernández Zaragoza, P., René Valdez Lazalde, J., Aldrete, A., & Martínez Trinidad, T. (2019). Evaluación multicriterio y multiobjetivo para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales. *Madera y Bosques*, 25. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521819>
- Javez Valladares, S. S., Palacios Gómez, L. E. A., & Gastañadú Ibáñez, L. A. (2025). Método multicriterio analytic hierarchy procesos para la selección de proveedores. *Revista Electrónica de Ciencias Gerenciales*, 7. <https://doi.org/10.35381/gep.v7i1.234>
- Mendoza, A., Solano¹, C., Palencia¹, D., & Garcia¹, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 348–360. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>
- Molina Pfennig, P. D., & González-Baheza, A. (2020). Evaluación de los recursos de radiación solar en los municipios de Baja California Sur, México, mediante un modelo de aptitud socioambiental. <https://regionysociedad.colson.edu.mx:8086/index.php/rys/article/view/1296/1681>
- Rivera, A., Mendoza, G., Martínez, F., & Servin, C. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de

Huasteca (México). 11(2), 144–154.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945029006>

Rivera Aguilar, N., Mendoza Galindo, G., Martínez Fortanelli, J., & Servin Contreras, C. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 144–154.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945029006>

Romantchik, E., Terrazas Ahumada, D., Isaias Martinez, J., & Santos Hernandez, A. M. (2020). Recuperación de energía eólica residual de extractores de aire en invernaderos. CIES2020 - XVII Congresso Ibérico e XIII Congresso Iberoamericano de Energia Solar, 3.
<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.3077>

S&P. (2015). *Leyes de los ventiladores*. Soler & Palau: Hojas Tecnicas.
<https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-leyes-de-los-ventiladores/>

Teitel, M., Atias, M., & Barak, M. (2010). Gradients of temperature, humidity and CO₂ along a fan-ventilated greenhouse. *Biosystems Engineering*, 106(2), 166–174. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2010.03.007>

Terrazas Ahumada, D. (2018). Recuperación de energía eólica residual de extractores de aire en invernaderos [Universidad Autónoma Chapingo].
<https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/ed3d4d66-4c2c-4acd-8efa-4d12f0393fce/content>