

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DEL AIRE DE SALIDA DE LOS EXTRACTORES EN INVERNADEROS

Romantchik K.E.* , Santos H.A.M.* , Terrazas A.D.* , Martínez J.I.*

* Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5 Carretera México-Texcoco, 56230, Chapingo, Estado de México, México,
correo-e: xicote1986@hotmail.com

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.3077>

RESUMEN

El uso de los extractores axiales en invernaderos para el control de temperatura y renovación de volumen de aire permite la recuperación de la energía eólica residual, esto representa una fuente constante de producción de energía limpia, y reducción de los costos de producción al bajar los costos de consumo de energía. El objetivo de este trabajo fue diseñar, construir y evaluar un sistema de recuperación de energía eólica residual en los invernaderos. Este sistema consiste en una turbina eólica colocada a una distancia óptima, un cono en la descarga de aire y un mecanismo para modificar el ángulo de aspas de la turbina eólica. Se analizó el balance de energía del sistema, midiendo los principales parámetros de energía, tales como: voltaje, amperaje, velocidad del aire y velocidad angular de los rotores. Las pruebas con la turbina eólica se realizaron en el sistema extractor de aire de un invernadero, sin cono y con cono. La implementación del sistema propuesto permitió recuperar la energía eléctrica del motor. Con el cono instalado, la energía eléctrica recuperada se incrementó en comparación que con el sistema de recuperación sin cono.

PALABRAS CLAVE: Energía eólica, Extractor, Invernaderos, Aerogenerador

ENERGY RECOVERY FROM EXHAUST AIR IN GREENHOUSES

ABSTRACT

The use of axial extractors in greenhouses for temperature control and air volume renewal allows the recovery of residual wind energy, this represents a constant source of clean energy production, and reduction of production costs by lowering energy consumption costs. The objective of this work was to design, build and evaluate a wind energy recovery system in greenhouses. This system consists of a wind turbine placed at an optimal distance, an air discharge cone and a mechanism to modify the angle of the wind turbine blades. The energy balance of the system was analyzed, measuring the main energy parameters, such as: voltage, amperage, air speed and angular velocity of the rotors. The tests with the wind turbine were carried out in the air extraction system of a greenhouse, without cone and with cone. The implementation of the proposed system allowed the recovery of electrical energy from the engine. With the cone installed, the electrical energy recovered was increased compared to the recovery system without cone.

KEYWORDS: Wind Energy, Extractor, Greenhouses, Wind Turbine

INTRODUCCIÓN

La elección de obtener productos agrícolas en un invernadero tiene como consecuencia una serie de ventajas que se ofrecen al agricultor:

- ✓ Permite establecer las condiciones climáticas más adecuadas para cada cultivo y estadio.
- ✓ Mayor producción y mejor calidad.
- ✓ Mayor control sobre las plagas, malezas y enfermedades.
- ✓ Uso más eficiente de los recursos productivos.

Por estas razones en el mundo se desarrollan y utilizan más y de mejor manera los invernaderos.

De acuerdo con el Atlas Agroalimentario (SIAP, 2017), en México la superficie de agricultura protegida es de 50 mil 862 ha, de las cuales el 60% son construcciones tipo invernadero.

La protección que las cubiertas de invernadero proporcionan a los cultivos limita la renovación del aire y ralentizan su movimiento en el interior. Una adecuada tasa de renovación del aire interior junto con un adecuado movimiento puede proporcionar unos niveles óptimos de temperatura, déficit higrométrico y concentración de anhídrido carbónico (Jiménez, 1999).

Mediante la instalación de ventiladores - extractores (Fig. 1) de gran caudal y baja presión en una de las paredes



Fig. 1. Instalación de los extractores en los invernaderos (<http://www.novagric.com/es>).

del invernadero se fuerza la entrada de aire por el resto de ventanas con una velocidad menor que no daña las plantas para renovar el aire y mantener la temperatura. A este sistema se le pueden añadir paneles evaporadores en la pared contraria para que el aire que sea forzado al entrar lo haga a una temperatura inferior, contribuyendo así a una mejor refrigeración del invernadero y a un incremento de la humedad interior. Este sistema consta de ventiladores de extracción en un extremo del invernadero y una bomba de circulación de agua a través de los poros del muro instalado del lado opuesto del invernadero (Tiwari, 2003).

Como el aire circula a través del invernadero hacia los ventiladores, absorbe el calor de las plantas y el suelo y por tanto incrementa gradualmente la temperatura del aire, es decir del lado del muro la temperatura es más fría y del lado de los ventiladores presenta un valor mayor (Bucklin *et al.*, 2004, Romantchik *et al.*, 2017). Los extractores consumen la mayor parte de la energía eléctrica utilizada en el invernadero. La energía del motor eléctrico se transforma a la energía eólica para vencer las resistencias de movimiento y principalmente es expulsada la atmósfera.

Diferentes investigadores han realizado el análisis de las pérdidas de energía en extractores de aire (Karadzhi y Moskovo, 2008, 2010).

El enfoque europeo del análisis de los ventiladores se basa en un concepto llamado grado de eficiencia del motor del ventilador, y es muy diferente que, en los Estados Unidos, el cual se basa en una definición llamada grado de eficiencia

del ventilador. La norma de la Organización Internacional de Normalización (ISO) define los grados de eficiencia del motor del ventilador, y describe brevemente cómo se aplicará la regulación europea en la selección del ventilador. Debido a que este tema involucra muchas definiciones y cálculos, se ha publicado una hoja de cálculo con ejemplos de cálculos y otro material en el sitio web de AMCA (www.amca.org) (Hauer y Brooks, 2012, Mathson y Ivanovich, 2011, Brendel, 2012).

Sin embargo, en estas publicaciones no se subraya que, en caso de un extractor, la energía del motor eléctrico transformada a la energía de aire sale a la atmósfera y se pierde.

En el trabajo (Romantchik *et al.*, 2019) se analizó la energía de salida de aire para un conjunto de extractores diseñados en función del ancho, número de aspas, frecuencia de rotación y ángulo de ataque del aire, simulando por Dinámica de Fluidos Computacional el comportamiento de la corriente de aire formada por los extractores.

El tema de energía renovable ha tomado importancia los últimos años debido a los actuales problemas sobre el cambio climático con los que se enfrenta la sociedad. En este punto cabe resaltar que en el campo de las energías renovables; la energía eólica, es decir la energía que se obtiene del viento, existen máquinas para capturar la energía eólica y convertirla en energía eléctrica llamadas aerogeneradores o turbinas eólicas. La máxima eficiencia energética de un aerogenerador que se puede obtener del viento según la teoría de Betz (1926) es del 59%.

Existen diversas propuestas de aprovechamiento de la energía de aire saliente de los extractores instalando frente los aerogeneradores (Patnaik and Ali, 2013, Romantchik y Urban, 2017, Romantchik *et al.*, 2019). Al colocar un aerogenerador frente a un extractor se puede aprovechar una porción de la energía eólica y convertirla en energía mecánica que después será transformada en energía eléctrica. Sin embargo, para determinar si un equipo es funcional debe realizarse un balance energético, es decir un análisis de la energía que se gasta y la energía recuperada. De esta forma es posible recuperar hasta un 60% de la energía de los motores de extractores. Al recuperar parte de la energía eólica residual, se incrementa la eficiencia de los extractores (Ahmad *et al.*, 2015).

Se realizó el análisis del comportamiento de los aerogeneradores de eje vertical en diversas condiciones de los efectos que producen cada tipo de extractores de aire (Chauhan y Singh, 2014, Chong *et al.*, 2012, 2013, 2014). El balance energético del conjunto extractor-aerogenerador muestra que se puede recuperar una parte de la energía eólica residual saliente de un invernadero (Terrazas *et al.*, 2018).

El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la variación del gasto de energía de un motor eléctrico y la energía de aire de salida de un extractor de aire con la instalación de un aerogenerador en la salida y demostrar que se puede recuperar la energía eléctrica de los extractores mediante la instalación de los aerogeneradores en los invernaderos, con el fin de incrementar la eficiencia y presentar un nuevo diagrama de balance energético del conjunto extractor aerogenerador.

MATERIALES Y MÉTODOS

Balance de Energía del Extractor de aire

En esta parte se introduce dos nuevos conceptos importantes llamados *Eficacia de Utilidad* y *Eficiencia Energética*.

Eficacia de utilidad del extractor (η_{util}) (Ec. 1) En un invernadero para producir plántulas es la razón de utilizar la energía necesaria para cumplir con los objetivos determinados, tal como la potencia para mover el aire y disminuir la temperatura (P_{util}), o potencia de la entrada de aire (P_e) y la energía disponible antes de ésta, o bien la potencia eléctrica consumida por el motor del extractor (P_{ele}).

$$\eta_{util} = \frac{P_{util}}{P_{ele}} = \frac{P_e}{P_{ele}} \quad (1)$$

La eficiencia energética del extractor (η_{energ}) (Ec. 2) En un invernadero para producir plántulas es la relación entre la energía disponible después de restar a la energía eléctrica del motor todas las pérdidas de la transformación y en la salida ($P_{ele} - P_{perd}$) y la energía eléctrica del motor (P_{ele}).

$$\eta_{ener} = \frac{P_{ele} - P_{perd}}{P_{ele}} = \frac{P_{ele} - P_s}{P_{ele}} \quad (2)$$

donde:

P_s – la potencia de aire en la salida del extractor.

P_{perd} – las potencias pérdidas durante la transformación de energía incluyendo de salida a la atmosfera.

Para realizar las pruebas y determinar los parámetros se instalaron 4 unidades experimentales en un invernadero del campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo (Fig. 2). Se utilizó un extractor de aire Multifan 130, con un diámetro de 1.3m, de tipo axial con 3 aspas, 550 rpm, y es impulsado por un motor de 1.2 kW.

También se utilizó un aerogenerador Air X (3 aspas, 1.2 m de diámetro, 400 W de potencia).

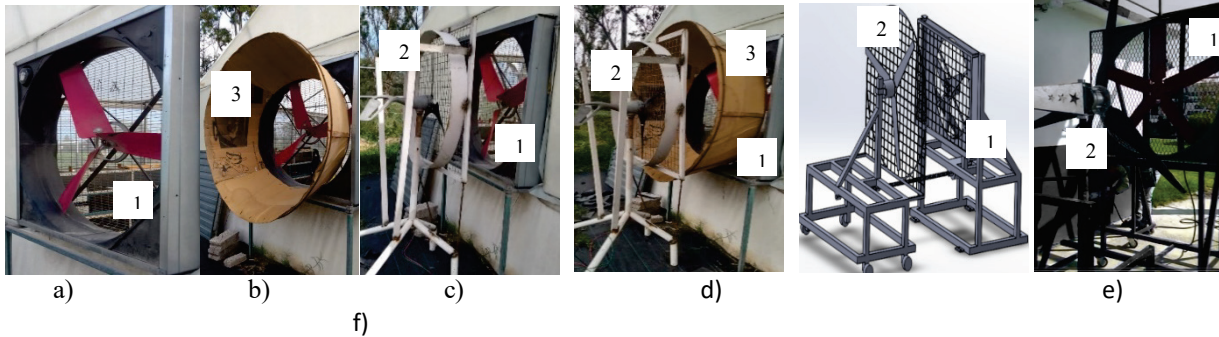


Fig. 2. Instalaciones del extractor: a) solo, b) con cono, c) con aerogenerador, d) con cono y aerogenerador, e) esquema y f) banco de pruebas, 1 – extractor, 2 – aerogenerador, 3 – cono.

El aerogenerador se colocó a diferentes distancias del extractor para determinar la resistencia que representaba a la extracción de aire.

Para los cuatro casos de estudio se realizaron las siguientes mediciones: velocidad de aire en la entrada y salida del extractor, velocidad angular del extractor y aerogenerador, voltaje y amperaje consumido por el motor del extractor. Se obtuvieron y analizaron los perfiles de velocidad de aire. De acuerdo con un análisis estadístico se determinó el efecto producido por el aerogenerador y el cono, sin y con la instalación de un aerogenerador. Para medir y determinar los perfiles de velocidad, el área total del extractor se dividió en 5 círculos concéntricos, realizando 4 mediciones a 90 grados por cada región. El consumo de potencia del motor del extractor se evaluó utilizando dos multímetros Steren, uno para medir voltaje y el otro la corriente en una línea, esto para estudiar si tiene un efecto en el consumo de energía del sistema de extracción de aire el colocar el aerogenerador frente al extractor.

Para obtener la relación de la velocidad de giro en función de la distancia se midieron las velocidades angulares del extractor y del aerogenerador con un fototacómetro Extech a diferentes distancias. Para llevar a cabo la medición de la velocidad del aire se utilizó un anemómetro Steren HER440 colocado en la entrada y salida de aire del extractor a diferentes distancias.

El caudal de aire se obtuvo multiplicando la velocidad media del aire y la superficie en la entrada del modelo. El rendimiento del sistema de extracción fue evaluado mediante el caudal de aire y el consumo energético del motor.

La potencia de aire de las entradas y salidas del extractor y aerogenerador se calcularon con la ecuación (3).

$$P_{aire\ entrada} = P_e = \frac{1}{2} \rho A v_e^3; \quad P_{aire\ salida} = P_s = \frac{1}{2} \dot{m} v_s^2 \quad (3)$$

Donde: P – potencia, W;

ρ – densidad de aire en el sitio de experimento, $\rho = 1.0 \text{ kg/m}^3$;

A – superficie de entrada = superficie de salida del aire, m^2 ;

v_e, v_s - velocidad promedio de entrada y de salida, m/s ;

$\dot{m} = \rho A v_e$ – flujo másico, kg/s .

La potencia eléctrica consumida por el motor del extractor (P_{ele}) se divide en dos partes (Ec. 4): la potencia necesaria para mover el aire hacia las aspas de extractor (P_e) y la potencia utilizada para impulsar el aire hacia el medio ambiente (P_{imp}) (ignorando las pérdidas mecánicas, eléctricas, electromagnéticas, etc.).

$$P_{ele} = P_e + P_{imp} \quad (4)$$

Ecuación (4) es para el caso en el que se considera que durante la transformación de energía no existen pérdidas. La potencia de aire de salida (P_s) se conforma de la potencia de aire de entrada más el impulso de las aspas (Ec. 5).

$$P_s = P_e + P_{imp} \quad (5)$$

Por tal razón se puede igualar la potencia eléctrica consumida por el extractor con la potencia eólica de salida del extractor (P_s) (Ec. 6). Esto quiere decir que la potencia total del motor eléctrico se gasta a la potencia del aire en la salida del extractor y se pierde en la atmosfera.

$$P_{ele} = P_s \quad (6)$$

Para determinar la eficiencia energética se utilizaron las Ec. (1) y (2), pero en este caso, al instalar un aerogenerador la eficacia se define como la suma de eficacia del extractor y la eficiencia energética del equipo extractor más aerogenerador (Ec.7).

$$\eta_{util} = \frac{P_e}{P_{ele}} + \frac{P_r}{P_{ele}} = \frac{P_e + P_r}{P_{ele}} \quad (7)$$

Donde: P_r - potencia recuperada en el aerogenerador, W.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

De los datos de mediciones se obtuvieron los perfiles de velocidad del aire (Fig. 3).

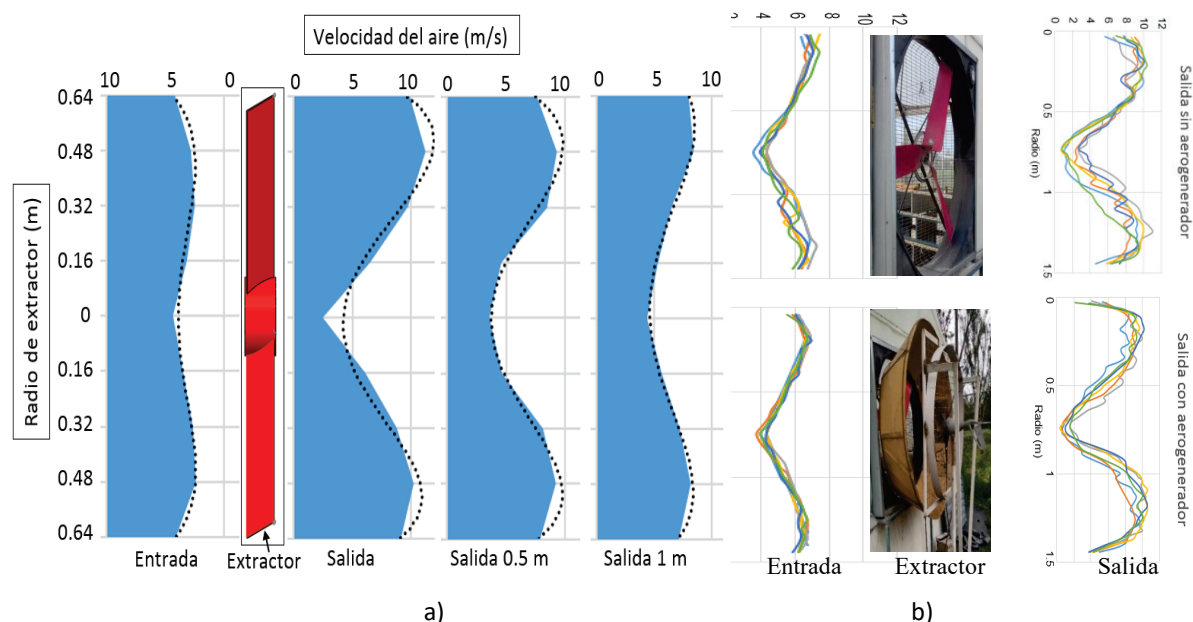


Fig. 3. Perfiles de velocidad de aire del extractor.
a) Extrapolados, b) medido.

Analizando los datos en la Fig. 3 de los perfiles de velocidades de aire se determinó lo siguiente:

- El mayor potencial eólico se concentra a 2/3 del área del centro de extractor, esto está acorde con las publicaciones de Terrazas *et al.* (2018),
- La potencia de aire de salida es mayor que la potencia de aire de entrada, Ec. (3), esto comprueba que la potencia de salida es igual a la potencia de entrada más un impulso adicional de las aspas (Ec. 5),
- La potencia de aire de salida del extractor se disipa con la distancia, ya que disminuye la velocidad promedio teniendo 8.5 m/s en la salida, 7 m/s a 0.5 m, y 6.5 m/s a 1 m de distancia.

También, los parámetros medidos y calculados del extractor y aerogenerador se presentan en la tabla 1 y en la tabla

2 se pueden ver las relaciones de potencia en el experimento y su distribución.

Tabla 1. Principales parámetros medidos y calculados del conjunto extractor-aerogenerador.

Uso del extractor	Potencia de Aire en extractor			Extractor			Aerogenerador				
	Entrada (Pe)	Salida (Ps)	Salida a 0.5 m (Ps0.5)	RPM	Voltaje	Corriente	Potencia (Pele)	RPM	Voltaje	Corriente	Potencia (Pr)
	W	W	W	min ⁻¹	V	A	W	min ⁻¹	V	A	W
sin cono, sin aerogenerador (scsa)	230	592	409	545	208	5.76	1195				
con cono, sin aerogenerador (ccsa)	249	685	518	542	208	5.75	1196				
ccsa/scsa (%)	7.6	13.6	21.0	-0.6	0.0	-0.2	0.1				
sin cono, con aerogenerador (scca)	226	561	388	547	209	5.74	1201	1154	22	12.7	279
scca/scsa (%)	-9.2	-18.1	-25.1	0.9	0.5	-0.2	0.4				
con cono, con aerogenerador (ccca)	228	634	494	540	209	5.72	1197	1140	25	13.3	332
ccca/scca (%)	0.88	13.01	27.32	-1.28	0.00	-0.35	-0.33	-1.21	13.64	4.72	19.00

La instalación en la salida del extractor con un solo cono sin aerogenerador mejoró significativamente los parámetros de funcionamiento del extractor, aumentando en 7.6%, 13.6 y 21% las potencias del aire de entrada, salida, y salida a 0.5 m respectivamente.

Si se instala solo un aerogenerador en la salida del extractor sin cono se empeoran significativamente los parámetros de funcionamiento del extractor, disminuyendo en 9.2%, 18.1 y 25.1% las potencias de aire de entrada, de salida y de salida a distancia de 0.5 metros respectivamente, pero se aumentan la eficacia (Ec. (7) hasta 0.42 y la eficiencia energética (Ec. (2) hasta 0.23.

Tabla 2. Relación de las potencias en el experimento, (%)

Uso del extractor	Pe/Pele	Ps/Pele	Ps0.5/Ps	Pr/Ps0.5	Pr/Ps0.5	Pr/Pele
sin cono y sin aerogenerador	19.2	49.8	68.8			
sin cono y con aerogenerador	18.8	46.7	69.2	72.0	49.8	23.3
con cono y sin aerogenerador	20.8	57.3	75.6			
con cono y con aerogenerador	19.0	53.0	77.9	67.3	52.7	27.8

Finalmente, la instalación un cono en la salida del extractor con el uso de aerogenerador ayuda a recuperar 16% más de energía residual en la salida del extractor, incrementando la eficacia del conjunto hasta 0.468 y la eficiencia energética hasta en un 0.278.

La potencia del motor de extractor en los cuatro experimentos se convierte a la potencia del aire de la entrada (18.8...20.8%) y de la salida (46.7...57.3%) y el resto se pierde en los elementos eléctricos, mecánicos y las aspas del extractor. La potencia recuperada de los gastos en el motor eléctrico con ayuda del aerogenerador fue de 23.3% sin cono y hasta 27.8% con cono.

Se mostró la baja eficacia del extractor (Ec. (1) sin cono $\eta_{util} = 0.192$, así mismo con cono $\eta_{util} = 0.208$, lo cual explica la existencia de grandes pérdidas en los elementos eléctricos, mecánicos y eólicos del extractor.

La eficiencia energética del extractor sin aerogenerador fue $\eta_{ener} = 0$ pues de acuerdo con la (Ec. (2) toda la energía eléctrica suministrada al motor se pierde, mientras que con aerogenerador sin cono fue $\eta_{ener} = 0.23$ y con cono fue de $\eta_{ener} = 0.28$.

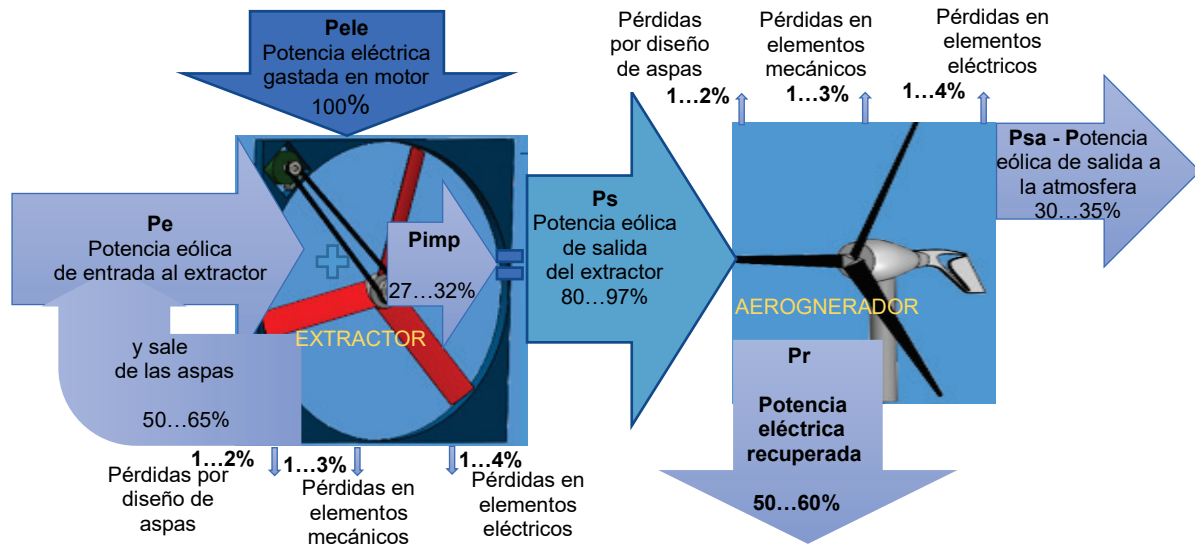


Fig. 4. Balance de energía de un extractor con aerogenerador de un invernadero.

En la Fig. 4 se presenta una nueva propuesta teórica de un diagrama de balance energético de un extractor con un aerogenerador, donde la potencia eléctrica del motor (P_{ele}) se divide en dos partes debido al trabajo de las aspas: la potencia de aire de entrada de extractor (P_e) se suma con la potencia de impulso (P_{imp}) y se obtiene la potencia de aire de salida (P_s) con las mínimas pérdidas eléctricas, mecánicas y eólicas (1...4%). Después de la salida de extractor el aire entra al aerogenerador y sale a la atmósfera (P_{sa}). La energía (potencia) del aire residual se transforma en generador a la eléctrica (P_r), recuperando así una parte de energía gastada para el motor eléctrico en el extractor.

CONCLUSIONES

La instalación de un aerogenerador en la salida de un extractor de aire en los invernaderos permite generar energía eléctrica recuperando la energía eólica residual del aire saliente del extractor.

La instalación de un cono en un invernadero con un sistema de enfriamiento de pared húmeda que integre un equipo de aprovechamiento de energía eólica residual mejora la eficacia de los extractores y la eficiencia energética de los aerogeneradores.

Una forma de presentación del diagrama de balance energético de un extractor de aire con aerogenerador mejora el entendimiento de distribución de las energías.

REFERENCIAS

- Ahmad F., Wen Tong C., Sook Yee Y., Wooi Ping H., and Sin Chew P. (2015). Design and Experimental Analysis of an Exhaust Air Energy. *Energies*, 7, 6566-6584.
- Betz A. (1926). Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. *Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht*. Alemania. 64 p.
- Brendel Michael. 2012. The Role of Fan Efficiency in Reducing HVAC Energy Consumption. *AMCA internacional, inmotion*. Summer, 10-13.
- Bucklin R. A., Leary J. D., McConnell D. B., and Wilkerson, E. G. (2004). Fan and Pad Greenhouse Evaporative Cooling Systems. *University of Florida, IFAS Extension*, 1, 1-7.
- Chauhan S., and Singh R. (2014). Design of Domestic Helix Vertical Axis Wind Turbine to Extract Energy from Exhaust Fans. *Innovative Systems Design and Engineering*. 12, 23-28.

- Chong W. T., Hew W. P., Yip S. W., Fazlizan A., Poh S. C., Tan C. J., and Ong H. C. (2014). The experimental study on the wind turbine's guide-vanes and diffuser of an exhaust air energy recovery system integrated with the cooling tower. *Energy Conversion and Management*. 87, 145-155.
- Chong W. T., Poh S. C., Fazlizan A., Pan K. P. (2012). Vertical axis wind turbine with omni-directional-guide-vane for urban high rise application. *Journal of Central South University of Technology*, 19, 727-732.
- Chong W. T., Poh S. C., Fazlizan A., Yip S. Y., Chang C. K., Hew, W. P. (2013). Early development of an energy recovery wind turbine generator for exhaust air system. *Applied Energy*, 568-575.
- FAO. (2002). *Manual preparado por el Grupo de Cultivos Hortícolas: El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo*. FAO. Roma. 320 p.
- Hauer Armin and Brooks Joe. Fan motor efficiency grades in the european market. (2012). *AMCA International inmotion*. Summer, 14-20.
- Jiménez O. (1999). *El ambiente dentro del invernadero. Invernaderos (diseño, establecimiento y manejo)*. SEP. México, 203 p.
- Karadzhi V.G., Moskovo Yu.G. (2008). Sobre una estimación de la eficiencia aerodinámica de los sistemas de ventilación. *Moscú. ABOK*. 7, 1-7.
- Karadzhi V.G., Moskovo Yu.G. (2010). Equipo de ventilación. [Recomendaciones técnicas para diseñadores e instaladores](#). ABOK-PRESS. Mosku. 432 p.
- Mathson Tim and Ivanovich Michael. 2011. AMCA's Fan Efficiency Grades: Answers to Frequently Asked Questions. *AMCA International inmotion*. Fall, 8-13.
- Patnaik A. and Ali S. M. (2013). Industrial exhaust fans as source of power. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*. 1, 38-41.
- Romantchik E., Santos M., Rios E., & Terrazas D. (2019). Análisis del flujo de aire de los extractores de invernadero usando la simulación por CFD. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 1, 1-14.
- Romantchik E., Rios E. (2017). Invernadero con sistema de enfriamiento de pared húmeda que integra un equipo de aprovechamiento de energía residual. MX/A/2016/013840. México. SIGA, IMPI.
- Romantchik E., Ríos E., Sánchez E., López I. (2017). Determination of energy to be supplied by fotovoltaic systems for fan-pad systems in cooling process of greenhouse. *Applied Thermal Engineering*. 114, 1161-1168.
- SIAP. (2017). *Atlas Agroalimentario 2017*. México: SAGARPA.
- Terrazas A.D.; Romantchik K., E., Ríos U., E., Santos A. M. (2018). Balance energético de equipo extractor-aerogenerador. *Memorias de VI Congreso Internacional y XX Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas*. Pp. 473-474.
- Tiwari G.N. (2003). *Greenhouse technology for controlled environment*. [Alpha Science International Ltd](#), Oxford, United Kingdom. 564 p.