UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE IRRIGACIÓN E INGENIERÍA MECÁNICA AGRÍCOLA

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA RESIDUAL DE EXTRACTORES DE AIRE EN INVERNADEROS

T E S I S

UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
MEXICO
DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

DIEGO TERRAZAS AHUMADA

Bajo la supervisión de: EUGENIO ROMANTCHIK KRIUCHKOVA, PhD

Chapingo, Estado de México, diciembre de 2018

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA RESIDUAL DE EXTRACTORES DE AIRE EN INVERNADEROS

Tesis realizada por DIEGO TERRAZAS AHUMADA bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobado 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 JESUS LOPEZ CANTEÑS

ASESOR: _____

DR. EDUARDO RIOS URBAN

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACh), al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) y al departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola por brindarme apoyo y material para realizar este trabajo.

Al Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova por aceptar dirigir este trabajo, su valioso apoyo, su guía y por transmitirme sus conocimientos.

Al Dr. Gilberto de Jesús López Canteñs por todas sus enseñanzas, valiosas sugerencias, su apoyo y su siempre amable disposición.

Al Dr. Eduardo Ríos Urban por sus valiosas sugerencias y aportaciones para este trabajo.

A Mayra, por su asesoría, e invaluable apoyo brindado en los distintos trámites y durante mi estancia en el posgrado.

DEDICATORIA

A mi padre por soportarme y apoyarme durante todo este tiempo, aportándome ideas muy valiosas para mi investigación, por ser mi más grande inspiración, mi motor para ser mejor cada día, por los valores que me ha inculcado para formar carácter, y por muchas cosas más.

A mi madre, por impulsarme a seguir en los momentos de debilidad y creer en mi en todo momento para lograrlo, por todo el amor que me das, la comprensión y el apoyo sin el cual no sería la persona que soy.

A mi hermano, por su apoyo incondicional en cualquier situación y ser un ejemplo a seguir, por sus enseñanzas y valores.

A mis tíos Silvia y Eduardo, por todo el apoyo que me han dado estos años, por motivarme e impulsarme a seguir creciendo como persona.

A Denise, por contar con su amistad en todo momento y por los excelentes momentos vividos juntos, por enseñarme a ser una persona responsable.

A Noemí, por ayudarme con mis problemas sin importar la circunstancia, por brindarme su apoyo y comprensión y ser una persona tan agradable.

A mis compañeros y amigos Ing. Felipe Alfaro, Ing. Iván Olivares, Ing. Carlos Gabriel, Ing. Brandon Martínez, Ing. Eder Reyes, Ing. Eduardo Rosales, Ing. Jorge Colin y el Ing. Alejandro Martínez por su apoyo y amistad.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre:	Diego Terrazas Ahumada
Fecha de nacimiento:	28 de diciembre de 1993
Lugar de nacimiento:	Texcoco, Estado de México, México
No. Cartilla militar:	D-3086197
CURP:	TEAD931228HMCRHG08
Profesión:	Ingeniero Mecánico Agrícola
Cédula profesional:	10145480

Desarrollo académico

Bachillerato:	Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, 2008-2011
Licenciatura:	Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, 2011-2015

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS IX

ÍNDICE DE FIGURAS X

RESUMEN GENERAL XIII

GENERAL ABSTRACT XIV

Página

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL 1

1.1 Panorama de la energía a nivel global 1

1.2 La energía eólica 1

1.3 Extractores en invernaderos 2

1.4 Justificación de la investigación 3

1.5 Hipótesis 6

1.6 Objetivo 6

1.7 Organización de la tesis 7

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA 8

2.1 Temperatura en invernadero 8

2.2 Ventilación y enfriamiento 8

2.3 Ventiladores 9

2.4 Pequeños aerogeneradores 10

2.4.1 Coeficiente de potencia 11
2.4.2 Fuerzas sobre la hélice 11
2.4.3 Teoría del elemento de pala 12
2.5 Generadores eléctricos 15
2.6 Patentes y uso de aerogeneradores en salidas de aire 17
CAPÍTULO 3. BALANCE DE ENERGÍA DE EQUIPO EXTRACTOR-AEROGENERADOR 22
3.1 Resumen 22
3.2 Abstract 23
3.3 Introducción 24
3.4 Materiales y métodos 27
3.4.1 Balance de energía en el Extractor de aire 27
3.4.2 Aerogenerador 30
3.4.3 Experimento en banco de pruebas 32
3.4.4 Mediciones en campo 33
3.5 Resultados 39
3.5.1 Conjunto extractor-aerogenerador 39
3.5.2 Banco de pruebas 41
3.5.3 Perfiles de velocidad de aire 42
3.5.4 Análisis estadístico de velocidades de aire en extractor 44
3.5.5 Velocidades angulares 47
3.5.6 Ángulo de aspas 48

3.6 Conclusiones 51

3.7 Referencias 52

CAPÍTULO 4. DIFICULTADES Y RECOMENDACIONES 54

4.1 Presión estática 54

4.2 Medición de velocidad de aire 54

4.3 Dirección del aire de salida del extractor 55

CAPÍTULO 5. ANEXOS 56

5.1 Caratula Norma AMCA 205-10 56

5.2 Extractor Multifan 130 57

ÍNDICE DE CUADROS

Página

CAPÍTULO 3.

Cuadro 1. Velocidades de aire en entrada y salida de extractor. 43

Cuadro 2. Principales parámetros medidos y calculados para los cuatro casos con y sin aerogenerador. 44

Cuadro 3. Prueba de normalidad. 46

Cuadro 4. Prueba de Kruskal-Wallis en la salida. 47

Cuadro 5. Parámetros obtenidos del aerogenerador. 47

Cuadro 6. Relación entre velocidad de giro de extractor y aerogenerador. 48

Cuadro 7. Ángulo óptimo de las aspas de aerogenerador Air X. 49

Cuadro 8. Parámetros medidos y calculados para extractor EOS53/1,5. 49

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO 1.

Figura 1. Invernadero con extractor y pared húmeda. 3

Figura 2. Dirección del aire normal al plano de giro de las aspas. 6

Figura 3. Dirección de las partículas de aire al salir de un extractor. 6

CAPÍTULO 2.

Figura 1. Coeficiente de potencia para diferentes aerogeneradores. 11

Figura 2. Fuerza de arrastre FD y de sustentación FL sobre un perfil aerodinámico. 12

Figura 3. Velocidades y fuerzas que actúan sobre una sección de la pala. 13

Figura 4. Corriente inducida. 15

Figura 5. Esquema de generación de corriente trifásica. 16

Figura 6. Rectificador trifásico de corriente alterna a corriente directa. 16

Figura 7. Recuperación de energía eólica de aire acondicionado. US 2012028.0503A1 17

Figura 8. Sistema de recuperación de aire extraído. US005512788A. 19

Figura 9. Producción de energía con aerogenerador de gases de laboratorio. US 20120070273A1. 19

Figura 10. Sistema de recuperación de energía eólica. WO 2013/073930 Al. 19

CAPÍTULO 3.

Figura 1. Distribución de potencia en extractor. 27

Figura 2. Componentes de la potencia de salida del aire del extractor. 28

Figura 3. Balance de energía de extractor de aire. 29

Figura 4. Entrada y salida de aire en un extractor. 30

Figura 5. Balance energético de aerogenerador de aire. 32

Figura 6. Multímetros utilizados. 33

Figura 7. Determinación de principales parámetros de aerogenerador. 33

Figura 8. Invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo. 34

Figura 9. Medición de RPM con fototacómetro Extech 34

Figura 10. Puntos de medición de velocidad de aire en el extractor. 35

Figura 11. Medición de parámetros para los 4 casos de extracción de aire. 36

Figura 12. Dimensiones de cono de extractor. 36

Figura 13. Modificación del ángulo de aspas del aerogenerador Air X. 37

Figura 14. Diferentes ángulos del perfil aerodinámico. 37

Figura 15. Mediciones en extractor EOS53/1,5. 38

Figura 16. Balance energético de equipo extractor-aerogenerador. 40

Figura 17. Curvas características de voltaje y amperaje. 41

Figura 18. Curva de potencia del aerogenerador Air X para diferentes bancos de carga. 42

Figura 19. Perfil de velocidad de aire del extractor. 43

Figura 20. Histogramas de velocidad de aire en extractor. 45

Figura 21. Perfiles de velocidad de aire para extractor EOS53/1,5. 50

CAPÍTULO 4.

Figura 1. Tubo de Pitot. 54

Figura 2. Anemómetro ultrasónico de 3 ejes. 55

RESUMEN GENERAL

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA RESIDUAL DE EXTRACTORES DE AIRE EN INVERNADEROS

Diego Terrazas Ahumada[1]; Eugenio Romantchik Kriuchkova[2]

La recuperación de energía eólica residual de extractores de aire en invernaderos representa una fuente constante de producción de energía limpia, disminuyendo así los costos de producción por la reducción de gastos en consumo eléctrico. El objetivo de este trabajo es diseñar, construir y evaluar un sistema de recuperación de energía eólica residual. Este sistema consta de un aerogenerador colocado a una distancia óptima, un cono en la descarga de aire y un mecanismo para variar el ángulo de las aspas del aerogenerador. Se analizó el balance de energía del sistema, midiendo los parámetros principales de energía como voltaje, amperaje, velocidades de aire y velocidades angulares de los rotores. Se realizaron pruebas en un invernadero con extractor Multifan 130 (1.2 kW, 550 rpm y 1.3 m de diámetro) sin cono y con cono, con el aerogenerador (3 aspas con 1.2 m de diámetro). La implementación del sistema permitió recuperar un máximo de 55% de la energía del motor. Con el cono instalado, aumenta en 10% la energía eléctrica recuperada. Experimentalmente se demostró que cambiando 3 grados el ángulo original de las aspas de aerogenerador, la velocidad angular incrementa en 17.7%.

Palabras clave: energía eólica, extractor de aire, aerogenerador, sistema de recuperación, invernaderos.

Tesis de Maestría en Ingeniería, Programa en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo
[1]Autor de tesis [2] Director de tesis

GENERAL ABSTRACT

RESIDUAL WIND ENERGY RECOVERY FROM EXHAUST FAN IN GREENHOUSES

Diego Terrazas Ahumada[1]; Eugenio Romantchik Kriuchkova[2]

The residual wind energy recovery from axial air extractors in greenhouses represents a constant source of clean energy production, which reduces production costs by reducing energy consumption costs. The objective of this work is to design, build and evaluate a residual wind energy recovery system. This system consists of a wind turbine placed at an optimal distance, a cone in the air discharge and a mechanism to vary the blades angle of the wind turbine. The system energy balance was analyzed, measuring the main energy parameters such as: voltage, amperage, air velocities and angular speeds of the rotors. Tests were carried in a greenhouse with extractor Multifan 130 (1.2 kW, 550 rpm and 1.3 m of diameter) without cone and with cone, with the wind turbine (3 blades with 1.2 m in diameter). The implementation of the system allowed recovering up to 55% of the motor's energy. With the cone installed, the electric energy recovered was increased by 10%. Experimentally, it was shown that changing in 3 degrees the original angle of the wind turbine blades, the angular velocity increases 17.7%.

Key words: wind energy, exhaust fan, wind turbine, recovery system, greenhouses.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
[1]Author [2]Advisor

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Panorama de la energía a nivel global

A nivel mundial, el 80% de la energía producida en 2008 se obtuvo de combustibles fósiles, los cuales son los principales generadores de los gases contaminantes que aceleran el proceso de calentamiento global. Existen dos razones por las que se deben buscar alternativas a la producción de energía: la primera es que en un futuro no muy lejano las reservas de extracción de restos fósiles se terminaran, lo que podría generar una crisis global; y la segunda es que los combustibles fósiles son responsables del 74% de las emisiones de CO_2 (Moriarty & Honnery, 2012).

Hay alternativas viables para generar energía, como es el caso de la energía nuclear. Sin embargo, de la cantidad total de energía que se genera, solo el 5.8% proviene de la energía nuclear de acuerdo con IAEA (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2008), además de que ha perdido aprobación debido a los grandes riesgos que implica producir energía de esta forma. Es por esto que las energías limpias representan la opción más amigable con el medio ambiente, y han sido objeto de estudio en las últimas décadas.

1.2 La energía eólica

La energía renovable ha tomado importancia los últimos años debido a los problemas sobre el cambio climático con los que se enfrenta la sociedad. La contaminación que se produce al generar energía con recursos no renovables ha incrementado este cambio mediante los gases generados acelerando el efecto invernadero. Las energías renovables son energías limpias que no contaminan y que se pueden utilizar repetidamente. En este punto cabe resaltar un campo de las energías renovables; la energía eólica, es decir la energía que se obtiene del viento.

Existen máquinas para extraer la energía eólica y convertirla en energía eléctrica llamadas aerogeneradores o turbinas eólicas. La máxima eficiencia que se puede

obtener de estas máquinas según Betz (1926) es del 59%. Las alteraciones en la distribución de la velocidad del viento pueden modificar el aprovechamiento y, por tanto, la eficiencia en la recuperación del recurso eólico (Schaeffer, et al., 2012). En México se tiene una capacidad total instalada de 75,685 MW para la producción de energía eléctrica, de los cuales 4,198.98 MW se generan a través de la energía eólica de acuerdo con la Secretaría de Energía (SECRETARÍA DE ENERGÍA, 2017).

1.3 Extractores en invernaderos

El principal objetivo de un invernadero es generar el clima propicio para obtener el mejor rendimiento y calidad de los cultivos dentro de él. Esto se logra a través de la tecnología implementada como el diseño, el tipo de cubierta y el grado de mecanización. Los factores principales que se controlan en la climatización de un invernadero son la concentración de oxígeno y dióxido de carbono, luminosidad, humedad y temperatura. De acuerdo con el Atlas Agroalimentario 2017 (SIAP, 2017), en México la superficie de agricultura protegida es de 40 mil 862 ha, de las cuales el 60% son construcciones tipo invernadero.

Uno de los métodos más utilizados para el control del clima dentro de un invernadero es el de enfriamiento por ventilación mecánica con pared húmeda, ya que proporciona un control eficaz de acuerdo con las necesidades del cultivo. La ventilación consiste en el intercambio de aire con el medio ambiente con dos objetivos principales: el primero es el intercambio de una masa de aire caliente por una masa de aire exterior más frio, y el segundo es la renovación de aire y control de concentración de CO_2. Sin embargo, durante este proceso es notorio el aumento en el consumo de energía.

El control del clima mediante ventiladores y pared húmeda consta de los siguientes elementos: ventiladores de extracción en un extremo del invernadero, una bomba de circulación de agua y un muro húmedo del lado opuesto del invernadero. Si todas las ventanas y puertas están cerradas cuando están funcionando los ventiladores, el aire es extraído a través de la pared húmeda y

el agua se evapora. El aire estará en su temperatura más baja inmediatamente después de pasar a través del muro húmedo. Como el aire se mueve a través del invernadero hacia los ventiladores, el aire absorbe calor de las plantas y del suelo y la temperatura del aire incrementa gradualmente. Esto da como resultado un gradiente de temperatura a lo largo del invernadero, con el lado del muro estando más frio y el lado de los ventiladores más caliente (Bucklin, Leary, McConnell, & Wilkerson, 2004).

En el Manual práctico de ventilación (Escoda, 2002) establece una serie de normas para el diseño y control de los sistemas de control de ventilación forzada. Se recomienda que la tasa de ventilación sea como mínimo de ¾ a un cambio total de aire por minuto (45-60 ventilaciones por hora) (Montero, Antón, & Muñoz, 2018).

1.4 Justificación de la investigación

Actualmente no se ha determinado la cantidad de energía disponible en la salida de extractores de invernaderos, con lo cual se puede mejorar la eficiencia energética de invernaderos.

Se tiene en cuenta las siguientes medidas de un invernadero: 30 m de largo por 10 m de ancho, el área de la pared húmeda por donde entrara el aire es de 10 m de ancho (ap), por 1.5 m de alto (hp). Al multiplicar estas dimensiones se obtiene el área de entrada de aire a través de la pared húmeda (Ae). La velocidad de

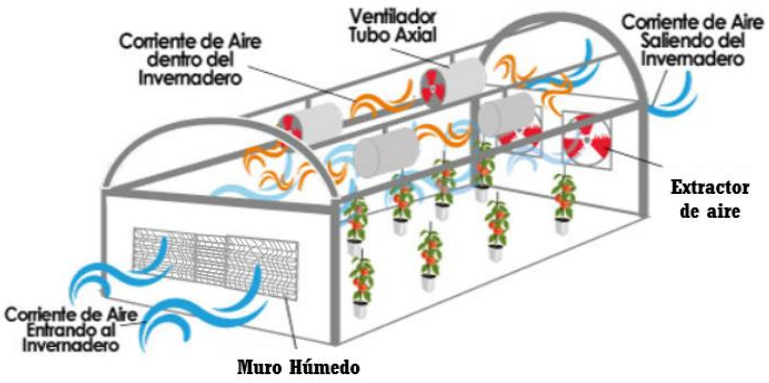


Figura 1. Invernadero con extractor y pared.

entrada en la pared húmeda (Ve) será de 0.85 m/s, si se considera un extractor para el invernadero con un caudal de 12.75 m^3/s (Evolución Tecnológica Agropecuaria, 2012).

En el otro extremo se considera que el diámetro del extractor será de 1.2 m (dv). Con estos datos y la fórmula de caudal (Q); que es velocidad del aire (V) por área (A), se puede determinar la velocidad del aire al llegar al extractor como a continuación se explica:

$$Ae = ap * hp \qquad (1)$$

$$Ae = 15\ m^2$$

$$Q = V * A \qquad (2)$$

Conociendo la velocidad en la pared (Ve) y el área de la pared húmeda (Ae), se puede calcular entonces el caudal de flujo de aire de entrada (Qe). Para que exista un balance en el sistema de flujo de aire, el caudal de entrada debe ser igual al caudal de salida (Qv) (ecuación (3)):

$$Qe = 12.75\ \frac{m^3}{s}$$

$$Qe = Qv \qquad (3)$$

De acuerdo con el dato del diámetro del extractor dado anteriormente (dv =1.2 m), se puede determinar el área de barrido del extractor:

$$Av = \pi(\frac{dv}{2})^2 \qquad (4)$$

$$Av = 1.13\ m^2$$

Ahora sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (3) y despejando se puede conocer la velocidad del aire entrando al extractor (Vv).

$$Vv = \frac{Ve*Ae}{Av} \qquad (5)$$

$$Vv = 11.3\ m/s$$

Conociendo los valores de Av y Vv podemos tener una primera noción de la potencia que tiene el aire al salir del extractor (P_{en}):

$$P_{en} = \left(\frac{1}{2}\right)(1.25)\left(\frac{\pi * 1.2^2}{4}\right)(11.3^3) = 1019.9\ W$$

Toda la potencia eólica de salida se desperdicia en el medio ambiente, por tal razón se propone recuperar una parte de esta aumentando así la eficiencia del sistema.

El ángulo de las aspas del aerogenerador está diseñado para recuperar energía eólica del viento, y para esto se construyen las aspas considerando que la dirección de flujo del aire es perpendicular al plano de giro de las aspas como se muestra en la Figura 2.

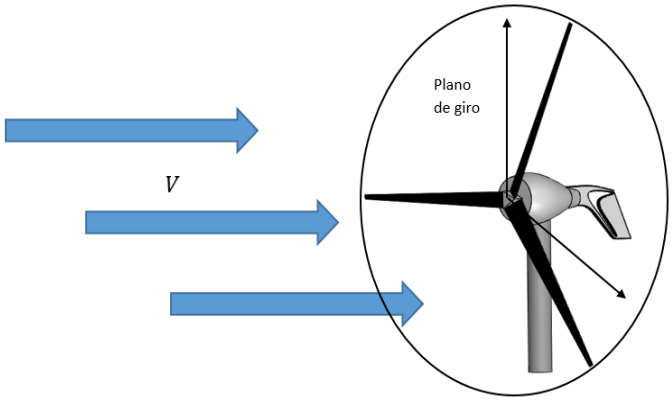


Figura 2. Dirección del aire normal al plano de giro de las aspas.

Sin embargo, las partículas de aire que salen de los extractores de aire de ventilador axial llevan una dirección helicoidal (Soler & Palau, 2018), por lo que un aerogenerador diseñado para condiciones normales no permitirá un aprovechamiento óptimo del recurso eólico disponible (Figura 3).

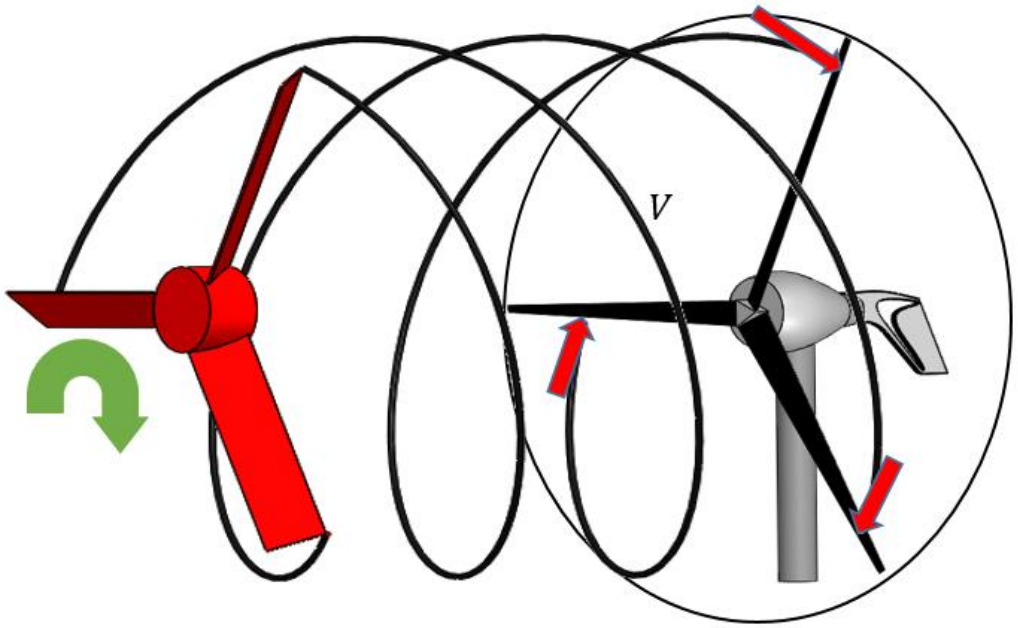


Figura 3. Dirección de las partículas de aire al salir de un extractor.

1.5 Hipótesis

Durante el proceso de extracción de aire en un invernadero, la mayor parte de la potencia entregada por el extractor al aire se pierde al salir a la atmosfera. Una parte (50%) de esta energía eólica residual puede ser recuperada mediante la implementación de un eficiente sistema de aprovechamiento. Al colocar un aerogenerador frente al extractor de un invernadero a una cierta distancia, no se afecta el proceso de extracción de aire.

1.6 Objetivo

Objetivo general

Construir y evaluar un sistema de recuperación de energía eólica residual saliente de un extractor en un invernadero.

Objetivos específicos

- Desarrollar un análisis de balance de energía del sistema extractor-aerogenerador.

- Diseñar, construir y evaluar un conducto en la salida de aire del extractor en invernadero y elementos que permitan variar el ángulo de ataque de las aspas de un aerogenerador.
- Determinar experimentalmente el ángulo óptimo de las aspas del aerogenerador para la recuperación de energía del extractor.

1.7 Organización de la tesis

Esta tesis está organizada en cinco capítulos, incluyendo el presente; en el capítulo dos se presenta la revisión de literatura, en el capítulo tres la investigación realizada en forma de artículo científico, en el capítulo cuatro algunas dificultades que se presentaron en la investigación, así como recomendaciones para futuros trabajos y en el capítulo final se presentan anexos.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Temperatura en invernadero

Existen varios factores ambientales que intervienen en la producción de cultivos y se pueden controlar mediante el uso de invernaderos. Uno de los más importantes es la temperatura, ya que se debe estabilizar dentro de un rango óptimo para diferentes cultivos. La temperatura tiene efectos vitales en las tasas de crecimiento y morfología del desarrollo de las plantas. Por debajo de ciertos límites de temperatura no existirá crecimiento, a esta temperatura se le conoce como “temperatura base”; por encima de ella, el crecimiento aumentará de manera proporcional al incremento de la temperatura, hasta alcanzar cierta “temperatura óptima” (Grupo de Cultivos Hortícolas, 2002).

Al realizar el control de temperatura dentro de un invernadero se debe tener en consideración los dos métodos de variación que son la calefacción y la ventilación y enfriamiento. La aplicación de alguno de estos controles dependerá de la temperatura exterior y de la temperatura óptima para el cultivo.

2.2 Ventilación y enfriamiento

Dentro de los invernaderos se almacena gran cantidad de energía solar, una parte de esta energía es absorbida por el suelo y el cultivo, pero existe un exceso que se queda dentro y que debe ser expulsada del invernadero.

La circulación de aire dentro de los invernaderos es uno de los factores más importantes para controlar las condiciones ambientales, tomando en cuenta las necesidades del cultivo establecido. Para esto existen dos tipos de ventilación: natural y mecánica. Aunque en la mayoría de los casos es utilizada la ventilación natural ya que no implica ningún costo adicional, habrá ocasiones en la que esta no sea suficiente por lo que será necesario complementarla con la ventilación mecánica.

El movimiento de aire horizontal es el sistema más utilizado ya que proporciona varios beneficios como: temperatura uniforme, reduce condensación y disminuye

la concentración de CO_2. Los requerimientos generales de ventilación están basados en los movimientos de aire necesarios para controlar la temperatura, humedad o gases.

El muro húmedo y ventilador 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). Si todas las ventanas y puertas están cerradas cuando están funcionando los ventiladores, el aire es extraído a través de la pared húmeda y el agua se evapora. El aire estará en su temperatura más baja inmediatamente después de pasar a través del muro húmedo. Como el aire se mueve a través del invernadero hacia los ventiladores, el aire absorbe calor de las plantas y del suelo y la temperatura del aire incrementa gradualmente. Esto da como resultado un gradiente de temperatura a lo largo del invernadero, con el lado del muro estando más frio y el lado de los ventiladores más caliente (Bucklin, Leary, McConnell, & Wilkerson, 2004).

En el Manual práctico de ventilación (Escoda, 2002) establece una serie de normas para el diseño y control de los sistemas de control de ventilación forzada. Se recomienda que la tasa de ventilación sea como mínimo de ¾ a un cambio total de aire por minuto (45-60 ventilaciones por hora) (Montero, Antón, & Muñoz, 2018).

2.3 Ventiladores

Un ventilador es una turbo máquina que se caracteriza porque el fluido impulsado es un gas (fluido compresible) al que transfiere una potencia con un determinado rendimiento. A pesar de que no existe convenio alguno universalmente adoptado, los ventiladores pueden subdividirse en cuatro grupos (Ventiladores Axiales, 2018):

- ventiladores de baja presión: hasta una presión del orden 200 mm c agua (ventiladores de hogar).
- ventiladores de media presión: entre 200 y 800 mm c agua (soplantes)
- ventiladores de alta presión: entre 800 y 2500 mm c agua (turbosoplantes)

- ventiladores de muy alta presión, mayor a 2500 mm c agua (turbocompresores)

En función de la trayectoria del fluido, todos estos ventiladores se pueden clasificar en:

- flujo radial (centrífugos)
- flujo semiaxial (helico-centrífugos)
- flujo axial

Los ventiladores axiales son aplicados en situaciones donde esencialmente se pretenda aumentar la velocidad de un fluido, como sistemas de extracción, ventilación en minas y en muchos procesos industriales.

2.4 Pequeños aerogeneradores

Un aerogenerador es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Es un generador eléctrico que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica a través de una hélice y en energía eléctrica gracias a un generador.

Los pequeños aerogeneradores o maquinas micro eólicas tienen aplicaciones muy diferentes a los aerogeneradores conocidos, ya que tienen aplicaciones a situaciones que requieren soluciones técnicas simplificadas y específicamente diseñadas. Se emplean principalmente para el autoconsumo.

Pueden tener una potencia nominal de 100W hasta más de 10kW. Se usan en zonas remotas para casas aisladas, para sistemas de emergencia y de alarmas, en la agricultura, para alimentar sistemas de telecomunicación, para un back-up en plataformas de petróleo o para estaciones científicas, por ejemplo, en la Antártida.

La ley de Betz (1926) dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. Según Betz la máxima potencia que se puede extraer del viento con un aerogenerador se calcula con la siguiente fórmula:

$$P = \frac{1}{2}(0.59)\rho A v^3 \qquad (6)$$

Donde P es la potencia [W], ρ es la densidad del aire [kg/m^3], A es el área de barrido de las palas [m^2] y v es la velocidad del viento [m/s]. Para hacer un cálculo real de un aerogenerador, se debe agregar a esta fórmula la eficiencia del equipo (Franquesa, 2009).

2.4.1 Coeficiente de potencia

Los aerogeneradores tienen diferentes coeficientes de potencia de acuerdo con el tipo de eje y el diseño aerodinámico de las aspas. Este coeficiente sirve para representar las principales características de las aspas, junto con el coeficiente lambda (λ) que representa la relación entre la velocidad de rotación del rotor y la velocidad del aire y es adimensional como se muestra en la Figura 1 (Bastianon, 2008).

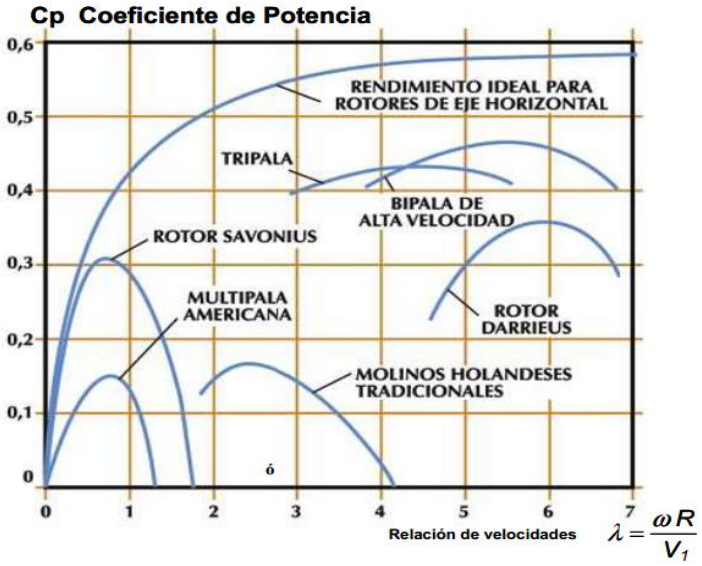


Figura 1. Coeficiente de potencia para diferentes aerogeneradores.

2.4.2 Fuerzas sobre la hélice

La variación del coeficiente de potencia para los aerogeneradores mostrados en la figura anterior, dependen en gran medida de las fuerzas que actúan sobre la hélice del aerogenerador. Existen dos fuerzas que actúan sobre todo objeto

inmerso en un fluido viscoso las cuales son la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación. La primera es la fuerza que experimenta un objeto al chocar con un fluido y tiene la dirección de este. Durante el diseño de hélices se intenta minimizar esta fuerza y así evitar la turbulencia del fluido.

La fuerza de sustentación surge debido a la modificación de la dirección del viento por el alerón, lo que genera la diferencia de presiones ejercidas por el fluido en la parte inferior y posterior de la hélice, para generar una fuerza resultante de levante o sustentación. Como se puede observar en la Figura 2 (De Battista, 2000), cuando se incrementa demasiado el ángulo de ataque (α) se genera turbulencia, aumentando también la fuerza de arrastre, lo que genera pérdida.

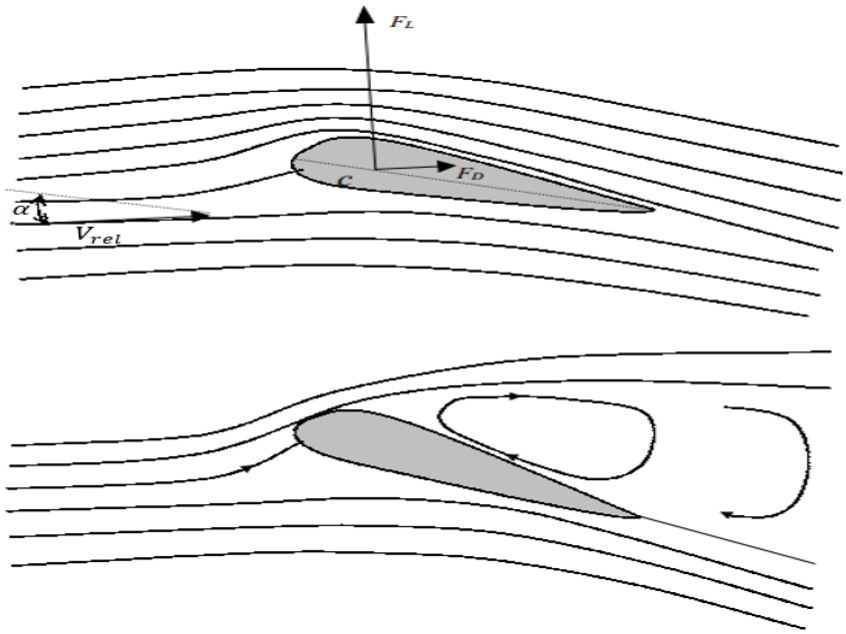


Figura 2. Fuerza de arrastre F_D y de sustentación F_L sobre un perfil aerodinámico.

2.4.3 Teoría del elemento de pala

La teoría del elemento pala permite hacer un análisis de la interacción entre los coeficientes aerodinámicos de la geometría del perfil y el fluido en el que se encuentra. Esta teoría consiste en dividir el aspa del aerogenerador en pequeños segmentos a diferentes distancias (r) y calcular las fuerzas que actúan en cada uno de estos. Estas fuerzas se integran a lo largo de toda la pala considerando

que la hélice tiene una velocidad angular, para obtener las fuerzas y los momentos producidos por el rotor (Medina, 2011).

La Figura 3 muestra el diagrama de cuerpo libre para una sección del aspa de un aerogenerador, representando las velocidades que surgen debido a la velocidad del aire sobre la pala, las fuerzas resultantes en dicho proceso y los ángulos necesarios para el diseño óptimo.

Para λ, u y v se definen las siguientes ecuaciones:

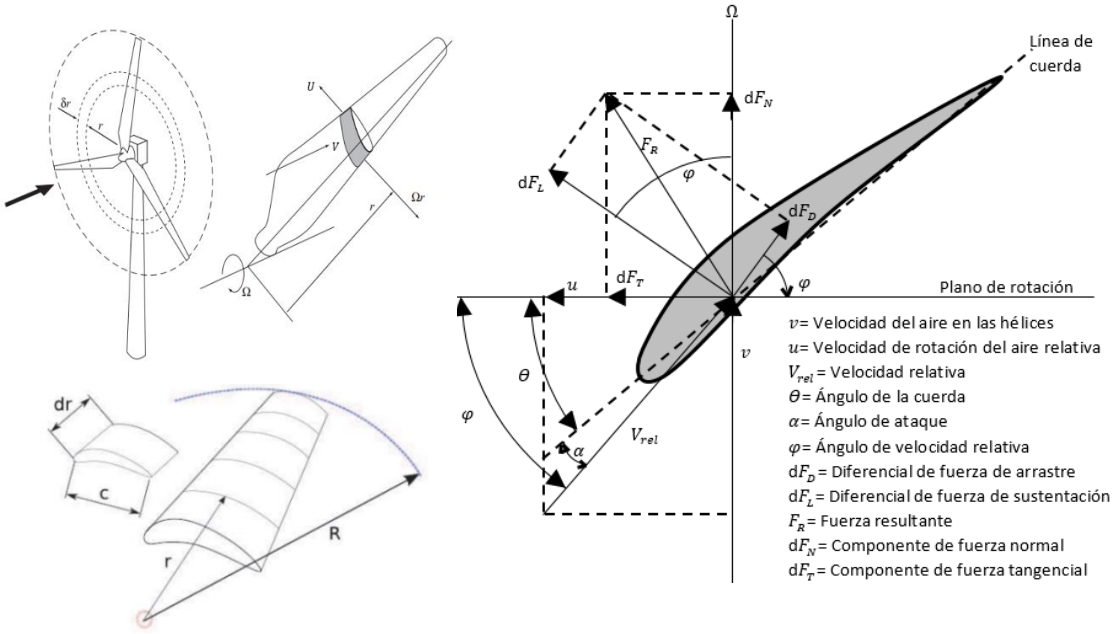


Figura 3. Velocidades y fuerzas que actúan sobre una sección de la pala.

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{v_1}$$

$$u = r\Omega(1 + a')$$

$$v = v_1(1 - a)$$

Donde:

λ_r: relación entre velocidad de rotación en la sección y velocidad del aire

u: velocidad de rotación del aire relativa (m/s)

v: velocidad del aire en las hélices (m/s)

v_1: velocidad del aire en la entrada de la estela (m/s)

a: factor de inducción axial que induce una variación en la velocidad del aire $v1$ por el efecto del disco generado por las aspas

r: radio del eje de giro a la sección (m)

a': factor de inducción tangencial de variación de la velocidad angular del flujo

w: velocidad angular del flujo de aire al chocar con aspa (rad/s)

Ω: velocidad angular del rotor (rad/s)

La velocidad relativa surge de las componentes de velocidad del viento en dirección normal al plano de rotación y la velocidad de rotación del aire. De la Figura 3 se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

$$V_{rel} = \frac{v_1(1-a)}{sen\varphi}$$

$$tan\varphi = \frac{v_1(1-a)}{r\Omega(1+a')} = \frac{1-a}{\lambda_r(1+a')}$$

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} * \rho * V_{rel}^2 * c * dr \quad (7)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} * \rho * V_{rel}^2 * c * dr \quad (8)$$

Donde C_L y C_D son los coeficientes de arrastre y sustentación, V_{rel} la velocidad relativa [m/s], c la cuerda de la sección [m] y dr el ancho de la sección analizada [m]. También se pueden determinar los valores de dF_N y dF_T:

$$dF_T = dF_L sen\varphi - dF_D cos\varphi \quad (9)$$

$$dF_N = dF_L cos\varphi + dF_D sen\varphi \quad (10)$$

Sustituyendo las ecuaciones (7) y (8) en las ecuaciones (9) y (10) y tomando en cuenta en número de aspas (B), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$dF_N = B * \frac{1}{2} * \rho * V_{rel}^2 * c * dr(C_L cos\varphi + C_D sen\varphi) \quad (11)$$

$$dF_T = B * \frac{1}{2} * \rho * V_{rel}^2 * c * dr(C_L sen\varphi - C_D cos\varphi)$$

El torque en cada sección puede ser escrito como $dQ = r * dF_T$, por lo que:

$$dQ = B * \frac{1}{2} * \rho * V_{rel}^2 * c * r * dr(C_L sen\varphi - C_D cos\varphi) \qquad (12)$$

La ecuación (11) representa la fuerza de empuje o fuerza normal y la ecuación (12) representa el torque o fuerza tangencial sobre la sección.

Este análisis se realiza para una velocidad v perpendicular al plano de giro de las aspas de la turbina. Sin embargo, para el caso en el que el aire tiene una dirección diferente, se debe realizar de nuevo todo el análisis para poder encontrar el ángulo de ataque optimo (α_{opt}) que haga que se maximicen las fuerzas y tangencial sobre cada sección del aspa.

2.5 Generadores eléctricos

Un generador eléctrico es un dispositivo que convierte energía mecánica en energía eléctrica. Mantiene por tanto una diferencia de potencial entre dos puntos denominados polos. Michael Faraday descubrió que un conductor eléctrico moviéndose dentro de un campo magnético (imán) generaba una tensión o diferencial de potencial entre sus dos extremos. Faraday comprobó con un amperímetro que se generaba una corriente eléctrica al mover el conductor por dentro del campo magnético. A esta corriente la llamo corriente inducida (por Inducción Electromagnética). Al revés, si en lugar de mover el conductor se mueve el campo magnético (el imán), también se generaba corriente eléctrica(Figura 4).

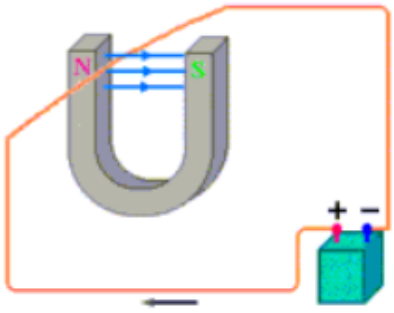


Figura 4. Corriente inducida.

En este experimento también se comprobó que cuanto más rápido el conductor cortaba las líneas del campo magnético del imán, se creaba mayor corriente

eléctrica inducida en él y además cuando la dirección del movimiento del conductor por el campo era contraria (bajaba o subía por el campo magnético) la corriente generada era de sentido contrario (Figura 5). Si el cable y el campo estaban parados no se genera corriente.

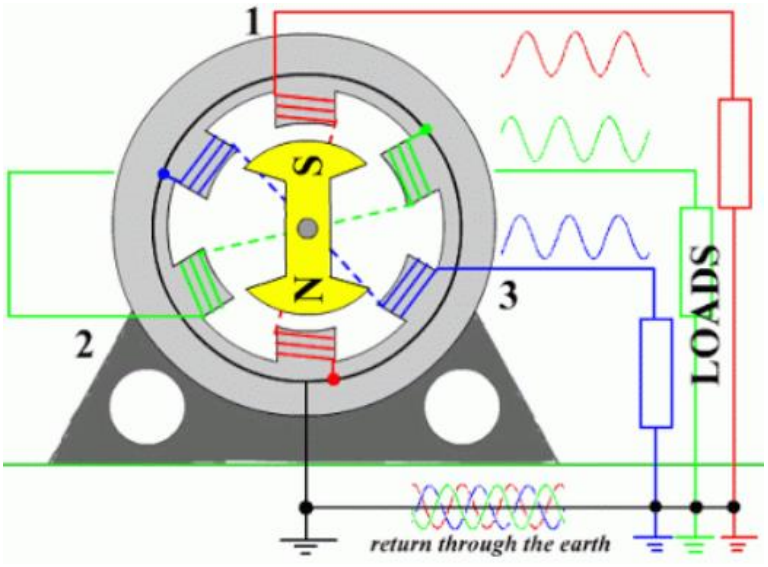


Figura 5. Esquema de generación de corriente trifásica.

Un rectificador trifásico o convertidor trifásico es un dispositivo electrónico capaz de convertir una corriente alterna de entrada en una corriente continua de salida (Figura 6), mediante dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes potencias como diodos, tiristores, válvulas de mercurio (usados hace más de 100 años), entre otros.

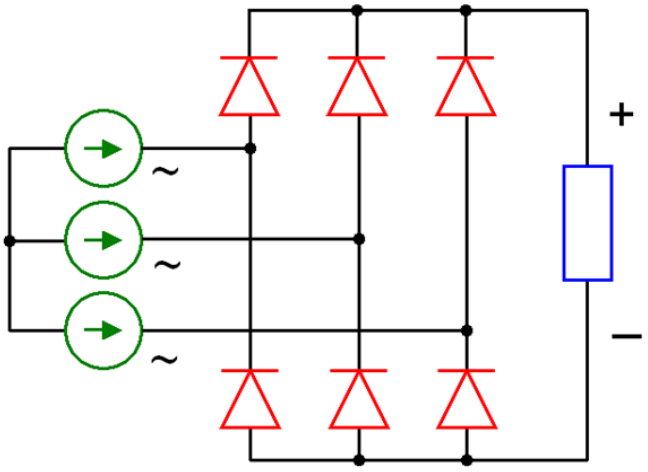


Figura 6. Rectificador trifásico de corriente alterna a corriente directa

2.6 Patentes y uso de aerogeneradores en salidas de aire

Actualmente existen algunas patentes relacionadas con el tema de recuperación de energía eólica. Mahawili (2012) (Figura 7) propone la recuperación de energía eólica expulsada al medio ambiente por los sistemas de aire acondicionado utilizados en los hogares y sitios de trabajo. En esta patente también se expone un arreglo de extractores con un colector para dirigir toda la energía a una sola salida de aire donde puede ser recuperado.

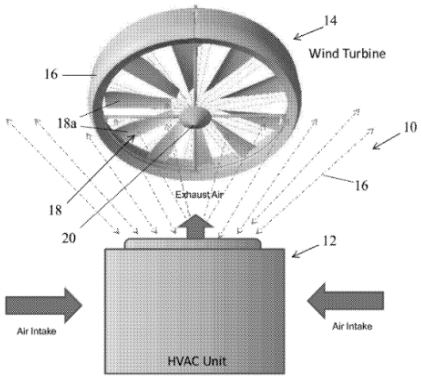


Figura 7. Recuperación de energía eólica de aire acondicionado. US 2012028.0503A1

Por otra parte, Cohen (2002) propone un mecanismo de adaptación para colocar un pequeño aerogenerador a la salida de los sistemas de aire acondicionado, para bajas velocidades y con un conducto direccionador.

Berenda en su patente (1996) (Figura 8) explica la recuperación localizada de energía eólica en lugares donde es necesario la extracción de aire para expulsar la acumulación de gases en zonas cerradas, lo que representa una fuente de energía. La diferencia en esta patente es que se propone un conjunto de pequeños aerogeneradores eléctricos en las salidas de las ventilaciones para recuperar la mayor cantidad de energía expulsada a la atmosfera y reincorporarla al sistema eléctrico, además de presentar la relación entre la distancia a la salida del aire y la pérdida de velocidad.

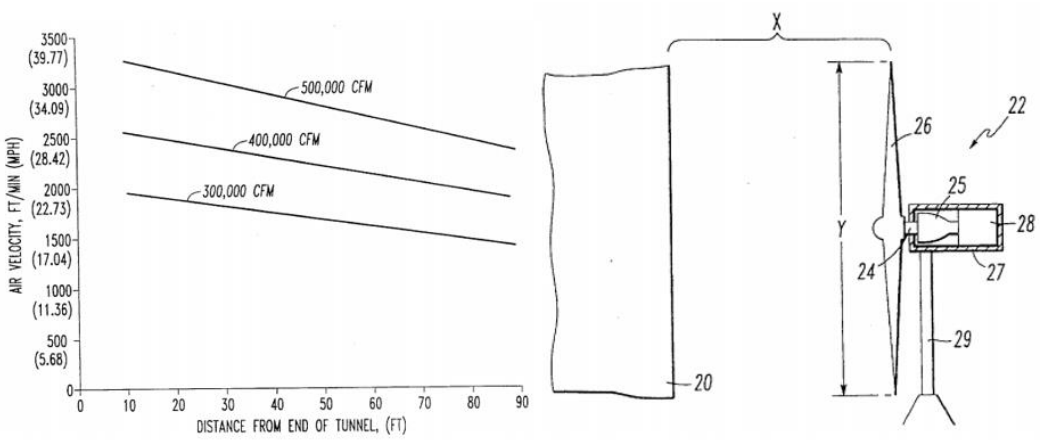


Figura 8. Sistema de recuperación de aire extraído. US005512788A.

En la Figura 9, perteneciente a la patente US 20120070273A1 (DeLuca Jr, 2012), se describe un invento para la recuperación de energía eólica de la extracción de gases de laboratorios, ya sea de un extractor o ducto de ventilación, o un conjunto de estos. Esto también tiene la finalidad de dispersar los contaminantes expulsados en el medio ambiente de una manera segura.

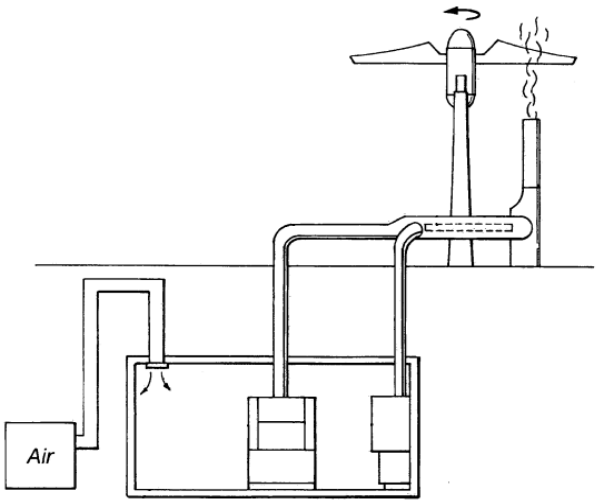


Figura 9. Producción de energía con aerogenerador de gases de laboratorio. US 20120070273A1.

De acuerdo con (Chong, Kong, & Fazlizan, 2013), su invento puede recuperar energía eólica de las torres de enfriamiento que utilizan extractores para expulsar el aire dentro o puede recuperar energía del medio, aunque estos extractores no estén funcionando, además de reducir el consumo eléctrico de los extractores.

Este invento tiene la particularidad de contar con un difusor de aire que redirige la dirección del viento en el ángulo óptimo para el aprovechamiento de la energía a través de las aspas del aerogenerador (Figura 10).

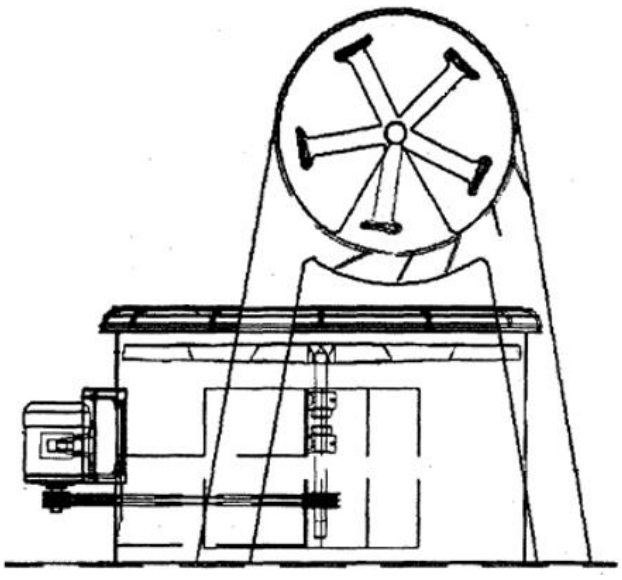


Figura 10. Sistema de recuperación de energía eólica. WO 2013/073930 Al.

Referencias

Bastianon, R. (2008). *Cálculo y diseño de la helice óptima para turbinas eólicas.* Buenos Aires.

Berenda, R. (1996). *EXHAUSTAR RECOVERY SYSTEM. US005512788A.* US: United States Patent.

Betz, A. (1926). *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen.* Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

Bucklin, R. A., Leary, J. D., McConnell, D. B., & Wilkerson, E. G. (2004). Fan and Pad Greenhouse Evaporative Cooling Systems. *IFAS Extension*, 1-7.

Chong, W. T., Kong, Y. Y., & Fazlizan, A. (2013). *WIND AND EXHAUST AIR ENERGY RECOVERY SYSTEM. WO 2013/073930 Al.* Kuala Lumpur (MY): World Intellectual Property.

Cohen, L. J. (2002). *ELECTRICITY GENERATION FROM AIR CONDITIONING EXHAUST. US006365985B1.* RI (US) : United States Patent.

De Battista, H. (2000). *Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica.* Universidad Nacional de La Plata.

DeLuca Jr, R. A. (2012). *ENERGY PRODUCINGWINDTURBINE FOR LABORATORY EXHAUST SYSTEMS. US 20120070273A1.* NY (US): Patent Application Publication.

Escoda, S. (2002). *Manual práctico de ventilación* (Segunda edición ed.). Barcelona: Catálogo técnico.

Evolución Tecnológica Agropecuaria. (2012). *Ficha técnica Extractor Multifan 50´´.* México.

Franquesa, M. (2009). *Introducción a la teoría de las turbinas eólicas.* Berlín: Bauverlag.

Grupo de Cultivos Hortícolas. (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo.* Roma: FAO.

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2008). *Energy, electricity and nuclear powerestimates forthe period up to 2030.* Vienna: IAEA-RDS-1/29.

Mahawili, I. (2012). *EXHAUST ENERGY RECOVERY SYSTEM. US 2012028.0503A1.* Napa, CA (US): Patent Application Publication.

Medina, R. (2011). *Cálculo y diseño de la pala (ehecamani) de un aerogenerador.* México: Instituto Politécnico Nacional.

Montero, J. I., Antón, A., & Muñoz, P. (2018). Refrigeración de invernaderos II.

Moriarty, P., & Honnery, D. (2012). What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 244-252.

Schaeffer, R., Salem Szklo, A., Pereira de Lucena, A. F., Soares Moreira, B., Pinheiro Pupo Nogueira, L., Pereira Fleming, F., . . . Sadeck Boulahya, M. (2012). Energy sector vulnerability to climate change: A review. *Energy*, 1-12.

SECRETARÍA DE ENERGÍA. (2017). *Reporte de avances de energías limpias 2017.* México: SENER.

SIAP. (2017). *Atlas Agroalimentario 2017.* México: SAGARPA.

Soler & Palau. (2018). *Acoplamiento de ventiladores.* Recuperado de https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-acoplamiento-de-ventiladores/: Soler & Palau Sistemas de Ventilación.

Southwest Windpower. (2002). *Manual de usuario Air X.* Arizona: Southwest Windpower, Inc.

Tiwari, G. N. (2003). *Greenhouse technology for controlled environment.* New Delhi: Alpha Science Int'l Ltd.

(2018). *Ventiladores Axiales.* Recuperado el 12 de Septiembre de 2018, de https://www.extractores.net/axiales.htm

CAPÍTULO 3. BALANCE DE ENERGÍA DE EQUIPO EXTRACTOR-AEROGENERADOR[1]

3.1 Resumen

Los sistemas mecánicos de extracción de aire de aire en invernaderos representan una fuente constante y predecible de energía eólica. Por tal razón este trabajo tiene como objetivo implementar un sistema de recuperación de energía eólica para sistemas de extracción de aire en invernaderos. Teóricamente, se desarrolló un balance de energía para el conjunto extractor-aerogenerador. Se determino la curva de potencia del aerogenerador Air X (3 aspas, 1.2 m de diámetro). Se realizaron las siguientes mediciones: velocidad de aire en la entrada y salida del extractor (Multifan 130), velocidad angular de extractor y aerogenerador, voltaje y amperaje consumido por el motor del extractor; todo esto para cuatro casos: sin aerogenerador ni cono, sin aerogenerador con cono, con aerogenerador sin cono y con aerogenerador y cono. Se obtuvieron los perfiles de velocidad de aire los cuales indican que a la salida el mayor potencial eólico se concentra en el Área 4 de medición. Se realizó un análisis estadístico y se determinó que el efecto producido por el aerogenerador y el cono no era significativo en el proceso de extracción. La implementación del sistema permitió recuperar hasta 55% de la energía del motor. El cono incrementó en 10% la potencia eólica de salida del aire. Experimentalmente se demostró el ángulo de cuerda θ óptimo de las aspas de aerogenerador fue a 17 grados, incrementando la recuperación de energía.

Palabras clave: balance energético, aerogenerador, eficiencia, energía, potencia.

[1] Diego Terrazas Ahumada; Eugenio Romantchik Kriuchkova; Eduardo Ríos Urban; Mauricio Santos Hernández; Gilberto de Jesús López Canteñs.

3.2 Abstract

Mechanical air extraction systems in greenhouses represent a constant and predictable source of wind power. For this reason, this work aims to implement a wind energy recovery system for air extraction systems in greenhouses. Theoretically, an energy balance was developed for the fan extractor-wind turbine assembly. The Air X wind turbine (3 blades, 1.2 m diameter) power curve was determined. The following measurements were made: air velocity on the inlet and outlet of the extractor (Multifan 130), angular velocity of extractor and wind turbine, voltage and amperage consumed by the extractor motor; all this for four cases: without wind turbine and without cone, without wind turbine and with cone, with wind turbine and without cone and finally with wind turbine and with cone. The air velocity profiles were obtained, which indicate that at the exit the highest wind potential is concentrated in measurement Area 4. A statistical analysis was carried out and it was determined that the effect produced by the wind turbine and the cone was not significant in the extraction process. The implementation of the system in vacuum allowed recovering up to 55% of the motor's energy. The cone increased the wind output power by 10%. Experimentally was demonstrated the optimal chord angle θ of the blades of wind turbine was at 17 degrees, increasing the energy recovery.

Key words: energy balance, wind power, efficiency, energy, power.

3.3 Introducción

La energía es lo que hace que los objetos puedan moverse o cambien de lugar o estado físico. Se define comúnmente como la capacidad para realizar un trabajo. Puede manifestarse de diferentes formas; como un cambio de velocidad, de altura, radiación electromagnética o movimiento de los átomos de un cuerpo. La ley universal de la conservación de la energía afirma que: “la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía”.

La transformación de la energía es parte importante del análisis de energía, ya que, su transformación de unas formas a otras nos permite poder aprovecharla. De acuerdo con la ley universal de transformación de la energía, antes, durante y después de las transformaciones, la energía total permanece constante, aunque en formas diferentes. Durante el proceso de transformación, una parte de la energía disponible se transforma en energía calorífica, la cual no puede ser aprovechada, y por lo tanto se considera como pérdida. En esta parte se introduce otro concepto importante llamado eficiencia. La eficiencia es la relación entre la energía útil después de la transformación y la energía disponible antes de ésta.

Para el caso de los extractores de aire de instalaciones agrícolas o industriales, la eficiencia se determina dividiendo la potencia entregada al aire entre la potencia eléctrica consumida por el motor del extractor. Algunos estudios han demostrado que se puede mejorar el rendimiento de los extractores al colocar difusores de aire en la salida. Chong et al. (2012) lograron aumentar la velocidad de rotación de un aerogenerador de eje vertical a la salida de un extractor en 125%, utilizando un direccionador de aire omnidireccional.

Existen varios factores ambientales que intervienen en la producción de cultivos y se pueden controlar mediante el uso de invernaderos. Uno de los más importantes es la temperatura, ya que se debe estabilizar dentro de un rango óptimo para diferentes cultivos. La temperatura tiene efectos vitales en las tasas de crecimiento y morfología del desarrollo de las plantas (Grupo de Cultivos

Hortícolas, 2002). Por debajo de ciertos límites de temperatura no existirá crecimiento, a esta temperatura se le conoce como “temperatura base”; por encima de ella, el crecimiento aumentará de manera proporcional al incremento de la temperatura, hasta alcanzar cierta “temperatura óptima”.

El muro húmedo y ventilador 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). Si todas las ventanas y puertas están cerradas cuando están funcionando los ventiladores, el aire es extraído a través de la pared húmeda y el agua se evapora. El aire estará en su temperatura más baja inmediatamente después de pasar a través del muro húmedo. Como el aire se mueve a través del invernadero hacia los ventiladores, el aire absorbe calor de las plantas y del suelo y la temperatura del aire incrementa gradualmente. Esto da como resultado un gradiente de temperatura a lo largo del invernadero, con el lado del muro estando más frio y el lado de los ventiladores más caliente (Bucklin, Leary, McConnell, & Wilkerson, 2004).

El tema de energía renovable ha tomado importancia los últimos años debido a los problemas sobre el cambio climático con los que se enfrenta la sociedad. En este punto cabe resaltar el campo de las energías renovables; la energía eólica, es decir la energía que se obtiene del viento. Existen máquinas para extraer la energía eólica y convertirla en energía eléctrica llamadas aerogeneradores o turbinas eólicas. La máxima eficiencia que se puede obtener del viento según Betz (1926) es del 59%. Para obtener una alta eficiencia general, se debe considerar el sistema completo, que incluye la turbina, las piezas mecánicas, como los rodamientos de bolas, el sistema de poleas y las partes eléctricas, como el generador, el convertidor de corriente y el sistema de almacenamiento de energía (Minh & Melis, 2013). Hay una serie de mecanismos mediante los cuales se puede aumentar la potencia de salida de una turbina. Con la turbina cubierta por el difusor, el caudal másico de aire a través de una turbina aumenta en función de la presión subatmosférica en el plano de salida del difusor (Kosasih &

Tondelli, 2012), con lo que, el coeficiente de rendimiento del micro aerogenerador aumentó en aproximadamente un 60% con la adición de un difusor cónico simple.

Un factor importante que se debe conocer para determinar la energía generada por un aerogenerador en función de la velocidad de viento es la curva de potencia (De Oliveira, Salviano, Albiero, Castro, & De Almeida, 2014), es esencial en el aprovechamiento del potencial eólico. Existen normativas que agrupan los parámetros requeridos para determinar las curvas de potencia como intensidad y dirección de viento y potencia (Oliva, 2006).

El diseño de las aspas de los aerogeneradores es otro factor importante en el proceso de recuperación de energía eólica. El diseño aerodinámico de las aspas establece el ángulo de ataque que alcanza la máxima eficiencia y el diseño mecánico determina la distribución de las fuerzas y torsión que se puede diseñar en la práctica. Khakpour & Half (2018) presentan una metodología para diseñas una hélice flexible con un ángulo de giro activamente variable. Mediante el uso de actuadores en las secciones de las hélices flexibles, se consigue aumentar la velocidad tangencial en 3.8% y la velocidad normal en 3.3%.

Los extractores de aire en las grandes industrias pueden desempeñar un papel fundamental en la producción de energía eléctrica que puede ser utilizada en varios sistemas. La fuerza del viento proveniente del extractor de aire puede dirigirse hacia un pequeño molino de viento en frente de este (Patnaik & Ali, 2013). La velocidad de aire saliente de los extractores es de 1.5 a 2 veces mayor que la velocidad del viento en la atmosfera. Chauhan & Singh (2014) realizaron un diseño de aerogenerador casero de eje vertical con palas helicoidales para la recuperación de energía de extractores, reduciendo el consumo de energía de los sistemas de extracción de aire.

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 (Romantchik & Rios, 2017). Sin embargo, debe realizarse un análisis de la energía que se gasta y la energía recuperada, es decir; un balance energético para determinar si el equipo es funcional.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Balance de energía en el Extractor de aire

Para poder determinar a donde se va la energía utilizada en el proceso de extracción de aire se definieron los parámetros de medición, que se utilizaron para realizar el balance energético y determinar la eficiencia de extracción. Para comenzar con el análisis se definió primero la potencia consumida por el motor eléctrico del extractor y como se transforma. La potencia eléctrica consumida por el extractor (P_{ele}) se divide en dos partes: la potencia necesaria para mover el aire hasta las aspas de extractor (P_e), y la potencia gastada en impulsar el aire hacia el medio ambiente (P_{imp}) como se muestra en la ecuación (13) (Figura 1).

$$P_{ele} = P_e + P_{imp} \qquad [W] \qquad (13)$$

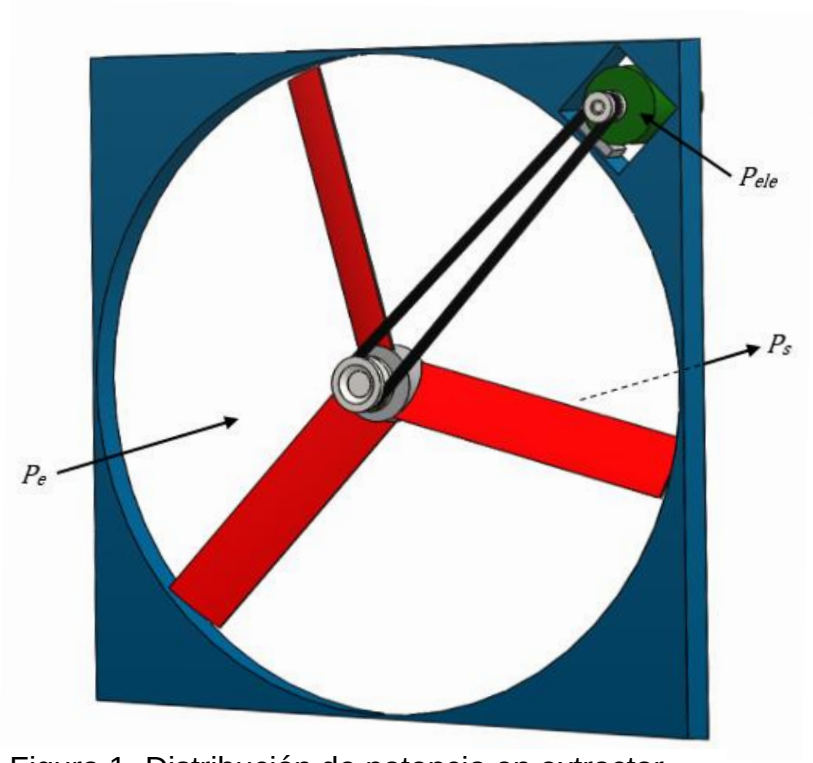


Figura 1. Distribución de potencia en extractor.

La ecuación (13) es para el caso en el que se considera que durante la transformación de energía no existen pérdidas. Para el caso de la potencia eólica de salida del extractor (Ps) se tiene la ecuación (14) (Figura 2).



Figura 1. Componentes de la potencia de salida de aire del extractor.

$$P_s = P_e + P_{imp} \qquad [W] \qquad (14)$$

De aquí se observa que la potencia eólica de salida se puede igualar con la potencia eléctrica consumida por el motor del extractor:

$$P_{ele} = P_s \qquad [W] \qquad (15)$$

Esto estaría indicando que para el caso ideal en el que no se consideran pérdidas, toda la potencia eléctrica consumida por el motor del extractor sale a la atmosfera, por lo que **se pierde**. Si con estas ecuaciones calculamos la eficiencia energética sin perdidas del extractor (η_x) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\eta_x = \frac{P_{ele} - P_s}{P_{ele}} = \frac{0}{P_{ele}} = 0$$

la cual expresa que la eficiencia energética del sistema de extracción será la potencia eléctrica consumida por el motor del extractor menos la potencia eólica perdida en el medio ambiente, dividido esto entre la potencia eléctrica consumida. De aquí resulta eficiencia energética con este análisis es **cero.**

Las pérdidas de potencia del extractor se presentan en la Figura 3. Para poder realizar el balance de energía en el extractor, es necesario primero definir donde se pierde parte de la potencia que está consumiendo el motor;

- En primer lugar, se encuentra la potencia eléctrica consumida, la cual es mayor a las demás, y es la que irá disminuyendo conforme a la transformación de la energía (P_{ele}).
- En el cobre del estator se pierde potencia debido al efecto Joule (P_{es}).
- La potencia de perdidas en el hierro se refiere al asentamiento de corrientes parásitas y son de tipo magnético (P_h).

- En el cobre del rotor también se da el efecto Joule por lo que se presentan pérdidas de potencia (P_{rot}).
- La siguiente parte donde se presentan pérdidas de potencia es en las partes mecánicas del equipo tales como rodamientos, ejes, poleas y correa de transmisión (P_{mec}).
- Por último, se encuentran las pérdidas al momento de transformar la energía mecánica de las aspas en energía eólica, ya que no toda la energía se transmite al aire (P_{asp}).

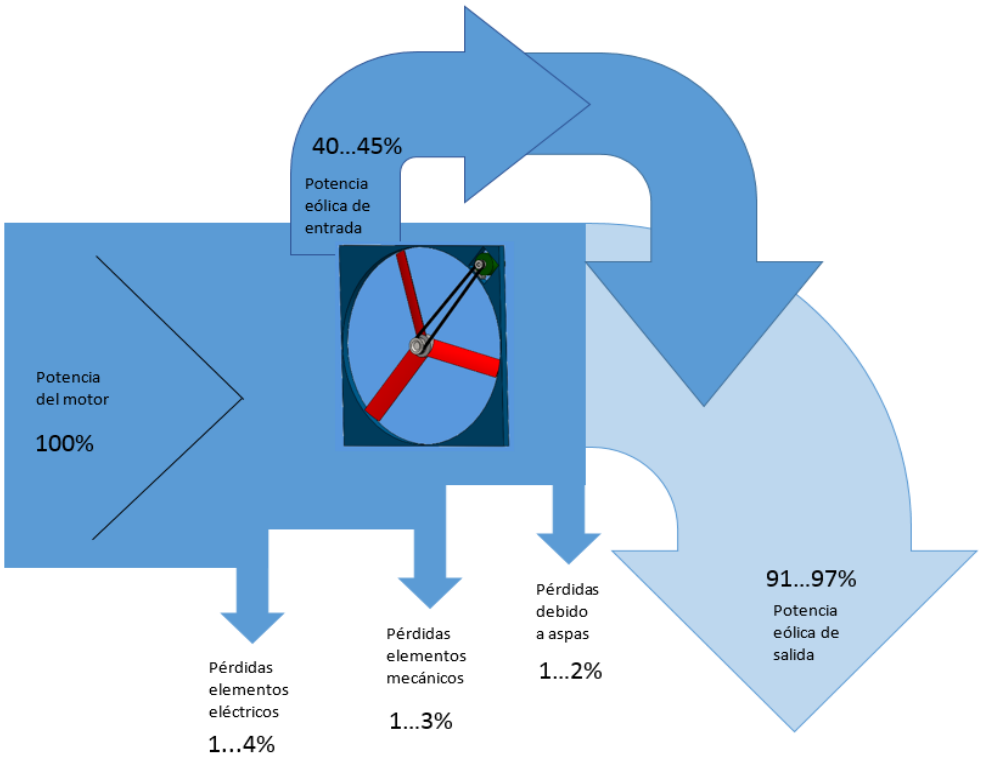


Figura 3. Balance de energía de extractor de aire.

De aquí resulta el siguiente balance de potencias:

$$P_s = P_{ele} - \left(P_{es} + P_h + P_{rot} + P_{mec} + P_{asp}\right) \qquad [W]$$

Las perdidas eléctricas se pueden representar como $P_{elec} = P_{es} + P_h + P_{rot}$ por lo que:

$$P_s = P_{ele} - \left(P_{elec} + P_{mec} + P_{asp}\right) \qquad [W] \qquad (16)$$

Donde $P_{elec} = (0.01\ a\ 0.04)P_{ele}$, $P_{mec} = (0.01\ a\ 0.03)P_{ele}$ y $P_{asp} = (0.01\ a\ 0.02)P_{ele}$

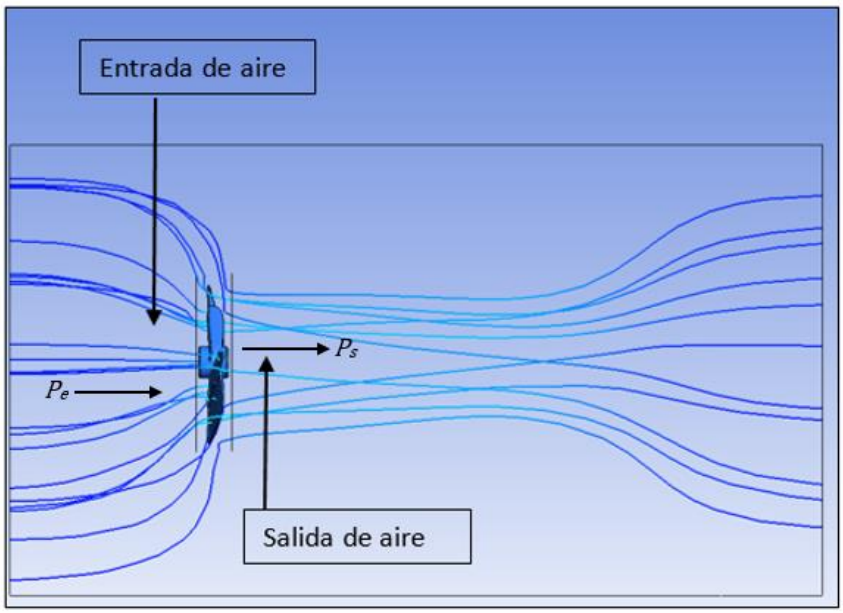


Figura 4. Entrada y salida de aire en un extractor.

Para determinar el rendimiento el extractor (η_{ext}); se divide la potencia entregada al aire por el extractor entre el consumo eléctrico del motor del extractor (Air Movement and Control Association International, Inc., 2010) como se muestra en la ecuación (17):

$$\eta_{ext} = \frac{Q * p_T}{P_{ele}} = \frac{P_e}{P_{ele}} \qquad (17)$$

Donde Q es el caudal generado por el extractor, p_T es la presión total en el sistema de circulación de aire y P_{ele} es la potencia electica consumida por el motor de extractor. Una vez hecho el análisis de la transformación de energía en el extractor, lo siguiente es realizar el desarrollo correspondiente para el aerogenerador.

3.4.2 Aerogenerador

En el caso del aerogenerador se realiza el análisis energético en función de la energía eólica antes de pasar por las aspas de éste (P_s), la energía eléctrica generada (P_{rec}), y la potencia final del aire después de pasar por el aerogenerador.

Para determinar la distribución de la potencia eólica al pasar por el aerogenerador se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_s = P_{rec} + P_f \qquad [W] \qquad (18)$$

Donde:

P_s: potencia del aire antes de pasar por el aerogenerador

P_{rec}: potencia eléctrica recuperada por el aerogenerador

P_f: potencia final del aire después de pasar por el aerogenerador

Sin embargo, en la ecuación (18) no se está considerando las pérdidas que ocurren durante el proceso de transformación de la energía. En la Figura 5 se ilustran estas pérdidas. La ecuación para determinar la potencia eléctrica recuperada por el aerogenerador ya considerando todas las pérdidas durante el proceso es la siguiente:

$$P_{rec} = 0.59P_s - P_{2asp} - P_{2mec} - P_{2elec} \qquad [W] \qquad (19)$$

Donde:

$P_{2asp} = (0.01\ a\ 0.02)0.59\mathrm{P_s}$: Perdida de potencia debido a la eficiencia de las aspas del aerogenerador.

$P_{2mec} = (0.01\ a\ 0.03)0.59\mathrm{P_s}$: Perdida de potencia debido a las partes mecánicas del aerogenerador (eje, rodamientos, engranajes).

$P_{2elec} = (0.01\ a\ 0.04)0.59\mathrm{P_s}$: Perdida de potencia debido a elementos eléctricos del aerogenerador (rotor, hierro, estator, cables, regulador de potencia).

Con estos datos se presenta la ecuación (19) de la siguiente manera:

$$\mathrm{P_{rec}} = 0.59\mathrm{P_s}(1 - 0.01 - 0.01 - 0.01)$$

$$\mathrm{P_{rec}} = 0.57\mathrm{P_s}$$

Para determinar el rendimiento de un aerogenerador (η_a) se deben medir la potencia eólica antes de pasar por las aspas (P_s) y la potencia eléctrica generada por éste (P_{rec}).

$$\eta_a = \frac{P_{rec}}{P_s} \qquad (20)$$

$$\eta_\mathrm{a} = \frac{0.57\mathrm{P_s}}{\mathrm{P_s}} = 0.57$$

La potencia máxima recuperada será 57% de la potencia eólica disponible.

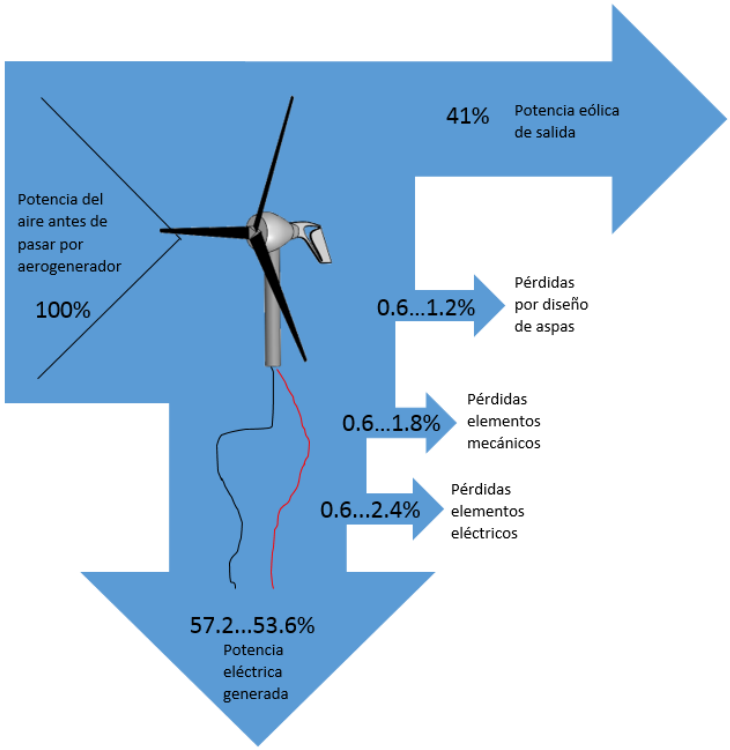


Figura 5. Balance energético de aerogenerador de aire.

3.4.3 Experimento en banco de pruebas

Para realizar las mediciones eléctricas de voltaje y amperaje en los experimentos, se utilizaron 3 multímetros (Figura 6) : un multímetro Steren Mul 270 de 200 mV a 1000 Volts VCD (resolución 0.1 mV), 2 a 750 Volts VCA (resolución 0.1 mV), de 2 mA a 20 Amperes ACD (resolución 1 µA), de 20 mA a 20 Amperes ACA(resolución 10 µA, un multímetro Steren Mul 265 de 600 mV a 1000 Volts VCD (resolución 0.1 mV), 2 a 750 Volts VCA (resolución 0.1 mV), de 60 µA a 20 Amperes ACD (resolución 0.01 µA), de 20 mA a 20 Amperes ACA (resolución 0.01 mA) y un multímetro Unit t UT204 de 400 mV a 600 Volts VCD (resolución 1 mV), 4 a 600 Volts VCA (resolución 0.1 V), de 40 A a 400 Amperes ACD (resolución 1 A), de 40 A a 400 Amperes ACA(resolución 1 A).



Figura 6. Multímetros utilizados.

Se realizaron mediciones a diferentes velocidades angulares de voltaje y amperaje para determinar la curva característica de potencia del aerogenerador Air X, conectado a una batería de 12 volts de 17 placas (Figura 7). Para llevar a cabo el experimento se utilizó un tacómetro óptico Extech, dos multímetros Steren, aerogenerador Air X, un motor trifásico de 2 hp y un variador de frecuencia para poder controlar la velocidad de giro.

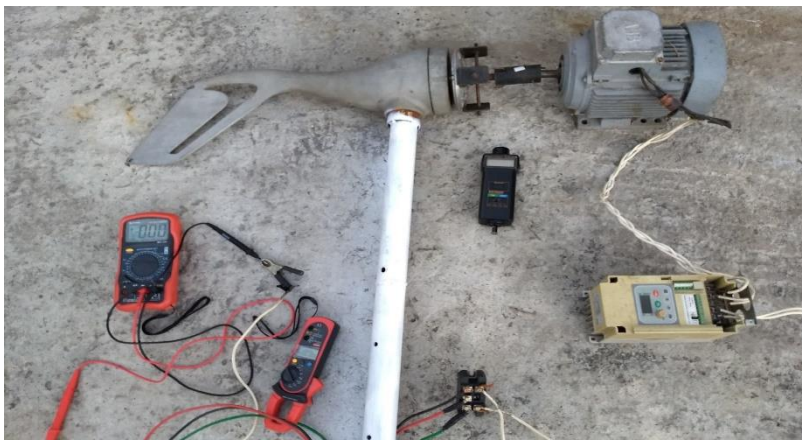


Figura 7. Determinación de principales parámetros de aerogenerador.

3.4.4 Mediciones en campo

El experimento se realizó en el área de agricultura protegida, ubicada en el campo experimental “El Ranchito” perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, durante 2017 y 2018 (Figura 8). El invernadero cuenta con

pared húmeda y dos extractores, con las siguientes medidas: 30 m de largo por 10 m de ancho, el área de la pared húmeda por donde entra el aire es de 10 m de ancho por 1.5 m de alto.



Figura 8. Invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo.

Las mediciones de los parámetros principales se realizaron en uno de los extractores (Multifan 130); él cual tiene un diámetro de 1.3m, es del tipo axial con 3 aspas, trabaja a 550 rpm y es impulsado por un motor de 1.5 hp.

Se colocó un aerogenerador de tres aspas y 1.2 m de diámetro (Air X) a diferentes distancias del extractor de aire Multifan 130 en el invernadero para determinar la resistencia que representaba a la extracción de aire. Se midieron las velocidades angulares del extractor y del aerogenerador (Figura 9), a diferentes distancias entre ellos para obtener la relación de la velocidad de giro en función de la distancia. Para esto se utilizó el fototacómetro Extech.



Figura 9. Medición de RPM con fototacómetro Extech

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. En la Figura 10 se muestra el diagrama seguido para realizar las mediciones de velocidad, se dividió el área total del extractor en círculos concéntricos, para determinar los perfiles de velocidad de aire, realizando 4 mediciones por área a 90 grados cada una. El caudal de aire se obtiene multiplicando la velocidad media del aire y el área en la entrada del modelo (Fazlizan, Chon, Yip, & Poh, 2015). El rendimiento del sistema de extracción de aire es evaluado por el caudal de aire y el consumo de energía del motor.

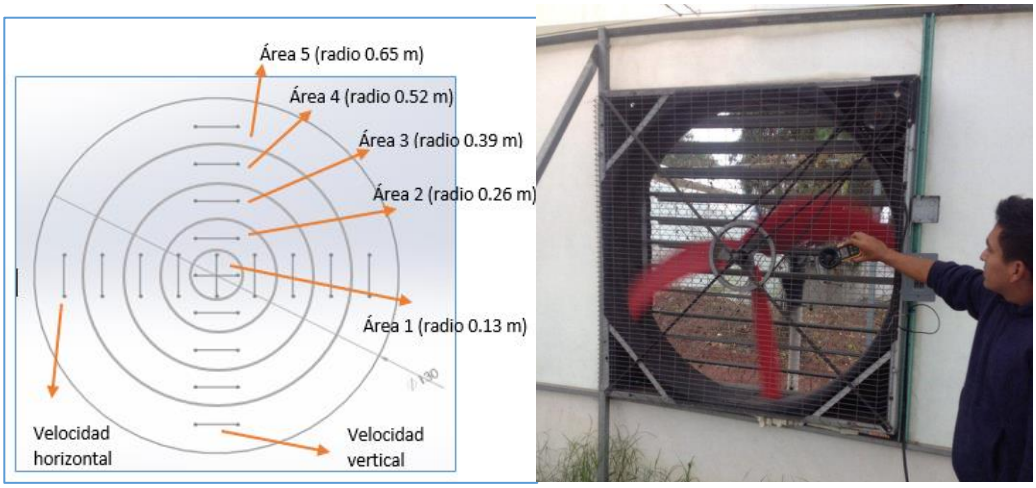


Figura 10. Puntos de medición de velocidad de aire en el extractor.

El consumo de corriente del motor del extractor se midió utilizando dos multímetros Steren, uno midiendo voltaje y el otro la corriente en una línea, para estudiar si tiene un efecto el colocar el aerogenerador frente al extractor en el consumo de energía del sistema de extracción de aire. La entrada de potencia P_e al sistema de extracción de aire se determinó mediante la siguiente ecuación (Chong, et al., 2013):

$$P_e = V_m * I_m$$

donde V es el voltaje consumido por el motor y I es la corriente eléctrica.

Las mediciones de voltaje, amperaje, velocidad angular y velocidad de aire se realizaron para cuatro tratamientos (Figura 11):

1. Extractor sin cono, sin aerogenerador.
2. Extractor con un cono colocado en la salida de aire, sin aerogenerador.
3. Extractor sin cono, con aerogenerador frente a la salida de aire.
4. Extractor con cono, con aerogenerador colocado a la salida del extractor.

En la Figura 12 se presentan las dimensiones del cono construido para las pruebas.



Figura 11. Medición de parámetros para los 4 casos de extracción de aire.

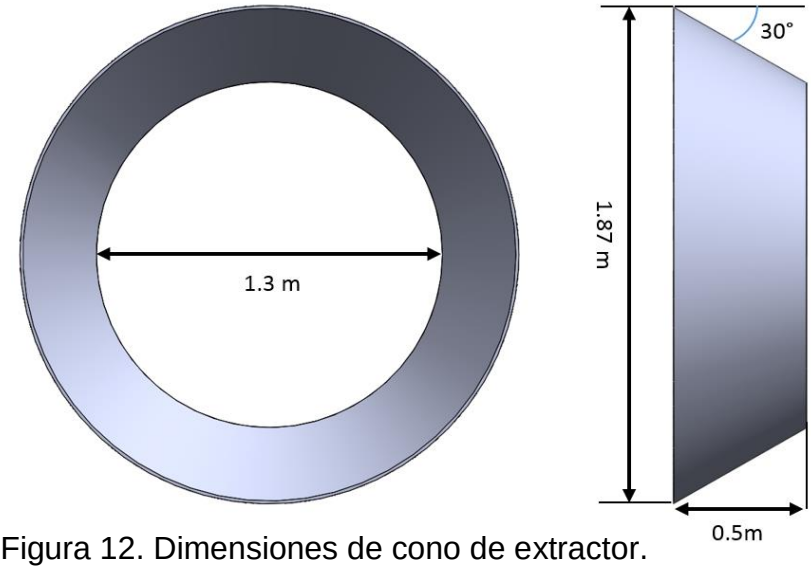


Figura 12. Dimensiones de cono de extractor.

Para poder determinar experimentalmente el ángulo óptimo de las aspas del aerogenerador Air X, se adaptaron conexiones en cada una de las aspas como se presenta en la Figura 13, con lo que se consiguió girar las aspas en cualquier



Figura 13. Modificación del ángulo de aspas del aerogenerador Air X.

ángulo (θ) de la cuerda del aspa con respecto al plano de giro de las aspas. Una vez colocado el aerogenerador fuera del extractor, se tomaron las mediciones de RPM para diferentes ángulos de las aspas, con el aerogenerador conectado a una batería de 12 volts. Para este experimento se mantuvo la distancia fija entre el extractor y el aerogenerador, a 50 centímetros de distancia. Esto se realizó debido que la fuerza de sustentación que se genera en las aspas aumenta junto con el aumento del ángulo de ataque y cae después del ángulo crítico de ataque (Chong, et al., 2014). Como se observa en la Figura 14, la variación del ángulo de cuerda θ provoca que cambie la magnitud de la velocidad relativa, por lo que se busca el ángulo de ataque que maximiza la velocidad relativa, consiguiendo así mayor velocidad tangencial de las aspas.

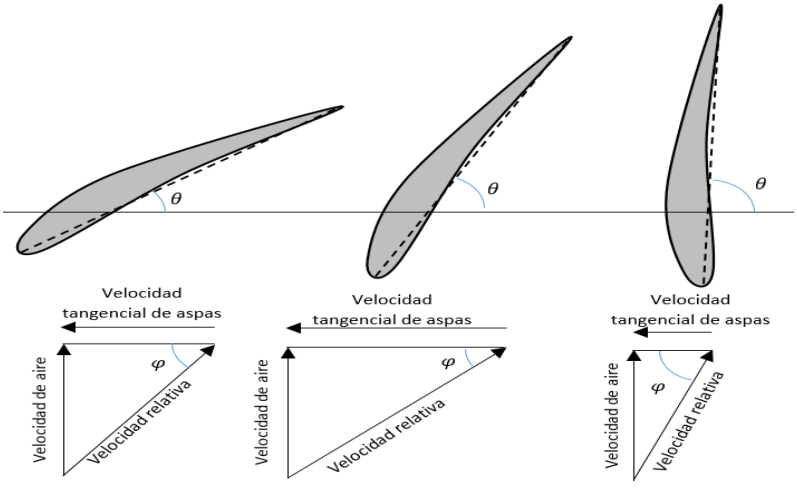


Figura 14. Diferentes ángulos del perfil aerodinámico.

Se realizo otro experimento en el campo experimental perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, en un invernadero que cuenta con un extractor EOS53/1,5, el cual cuenta con 6 aspas, tiene 1.35 cm de diámetro y un motor de 1.10 KW. Se tomaron mediciones de velocidad de aire en la entrada y salida del extractor, velocidad angular de aspas de extractor, voltaje y amperaje del motor del extractor, para determinar los perfiles de velocidad de aire y la variación en el consumo de energía eléctrica al colocar el aerogenerador. Para este experimento solo se realizaron dos tratamientos: sin aerogenerador y con aerogenerador como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Mediciones en extractor EOS53/1,5.

3.5 Resultados

3.5.1 Conjunto extractor-aerogenerador

Con las fórmulas presentadas anteriormente, se puede realizar un análisis del conjunto extractor-aerogenerador para describir la distribución de la energía durante el proceso de recuperación.

La ecuación para determinar la potencia eléctrica recuperada por el conjunto extractor-aerogenerador es la ecuación (21):

$$P_{rec} = \left[D(P_{ele} - P_{elec} - P_{mec} - P_{asp})\right]\left[0.59\left(1 - P_{2asp} - P_{2mec} - P_{2elec}\right)\right] \quad [W] \qquad (21)$$

Donde:

P_{rec}: Potencia eléctrica recuperada por el aerogenerador.

P_{ele}: Potencia eléctrica consumida por el extractor de aire.

$P_{elec} = (0.01\ a\ 0.04)P_{ele}$: Pérdida de potencia debido a elementos eléctricos del motor de extractor (cobre de rotor, cobre de estator, en el hierro, cables conductores).

$P_{mec} = (0.01\ a\ 0.03)P_{ele}$: Pérdida de potencia debido a partes mecánicas del extractor (rodamientos, ejes, poleas, correa)

$P_{asp} = (0.01\ a\ 0.02)P_{ele}$: Pérdida de potencia debido a la eficiencia de las aspas del extractor.

$D = 0.99$: Coeficiente de difusión del aire en el medio ambiente.

$P_{2asp} = (0.01\ a\ 0.02)$: Pérdida de potencia debido a la eficiencia de las aspas del aerogenerador.

$P_{2mec} = (0.01\ a\ 0.03)$: Pérdida de potencia debido a las partes mecánicas del aerogenerador (eje, rodamientos, engranajes).

$P_{2elec} = (0.01\ a\ 0.04)$: Pérdida de potencia debido a elementos eléctricos del aerogenerador (rotor, hierro, estator, cables, regulador de potencia).

$P_{2s} = 0.41$: Potencia del aire después de pasar por el aerogenerador.

El coeficiente de difusión de aire en el medio ambiente va a depender directamente de la presión ambiental y la presión con la que sale el aire del

invernadero debido al extractor. Con los valores propuestos de las perdidas anteriormente, se tiene lo siguiente:

$$P_{rec} = [0.99(1P_{ele} - 0.01P_{ele} - 0.01P_{ele} - 0.01P_{ele})][0.59(1 - 0.01 - 0.01 - 0.01)]$$

$$P_{rec} = [0.99(0.97P_{ele})][0.59(0.97)]$$

$$P_{rec} = 0.55P_{ele} \qquad [W]$$

Para determinar la eficiencia del conjunto extractor-aerogenerador se obtuvo entonces la ecuación (22), la cual indica que la eficiencia del equipo extractor-aerogenerador será la relación de la potencia eólica en la entrada del extractor más la potencia eléctrica recuperada, todo esto dividido entre la potencia eléctrica consumida por el motor del extractor.

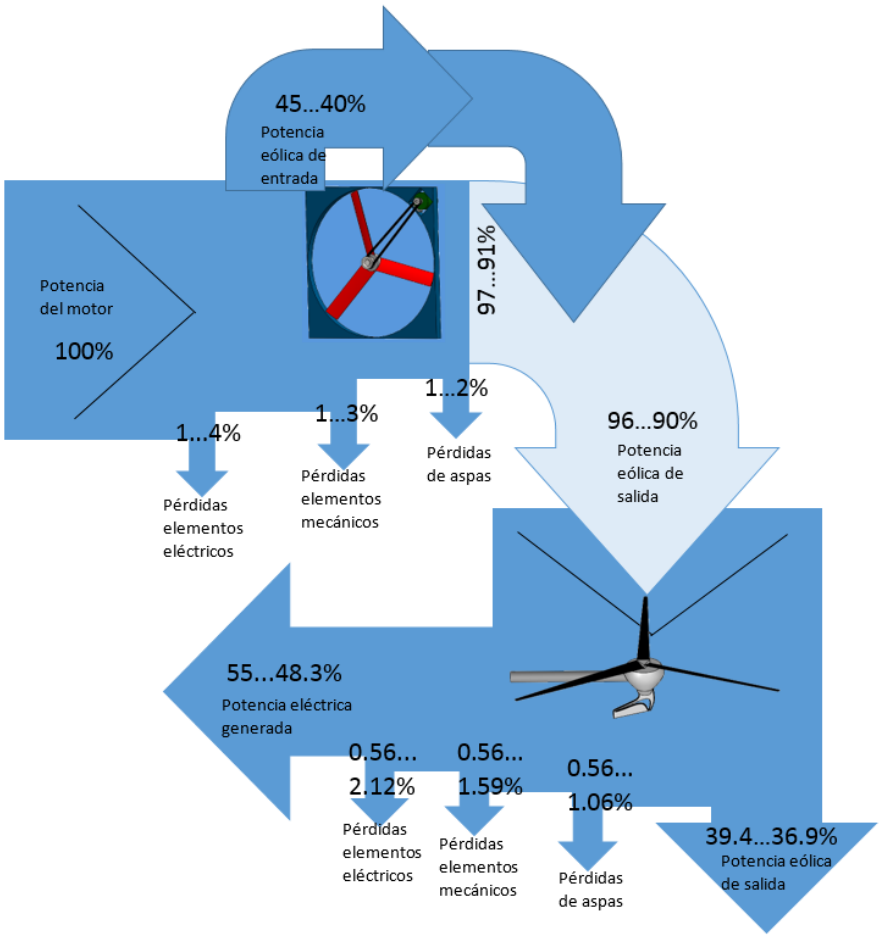


Figura 16. Balance energético de equipo extractor-aerogenerador.

$$\eta_t = \frac{P_{rec}}{P_{ele}} \qquad (22)$$

$$\eta_t = \frac{0.55P_{ele}}{P_{ele}} = 0.55$$

Teóricamente, la máxima eficiencia del sistema de recuperación de energía eólica es 55%.

3.5.2 Banco de pruebas

Con la medición de los principales parámetros del aerogenerador Air X en el banco de pruebas, se construyó la curva característica en función de la velocidad angular como se muestra en la Figura 17, para diferentes bancos de cargas; el primero de 12 volts, el segundo de 24 volts y por último la potencia en vacío, es decir, sin conectar a un banco de carga.

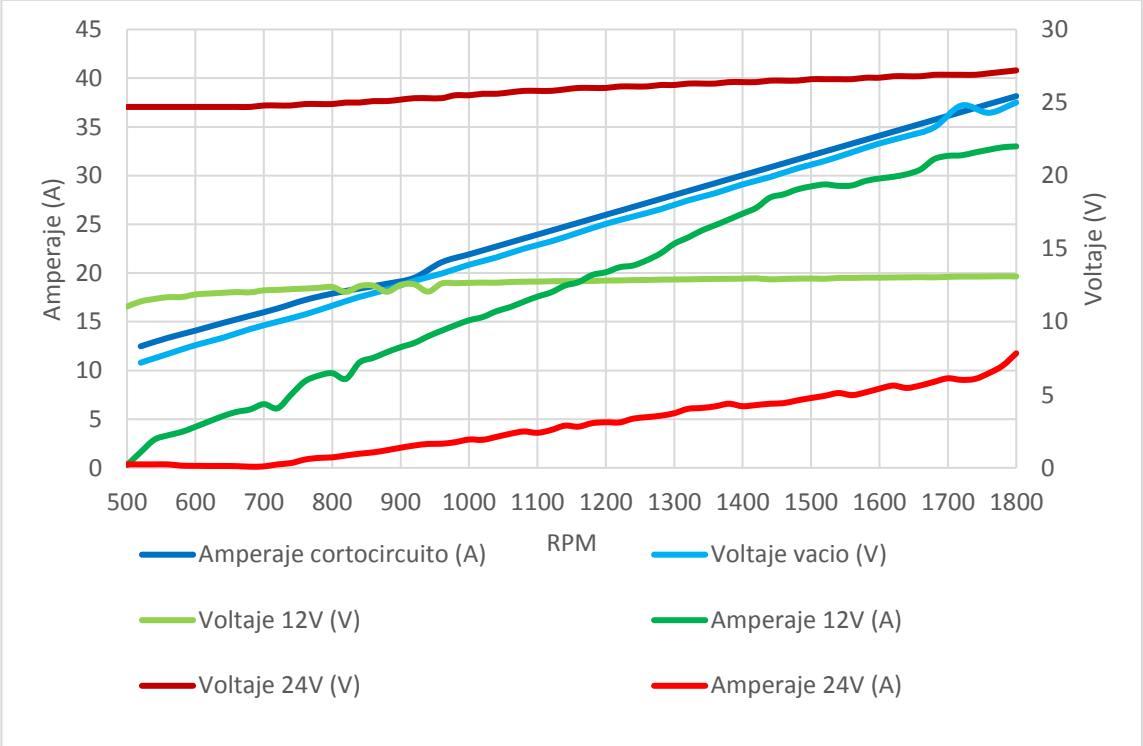


Figura 17. Curvas características de voltaje y amperaje.

Con estas curvas se puede determinar la máxima potencia producida por el aerogenerador, en función de la velocidad angular, además se observa que este aerogenerador es más eficiente conectado a un banco de carga de 12 volts, ya que produce casi el doble de energía que conectado al banco de carga de 24 volts (Figura 18).

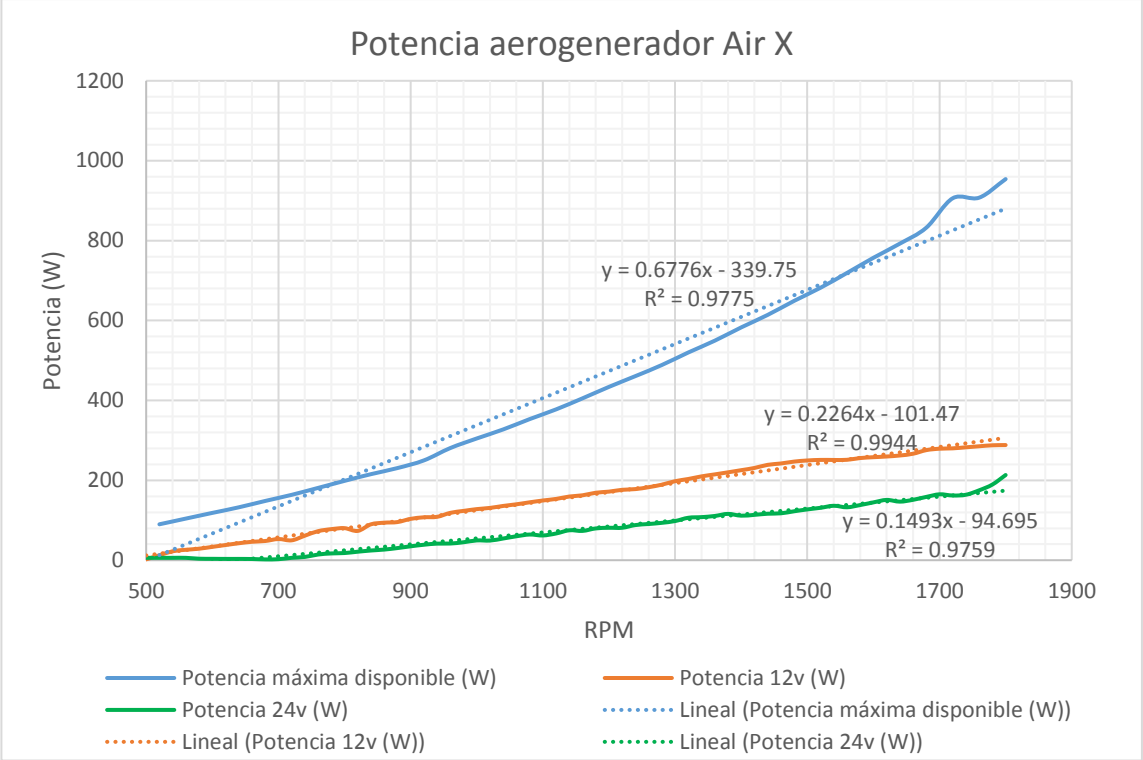


Figura 18. Curva de potencia del aerogenerador Air X para diferentes cargas.

3.5.3 Perfiles de velocidad de aire

El Cuadro 1 muestra las velocidades de aire obtenidas durante la medición en campo, de esta manera se pudo determinar el perfil de velocidad de aire en la entrada y salida del extractor, caudal y potencia eólica generada en el proceso, estos perfiles de velocidad se presentan a la derecha del cuadro. La máxima potencia eólica que se puede obtener del aire en movimiento se produce justo a la salida del extractor de aire y es de 561 watts, para un diámetro de 1.3 metros. Cabe destacar que la mayor velocidad de aire se concentra a 50 centímetros del centro del extractor, lo que significa que en este lugar se puede recuperar la mayor cantidad de energía del área por donde fluye el aire extraído. Debido a la difusión del aire en el medio ambiente, a un metro de distancia del extractor, tomando en cuenta la misma área que en el extractor, ya solo existen 290 watts disponibles en el aire. A esta distancia, el perfil de velocidad de aire comienza a normalizarse, ya que existe menor diferencia entre las velocidades para los distintos puntos de medición.

Cuadro 1. Velocidades de aire en entrada y salida de extractor.

	Radio [m]	Velocidad promedio [m/s]	Área [m^2]	Caudal [m^3/s]	Potencia total [W]
Salida a 1 m	0.65	4.77	1.33	9.71	289.76
Salida a 0.5 m	0.65	5.26	1.33	10.71	387.08
Salida	0.65	5.95	1.33	12.14	561.30
Entrada	0.65	4.4	1.33	9.23	227.24

En la Figura 19 se presenta gráficamente el comportamiento de la velocidad del aire antes y después de pasar por el extractor de aire. estos perfiles son de gran importancia ya que permiten identificar en donde se concentra la mayor potencia de aire. En el centro del extractor, se encuentra la menor velocidad de aire, y por tanto, es donde hay menor potencia eólica.

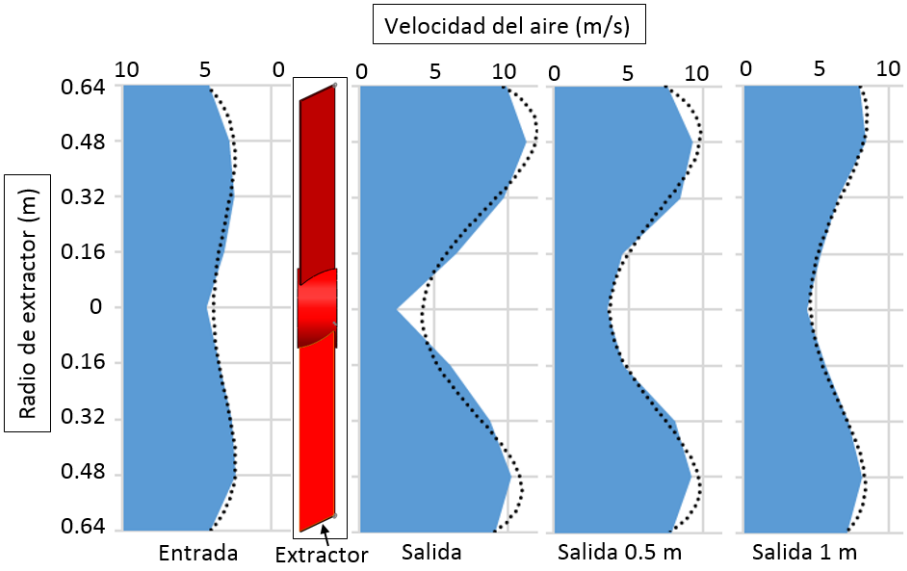


Figura 19. Perfil de velocidad de aire del extractor.

De acuerdo con los resultados presentados en el Cuadro 2, el cono colocado en la salida de extractor de aire evita que se disperse la energía eólica en el medio ambiente, es decir, hay mayor energía eólica disponible para recuperar. Al colocar el aerogenerador a 50 centímetros del extractor sin cono, la potencia eólica de salida disminuyo 20%, aunque al colocar el cono la potencia disponible aumentó. El consumo de energía del motor del extractor se mantuvo en un promedio de 1.2 kW en cada caso.

Cuadro 2. Principales parámetros medidos y calculados para los cuatro casos con y sin aerogenerador.

Tratamiento	Aire				Extractor			
	Entrada	Salida		Salida 0.5 m	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia eléctrica (W)
	Potencia (W)	Caudal (m^3/s)	Potencia (W)	Potencia (W)				
1. Extractor sin persiana, sin cono, sin aerogenerador	226.3	12.1	561.3	388.8	547.6	209.3	5.7	1201.5
2. Extractor sin persiana, sin cono, con aerogenerador	215.6	11.4	485.5	308.9	542.8	208.7	5.8	1204.0
3. Extractor sin persiana, con cono, sin aerogenerador	249.1	13.1	685.8	518.3	542.4	208.0	5.7	1196.0
4. Extractor sin persiana, con cono, con aerogenerador	228.7	12.7	622.3	494.9	540.3	209.3	5.7	1197.4

El caudal de salida de aire aumentó 8.3% entre los tratamientos 1 y 3, al colocar el cono. En el tratamiento 4 el caudal aumentó 5% con respecto al tratamiento 1. Se observa que, al colocar el aerogenerador, el caudal de extracción disminuye, pero al colocar el cono se corrige este efecto. La velocidad angular de las aspas del extractor se mantuvo constante para los cuatro tratamientos, al igual que el consumo eléctrico del motor del extractor. Al colocar el cono y el aerogenerador a la salida del extractor, no se afecta el proceso de extracción de aire del invernadero, un factor que podría traer consecuencias al cultivo dentro del invernadero si se viera reducido.

3.5.4 Análisis estadístico de velocidades de aire en extractor

Se realizó un análisis exploratorio de los datos, los cuales representan mediciones de velocidad en los perfiles horizontal y vertical a lo largo del diámetro del extractor. Los datos se tomaron en 3 lugares distintos: en la entrada al extractor, en la salida y a 0.5 metros de la salida del extractor. Los datos se tomaron con 4 tratamientos, los cuales fueron:

T1: Sin cono y sin aerogenerador

T2: Sin cono y con aerogenerador

T3: Con cono y sin aerogenerador

T4: Con cono y con aerogenerador

Para conocer el comportamiento de los datos se realizaron los histogramas por tratamiento para las velocidades medidas en el área de barrido del extractor de aire (Figura 20), para cada lugar de medición.

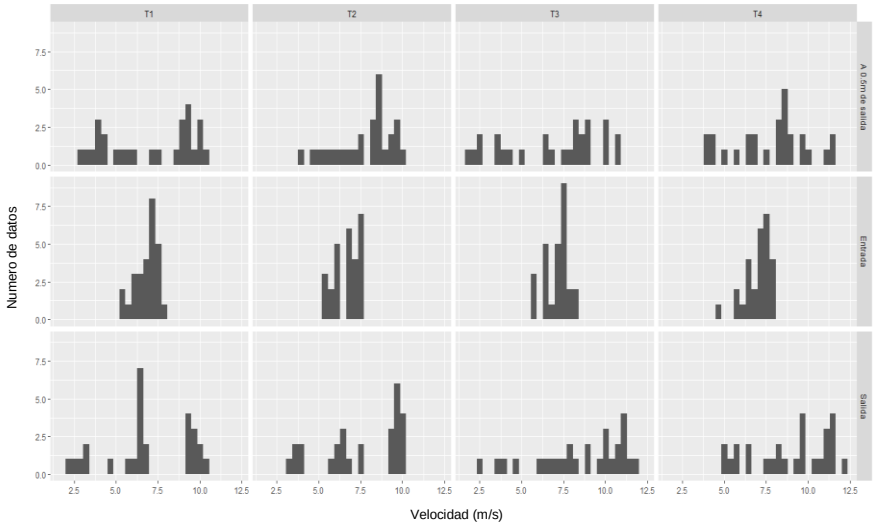


Figura 20. Histogramas de velocidad de aire en extractor.

Se observó en los histogramas que los datos medidos en la entrada del extractor se distribuyen de manera similar a la distribución normal, mientras que los demás no presentaron este comportamiento.

Se realizó una prueba de normalidad para corroborar lo observado en los histogramas. Se utilizó la prueba de Shapiro–Wilks (Molinero, 2003) y se planteó la siguiente prueba de hipótesis:

H0: La muestra proviene de una distribución normal.

H1: La muestra no proviene de una distribución normal.

Criterio de Decisión:

Si p-valor < α; Se rechaza Ho

Si p-valor >= α; No se rechaza Ho

Para esta prueba de hipótesis, se consideró un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Cuadro 3. Prueba de normalidad.

Lugar medición	Tratamiento	W	P-valor
Entrada	T1	0.885	0.006
	T2	0.897	0.011
	T3	0.906	0.018
	T4	0.936	0.099
Salida	T1	0.873	0.003
	T2	0.922	0.044
	T3	0.87	0.003
	T4	0.876	0.004
A 0.5m de salida	T2	0.908	0.02
	T1	0.89	0.008
	T3	0.93	0.07
	T4	0.955	0.28

De la prueba de hipótesis (Cuadro 3), se concluyó que en la mayoría de los casos se rechaza la hipótesis nula, es decir los datos no provienen de una distribución normal. Se presentan algunos casos en los que no se rechaza la hipótesis nula, sin embargo, los valores del p-valor se encuentra muy cerca del nivel de significancia por lo que no se tiene suficiente evidencia para asegurar que provienen de una distribución normal. Con estos resultados se decidió realizar pruebas no paramétricas al no ser validos los supuestos de normalidad para estos datos, lo que impidió realizar pruebas convencionales.

Prueba de Kruskal-Wallis

Se eligió la prueba de Kruskal-Wallis (Badii, et al., 2012), se realizó la prueba con los datos en la salida para buscar diferencias significativas entre los tratamientos. La prueba de Kruskal-Wallis (de William Kruskal y W. Allen Wallis) es un método no paramétrico para probar si un grupo de datos proviene de la misma población (Badii, et al., 2012). En este caso permitió determinar si existían diferencias significativas en los tratamientos.

Se analizo si existía una diferencia significativa en la velocidad del viento en la salida cuando se agrega un cono y aerogenerador (Cuadro 4).

Cuadro 4. Prueba de Kruskal-Wallis en la salida.

Kruskal-Wallis rank sum test (SALIDA)			
data: Vel by Tratamiento			
Kruskal-Wallis chi-squared = 1.711, df = 3, p-value = 0.6345			
Multiple comparison test after Kruskal-Wallis			
Comparisons			
	Diferencia observada	Diferencia crítica	Diferencia
T1-T2	3.055556	22.48976	FALSE
T1-T3	3.277778	22.48976	FALSE
T1-T4	7.555556	22.48976	FALSE
T2-T3	6.333333	22.48976	FALSE
T2-T4	10.61111	22.48976	FALSE
T3-T4	4.277778	22.48976	FALSE

En los datos medidos en la salida no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, por lo que hay evidencia para decir que la velocidad del viento cuando se mide en la salida no disminuye al agregar el cono y el aerogenerador.

3.5.5 Velocidades angulares

Para los dos casos donde se colocó el aerogenerador se obtuvieron los resultados presentados en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Parámetros obtenidos del aerogenerador.

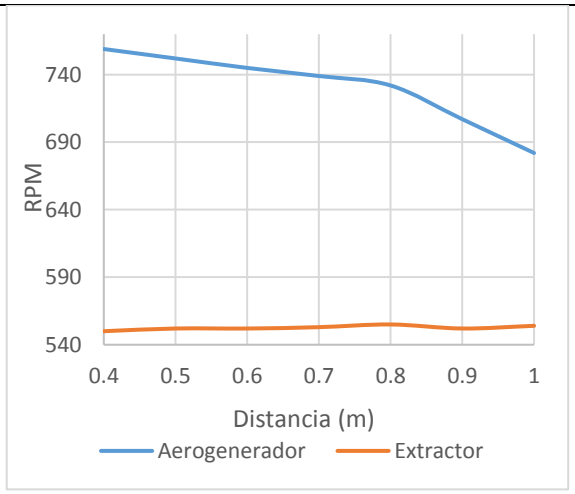
	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (W)
Extractor sin persiana, sin cono, con aerogenerador	1428	19.60	30.5	597.8
Extractor sin persiana, con cono, con aerogenerador	1482	20.60	31.9	657.14

En el cuadro anterior muestra que se recupera 657 W, que es la energía eléctrica disponible cuando se encuentra el cono instalado.

En el Cuadro 6 se presenta la relación entre las velocidades angulares del extractor y el aerogenerador, con el aerogenerador conectado a una batería de 12 V, teniendo la mayor velocidad de giro el aerogenerador a 0.4 metros del extractor, 759 RPM.

Cuadro 6. Relación entre velocidad de giro de extractor y aerogenerador.

Distancia entre extractor y generador (m)	RPM de extractor	RPM de aerogenerador
∞	553	0
0.4	550	759
0.5	552	752
0.6	552	745
0.7	553	739
0.8	555	732
0.9	552	707
1	554	682

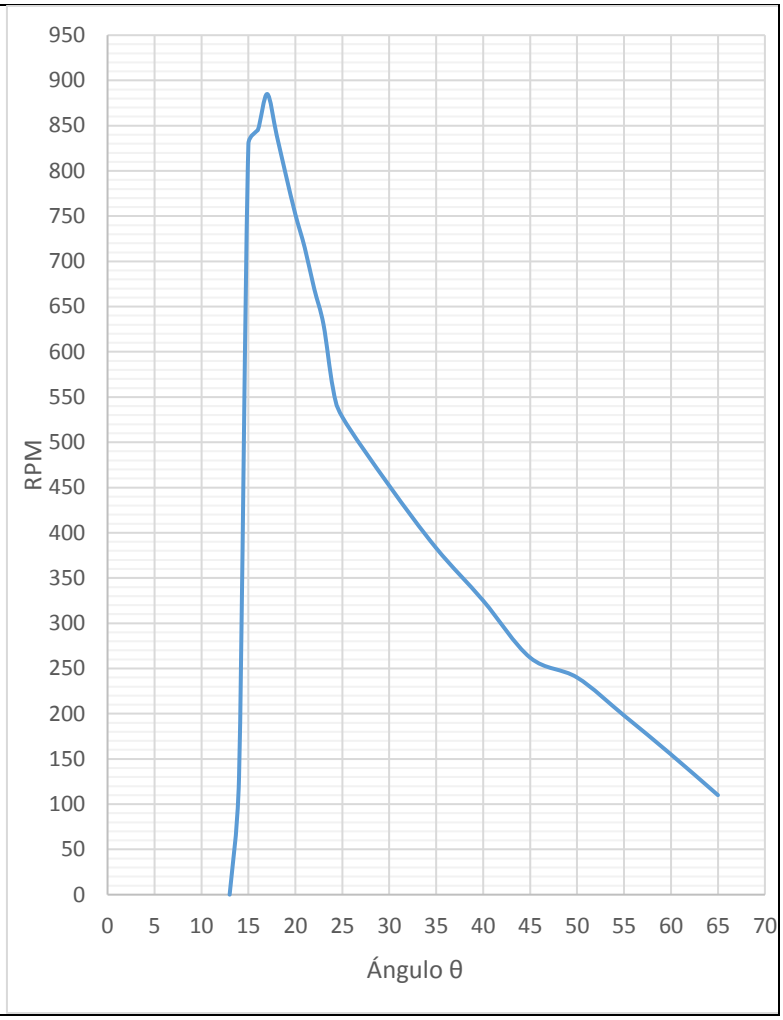


3.5.6 Ángulo de aspas

Se encontró que el ángulo θ que produce mayor velocidad angular para las aspas del aerogenerador Air X es 17 grados, -3 grados de su posición original, con un incremento del 17.7% de la velocidad angular. En el Cuadro 7 se observa que conforme fue aumentando el ángulo, disminuyo la velocidad de giro del aerogenerador, debido a las fuerzas de arrastre y sustentación que generan el movimiento de las aspas. Este ángulo debe ser cambiado debido a que el aire que sale de extractor no lleva una dirección lineal como la del viento, sino que sale generando un movimiento helicoidal (Romantchik, Santos, Rios, & Terrazas, 2018). El ángulo θ que se presenta en el Cuadro 7, corresponde al ángulo de cuerda del aspa en el centro, pegado al eje de giro, sin embargo, el diseño de aspa del aerogenerador Air X cuenta con un ángulo de torsión, por lo que el ángulo de cuerda en el inicio y el final del aspa es diferente. Esto es debido a que la velocidad tangencial de la pala es mayor en la punta que en el centro.

Cuadro 7. Ángulo óptimo de las aspas de aerogenerador Air X.

Ángulo de aspas (°)	Ángulo θ (°)	RPM (min^{-1})
-7	13	0
-6	14	130
-5	15	830
-4	16	845
-3	17	885
-2	18	840
-1	19	795
0	20	752
1	21	715
2	22	670
3	23	630
4	24	560
5	25	528
10	30	452
15	35	383
20	40	325
25	45	262
30	50	240
35	55	198
40	60	155
45	65	110



De los parámetros medidos en el extractor EOS53/1,5, se obtuvo el Cuadro 8.

Cuadro 8. Parámetros medidos y calculados para extractor EOS53/1,5.

	Aire		Extractor			
	Entrada	Salida				
	Potencia (W)	Potencia (W)	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia eléctrica (W)
Extractor sin aerogenerador	205.47	460.62	446.7	204.9	3.03	1075.34
Extractor con aerogenerador	188.09	440.30	444.2	206.3	3.14	1121.99

Este cuadro muestra que, al colocar el aerogenerador, la potencia en la salida de aire del extractor disminuyó en 5%, la potencia de entrada disminuyó en 9%,

mientras que la velocidad angular se mantuvo constante en ambos tratamientos. La potencia eléctrica consumida por el motor del extractor aumentó 4.3%. Los perfiles de velocidad obtenidos se presentan en la Figura 21. De nuevo se observa que en el centro del extractor el aire tiene la menor velocidad y menor potencia eólica. Mientras que en los extremos se concentra la mayor cantidad de potencia eólica aprovechable.

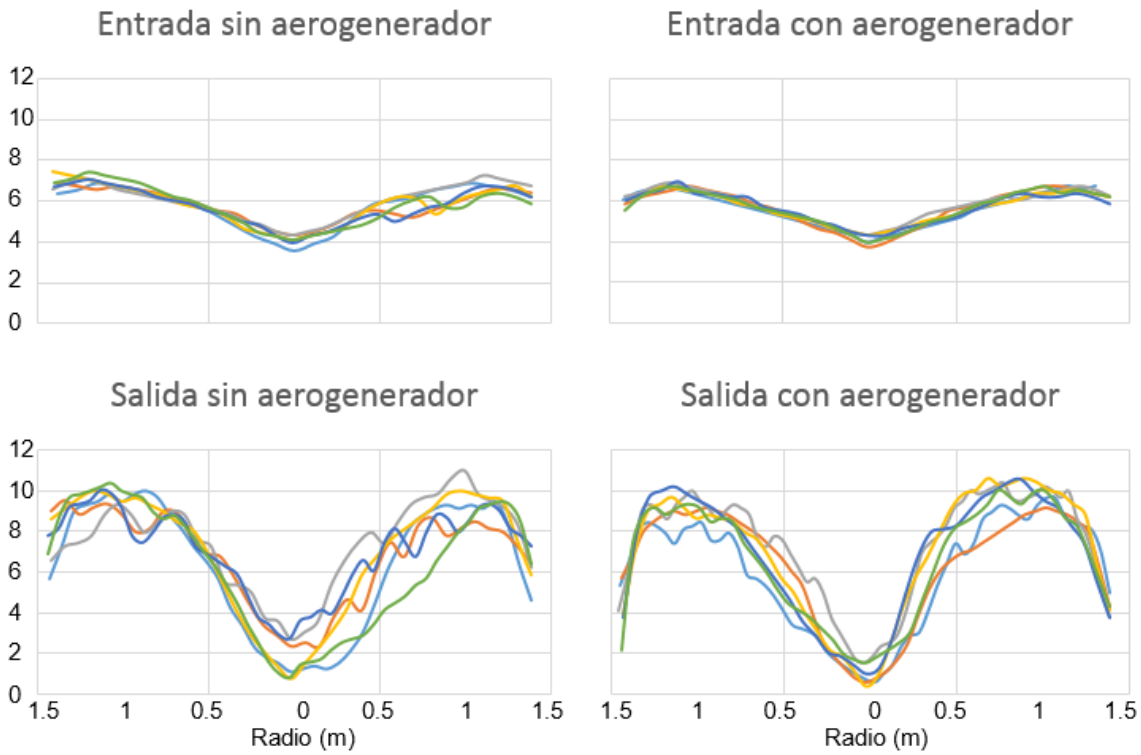


Figura 21. Perfiles de velocidad de aire para extractor EOS53/1,5.

3.6 Conclusiones

Casi el 100% de la energía del motor del extractor sale a la atmósfera y se pierde, en todos los sistemas de extracción de aire en invernaderos.

Teóricamente, se puede recuperar hasta 55% de potencia eléctrica consumida, considerando todas las pérdidas durante las transformaciones de energía.

El ángulo mejorado de cuerda θ de las aspas del aerogenerador Air X que produce la mayor potencia es 17 grados, el cual es diferente al establecido por el fabricante, aumentando 19% la potencia generada. El diseño original de las aspas no permite maximizar la velocidad relativa para este perfil aerodinámico.

Con la implementación del sistema de recuperación de energía, el aerogenerador tiene disponible una potencia máxima de 657 W, que es el 54.7% de la energía gastada por el motor eléctrico del extractor.

El mayor potencial eólico en el área de extracción de aire se encuentra a 50 cm de radio, siendo el centro el lugar donde la velocidad del aire y la potencia eólica son menores.

La potencia eólica a la salida del extractor aumenta 10% entre el caso en el que esta solo el extractor y el caso en el que se ha instalado el cono y el aerogenerador, mientras que la velocidad de giro del extractor se mantiene constante.

3.7 Referencias

Air Movement and Control Association International, Inc. (2010). *Norma AMCA 205-10. Clasificación de eficiencia energética para ventiladores.* Illinois: AMCA International.

Badii, M. H., Guillen, L. A., Araiza, E., Cerna, J., Valenzuela, J., & Landeros. (2012). Métodos No-Paramétricos de Uso Común. *International Journal of Good Conscience*, 132-155.

Betz, A. (1926). *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen.* Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

Bucklin, R. A., Leary, J. D., McConnell, D. B., & Wilkerson, E. G. (2004). Fan and Pad Greenhouse Evaporative Cooling Systems. *IFAS Extension*, 1-7.

Chauhan, S., & Singh, R. (2014). Design of Domestic Helix Vertical Axis Wind Turbine to Extract Energy from Exhaust Fans. *Innovative Systems Design and Engineering*, 23-28.

Chong, W. T., Hew, W. P., Yip, S. W., Fazlizan, A., Poh, S. C., Tan, C. J., & 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*, 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.

De Oliveira, E., Salviano, T., Albiero, D., Castro, A., & De Almeida, L. (2014). Curvas de potencia de aerogeneradores para baja velocidad del viento en la generación de energia electríca para agriultura familiar. *Energía na agricultura*, 190-196.

Fazlizan, A., Chon, W. T., Yip, S. Y., & Poh, S. C. (2015). Design and Experimental Analysis of an Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator. *Energies*, 6566-6584.

Grupo de Cultivos Hortícolas. (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo.* Roma: FAO.

Khakpour, H., & Half, J. F. (2018). Modeling and Design Method for an Adaptive Wind Turbine Blade With Out-of-Plane Twist. *Journal of Solar Energy Engineering*, 051010.1-051010.9.

Kosasih, B., & Tondelli, A. (2012). Experimental study of shrouded micro-wind turbine. *Procedia Engineering 49*, 92-98.

Minh, D., & Melis, W. (2013). Micro Wind Turbines for Energy Gathering in Build Up Areas. *International Journal of Sustainable Energy Development (IJSED)*, 105-114.

Molinero, L. (2003). ¿Y si los datos no siguen una distribución normal?... Bondad de ajuste a una normal. Transformaciones. Pruebas no paramétricas. *Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión*, 1-6.

Oliva, R. (2006). *Medición de curva de potencia-Pequeños aerogeneradores.* Chubut: Aerowind S. A.

Patnaik, A., & Ali, S. M. (2013). INDUSTRIAL EXHAUST FANS AS SOURCE OF POWER. *International Journal ofElectrical, Electronics and Data Communication*, 38-41.

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., Santos, M., Rios, E., & Terrazas, D. (2018). Análisis del flujo de aire de los extractores de invernadero usando la simulación por CFD. *Ingeniería Investigación y Tecnologia*.

Tiwari, G. N. (2003). *Greenhouse technology for controlled environment.* New Delhi: Alpha Science Int'l Ltd.

CAPÍTULO 4. DIFICULTADES Y RECOMENDACIONES

4.1 Presión estática

Uno de los parámetros necesarios para llevar a cabo el balance energético y rendimiento del extractor de aire es la presión estática, la cual no se pudo determinar experimentalmente, ya que, el equipo necesario es el tubo de Pitot el cual es bastante caro y difícil de conseguir.



Figura 1. Tubo de Pitot.

La medición de la presión estática es importante ya que dentro del invernadero se considera que el aire fluye a través de un ducto, por lo que la potencia eólica se calcula como la suma de las potencias debido a la presión estática y presión dinámica.

4.2 Medición de velocidad de aire

Durante el proceso de extracción de aire, la dirección de las partículas de aire se cree que no es uniforme, ya que, en algunas mediciones, al cambiar el ángulo de medición del anemómetro aumentaba la velocidad registrada. Por esto se recomienda utilizar un anemómetro ultrasónico de tres ejes, para tener la medición de velocidad correcta y la dirección de esta antes y después de pasar por el extractor de aire.



Figura 2. Anemómetro ultrasónico de 3 ejes.

4.3 Dirección del aire de salida del extractor

Se recomienda realizar el análisis numérico de la dirección de las partículas de aire al salir del extractor de aire, ya que de esta forma se pueden obtener algunos parámetros necesarios para determinar el ángulo óptimo para la recuperación de energía y el diseño adecuado del aspa del aerogenerador.

CAPÍTULO 5. ANEXOS

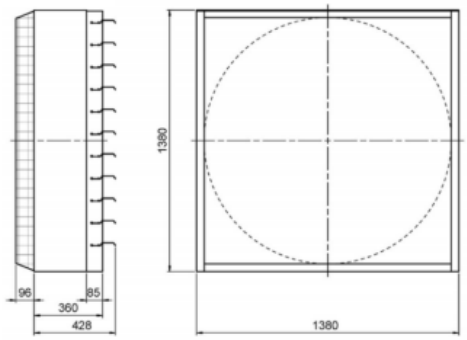
5.1 Caratula Norma AMCA 205-10



Evolución
Tecnológica Agropecuaria

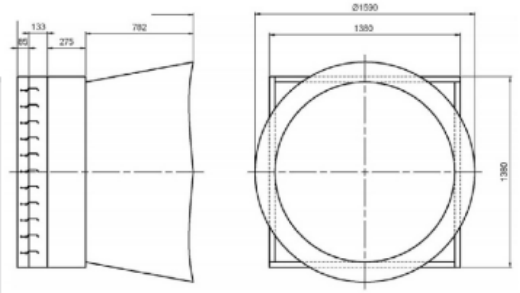
Extractor 50"

230 / 400V 50 Hz; 230 / 400V 60 Hz	W1000 m3 / h (0 Pa)	I (A) 50 Hz	I (A) 60 Hz	Interruptor de seguridad (A) 50 Hz	Interruptor de seguridad (A) 60 Hz
3 aspas	36,9	5,2 / 3,0	4,8 / 2,8	5,7 / 3,3	5,3 / 3,1
5 aspas	38,8	5,2 / 3,0	4,8 / 2,8	5,7 / 3,3	5,3 / 3,1
3 aspas con cono	31,8	5,2 / 3,0	4,8 / 2,8	5,7 / 3,3	5,3 / 3,1
5 aspas con cono	34,1	5,2 / 3,0	4,8 / 2,8	5,7 / 3,3	5,3 / 3,1



OPCIONAL:

* Regulable para variador de frecuencia.
*Otros voltajes.
* Varias clasificaciones C.V.



230 / 400V 50 Hz; 230 / 400V 60 Hz	Pin W	Volumen de aire trifasico en m3 /h						
		0 Pa	20 Pa	40 Pa	60 Pa	80 Pa	90 Pa	100 Pa
3 aspas	1650	45.600	41.370	37.030	30.940	-	-	-
5 aspas	1650	39.270	36.360	33.410	29.300	26.010	23.790	21.600
3 aspas con cono	1650	47.470	43.930	39.590	-	-	-	-
5 aspas con cono	1650	42.570	39.580	36.450	28.450	28.450	25.410	-

Multifan

Vostermans Ventilation

MULTIFAN 130



DISEÑO AERODINAMICO

Con el diseño del Multifan 130, Vostermans ventilation ha llevado al limite la aerodinamica en extractores para aplicaciones en avicultura. Todos los diferentes componentes tienen un diseño ligero para garantizar una perdida de aire mínimo. El interior del ventilador dirige el aire entrante y el aire saliente de forma perfecta a través del edificio. El especial diseño 3-dimensional de las aspas permite un rendimiento máximo del extractor de avicultura. Otra ventaja de este diseño es el bajo nivel de ruido. Las cintas únicas en la parte superior de las aspas ayuda a bajar más aún la resistencia del aire que pasa por el extractor Multifan 130. Especialmente se ha prestado atención en redondear todas las esquinas y en elegir el espesor y lisura correcto de todos los componentes. La ventaja más importante se debe a la combinación y colaboración de todos las partes individuales con el objetivo más importante: ***un volumen de aire más grande con un esfuerzo más pequeño.***



VOLUMEN DE AIRE GRANDE, ALTA EFICIENCIA

Todos los componentes juntos crean el flujo de aire optimo del Multifan 130. El extractor no solo desplaza un volumen de aire más alto, sino que el Multifan 130 tambien tiene una eficiencia altisima. Un consumo energía pequeño da una dimensión nueva al consumo de energía para extractores de estas medidad. Para la misma inversión ahora es posible tener más aire fresco alrededor de los animales de alto rendimiento, no es un lujo tener este aire adicional. El ahorro energético resulta asimismo conveniente en estos tiempos de creciente aumento del precio de la energía.



DURABILIDAD COMO VENTAJA

El Multifan 130 esta construido para durar más tiempo. La construcción duradera esta reforzada en todos lados. La caja metálica y la construcción aerodinámica integrada dentro del ventilador forma un conjunto fuerte. La conexión suave de las aspas a la construcción compacta de la polea, así como los soportes diagonales ayudan a la estabilidad del ventilador. Cada material esta elegido para un funcionamiento de larga duración sin problemas: las conexiones son anticorrosivos, la polea de aluminio y las aspas muy protegidas son algunos ejemplos. Todos los materiales son elegidor para resistir el clima agresivo dentro de las naves.

REFRESHINGLY POWERFUL



MANTENIMIENTO RÁPIDO

Durante el tiempo de la limpieza resulta necesario que todas las actividades se puedan hacer de forma rápida y precisa. La rejilla Multifan 130 se puede abrir por ambos lados. Las tapas de las 4 esquinas se abren en el momento que se quita la rejilla. Estas tapas evitan la acumulación de polvo y permiten una limpieza fácil. El resto de las partes son de fácil acceso y limpieza, permitiendo conseguir a una optima higiene. La correa flexible no necesita un mecanismo de tensión y tampoco hace falta tensarla con regularidad. Debido a esta correa, la durabilidad de la polea y la del ventilador resulta aún mas larga.



DIFERENTES POSIBILIDADES

Con el Multifan 130, Vostermans Ventilation ofrece muchas opciones. Para aplicaciones estándar se utiliza la versión 3 aspas. Pero para presiones más altas (mas de 60 Pa) existe la versión con 5 aspas; para granjas de gallinas ponedoras con jaulas o pajarerasesta es a opción preferida. Como siempre, la gama de motores Multifan permite adaptar el extractor a cualquier voltaje, frecuencia o fase existente en el mundo. La posibilidad de regular el extractor por variador de frecuencia es otra cualidad que se pide muchas veces. Otras opciones disponibles son: varios tipos de rejilla y trampilla de luz.



UNA CONSTRUCCIÓN INTELIGENTE EN CUANTO A LA LOGISTICA

Los componentes simétricos de la caja y la construcción interna, incluyendo las 4 tapas de esquinas, admiten un montaje sencillo y rápido. Todos los componentes se pueden montar fácilmente. El numero de conexiones ha sido reducido a un mínimo. Para evitar problemas durante la instalación en la granja, el Multifan 130 ha sido diseñado de forma que el motor, correa, polea y helice formen un conjunto. Dependiendo de la preferencia del cliente se puede suministrar el Multifan 130 completamente armado o en partes. De esta forma los gastos de transporte se puede optimizar para cada cliente y reducir a un mínimo.

Tel. (777) 311 9074 / 364 5988 / 317 9253 | ventas@evolucionagropecuaria.com