



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Generador de agua del aire  
con producción de energía  
eléctrica termosolar**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Edgar Nahum Rodríguez González

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Adrián Espinosa Bautista



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

<b>Índice</b> .....	2
<b><u>Agradecimientos</u></b> .....	4
<b><u>Objetivo</u></b> .....	6
<b><u>Resumen</u></b> .....	6
<b><u>1. Antecedentes</u></b>	
<u>1.1 Escasez de agua en México y el mundo</u> .....	7
<u>1.2 Estrés hídrico en México</u> .....	8
<u>1.3 Efecto e importancia del vapor del agua en el cambio climático.</u> ....	10
<u>1.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU</u> .....	11
<b><u>2. Estado de la tecnología de generadores de agua del aire</u></b>	
<u>2.1 Condensadores de agua del aire por refrigeración</u> .....	13
<u>2.2 Atrapanieblas</u> .....	14
<u>2.3 Filtros coalescentes</u> .....	15
<u>2.4 Desnebulizador o eliminadores de niebla</u> .....	16
<u>2.5 Análisis de malla de filtro de agua</u> .....	20
<u>2.6 Puente de hidrógeno</u> .....	23
<u>2.7 Ángulo de contacto</u> .....	23
<u>2.8 Recolección de neblina utilizando electrostática</u> .....	24
<u>2.9 Humedad relativa, energía interna, entalpía y carta psicrométrica</u> ..	25
<u>2.10 Clasificación de tamaño de gota de agua en diferentes ambientes.</u> .....	28
<u>2.11 Recubrimiento superhidrofílico con bióxido de titanio</u> .....	29
<u>2.12 Medición del ángulo de contacto</u> .....	29
<u>2.13 Carga eléctrica en las nubes</u> .....	30
<b><u>3. Chimeneas solares, intercambiadores de calor de aire y turbinas eólicas</u></b>	
<u>3.1 Chimeneas solares</u> .....	31
<u>3.2 Modelado térmico de la chimenea solar</u> .....	33
<u>3.3 Intercambiadores de calor de aire y colectores solares planos</u> .....	42
<u>3.4 Colectores solares corrugados</u> .....	43
<u>3.5 Emisividad, absorptividad, reflectividad y transmisividad</u> .....	44
<u>3.6 Pintura selectiva para colectores solares</u> .....	46
<u>3.6.1 Características ópticas de radiación de la pintura selectiva</u> .....	47
<u>3.6.2 Preparación de la superficie</u> .....	48
<u>3.6.3 Para sustratos metálicos</u> .....	48
<u>3.6.4 Sustratos pasivos</u> .....	49
<u>3.6.5 Métodos de aplicación</u> .....	49
<u>3.6.6 Secado y curado</u> .....	49
<u>3.7 Pintura selectiva TINOX</u> .....	50
<u>3.8 Radiación solar en México</u> .....	50
<u>3.9 Potencial eólico en México</u> .....	51
<u>3.10 Ecuación de potencia de las turbinas</u> .....	53
<u>3.10.1 Selección de turbina eólica</u> .....	56

<u>3.11 Turbinas eólicas entubadas</u> .....	58
<b><u>4. Diseño y experimentación de generador pasivo de agua del aire.</u></b>	
<u>4.1 Requerimientos de diseño</u> .....	61
<u>4.1.1 Propuesta de diseño para chimenea solar con colector solar bifacial</u> .....	61
<u>4.1.4 Sistema simultáneo de producción de energía eléctrica y agua atmosférica</u> .....	65
<u>4.1.5 Configuración alternativa</u> .....	66
<u>4.2.1 Turbina eólica termosolar-eólica</u> .....	67
<u>4.2.2 Reguladores de entradas extras a chimenea</u> .....	67
<u>4.3.1 Primer prototipo y experimento mallas de acero tipo tamiz</u> .....	69
<u>4.3.2 Segundo prototipo y experimento con filtro coalescente</u> .....	70
<u>4.3.3 Tercer prototipo y experimento extractor de 1/4 HP y agua en ebullición</u> .....	72
<u>4.4 Pruebas de otros laboratorios</u> .....	74
<u>4.5.1 Construcción de bomba de agua para humidificación</u> .....	75
<u>4.5.2 Problemas encontrados en el diseño y mejoras</u> .....	77
<u>4.6 Recubrimiento superhidrofílico con bióxido de titanio para purificación de agua</u> .....	77
<u>4.7 Cuarto prototipo con generadores de neblina</u> .....	78
<u>4.7.1 Prueba de eficiencia de mallas</u> .....	82
<u>4.8 Estimación de producción de agua y energía eléctrica</u> .....	84
<b><u>5. Conclusiones</u></b>	
<u>Conclusiones</u> .....	91
<b><u>6. Referencias bibliográficas</u></b>	
<u>Referencias bibliográficas</u> .....	92
<b><u>Apéndices</u></b>	
<u>A1 Especificaciones kit motor drone</u> .....	95
<u>A2 Diagrama de conexión de motor brushless al Arduino uno</u> .....	96

## **Agradecimientos**

---

A mis bisabuelos, bisabuelas, abuelos y abuelitas que nos dejaron grandes enseñanzas. Gracias por todos los regalos, el tiempo, las palabras, los momentos y haber de hecho de nuestras vidas, tanto de mis papás como del resto de la familia una bendición.

A mi Papá, quien buscó darme la mejor educación que pudo. Gracias papá por nunca dejarme solo, haberme ayudado cuando estuve enfermo, ayudarme a alcanzar mis sueños, haberme apoyado para ir a Francia y Alemania, momentos que cambiaron mi vida.

A mi Mamá por enseñarme lo mejor de la vida. Gracias por ponerme en contacto con Dios y mostrarme que en los detalles está la riqueza. Gracias por enseñarme la bondad, el cariño y en buscar siempre en ayudar a los demás.

A mi hermana Lina por haberme apoyado tanto, por haberme hecho reír tanto de niño y por todas las muestras de afecto que en estos años has tenido.

A mi hermano Baruch porque de los momentos más felices que recuerdo serán siempre haber estado jugando contigo. Gracias por tu apoyo en los últimos años y seguir creyendo en mí.

A mi hermano Uri gracias por tu apoyo, por mis diseños, por tu ayuda y por todo lo que jugamos. Te agradezco haber estado contigo cuando pudimos.

A mis otros hermanos, les doy el lugar que les corresponde y siempre serán parte de esta familia. Seguro nos seguiremos cuidando los unos a los otros siempre.

A Jacobo y Samuel por ser más que amigos ser parte de mi familia. Gracias por creer en mi cuando todos los demás no lo hicieron e inclusive cuando olvidé también creer en mí. Gracias por las enseñanzas, los regalos, las chelas y los grandes momentos que hemos vivido.

A la Dra. Ramos a quien le agradezco el que yo siga aquí. Gracias por su apoyo, su sinceridad, su gran profesionalismo. Gracias por todo el conocimiento compartido. Gracias por sacarme del tremendo fondo en el que me encontraba.

A super Hilda Corona por todas las enseñanzas invaluable que me llevaré por el resto de mi vida. Gracias por recordarme qué es lo más importante, lo más valioso y por aquello por lo que debemos trabajar. Gracias por los inmensos regalos que viniste a traerme a mí y a mi familia.

A Rafael García por haber estado ahí en momentos muy difíciles en mi vida. Por ser un gran amigo y uno de mis más grandes apoyos. Por enseñarme a no rendirme y a siempre seguir adelante. A no dejar de perseguir el objetivo de titularnos.

Al Dr. Adrián Espinosa a quien le debo haberme involucrado en este proyecto de agua, que me dejó muchísimos retos tanto profesionales como personales. Que hasta este punto de la vida ha sido uno de los mis más grandes regalos que me ha llevado a viajar por todo el mundo. Además de ser esta tesis una de las más grandes aportaciones a la humanidad sobre cambio climático.

Al M. en Ing. Esteban Barrios Bonilla por haberme inspirado a desarrollar esta tecnología gracias a sus clases sobre termofluidos. Le agradezco habernos compartido sus conocimientos que me abrieron la mente a desarrollar mejor diferentes tecnologías. Gracias profesor por el gran apoyo para mis aplicaciones y concursos. Gracias porque fue fundamental en este gran proyecto también.

A mis grandes amigos de la facultad Rafael Castañón, Octavio Ponce, Fernando Villagra, Francisco y Ricardo Singer por haber hecho de la universidad el mejor lugar para estudiar. Gracias por su apoyo, por las tareas que me ayudaron, por los trabajos que hicimos juntos, pero sobre todo por las risas y siempre estar buscando ser mejores. Mi paso por la UNAM fue el mejor gracias a ustedes. A Karla Miravete por tu amistad, por compartir conmigo muchas, muchas horas de baile. Por la confianza, por permitirme verte transformarte en una gran mujer y haber hecho las tardes en la UNAM increíbles.

A mis amigos muniquenses a Roberto León, Eduardo Morales, Laura Ramírez, Andrés Negrete, Rolando Donis y Fabian Schweizer, porque hasta el día de hoy siguen siendo parte de mi familia.

A la maestra María Eugenia y Alejandra Torres por la difusión de mis proyectos a través de la Gaceta de la Facultad, de la Gaceta de la UNAM y las entrevistas organizadas en radio y televisión. Gracias por creer en mí y el proyecto y estar siempre buscando espacios para dar a conocer los logros que realicé.

A mis maestros de la Facultad de Ingeniería de quienes aprendí muchísimo tanto académicamente como personalmente. Gracias a su vocación y sus años de experiencia de enseñar las materias en la facultad, estoy convencido que formaron a un gran ingeniero que ahora está creando un impacto positivo en nuestro país.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de haber pasado por sus aulas, haber disfrutado sus instalaciones, por poder seguir estudiando a pesar de haber tardado tanto en terminar mis créditos, por conocer la mejor universidad del país y conocer a grandes maestros e investigadores que siguen trabajando por un México mejor.

Gracias a toda la gente que se ha cruzado en mi camino para llegar en el lugar que estoy. Al resto de mi familia, mis tíos, mis primos, al resto de mis amigos, la gente involucrada en los concursos, en las entrevistas, en las inversiones, en los viajes, en las conferencias, en las asesorías y en el conocimiento que han compartido otros investigadores.

A todos mis maestros de Ciencias Básicas y de toda la DIMEI por la gran formación que me ofrecieron durante mi paso en Ciudad Universitaria y mis maestros del CELE.

Gracias porque estoy parado sobre gigantes.

## **Objetivo**

---

El objetivo de esta tesis es desarrollar una solución al problema de escasez de agua en lugares con bajo flujo de aire, a través del estudio de mallas para la generación de agua a partir del aire con un proceso pasivo de recolección, es decir sin la utilización de sistemas de refrigeración o energía eléctrica.

## **Resumen**

---

Esta tesis se encaminó en el estudio de la parte más compleja del sistema que es la generación de agua sin la utilización de sistemas de refrigeración. Se encontró que es una investigación de frontera, ya que casi no se encuentra información sobre el tema. Después de la investigación que duró alrededor de 5 años, se encontró que no es posible lograr la generación de agua del aire sin sistemas de refrigeración, inclusive bajo condiciones de 100% humedad relativa. Esto, debido a que la cantidad de agua en el ambiente no es lo suficientemente grande para lograrlo. En el proceso de investigación se descubrió que únicamente es factible hacerlo con condiciones de neblina. Las gotas de agua en la neblina son mucho mayores que las que existen en el aire regular, permitiendo su recolección. Se introdujo uno nuevo concepto al que se llamó entalpía eléctrica del vapor de agua, que busca dar explicación a la gran cantidad de agua en las nubes.

La utilización de chimeneas solares para la generación de agua atmosférica requiere que el tamaño sea de al menos 50 metros de alto. Es posible alcanzar temperaturas por debajo de 0°C con alturas en chimeneas por arriba de 50 metros. Con estas dimensiones no se requiere sistemas de enfriamiento para condensar el agua. En sistemas residenciales se necesita utilizar sistemas de refrigeración para lograr capturar agua del ambiente. El costo de producción de energía eléctrica con las chimeneas solares puede estar cercano a los \$0.07 dólares, pero incluye ya el almacenamiento de energía, lo que lo hace mucho más rentable que los paneles solares fotovoltaicos.

## 1. Antecedentes

---

### 1.1 Escasez de agua en México y el mundo

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) asegura que más de 1200 millones de personas alrededor del mundo vive en áreas con escasez de agua y 500 millones más se dirigen hacia esta situación. Se espera que para 2025 existan 1800 millones de personas que vivan en regiones con absoluta escasez de agua y dos tercios de la población mundial vivirán en condiciones de estrés hídrico [1].

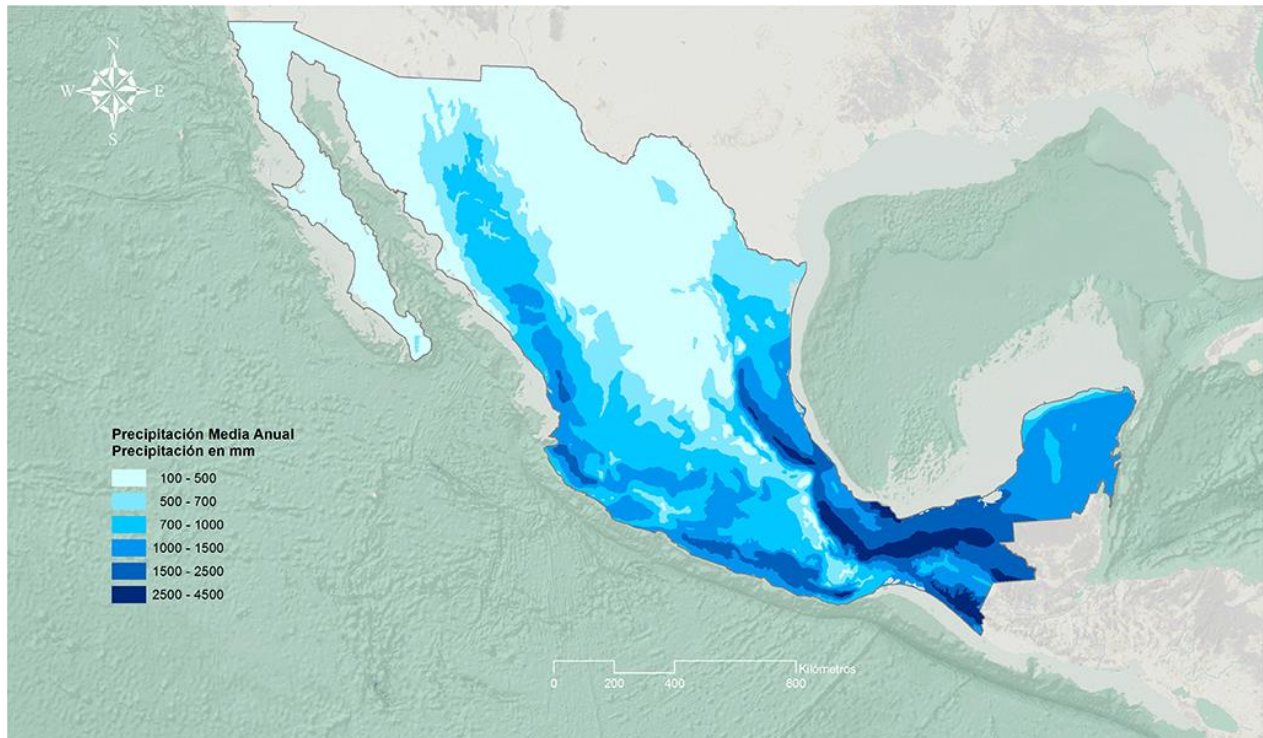
Este problema también se presenta en México donde el 92% de la población tiene acceso al servicio de agua potable, sin embargo, cuando se considera la calidad de ésta, este porcentaje disminuye dramáticamente. La cobertura de agua potable en el país es del 95.4% para zonas urbanas y en zonas rurales del 78.8% en comunidades de menos de 2500 habitantes [2]. Esto es sin considerar el estrés hídrico que se presenta durante las diferentes estaciones del año, ya que la disponibilidad depende de las lluvias que se tengan en las diversas regiones del país.

En el país, así como en casi todo el mundo, la mayoría del agua se utiliza para fines agropecuarios. En México se utiliza para este sector el 78% del agua disponible y debido a su uso genera el 62% de aguas residuales, que contienen plaguicidas, fertilizantes, cargas orgánicas, entre otros contaminantes [2].

En la República Mexicana se pueden encontrar una variedad de climas, que cuentan durante el año con diferentes precipitaciones que varían con las temporadas del año. En la Figura 1 se puede apreciar como el norte del país cuenta con pocas precipitaciones que van de 0 a 250 mm de agua a lo largo de prácticamente todas las estaciones. El sur cuenta con regiones en su mayoría con precipitaciones que van de 250 a 500 mm anualmente y en algunas regiones con precipitaciones cercanas a los 4500 mm.

Según el Foro Económico Mundial los riesgos a la economía global en términos de impacto se encuentran en primer lugar la crisis de agua aún por encima del cambio climático [3]. Esto debido a la dependencia de la economía global que existe con el líquido, como lo es la seguridad alimentaria, la manufactura y los servicios.

Por estas circunstancias y panorama que se puede ver la necesidad de buscar nuevas soluciones al problema de agua en México y en el mundo. Desafortunadamente, para las soluciones actuales se tiene poco tiempo y es necesario realizar grandes obras de infraestructura que requieren una considerable inversión tanto económica, como de recursos humano, de planeación, etcétera, que se debe comenzar a realizar lo más pronto posible, de no ser así el futuro del país en seguridad hídrica se verá amenazado.



**Figura 1. Precipitación media anual en México [4]**

## 1.2 Estrés hídrico en México

El siguiente mapa de la República Mexicana muestra el estrés hídrico del país. Como se puede ver al menos 23 estados de la federación no tienen suficiente agua disponible. Al estar cerca del Trópico de Cáncer, es una zona desértica a nivel mundial. Aunque no cuentan estas regiones con agua, se puede utilizar la gran radiación solar, como recurso, para su aprovechamiento y la purificación de agua con diversos métodos como fotocátalisis, desalación, evaporación solar, etcétera. Lo cual puede ser otra opción en favor de la generación de agua.

El estrés hídrico se mide con un valor que va de 0 a 5, donde 5 es el valor más alto. En color más rojo se muestra en el mapa las regiones de mayor estrés y en color más amarillo las que tienen menor estrés hídrico. El estrés hídrico se define como la cantidad de agua que utiliza una región de la que tiene disponible. Si se consume más del 80% del agua de la que se tiene disponible, entonces esa zona se encuentra en un alto nivel de estrés hídrico 5. La Península de Baja California y toda la costa del pacífico puede utilizar plantas de desalación de agua para abastecer a su población y otras necesidades como producción de alimentos.



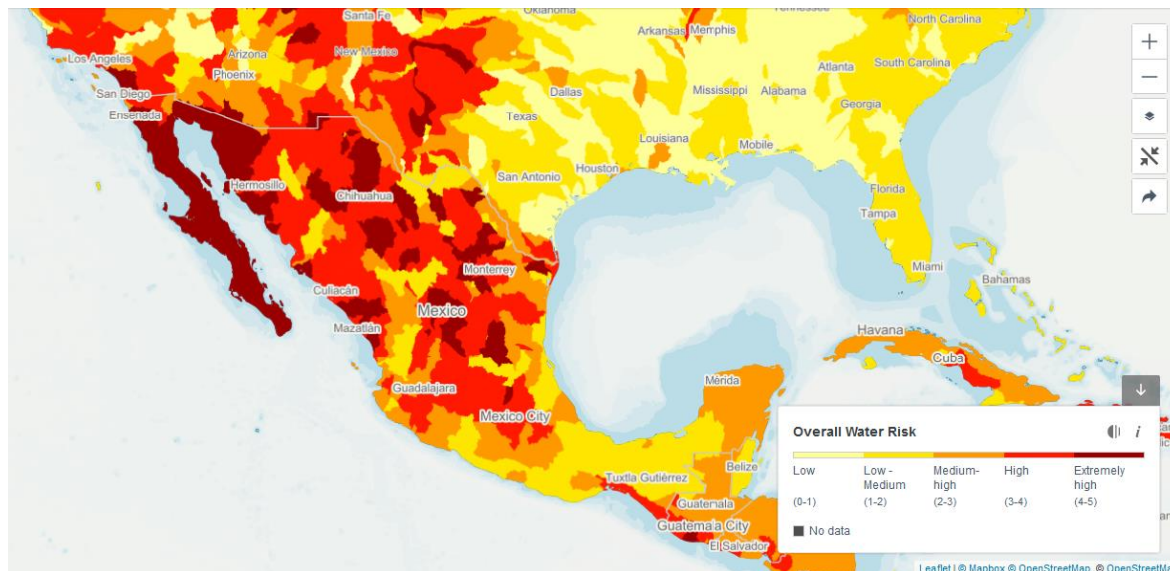


Figura 2 Estrés hídrico en México[6]

La siguiente tabla se muestra el estrés hídrico en México por Estado de la República [5]

Estado	Nivel de estrés hídrico
Baja California Sur	5
Guanajuato	4.94
Ciudad de México	4.9
Aguascalientes	4.81
Estado de México	4.76
Querétaro	4.71
Hidalgo	4.63
Chihuahua	4.63
Zacatecas	4.63
Sonora	4.6
Sinaloa	4.47
Nuevo León	4.44
Morelos	4.33
Jalisco	4.22
Tamaulipas	4.11
Colima	3.74
Tlaxcala	3.36
Baja California	3.28
Michoacán	3.28
San Luis Potosí	3.23
Coahuila	3.15
Puebla	3.05
Durango	3.02

Nayarit	2.93
Yucatán	2.49
Quintana Roo	1.95
Guerrero	1.82
Veracruz	1.65
Campeche	1.47
Oaxaca	1.22
Chiapas	0.84
Tabasco	0.08

**Tabla 1. Nivel de estrés hídrico en México [5]**

En México hay más de 12 millones de personas que no tienen acceso a agua potable y más del 80% de los cuerpos de agua del país están contaminados por descargas industriales. A pesar de la escasez de agua, en la Ciudad de México se consumen en promedio 366 litros de agua al día por persona, variando entre 500 litros en zonas como Polanco y de 50 a 100 litros en zonas de mayor escasez como Iztapalapa [7]

### **1.3 Efecto e importancia del vapor del agua en el cambio climático.**

Como se ha comentado en diferentes medios, el cambio climático es una de las mayores amenazas más fuertes que el ser humano está enfrentando actualmente. Una de las causas del cambio climático son las emisiones de bióxido de carbono al ambiente debidas principalmente a la quema de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica, transporte, por diferentes industrias, entre otras fuentes. Aunque el bióxido de carbono es la principal causante de esto, existen otros gases de efecto invernadero más potentes y entre ellos, se encuentra el vapor de agua. El agua que se encuentra en la atmósfera, debido a la evaporación de los mares, es el gas que tiene más potencial para generar el efecto invernadero sobre todos los demás existentes. En la siguiente gráfica se puede observar en color rojo la radiación del espectro solar que llega a la superficie de la tierra. El vapor de agua es capaz de absorber la radiación solar casi a lo largo de todo el espectro a diferencia del bióxido de carbono que sólo lo hace en la región infrarroja [8]. Esto es importante para conocer los efectos del vapor de agua en el planeta. Y ya que los generadores de agua del aire extraen la humedad del ambiente, podrán tener un impacto positivo en la mitigación del cambio climático.

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)

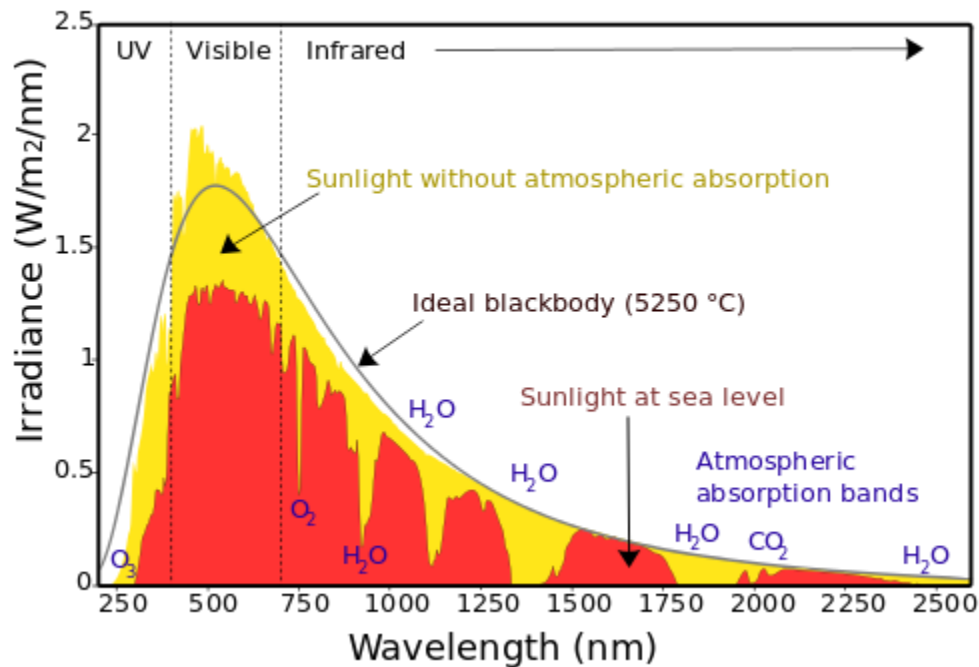


Figura 3. Espectro de la radiación solar en el espacio, a nivel del mar y absorción electromagnética del vapor de agua [8]

El vapor de agua en combinación con las nubes representa más del 75% del calentamiento atmosférico global, [9]. El vapor de agua absorbe grandes cantidades de energía de la radiación solar. Aunque no es la causa del calentamiento atmosférico, genera un ciclo de retroalimentación positiva. El aire se calienta por el vapor de agua, evaporando así más agua en los océanos que a su vez absorbe más agua del sol, generando más calentamiento en el planeta. Este dato será de suma importancia en las conclusiones.

### 1.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015 estableció 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que buscan mitigar los problemas más grandes que el mundo enfrenta. Estos objetivos con 169 metas específicas establecen mejoras centradas principalmente en los más pobres y los más vulnerables. Estos objetivos que están pensados para ser logrados en el 2030 [10], buscan eliminar la pobreza, eliminar el hambre, mejorar el acceso a la salud y el bienestar, tener educación de calidad, buscar igualdad de género, **dar acceso a agua limpia y saneamiento, dar energía limpia y asequible**, generar crecimiento económico, ofrecer trabajos decentes, buscar una industria mejor y tener innovación e infraestructura, reducir las desigualdades, que las ciudades sean sostenibles y comunicadas, producir y consumir responsablemente, realizar acciones en beneficio del clima, mejorar la vida submarina y proteger los ecosistemas terrestres, fomentar la paz, la justicia y las instituciones sólidas y generar alianzas para lograr estos objetivos. Las naciones involucradas están comprometidas para enfocar sus recursos para estas grandes metas. Existen grandes fondos

internacionales para su desarrollo, por lo que también es posible buscar estos apoyos para contribuir al entorno.



**Figura 4. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) según la Organización de las Naciones Unidas para el 2030 [10].**

En este capítulo se presenta brevemente la situación actual global del agua. La presente tesis busca contribuir a resolver los ODS 6 y 7 y de manera indirecta el 1, 2 y 9. Es importante conocer y mencionar estos objetivos, ya que la sociedad y el planeta requiere de toda la atención y acción. Realizando acciones integradas a estos objetivos, se puede mejorar la calidad de vida considerando siempre los recursos naturales sobreexplotados.

## 2. Estado de la tecnología de generadores de agua del aire

---

### 2.1 Condensadores de agua del aire por refrigeración

Existen generadores de agua del aire tradicionales que utilizan un sistema de refrigeración para lograr producir agua. El principio básico en el que se basan es hacer pasar el aire a través de un intercambiador de calor y por enfriamiento es posible obtener agua del ambiente. Estas máquinas son muy costosas, por ejemplo, la empresa mexicana Innovaqua vende máquinas que oscilan de la más pequeña en \$30,000 pesos con una producción diaria de 30 litros de agua hasta otras más grandes de \$150,000 pesos para producir 150 litros de agua al día [11]. Los sistemas de refrigeración requieren de un compresor, una válvula de extrusión, un evaporador y un condensador. Estos sistemas consumen mucha energía eléctrica, pero es la única opción de tener acceso a agua potable en algunas regiones del mundo.

Esta tesis se enfoca a sistemas de generación de agua del aire a través de mallas, pero como se verá más adelante estos sistemas toman mucha importancia en la generación de agua.



**Figura 5. Generador de agua del aire de 150 litros al día de empresa Innovaqua [11]**

## 2.2 Atrapanieblas

La obtención de agua a partir de la humedad del aire se ha realizado en Perú con un sistema llamado atrapaniebla. Estos captadores funcionan colocando grandes mallas en zonas donde existen las condiciones climatológicas para neblina. Las gotas que arrastra la corriente de aire se van adhiriendo a los hilos que conforma la malla y posteriormente éstas caen por gravedad a una canaleta de recolección, donde el agua es luego llevada a un contenedor.

La calidad del agua obtenida es prácticamente agua destilada porque no contiene minerales, a diferencia del agua subterránea o de ríos la cual por su proceso natural de filtrado va obteniendo los minerales de las piedras con las cuales tiene contacto. El agua recolectada en estos sistemas se utiliza normalmente para riego, aunque puede ser fácilmente potable mineralizándola, agregando en polvo o con filtros los elementos que se requieran.



Figura 6. Atrapanieblas en Perú [12]

Además de este sistema existen un sin número de variantes, tanto de manera comercial como en patentes registradas. Algunos de estos sistemas consideran procesos de enfriamiento, esto a través de sistemas de refrigeración, que de manera convencional pueden condensar el agua en el ambiente bajando la temperatura a la que ingresan a la cámara de condensación. Otros aparatos utilizan compresores de aire, los cuales al aumentar la presión llevan el aire a un líquido saturado, logrando así la separación de la mezcla agua con aire.

Adicionalmente, con relación a la radiación solar que recibe el país, es bien conocido que México es uno de los países a nivel mundial que mayor radiación solar recibe. Con una radiación solar mayor a  $5.6 \text{ kWh/m}^2$  en la región norte hasta las más bajas de  $4.8 \text{ kWh/m}^2$  en las de menor radiación. Con esta situación, sería posible poder explotar este recurso para abastecer las necesidades energéticas del país. Es por ello también que buscar tener sistemas basados en energía solar en la región tiene sentido.

En el capítulo 3 de esta tesis se puede observar el promedio anual de la radiación solar que recibe el país. Los que cuentan con un mayor recurso son los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, Durango, Sinaloa, Jalisco, Aguascalientes y Oaxaca. Sin embargo, los demás estados al encontrarse en el rango de 4.8 a 5.1 kWh/m<sup>2</sup> también se pueden considerar de alta radiación.

Es por ello por lo que, tanto para la generación de agua, como para la generación de energía eléctrica, se podría proponer que, en cualquier parte del país, sería conveniente y posible colocar los sistemas propuestos en esta tesis.

### 2.3 Filtros coalescentes

Los filtros coalescentes se utilizan en la industria, entre otras aplicaciones, para la remoción de humedad en el aire para líneas neumáticas o para algunos procesos donde se requiere aire seco. El funcionamiento de estos filtros, en el caso del agua, es a través de la unión de las gotas que se encuentran en el aire con varias mallas o capas de filtros colocados uno detrás de otro. Durante el proceso la gota de agua irá aumentando de tamaño hasta que sea lo suficientemente grande para caer por gravedad.

Normalmente lo que se utiliza es una primera etapa donde se remueven las impurezas que contenga el aire, por ejemplo, polvo o en ocasiones hasta bacterias. Posteriormente se va cambiando el tamaño de la malla, de una muy fina a una más gruesa. La intención es que las gotas vayan adhiriéndose a los hilos que se encuentran en la malla, esto con la finalidad de que conforme vayan llegando nuevas gotas, éstas se vayan pegando a las que ya se encontraban ahí. Finalmente, las gotas cuando tienen cierto tamaño caen por su propio peso. En la Figura 7 se muestra este proceso.

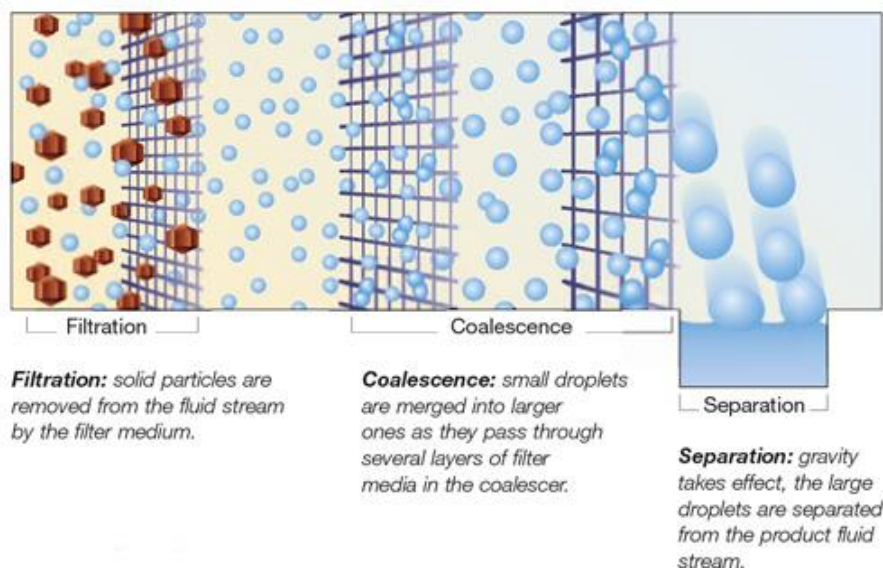


Figura 7. Principio de filtro coalescente [13]

Desafortunadamente existe muy poca investigación sobre este tipo de filtros. Ya que, como se verá más adelante, el diseño de estos es muy complicado al contar con múltiples variables que afectan su eficiencia y desempeño.

## 2.4 Desnebulizador o eliminadores de niebla

Los desnebulizadores o eliminadores de niebla son filtros coalescentes que se utilizan en sistemas de baja presión, a diferencia de los filtros coalescentes, para líneas neumáticas normalmente requieren presiones arriba de los 30 bares.

Los eliminadores de niebla normalmente son construidos con mallas de acero inoxidable o bien se pueden escoger otros materiales si se tienen otro tipo de fluidos corrosivos como ácidos a tratar, entre los que se encuentran polipropileno (PP), polietersulfona (PES), cobre, teflón, acero al carbón, carpenter 20 o iconel [14].



**Figura 8. Eliminador de niebla de polipropileno [15]**

A continuación, se presenta la tabla de requerimiento de datos que el proveedor Materiales Textiles S. A. de C. V. [14] solicita para el diseño de este tipo de filtros.

### Datos del eliminador

Diámetro	mm
Ancho	mm
Espesor	mm
Densidad de malla	Kg/m <sup>3</sup>
Calibre alambre	
Posición del eliminador	
Material de la malla	
Rejillas de soporte	
Material de rejillas	



<b>Condiciones de operación</b>	
Temperatura	°C
Presión	kg/cm <sup>2</sup>
<b>Datos de la fase de vapor</b>	
Composición	
Peso molecular	
Densidad	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad del gas	c.p.
Razón de flujo	
Presión barométrica	
Velocidad	m/s
Sólidos presentes (sí/no)	
<b>Datos fase líquida arrastrada</b>	
Composición	
Cantidad presente	
Densidad	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	c.p.
Tensión superficial	dinas/cm
Tamaño de gota	
<b>Requisitos del proceso</b>	
Caída de presión total en separación	inH <sub>2</sub> O, kg/cm
Caída de presión a través de la malla permitida	inH <sub>2</sub> O, kg/cm
Eficiencia de separación	
<b>Datos del recipiente</b>	
Posición (Horizontal, vertical, inclinado)	
Forma	
Diámetro interior	mm
Longitud	mm
Material de construcción.	mm

**Tabla 2. Datos pedidos por el proveedor para el diseño del filtro coalescente [14]**

Como se puede ver de la tabla anterior, la construcción de este tipo de filtro es multivariable y esto complica significativamente su implementación y diseño. Con esta información el proveedor puede fabricar un filtro según las necesidades de sus clientes.

La empresa coreana Dae Shin Demister muestra en su página de internet una gráfica sobre la variación de la presión en un sistema a base de filtros [16]. En la Figura 9, se observa que según el tipo de filtro que se esté utilizando es la caída de presión que se obtiene. La primera columna de la tabla se muestra el estilo del filtro con su densidad del filtro de en Kg/m<sup>3</sup>. En la segunda columna está un factor  $\alpha$  que determina la caída de presión. Conociendo la presión deseada en el filtro se podrá escoger la densidad del filtro. La gráfica está construida considerando un espesor del filtro de

0.1 m. En el filtro más cerrado tiene una caída de presión de 60 mmAq a 3 m/s que corresponden a 588 Pa. Las pérdidas de presión son muy bajas, lo cual hace a estos filtros muy útiles.

$$\Delta P = \frac{f \cdot V_g^2 \cdot P_g \cdot (1-\epsilon)}{8c \cdot D}$$

V<sub>g</sub> = Air current velocity(m/sec)    D = Diameter  
 P<sub>g</sub> = Gas density (kg/m<sup>3</sup>)    g<sub>c</sub> = Gravity acceleration  
 X = Filling thickness    f = Coefficient of friction (General 1.5)  
 ε = Open area

In summary,  $\Delta sP = \alpha \cdot P_g (V_g)^2$

Here, α is as per the below table.

STYLE			α
DSM-80	H	155 STYLE	0.65
DSM-144	S	275 STYLE	1.1
DSM-193	S	370 STYLE	1.5
DSM-390	S	740 STYLE	3.0
DSM-220	M	905 STYLE	3.6
DSM-432	M	1,740 STYLE	7.0

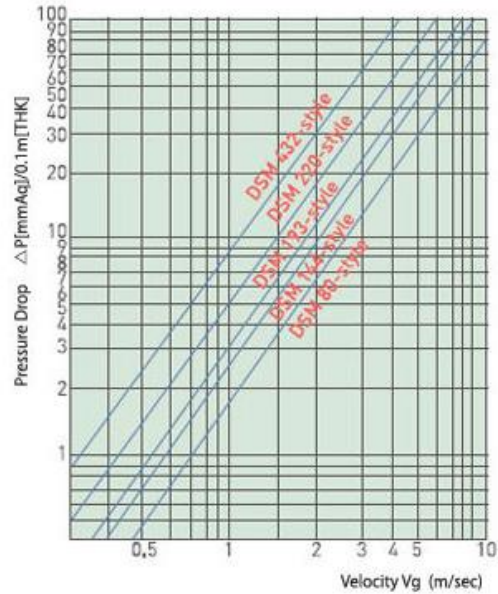


Figura 9. Se observa en la esquina superior izquierda la ecuación de la caída de presión. En la parte de abajo, la tabla indica los diferentes estilos o densidades de los eliminadores. Del lado derecho se encuentra la caída de presión según la densidad del eliminador de niebla y la velocidad del flujo de aire [16].

En las siguientes gráficas de la misma empresa coreana se pueden ver otros parámetros de diseño. Sugieren que la velocidad de operación se encuentre en 1m/s y 4m/s para obtener eficiencias entre 90% y 99%, también se muestra que entre mayor sea el tamaño de la gota mayor es la eficiencia. Con gotas mayores a los 4 μm se obtienen eficiencias de recolección superiores a 85%.

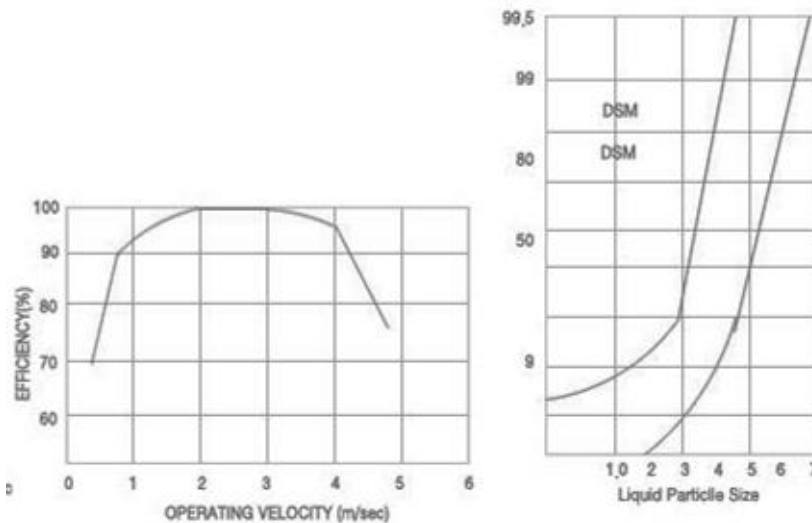


Figura 10. La gráfica del lado izquierdo muestra que la eficiencia máxima se encuentra entre una velocidad de 2 m/s a 3 m/s Y del lado derecho no muestra una gráfica según la eficiencia alcanzada por el tamaño de la gota de agua [16].

Para el cálculo de la caída de presión, primero se calcula el número de Reynolds, luego un coeficiente de arrastre y con estos datos se puede calcular la diferencia de presiones en la entrada y en la salida. El fabricante lo determina de la siguiente manera

$$N_{re} = \frac{DV_g e g}{\mu g} \quad (2-1)$$

$$Cd = 8.4 N_{re}^{-0.32} \quad (2-2)$$

$$\Delta p = Cd \frac{2 e g V_g^2 X (1 - \epsilon)}{\pi (g c) D} \quad (2-3)$$

$V_g$  = Velocidad del vapor [cm/s]

$D$  = diámetro del hilo [cm]

$\mu g$  = viscosidad del líquido [gr/cms]

$N$  = número de capas

$f$  = factor de fricción =  $5.3 \left( \frac{DV_g e g}{\mu g} \right)^{-0.32}$

$g c$  = aceleración = 9.8 [m/s<sup>2</sup>]

$X$  = grosor del eliminador de niebla [m]

$e g$  = densidad del vapor [kg/m<sup>3</sup>]

$\epsilon$  = Volumen libre

$E_t$  = Eficiencia total

$C$  = Coeficiente = 0.15

$E_f$  = Eficiencia fundamental

$K$  = Impactabilidad (término que hace referencia a la susceptibilidad de ser impactado)

$d_l$  = tamaño de partícula líquida [cm]

$e_l$  = densidad del líquido [gr/cm<sup>3</sup>]

Para el caso de la eficiencia, se puede obtener conociendo el volumen libre del sistema, el tamaño de la gota de agua, la velocidad del vapor, la densidad del fluido, la viscosidad del líquido y un coeficiente  $C$ .

$$E_f = 1 - \left(1 - \frac{E_t}{C}\right)^{N/100} \quad (2-4)$$

$$K = \frac{1}{9} \frac{(d_l)^2 e_l V_g}{\mu g D} \quad (2-5)$$

$$E_t = 1 - 10^{-0.22(\text{Log}_{10} K)^2} \quad (2-6)$$

$$N = \frac{\text{Log}(1 - \epsilon)}{\text{Log}\left(1 - \frac{E_t}{C}\right)} \quad (2-7)$$

## 2.5 Análisis de malla de filtro de agua

Durante la investigación se encontró un artículo de investigación donde se analizan algunas de las variables implicadas en la recolección de agua de las mallas. Este artículo es el más completo que se encontró para poder modelar el sistema, sin embargo en la práctica se encontraron algunas limitantes del mismo.

En las siguientes imágenes se pueden observar algunos sistemas que logran recolectar agua del ambiente. (a) Hojas delgadas de árboles. (b) Telaraña decorada con algunas gotas de agua colectadas de la niebla. (c) Gran red para atrapar niebla, puesta en el desierto de Atacama en Chile (d) Red Raschel utilizada para recolectar niebla. (e) Mecanismo básico para la recolección de niebla por impacto físico de las gotas de agua en la malla, recolección de gotas más grandes unidas y posteriormente drenadas [17].

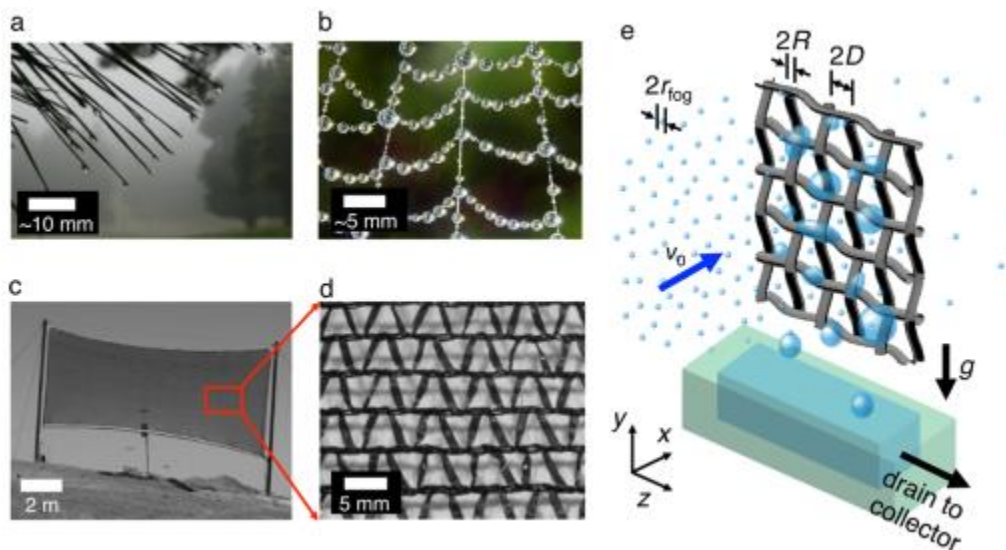


Figura 11. Recolección de agua por mallas [17]

En la Figura 12 se puede observar el flujo de la niebla a través de una malla tejida y una gráfica de eficiencia de cosecha de agua de niebla. (a) Una ilustración que indica las superficies de flujo de aire de neblina cargada y su desviación después de pasar por la malla tejida. (b) Imagen ampliada enfocándose en la interacción entre gotas de niebla entrante y un elemento horizontal de la malla. Las gotas más cercanas al eje central son atrapadas en el cilindro circular, mientras que las más cercanas a la periferia continúan por las líneas de corriente alrededor del hilo. Las gotas de agua en el cable coalescen, y una vez que crecen pasan un umbral de tamaño, son drenadas con la gravedad. (c) Gráfica de contorno de la eficiencia de cosecha de niebla ( $\eta$ ) como función de la relación del radio de las gotas de niebla con el radio del cable ( $R^* = r_{fog}/R$ ) y la relación entre el espaciamiento de la malla tejida ( $D^* = (R + D)/R$ ). Se muestran en la gráfica varias mallas y sus eficiencias.

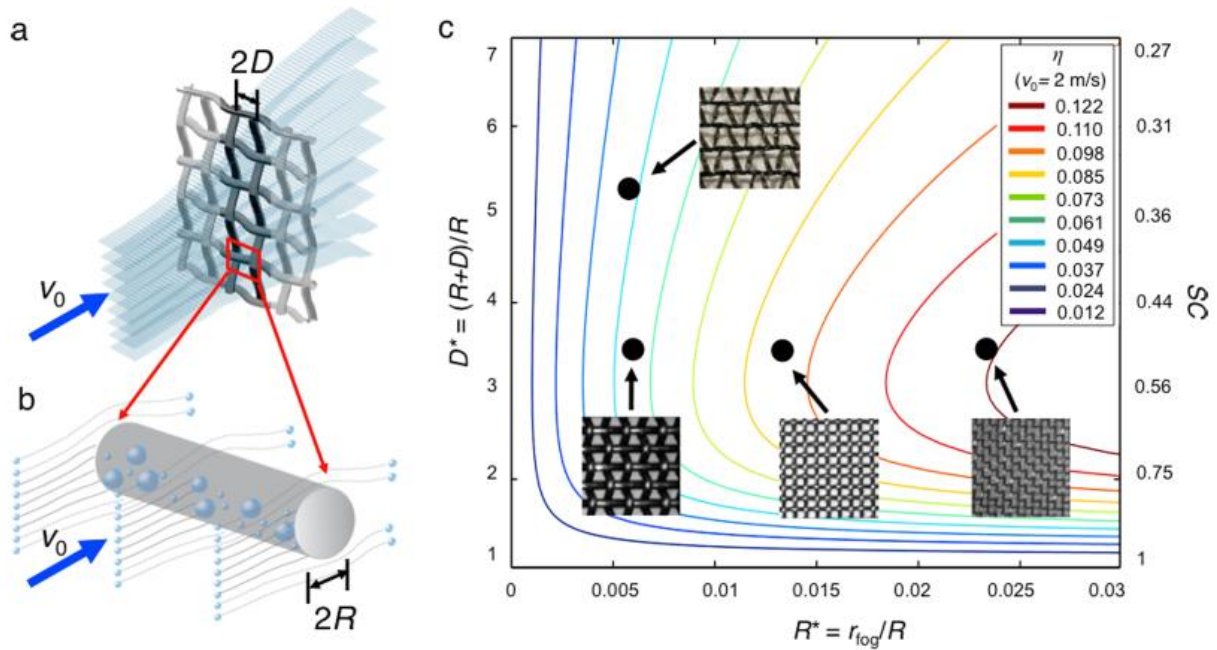


Figura 12. Gráfica de eficiencias según valores adimensionales de  $R^*$  y  $D^*$  [17]

En la Figura 13 siguiente se muestra cómo existen dos factores que reducen la eficiencia de la recolección. Uno de estos dos factores es el reingreso que es cuando las gotas de agua se despegan de la malla y vuelven al flujo de aire. El otro factor es el bloqueo que se presenta cuando la malla no drena las gotas y se acumulan muchas de ellas sobre la malla, reduciendo así su eficiencia. Estos factores que afectan la cosecha de niebla y reducen la eficiencia.

La Figura 13 está dividida en cuatro y cada una de las partes está identificada con una letra. Así se explica, (a) el reingreso de gotas recolectadas y el viento (b) el bloqueo de la malla. (c) Gráfica que identifica el rango de tamaños de gota y donde las fuerzas de adhesión dominan las fuerzas de arrastre y establecen un criterio para el umbral del tamaño de gota y el reingreso. (d) La segunda restricción surge de comparar el peso de la gota con fuerza de superficie de alfiler, surgiendo del ángulo de contacto de histéresis. El tamaño umbral donde la gravedad domina la sujeción de histéresis puede disminuir al minimizar  $CAH = \cos\theta_{rec} - \cos\theta_{adv}$

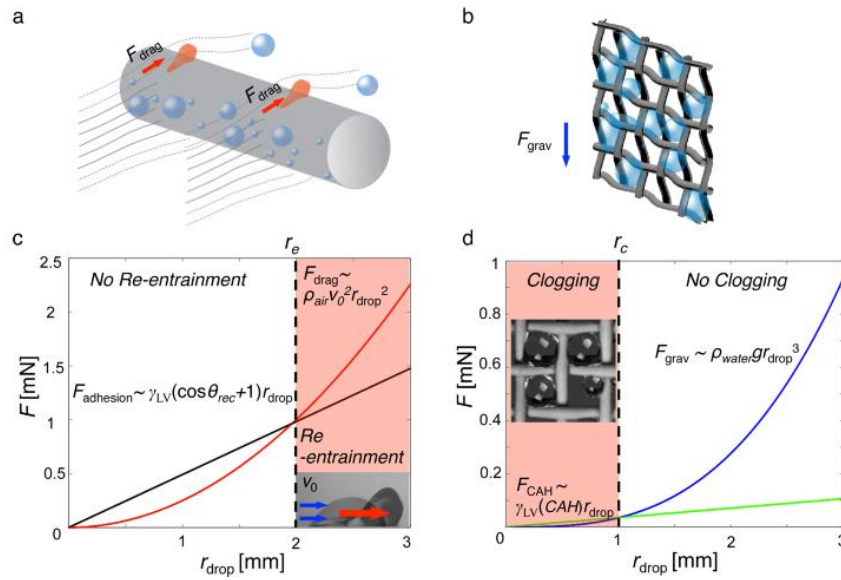


Figura 13. Gráficas para determinar reingreso y bloqueo de las mallas [17]

La Figura 14 muestran los resultados obtenidos de los experimentos realizados con diferentes materiales, de igual manera la Figura 14 tiene indicadores de letras para identificar a que parte de ella se refiere. (a) Se muestra una gráfica de  $R^*$  contra  $D^*$  y un factor SC. Este factor SC es qué tan cerrada está la malla, yendo de 1, que sería una pared, y va decreciendo hasta 0. En la gráfica también se pueden ver las eficiencias indicadas con curvas de diferentes colores. El área sombreada representa la zona donde el filtro se bloquea porque no hay suficiente drenaje de las gotas de agua. (b) En la tabla se muestra la comparación de eficiencia de recolección entre la malla Raschel utilizada en el desierto de Atacama en Chile y otros materiales. (c) En esta tabla se puede observar cómo aumenta la eficiencia de la recolección si se disminuye el tamaño del hilo, siendo el máximo para 172  $\mu\text{m}$ . Más pequeño genera que la malla se bloquee. (d) Finalmente la última gráfica representa la eficiencia de recolección respecto al tiempo. Como se puede observar en la línea azul, para el material con un recubrimiento hidrofílico es constante durante el tiempo. La línea roja representa la malla Raschel utilizada actualmente en estos lugares.

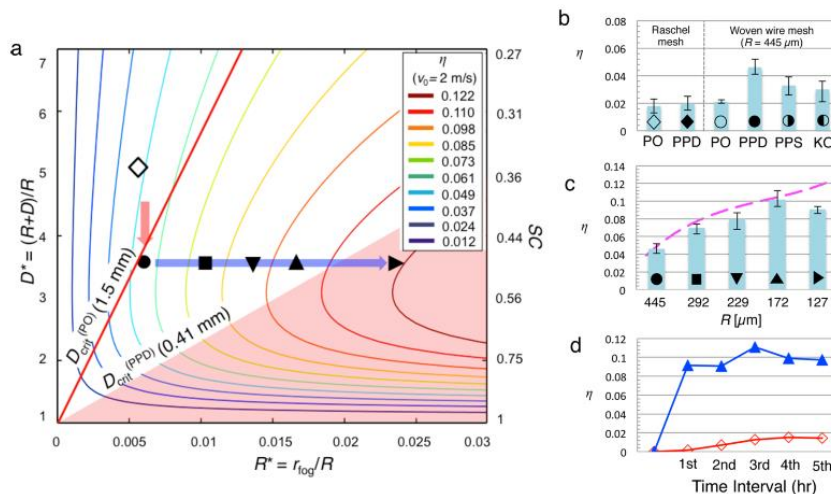
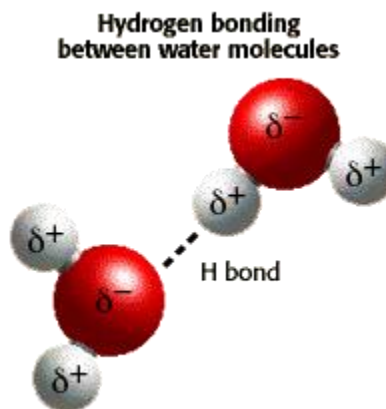


Figura 14. Resultados obtenidos con las diferentes mallas y sus eficiencias por hora [17].

## 2.6 Puente de hidrógeno

El puente de hidrógeno es muy importante en la coalescencia del agua. La molécula del agua está compuesta por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno. La molécula es polar, es decir que tiene una carga parcial negativa en el átomo de oxígeno y una carga parcial positiva en los átomos de hidrógeno, haciendo que haya una distribución irregular electrónica. Esta irregularidad hace que exista atracción entre las moléculas y se unan a través de puentes de hidrógeno. Este puente permite que el hielo flote, esto debido a que las moléculas están más separadas en el hielo que en el agua. Además, el puente de hidrógeno afecta otras propiedades físicas como la tensión superficial, un alto calor de vaporización y el ángulo de contacto que forma con las superficies [18], que es de vital importancia en estudio que se está realizando en esta tesis.



**Figura 15. Puentes de hidrógeno generados por la distribución irregular electrónica [18]**

## 2.7 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es el ángulo que se forma entre un líquido y un sólido o una superficie. Dependiendo del ángulo formado es la clasificación que se van a obtener. Uno de los dos casos extremos es un ángulo de contacto superhidrofílico. Aquí el líquido genera un ángulo menor a  $10^\circ$ , es decir que se forma una película del líquido sobre la superficie. Teniendo un ángulo entre  $10^\circ$  y  $90^\circ$  se puede hablar de una superficie hidrofílica. Para ángulos de  $90^\circ$  a  $120^\circ$  se trata de una superficie hidrofóbica, es decir que repele el agua. Finalmente, el último caso es una superficie que repele tanto el líquido y que prácticamente no tenga contacto con ella, a estas superficies se les llama superhidrofóbicas [19]. Este ángulo estará dado por diferentes variables como el tipo de líquido, el material de la superficie, la rugosidad de la superficie, Dependiendo la aplicación que se desee es el tipo de superficies que se requieren. Para evitar oxidación en los metales se busca por ejemplo que sean superficies hidrofóbicas, para la recolección de agua del aire se busca que sea una superficie superhidrofílica. Esto con dos objetivos, para atraer la mayor cantidad de agua y a la vez evitar que el agua se quede pegada a las mallas y las bloquee.

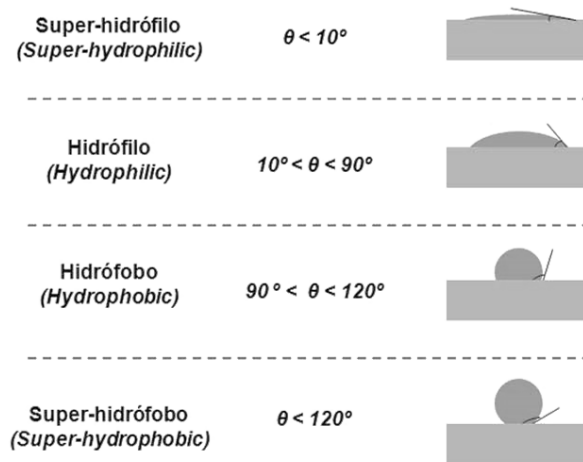


Figura 16. Clasificación de las superficies según el ángulo de contacto [19].

## 2.8 Recolección de neblina utilizando electrostática

Uno de los sistemas más eficientes para la recolección de neblina es la utilización de cargas electrostáticas que puede alcanzar hasta un 100% de eficiencia en su recolección. Esto fue demostrado por investigadores del Instituto Tecnológico de Massachusetts o por siglas en inglés (MIT) a través de cargar eléctricamente las gotas de agua previas a su captura. Utilizando un generador electrostático de alto voltaje, las gotas de agua primeramente se cargan en una primera fase y posteriormente se hacen colisionar con una malla de acero inoxidable que estará conectada a la tierra del generador electrostático. Después de realizado el experimento se encontró que es posible obtener una eficiencia cercana al 100%. Además, gracias al campo eléctrico generado por las mallas, es posible atraer el flujo inclusive por la parte posterior del sistema. En la Figura 17 se puede ver la evolución en el tiempo de la recolección de agua en la malla. Utilizando un colorante rojo, se puede observar más fácilmente cómo se logra pegar el agua en las mallas [20]. Este modelo es muy importante porque permite visualizar la sensibilidad y los efectos de los campos eléctricos en la recolección de agua.



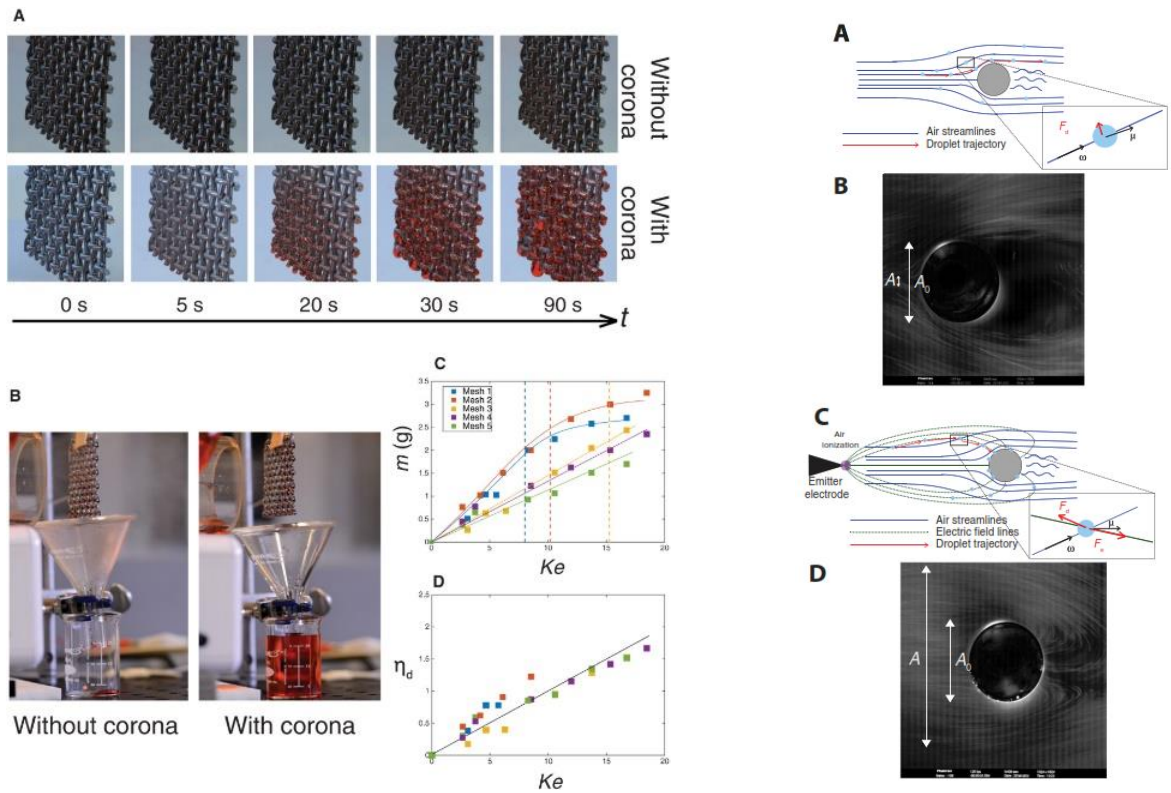


Figura 17. Comparación entre recolección de agua sin carga electrostática y con carga del lado izquierdo. Del lado derecho líneas de flujo alrededor de un cilindro sin carga en la corona y con carga. [20]

## 2.9 Humedad relativa, energía interna, entalpía y carta psicrométrica

Para calcular cuánta agua se puede extraer del ambiente, se necesitan conocer los parámetros atmosféricos con los cuales se van a estar trabajando. Además, es importante considerar que el aire es una mezcla de aire seco y vapor de agua. Ya que se busca conocer la producción de agua a partir del ambiente es necesario conocer la humedad relativa en el aire, el concepto de energía interna, entalpía y la carta psicrométrica para poder realizar los cálculos posteriores a ello.

La definición de energía interna y entalpía parten de las relaciones de Gibbs de formación [21]. La energía interna se define por la siguiente ecuación

$$du = Tds - Pdv \quad (2-8)$$

Lo que dice que los cambios en la entropía y los cambios de volumen generan un cambio en la energía interna, sin cambios en la temperatura o la presión. Mientras que la entalpía por la siguiente ecuación

$$dh = Tds + vdP \quad (2-9)$$

Esta ecuación nos dice que los cambios en la entropía y en la presión tienen cambios en la entalpía, sin cambios en la temperatura y el volumen.

La entalpía de la mezcla de vapor de agua con aire seco se define como la suma de las dos entalpías. El aire bajo condiciones de presiones de 1 atmósfera se puede tomar como gas ideal con un error muy pequeño de 0.2%. A temperaturas menores de 50°C a -10°C es posible tomar la entalpía de vapor sobrecalentado. La entalpía es sólo función de la temperatura y las entalpías son constantes por debajo de 50°C, esto facilita el cálculo de este valor.

La humedad absoluta o específica se define como el cociente de la masa de vapor que el aire puede contener entre la masa de aire a la misma temperatura [21]. La ecuación para la humedad absoluta se define como

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} \quad (2-10)$$

El total de la entalpía del aire atmosférico es la suma de la entalpía del aire seco más el vapor de agua que se puede expresar como

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (2-11)$$

Dividiendo entre  $m_a$  queda

$$h = \frac{m_a h_a}{m_a} + \frac{m_v h_v}{m_a} = h_a + \omega h_v \quad (2-12)$$

Donde  $\omega$  es la relación de humedad entre kilogramos de vapor de agua entre kilogramos de aire seco

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (2-13)$$

Otra manera de saber cuánta agua hay en el aire es conociendo la humedad relativa, la cual se define como la humedad que el aire puede mantener relativa a la cantidad de humedad máxima que el aire puede almacenar a la misma temperatura este cociente se define como

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_v T} = \frac{P_v}{P_g} \quad (2-14)$$

Por ejemplo, si se desea saber cuántos gramos de agua hay a 20°C con 100% de humedad relativa (HR) a través de la ecuación en la siguiente gráfica, se puede saber que hay aproximadamente 14 gr/m<sup>3</sup>. Esta gráfica muestra una curva de vapor saturado, el cual se alcanza con 100% de humedad relativa. Esto dice que es necesario hacer pasar grandes volúmenes de aire para generar agua suficiente para diferentes aplicaciones.

$$VD = 5,018 + ,32321 T_C + 8,1847 \times 10^{-3} T_C^2 + 3,1243 \times 10^{-4} T_C^3$$

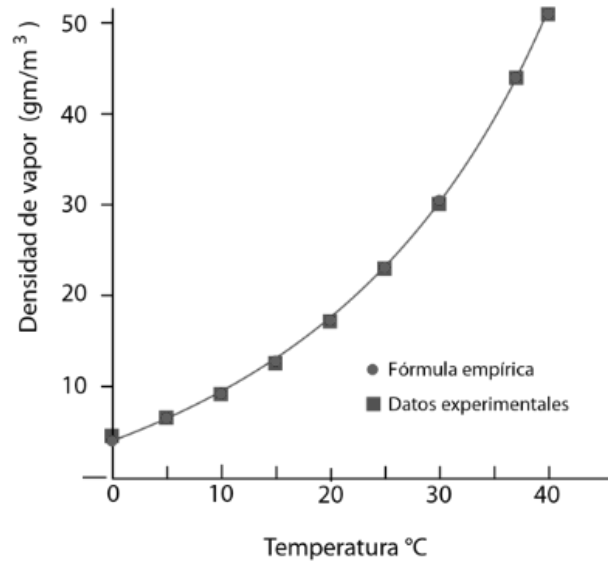
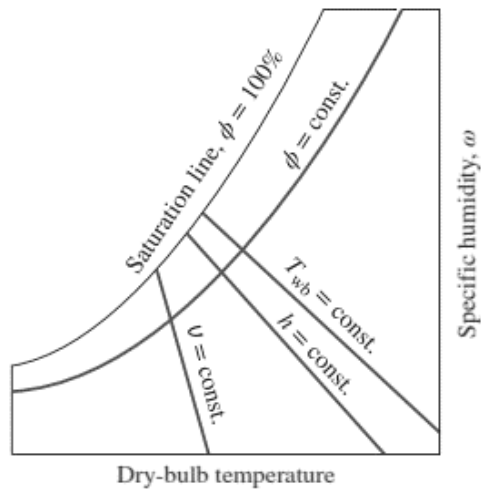


Figura 18. Curva de densidad de vapor saturado respecto a la temperatura ambiental [22]

Considerando diferentes densidades de vapor, diferentes humedades relativas, diferentes temperaturas y entalpías se genera la carta psicrométrica. Esta gráfica lo que permite es conocer los demás valores termodinámicos con dos datos al menos. Esto tiene diferentes aplicaciones por ejemplo en sistemas de aire acondicionado, humidificación del aire, deshidratación, entre otras. Dependiendo del proceso termodinámico que se está realizando, se pueden conocer las trayectorias que se van a seguir en esta carta y saber las variables y los valores al final del proceso.

Ya que el aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua, se definen dos temperaturas diferentes, la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo. El termómetro de bulbo húmedo se le coloca un material absorbente de humedad, lo que permite una mejor transferencia de calor hacia el termómetro generando una temperatura diferente a que si el termómetro está seco. Con esto es posible tener una relación más específica entre la humedad en el ambiente y las demás variables termodinámicas.



**Figura 19.** Carta Psicrométrica, donde se pueden observar en el eje horizontal temperatura de bulbo seco  $T_{ab}$ , en el eje vertical humedad específica  $\omega$ , las líneas de volumen específico  $v$  constante, entalpía  $h$  constante, la temperatura de bulbo húmedo  $T_{wb}$  constante la línea de saturación  $\phi=100\%$  [21]

La Figura 19 expresa que no es posible tener humedades relativas por encima del 100%, ya que, si hay más vapor de agua en el sistema, no podrá ser contenido por el aire y tenderá a condensarse.

## 2.10 Generación de nubes en los árboles

Según estudios realizados la generación de las nubes se da gracias a los árboles. Los árboles liberan componentes orgánicos volátiles donde las gotas de agua se pueden adherir y comenzar su crecimiento y también son generados por aerosoles orgánicos secundarios que se encuentran en la atmósfera. Estos reaccionan entre ellos y funcionan como nucleadores que les permite a las gotas de agua crecer más fácilmente. Así mismo, por un proceso de evapotranspiración aumenta la humedad en el aire, permitiendo que las gotas se formen más fácilmente [23].



**Figura 20.** Instalación de Cambio Climático en el Amazonas para medición de emisiones en los árboles [23]

## 2.10 Clasificación de tamaño de gotas de agua en diferentes ambientes

Según el tipo de condiciones que hay en el aire, existen diferentes tamaños para las gotas de agua. Por ejemplo, para gotas en el vapor de agua en condiciones atmosféricas de baja humedad relativa y hasta un 100%, el tamaño puede ir hasta las 10  $\mu\text{m}$ . Posteriormente en tamaño están las gotas de agua de neblina que pueden ir de las 30  $\mu\text{m}$  hasta las 100  $\mu\text{m}$ . Comparando estos dos tamaños, permite observar que hay un factor de 10 entre las más grandes de ambas clasificaciones, solo en su diámetro, el factor es más grande en el área. Las más grandes son las gotas de lluvia que pueden rondar mayores a las 100  $\mu\text{m}$  hasta casi las 1000  $\mu\text{m}$  y las gotas de tormenta pueden ser de hasta 5000  $\mu\text{m}$  [24]. Considerando los tamaños de estas gotas de agua, se puede ver que hay una mayor probabilidad de poder chocar con los hilos de las mallas entre más grandes sean. Además de que las nubes contienen más agua, la probabilidad aumenta también por su tamaño. Por esta razón es mucho más fácil obtener agua a partir de la neblina que del aire regular.

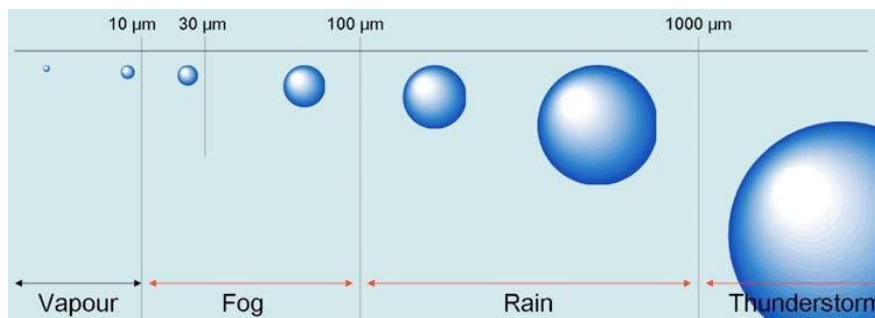


Figura 21. Tamaño promedio de gotas de agua en el vapor de agua, en neblina, en la lluvia y en una tormenta de izquierda a derecha [24].

## 2.11 Recubrimiento superhidrofílico con bióxido de titanio

Como se describió anteriormente, es muy importante generar un recubrimiento superhidrofílico para aumentar la eficiencia de la recolección. Haciendo una comparación entre las mallas Raschel y las mallas recubiertas, tienen una eficiencia del 4% y el 12% respectivamente. Por esta razón era necesario buscar un recubrimiento especial. En la investigación que se hizo en el MIT 17 se sintetizó el recubrimiento utilizado en las mallas, es decir, es un recubrimiento no disponible de manera comercial. Se hizo la búsqueda en Sigma Aldrich y no era posible generarlo de manera sencilla, además de tener que darse de alta en la empresa. Por esta razón se buscaron otras opciones para lograrlo.

Aunque el objetivo de la tesis es generar un colector de agua del aire sin energía, se encontró que el bióxido de titanio puede ofrecer un recubrimiento superhidrofílico [25], el cual puede ayudar a mejorar la eficiencia de la recolección. Este tipo de superficies se encuentran en vidrios tratados que permiten que el polvo y el agua escurran más fácilmente, siendo una superficie autolimpiable. Empresas como Dupont y Evonik son proveedores de este tipo de material. El proceso de fabricación de los recubrimientos puede ser variado, por lo que es necesario realizar experimentación al respecto.

Se realizó en este caso un recubrimiento de las mallas con bióxido de titanio, y una manera de probarlo fue a través de fotocatalisis. La fotocatalisis se presenta cuando este tipo de materiales semiconductores en la presencia de luz ultravioleta reaccionan y generan radicales libres que pueden purificar el agua. Se optó por este método de comprobación, ya que era el más sencillo en ese momento y también ofrecía la posibilidad de generar un sistema de purificación de agua.

## 2.12 Medición del ángulo de contacto

Existen diferentes métodos para realizar la medición del ángulo de contacto de la gota con la superficie, entre las que se encuentran la utilización de sistemas ópticos como lo pueden ser tensiómetros digitales, su costo puede rondar los 20,000 USD [26]. Existen algunos desarrollos en México que buscan reducir el costo de estos equipos. El estudio del ángulo de contacto sobre las superficies es muy importante ya que existe una gran de aplicaciones en ingeniería que lo requieren.

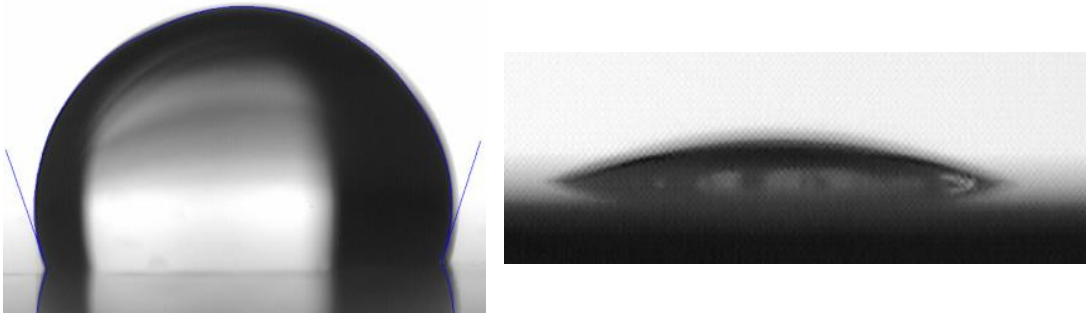


Figura 22. Agua bidestilada sobre PTFE [26] izquierda.  
Agua bidestilada sobre vidrio derecha

## 2.13 Carga eléctrica en las nubes

En la carga eléctrica de las nubes existen dos modelos teóricos uno de ellos por convección y el otro por colisiones [27]. En la carga eléctrica por convección existe una corriente ascendente en la presencia de iones dentro de un campo eléctrico ya existente. Al inicio los iones surgen de radiación cósmica, posteriormente proviene de descargas de objetos afilados, donde el campo eléctrico se puede volver muy grande. Al comenzar el ascenso del flujo del aire se generan aerosoles con carga positiva que a su vez atraen iones negativos de la atmósfera. La redistribución de la carga posteriormente provoca una descarga en forma de un rayo.

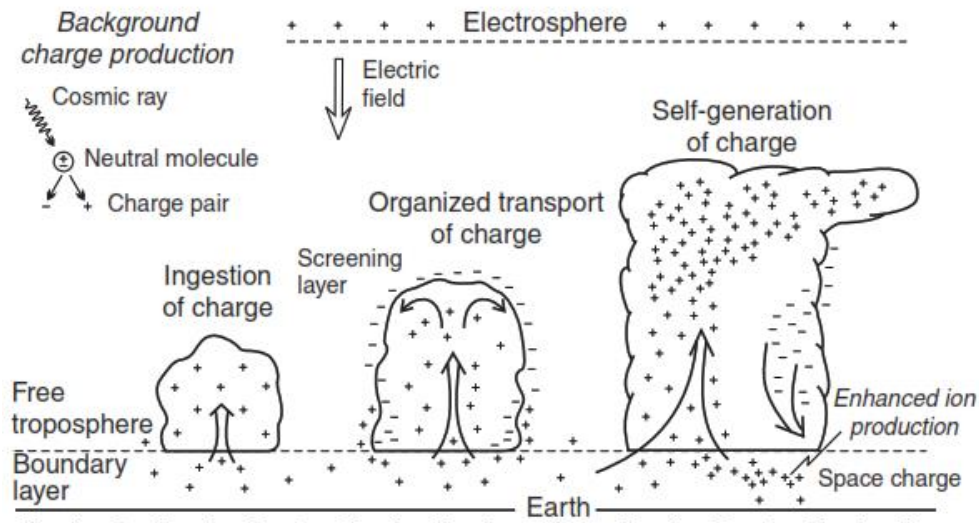
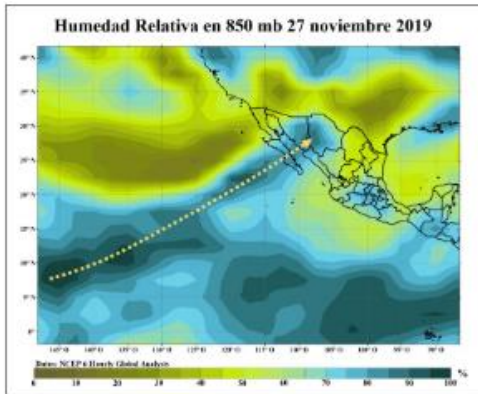


Figura 23. Carga eléctrica por convección en nubes [27]

El otro mecanismo de carga es a través de colisiones, donde las interacciones entre gotas de agua transfieren cargas eléctricas entre ellas y aquí es necesario que no se junten entre ellas. En este proceso aumentarán de tamaño algunas de las gotas, pero habrá algunas que no se unan y sirvan para transmitir la carga eléctrica. La carga eléctrica en las gotas de agua puede determinar significativamente también la recolección de agua a partir de la neblina.

## 2.14 Ríos atmosféricos

Los ríos atmosféricos con corredores largos, estrechos y de un fuerte transporte horizontal de vapor de agua. Están generalmente asociados en México con corrientes de chorro de bajo nivel en un frente frío de un ciclón extratropical. Estos producen fuertes precipitaciones suben por montañas o por el ascenso de cintas cálidas transportadoras. El vapor de agua en las latitudes medias proviene principalmente de los ríos atmosféricos. Este tipo de fenómenos son los ríos más grandes de agua dulce en la Tierra, transportando más del doble de agua que el río Amazonas. Estos eventos ocurren también en Chile y en diferentes partes del mundo. En la Figura 24 se puede observar las consecuencias en Mazatlán, Sinaloa. En noviembre de 2019 se presentó un río atmosférico en esta región del país, creando precipitaciones entre 86 mm a 196 mm. Es posible aprovechar este evento natural para captar agua del río, gracias a mallas que estén desarrolladas para este fin. En la península de Baja California donde existe un estrés hídrico alto, es posible implementar atrapanieblas para poder aprovechar los ríos atmosféricos y ofrecer agua a sus habitantes.



Mapa de humedad relativa



Imagen de análisis de Superficie

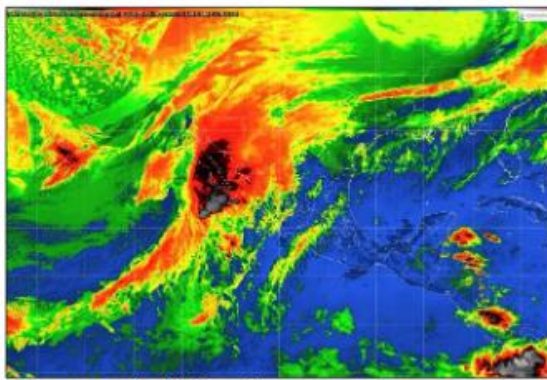


Imagen satelital infrarroja



Inundaciones el día 28 de noviembre de 2019

**Figura 24. Río atmosférico en el norte de México en Noviembre de 2019, con precipitaciones mayores a 150 mm**

## 2.15 Necesidad de utilización de chimeneas solares para la generación de agua del aire

Como se explicó durante este capítulo en Perú, Chile y otras partes del mundo existen condiciones atmosféricas especiales que permiten la recolección de agua del aire a través de mallas. Gracias a los ríos atmosféricos combinados con corrientes naturales generadas en algunas partes del planeta, es posible obtener agua de la neblina de manera muy sencilla, desafortunadamente estos recursos naturales no se encuentran en todo México o regiones de otros países donde el agua se requiere. En condiciones ideales a 30°C y con 100% de humedad relativa hay aproximadamente 25 mililitros de agua por cada kilogramo de aire. Si se deseara por ejemplo producir 1 litro de agua con estas condiciones sería necesario extraer toda el agua de 40 kilogramos de aire. Si el proceso de condensación del agua tiene una eficiencia del 10%, entonces este valor deberá ser de 400 kilogramos de aire para 1 litro de agua. **Para producir 30 litros al día serían 12,000 kilogramos de aire o bien 10,305 metros cúbicos.** Esto quiere decir que son necesarios grandes volúmenes de aire filtrado para la producción de pequeñas cantidades de agua. Existe la posibilidad por ejemplo de utilizar energía eléctrica para mover un ventilador que logre desplazar estos volúmenes de aire en el día. La energía requerida para ello es muy alta, por lo que una opción es la utilización de las chimeneas solares. Como se explicará en el próximo capítulo, las chimeneas solares aprovechan el efecto invernadero para calentar aire y lo hacen subir a través de grandes chimeneas. Estos sistemas



son capaces de mover enormes cantidades de aire a través de la chimenea, pudiéndose aprovechar para producir agua y también energía eléctrica a la vez.

El cambio climático es en la actualidad uno de los problemas más importantes y graves que la humanidad está enfrentando. Tener nuevos desarrollos en la generación de energía eléctrica que sean sustentables y amigables con el ambiente son muy importantes. La utilización de las chimeneas solares para producir energía limpia es una de las alternativas que actualmente se están explorando. Por otro lado, en comunidades rurales donde no hay acceso a agua potable normalmente tampoco tienen acceso a energía eléctrica. Por esta razón, el estudio de la generación eléctrica para lugares geográficamente aislados tiene sentido.

Como se comentó en el capítulo anterior dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU existen también ofrecer a la población energía asequible y no contaminante y realizar acciones por el clima, que es el cambio climático. La chimenea solar ofrece la posibilidad no sólo de generar agua a partir de la humedad del aire, sino también de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente además de proveer de energía sustentable a quienes se encuentren cerca de ella.

Por las razones aquí explicadas, en el capítulo siguiente se hará un análisis termodinámico de las chimeneas solares, que permitirán conocer la producción de agua a partir de la humedad del aire a la vez de la producción de energía eléctrica sustentable.

### **3. Chimeneas solares, intercambiadores de calor de aire y turbinas eólicas**

Los factores importantes en la obtención de agua del aire son: tener un flujo de aire considerable, temperatura y humedad. Por esta razón, en este capítulo se describen una tecnología renovable para la creación de una corriente de aire.

#### **3.1 Chimeneas solares**

En el capítulo anterior las tecnologías presentadas utilizan ya sea una corriente natural de aire proveniente del mar o bien un ventilador eléctrico para hacer pasar el aire por el condensador. En el caso de que no exista una corriente es posible utilizar las chimeneas solares, siendo una alternativa ecológica, que no solo tienen el potencial de generar agua del aire sino también de producir electricidad.

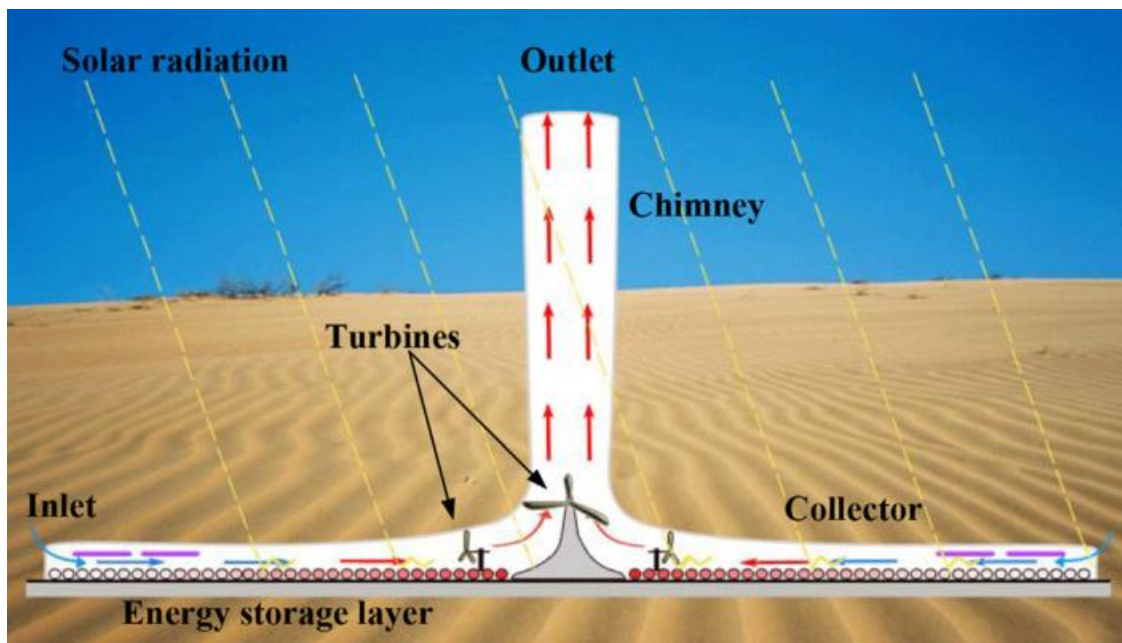


Figura 25 Diagrama de chimenea solar [28]

Las chimeneas solares están compuestas por cuatro elementos, un colector, una superficie de almacenamiento de energía, una turbina y la chimenea. La radiación solar calentará la placa de almacenamiento de energía, que a su vez calentará el aire que se encuentra en contacto con dicha placa. El aire caliente al ser más ligero que el aire frío, subirá por la chimenea haciendo girar una turbina que producirá energía eléctrica. El aire continuará ascendiendo hasta salir por la parte superior de la chimenea. Este vacío generado por el aire caliente hará que el aire frío y fresco entre por toda la periferia abierta del colector. El colector está hecho de un techo transparente para permitir el paso de la radiación solar y a su vez impedir que el calor se disipe al medio ambiente, creando también un efecto invernadero dentro del colector. Las únicas partes móviles de estos sistemas es la turbina y el generador eléctrico, lo que permite un bajo costo en el mantenimiento [28]. Esta

turbina se colocará en la parte inferior de la chimenea, esto para facilitar su mantenimiento, además de que en ese punto se encuentra la mayor velocidad del aire después del colector.

Este diseño fue propuesto inicialmente por el profesor Jörg Schlaich en 1970 y probado en Manzanares, España a inicios de los ochenta gracias a recursos alemanes. La torre tiene 194 m de altura, 240 m del diámetro del colector, una turbina de 50 kW, un diámetro en la chimenea de 10 m, el peso de la chimenea de 125,000 kg, una altura del colector de 2 m, un área del colector con membrana de 40,000 m<sup>2</sup> y otra sección de 5,000 m<sup>2</sup> con cristal [29]. Este diseño no contó con la placa de almacenamiento de energía y como se puede observar en la imagen, la superficie en la parte del piso era pasto. El costo estimado de producción de energía eléctrica es de 1.84 MXN/kWh muy similar al costo de los paneles fotovoltaicos tradicionales [30]. La ventaja sobre los paneles fotovoltaicos es la capacidad de almacenar energía para producción de electricidad en la noche y la posibilidad de producir agua al mismo tiempo.



**Figura 26. Interior del colector de la chimenea solar, Manzanares, España [29].**

Buscando la eficiencia de la planta piloto de Manzanares es necesario conocer el área de recolección y la producción de energía eléctrica. Para ello se obtiene lo siguiente

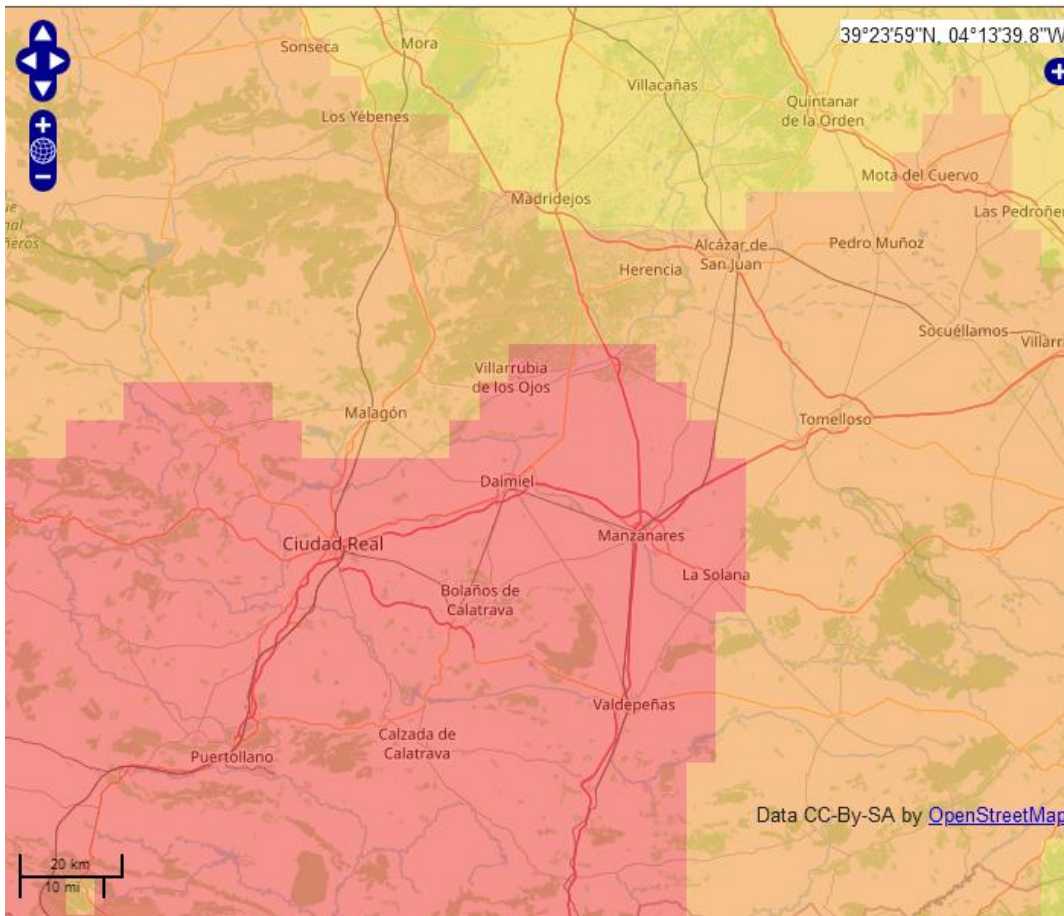
$$\text{Área} = A = \pi r^2 = \pi \left( \frac{244}{2} \right)^2 = 46759.46 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{PotenciaTurbina} = P_t = 50 \text{ [kW]}$$

$$\text{IrradiaciónSolar} = I_s = 1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$Eficiencia = \frac{Pt}{A(Is)} \times 100 = \frac{50,000}{46759.46(1000)} \times 100 = 0.106 \%$$

Esta eficiencia tan baja se debe a que no existe una placa de almacenamiento de energía, además de que las propiedades ópticas y materiales de la placa aportan también de manera importante. Esto se explicará más adelante en este capítulo.



**Figura 27. Irradiación solar sobre Manzanares, España con un promedio de 5.1 kWh/m<sup>2</sup> anual [31]**

### 3.2 Modelado térmico de la chimenea solar

Una forma de modelar el ciclo termodinámico ideal de la chimenea solar es a través de considerarla como un ciclo Brayton ideal. El aire comenzará a fluir inicialmente por la periferia del colector y se comenzará a calentar dentro de este conforme se vaya acercando a la chimenea. Una vez llegando a la chimenea comenzará a ascender y pasará por la turbina transformándose la energía cinética y térmica en energía eléctrica en este punto. Más adelante se continuará desplazando por la chimenea. El diagrama TS del ciclo completo quedará como la Figura 28.

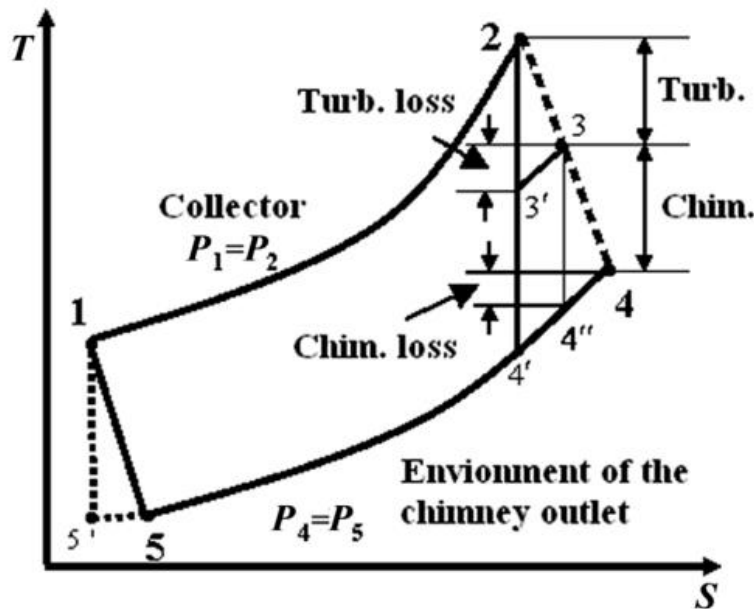


Figura 28. Diagrama TS del ciclo Brayton para la chimenea solar [32]

En el diagrama del punto 1 - 2, se llevará a cabo el calentamiento del aire dentro del colector. Después del 2 - 3 se tendrá la producción de energía en la turbina y del 3 - 4 en enfriamiento dentro de la chimenea. Del punto 2 al 4' será un proceso ideal isentrópico y adiabático, pero como se muestra en la Figura 28 los procesos ideales estarán indicados por el punto 3 y 4 lejos de la línea isentrópica.

Del punto 4 al 5, es considerando que el aire se enfría fuera de la chimenea y vuelve a entrar por la periferia del colector. Este proceso no se lleva a cabo en la chimenea solar ya que es un ciclo abierto. Los procesos de 1 a 2 y de 4 a 5 se consideran a presión constante y adiabáticos [32].

En la Figura 29 se puede observar los puntos termodinámicos ya explicados. El número 1 será para el aire fuera del colector solar, el punto número 2 es antes de la turbina, el número 3 es después de la turbina y finalmente el 4 es a la salida de la chimenea. Conociendo las temperaturas y las entalpías en cada uno de estos puntos se podrá realizar el modelado térmico del sistema. A continuación, se realizará el análisis de cada uno de los procesos térmicos.

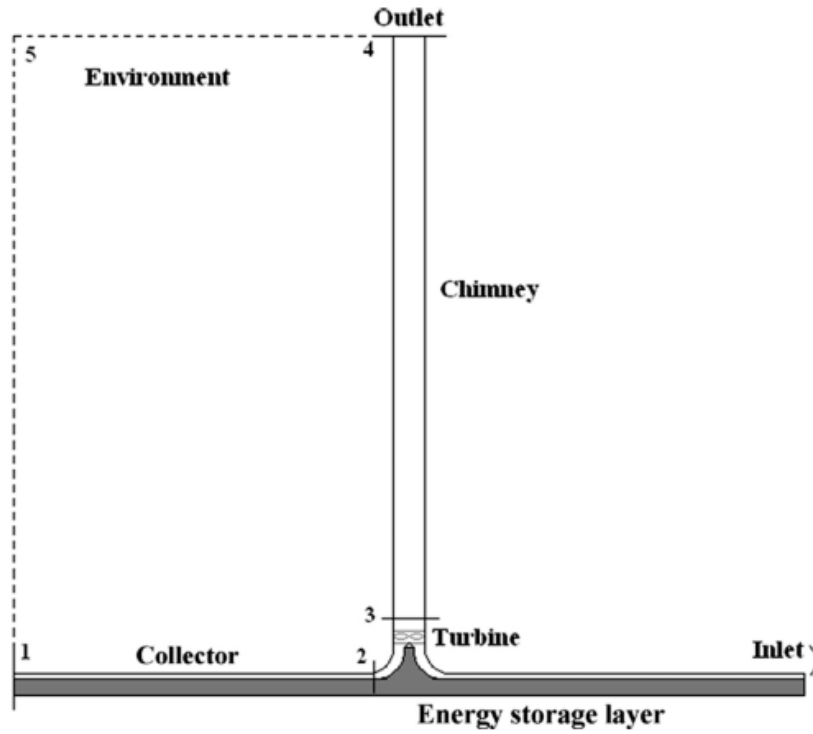


Figura 29. Diagrama de chimenea solar con puntos termodinámicos indicados [32]

El trabajo hecho por la turbina será la diferencia de las entalpías lo que queda como

$$w_t = h_2 - h_3 = c_p T_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (3-1)$$

La energía utilizada para aumentar la energía potencial del fluido a través de la chimenea queda como

$$w_p = h_3 - h_4 \quad (3-2)$$

Considerando condiciones estacionarias durante el día, la eficiencia térmica del ciclo podrá quedar como

$$\eta = \frac{w_t}{q_{12}} \quad (3-3)$$

donde el calor agregado  $q_{12}$  se puede escribir como

$$q_{12} = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) \quad (3-4)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores descritas, se tendrá que la eficiencia se puede escribir como

$$\eta = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \left[ 1 - \left( \frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{T_1 + \Delta T}{\Delta T} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta p_t}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (3-5)$$

En la ecuación anterior  $\Delta p_t$  se refiere a la caída de la presión a lo largo de la turbina  $\Delta p_t = P_2 - P_3 = P_1 - P_3$  mientras que la  $\Delta T$  será la diferencia de las temperaturas dentro y fuera del colector  $\Delta T = T_2 - T_1$ , que estará relacionada con la radiación solar, la caída de la presión y sobre todo por la placa de almacenamiento de energía. La eficiencia de la chimenea solar estará sujeta a varios parámetros como la radiación solar, la caída de presión, la temperatura ambiental, las dimensiones geométricas, etcétera.

La eficiencia térmica ideal de la chimenea solar, si todas las pérdidas irreversibles se desprecian, podrá ser expresado como

$$\eta = \frac{q_{12} - |q_{4'5'}|}{q_{12}} = \frac{\Delta h_{24'} - \Delta h_{3'4'}}{q_{12}} \quad (3-6)$$

entonces

$$\eta = \frac{(h_2 - h_{4'}) - (h_{1'} - h_{5'})}{h_2 - h_1} = \frac{(T_2 - T_{4'}) - (T_{1'} - T_{5'})}{T_2 - T_1} \quad (3-7)$$

de acuerdo con las características de cada proceso en el ciclo Brayton se podrá obtener las siguientes relaciones

$$\frac{T_{1'}}{T_{5'}} = \frac{T_{2'}}{T_{4'}} = \left( \frac{p_1}{p_{5'}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left( \frac{p_2}{p_{4'}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \pi^{\frac{k-1}{k}} \quad (3-8)$$

donde  $\pi$  es la relación de las presiones  $\pi = \frac{p_1}{p_{5'}}$ , sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación de la eficiencia se tiene que

$$\eta = 1 - \frac{T_{5'}}{T_1} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \quad (3-9)$$

Así la eficiencia ideal de la chimenea solar es exactamente a un ciclo Brayton convencional. Cuando el aire caliente fluye de la base a través de la chimenea al ambiente, o bien la misma masa de aire frío viene del medio ambiente a la misma altura que la salida de la chimenea a la entrada del colector, la transferencia de energía estará dada por

$$c_p dT = g dZ \quad (3-10)$$

Integrando se tendrá

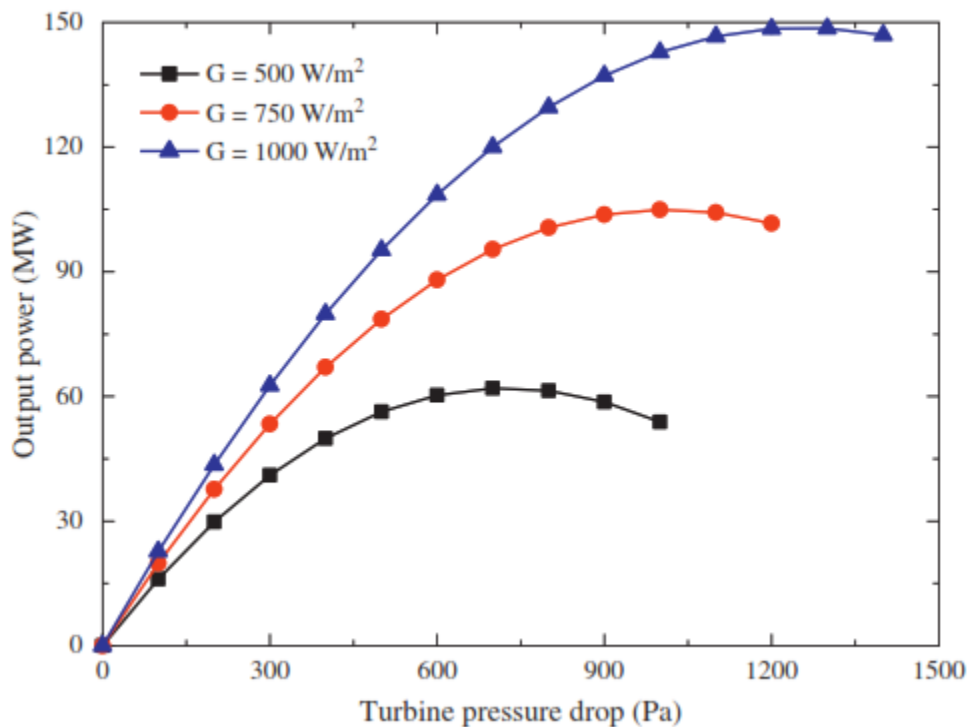
$$c_p (T_1 - T_{5'}) = gH \quad (3-11)$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación de la eficiencia se obtiene

$$\eta = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{gH}{c_p T_1} \quad (3-12)$$

La eficiencia ideal de la chimenea solar está relacionada con la altura de la chimenea y la temperatura ambiente si se desprecia el proceso de 5-1, el proceso de 5'-1 y el proceso 3'-4'. Al ser un proceso idealizado no se puede alcanzar debido a las pérdidas de energía en los procesos.

Con estas relaciones se pueden graficar todos los parámetros, por ejemplo, como varía la producción de energía según la altura y el diámetro de la chimenea solar, o bien cómo varía la eficiencia según la diferencia de temperaturas. En la Figura 30 se puede ver la producción de energía eléctrica según la radiación solar. A mayor radiación solar por metro cuadrado, la generación de energía con 1000 W/m<sup>2</sup> cercana a los 150 MW



**Figura 30. Caída de presión en la turbina en Pa contra potencia eléctrica generada en MW [32]**

Dentro de la literatura existe otra manera de modelar la capacidad de producción de energía eléctrica del sistema [33]. Se puede lograr utilizando la fuerza de flotabilidad del aire caliente respecto al frío. El aire caliente al ser más ligero que el aire frío tiene una fuerza de flotabilidad que le permite subir por la chimenea, para ello se necesita saber la densidad del aire respecto a la altura. A la entrada de la chimenea se considera una densidad  $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$  y esta densidad irá cambiando con la altura la cual se puede calcular con la siguiente ecuación



$$\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H} \quad (3-13)$$

donde  $H \sim 8$  km en un promedio de altura atmosférica. Ahora bien, la temperatura ambiente será  $T_0$  que es la temperatura fuera del colector solar. Como se mencionó anteriormente, el proceso dentro de la chimenea será adiabático e isentrópico para facilitar el modelado. Por esta razón es posible utilizar las condiciones de Poisson adiabáticas las cuáles se expresan con la siguiente ecuación

$$(p/p_0) = (p/p_0)^\gamma = (T/T_0)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3-14)$$

donde  $\gamma = c_p/c_v = 1.4$  que se la razón del calor específico del aire y  $p$  es la presión local y  $T$  la temperatura local. El impulso potencial debido a la flotabilidad  $\Delta\phi$  para el aire dentro de la chimenea está expresado por la integral

$$\Delta\phi = g \int_0^h \rho \left[ \frac{T_c - T}{T} \right] dz \quad (3-15)$$

donde  $g$  es la gravedad y  $T_c(z)$  es la temperatura dentro de la chimenea. Para una chimenea perfectamente aislada, el cambio de la temperatura afuera y dentro de la chimenea es la misma, por lo que  $(T_c - T) = \Delta T$  es aproximadamente independiente de  $z$ . Usando las dos ecuaciones anteriores se puede integrar como

$$\Delta\phi = \rho_0 g H' \frac{\Delta T}{T_0} [1 - e^{-h/H'}] \quad (3-16)$$

donde  $H' = H/(2 - \gamma)$ . Este potencial de tiro en la chimenea tiene que estar balanceado con las pérdidas debido a la fricción dentro de la chimenea, la separación de la capa límite y el trabajo extraído por la turbina. Este balance constituye una solución en estado estacionario de la ecuación de conservación del momento para el flujo en la dirección del eje de la turbina. Puede ser escrita como

$$\Delta\phi(1 - \varepsilon_t) = \left[ e^{\frac{h}{H}} + \varepsilon + \frac{fh}{d} \right] \frac{1}{2} \rho_0 u_0^2 \quad (3-17)$$

dentro de los corchetes están las pérdidas, primero las pérdidas a la salida de la chimenea, pérdidas de punto y las pérdidas por la fricción en la pared. Típicamente el valor de  $f \sim 0.01$  es para número de Reynolds altos dentro de las tuberías que no son muy rugosas. Las pérdidas de punto  $\varepsilon$  están contenidas las paletas que hacen girar el flujo, la rotación del flujo turbulento, la separación del condensado y la compresión del flujo en el difusor en la sección del separador (esta sección es utilizada para extraer la humedad del aire). El resto de la ecuación contiene la densidad y la velocidad de la chimenea respectivamente  $\rho_0, u_0$

Como siguiente paso, si se despeja la velocidad de la ecuación anterior se obtiene la ecuación

$$u_0(h) = \left[ \frac{2(1 - \varepsilon_t)(\Delta T/T_0)gH'(1 - e^{-h/H'})}{e^{h/H} + \varepsilon + \frac{fh}{d}} \right]^{1/2} \quad (3-18)$$

esta ecuación nos permite conocer la velocidad desarrollada dentro de la chimenea. El valor de  $\varepsilon_t$  es la carga por la turbina. Los valores de las pérdidas tendrán que ser necesariamente experimentales. Para el caso de la planta piloto de Manzanares, España los valores son  $d = 10.16$  m,  $\Delta T/T_0 \sim 15/298$ ,  $h = 194.6$  m,  $f = 0.01$ ,  $\varepsilon = 0.1$ ,  $\varepsilon_t = 0.67$ , es posible también realizar los cálculos sin pérdidas por fricción dentro de la chimenea, sin pérdidas por turbulencia y sin turbina.  $f = 0$ ,  $\varepsilon = 0$ ,  $\varepsilon_t = 0$  que sería en un caso ideal.

La potencia eléctrica generada  $N_e$  está dada por la correlación experimental

$$N_e = \dot{M} \eta_t \varepsilon_t \Delta \phi \quad (3-19)$$

$\eta_t$  es la eficiencia de la turbina y el flujo está dado por

$$\dot{M} = \rho_0 u_0 \pi d^2 / 4 \quad (3-20)$$

en el caso de la planta en Manzanares los valores  $\eta_t = 0.83$  y  $\varepsilon_t = 0.67$  Teniendo todos estos valores es posible realizar las gráficas correspondientes para el cálculo de la producción de energía eléctrica con una chimenea solar.

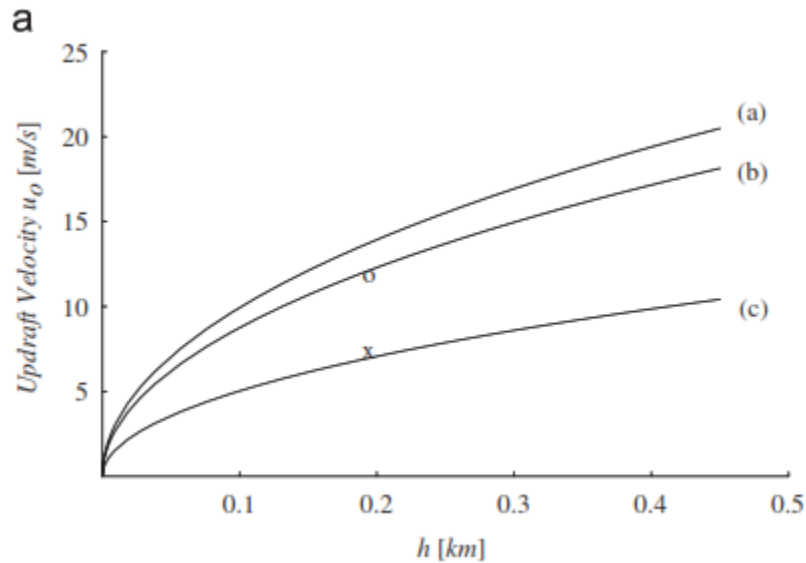
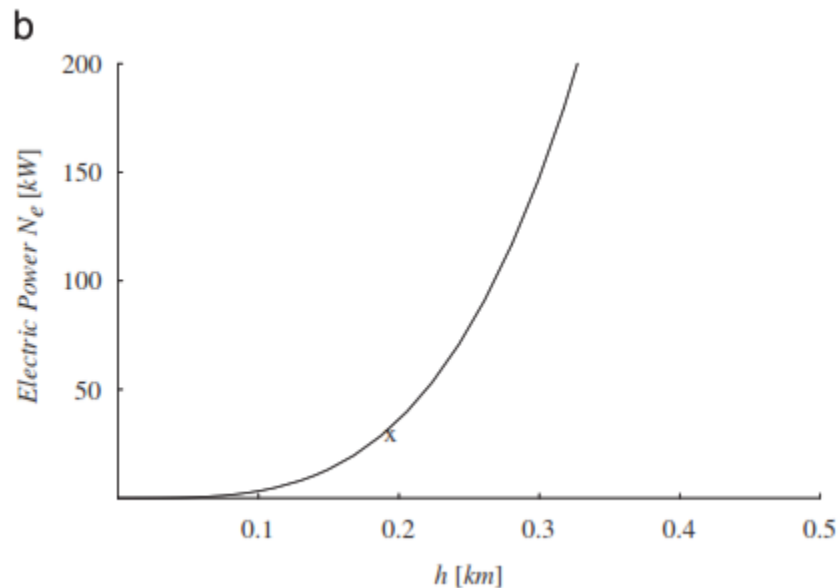


Figura 31. Gráfica que representa la altura de la chimenea en km contra la velocidad en m/s. (a) sin pérdidas por fricción (b) con pérdidas sin turbina (c) con pérdidas con turbina [33].



**Figura 32. Gráfica que representa la producción de energía eléctrica en kW según la altura de la chimenea en km [33]**

Dentro de la chimenea solar es posible utilizar un ciclón dentro de la chimenea, que hará que el remolino generado mande la humedad que hay en el ambiente a las paredes de la chimenea y ahí se pueda extraer el agua del aire. Este ciclón se genera gracias a unas paletas desviadoras que se colocan justo en la base de la chimenea antes de que comience a ascender el aire. Estas paletas harán girar el aire y entrará rotando, lo que por fuerza centrífuga empujará el aire con humedad hacia la pared de la chimenea.

En este caso la chimenea tendrá una pequeña abertura en su periferia de tal manera que el aire con humedad entrará ahí y posteriormente se coleccionará. Por la parte de afuera de esta cámara de recolección tendrá una tubería de drenado para llevar el agua a un depósito. El aire seco continuará ascendiendo por la chimenea hasta salir por la parte superior. En la Figura 33 se puede observar un corte transversal de este diseño para la extracción del agua.

La chimenea solar genera aire muy frío, esto se puede ver en la ecuación de conservación de la energía. Conforme la velocidad aumenta dentro del colector está acompañado este aumento con una disminución de la temperatura, también disminuye la presión y la densidad. Cuando la velocidad es lo suficientemente baja respecto al punto de rocío, la condensación ocurre. En el momento en que la velocidad alcanza su valor máximo, la temperatura la presión y la densidad alcanzan su mínimo.

Al llegar a la temperatura de rocío la mezcla vapor de agua con el aire, la mezcla llega al punto de saturación. Si la temperatura continúa disminuyendo se da un subenfriamiento y comienza la condensación del agua. En este punto se generan pequeñas gotas de agua o neblina gracias a la nucleación. La nucleación podrá ser homogénea cuando no hay impurezas en el aire o bien heterogénea cuando existe polvo en la mezcla. Lo común es que haya partículas de contaminantes en el ambiente que ayudan a este proceso. En este caso la condensación es inmediata una vez que se llega a la temperatura ligeramente por debajo de la temperatura de rocío [33].

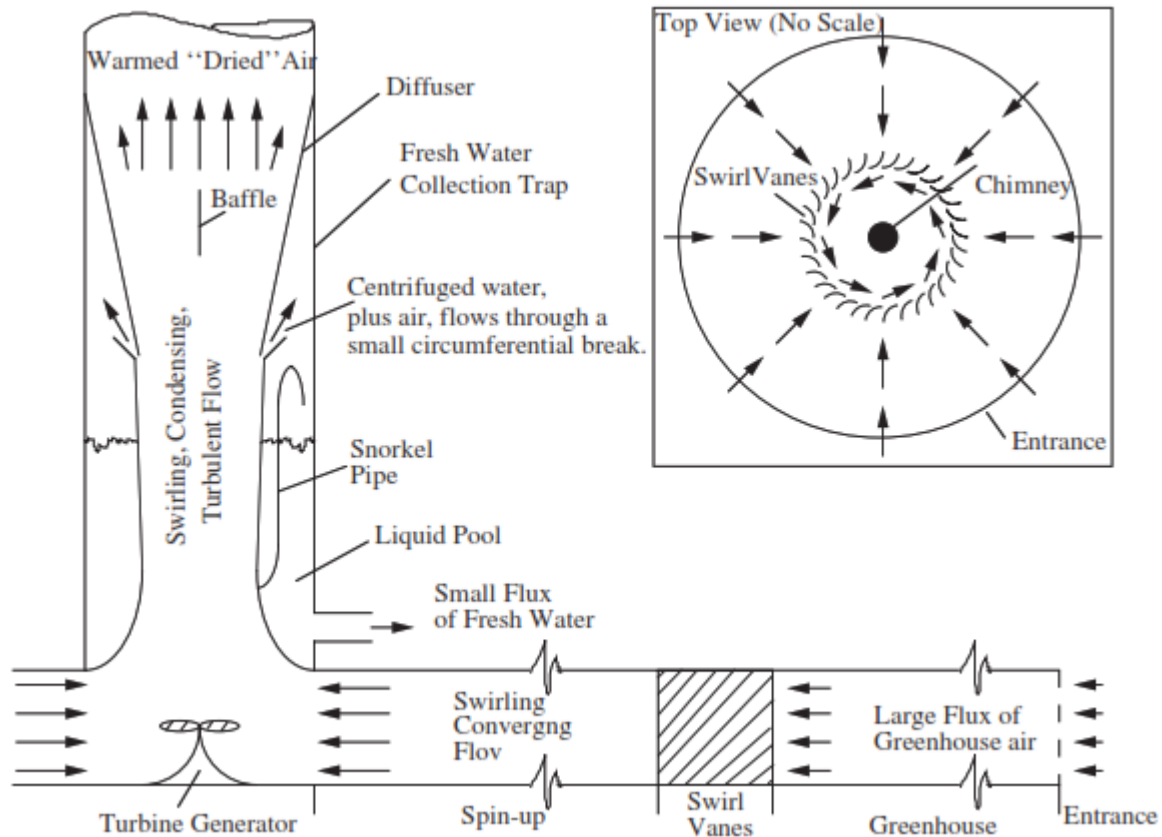


Figura 33. Esquema de un corte transversal de la chimenea solar, con obtención de agua a partir de la humedad del aire [33]

En la Figura 34 se puede ver la producción anual de agua de acuerdo con el contenido en gramos de agua por kilogramo de aire  $q_A$  y la altura de la chimenea. De acuerdo al autor Ming, T. 32 Con una chimenea de altura de 200 m y con un contenido de agua en el aire de 18 gr/kg se podrían generar cerca de  $1.8 \times 10^9$  litros de agua al año. Si se ofreciera diario 100 litros de agua al día por persona, se podría producir suficiente **agua para 49,315 personas** para todo el año. Este valor de producción es en un lugar muy húmedo donde el aire contenga grandes cantidades de agua.

La producción de agua se calcula con la siguiente ecuación

$$P_{agua} = \dot{M} \eta_s (q_A - q_s) \quad (3-21)$$

Donde  $\dot{M}$  es el flujo másico de aire,  $\eta_s$  la eficiencia de recolección que podrá ser cercana a un valor de  $\eta_s = 0.80$ ,  $q_A$  son los gramos de agua por kilogramo de aire y  $q_s$  los gramos por kilogramo de aire en saturación. Los cálculos para la estimación de producción de agua con la chimenea solar se explicarán más a detalle al final del capítulo 4.

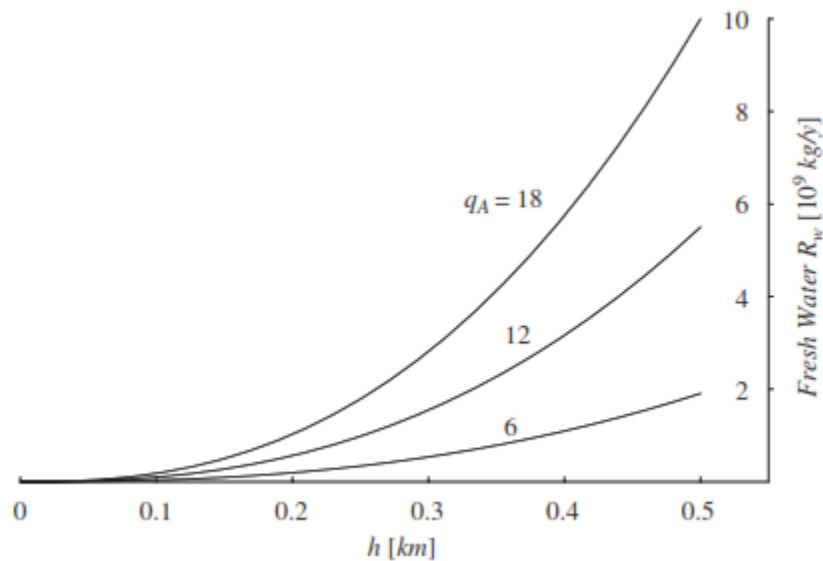


Figura 34. Gráfica que representa la producción de agua anual en  $10^9$  kg/año según la altura de la chimenea en km [33]

Como se describió antes, la planta de Manzanares no contaba con una placa para almacenar la radiación solar. La diferencia de temperaturas entre el exterior del colector y dentro del invernadero es apenas 15 grados. Al colocar un colector, es posible aumentar esta diferencia hasta 60 grados. Estos cálculos se presentarán al final de esta tesis.

### 3.3 Intercambiadores de calor de aire y colectores solares planos

Uno de los elementos de la chimenea solar es la placa de almacenamiento de energía. Esta placa en realidad es un intercambiador de calor solar. Los intercambiadores de calor son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes evitando al mismo tiempo que se mezclen entre sí. En la práctica, los intercambiadores de calor son de uso común en una amplia variedad de aplicaciones, desde los sistemas domésticos de calefacción y acondicionamiento del aire hasta los procesos químicos y la producción de energía en las plantas grandes [34]. En caso de la chimenea solar, como ya se ha mencionado, la parte del colector solar será un intercambiador de calor, donde una placa absorberá la radiación proveniente de sol y esta a su vez calentará el aire que esté en contacto con ella, aumentando la diferencia de temperaturas entre el interior del colector y el aire exterior, produciendo más energía y más agua.

En el caso de los intercambiadores de calor de aire tienen diferentes aplicaciones, por ejemplo, la calefacción de una casa, deshidratación de alimentos, generar corrientes de aire con diferentes usos, entre otras. Al existir grandes cantidades de energía solar disponible, es atinado aprovechar la radiación proveniente del sol para sacar provecho de ello. Algunas opciones de los calentadores solares son los colectores planos, los cuales consisten en un absorbedor que en este caso es una placa de color negro. Esta placa es calentada por el sol a temperaturas cercanas o superiores a los  $100^{\circ}\text{C}$ . Por la parte de inferior se encuentra un aislante térmico que evita que el calor salga por la parte de abajo. Cuentan con una cubierta transparente que puede ser sencilla o doble para aumentar su aislamiento térmico y finalmente tienen una entrada y una salida. El colector debe orientarse a un

cierto ángulo que permita aprovechar al máximo la radiación solar. En la Figura 35 se encuentra este tipo de colectores planos.

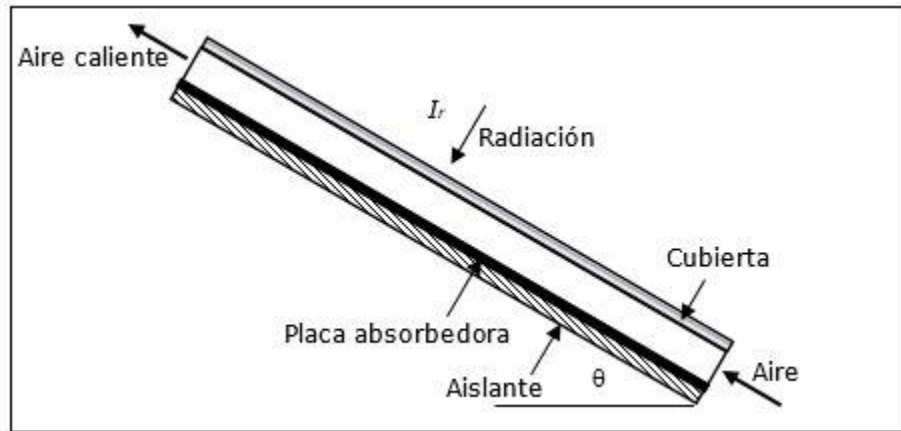


Figura 35. Colector solar plano para calentar aire [35].

### 3.4 Colectores solares corrugados

Los colectores corrugados utilizan, en lugar de una placa totalmente plana, un absorbedor en este caso en zigzag. Esto permite aumentar el área y el volumen de absorción aumentando la energía acumulada del sistema. En la Figura 36 se puede observar que este diseño cuenta con una doble cubierta, que permite un mayor aislamiento térmico en la parte superior y de igual forma tiene una entrada y una salida.

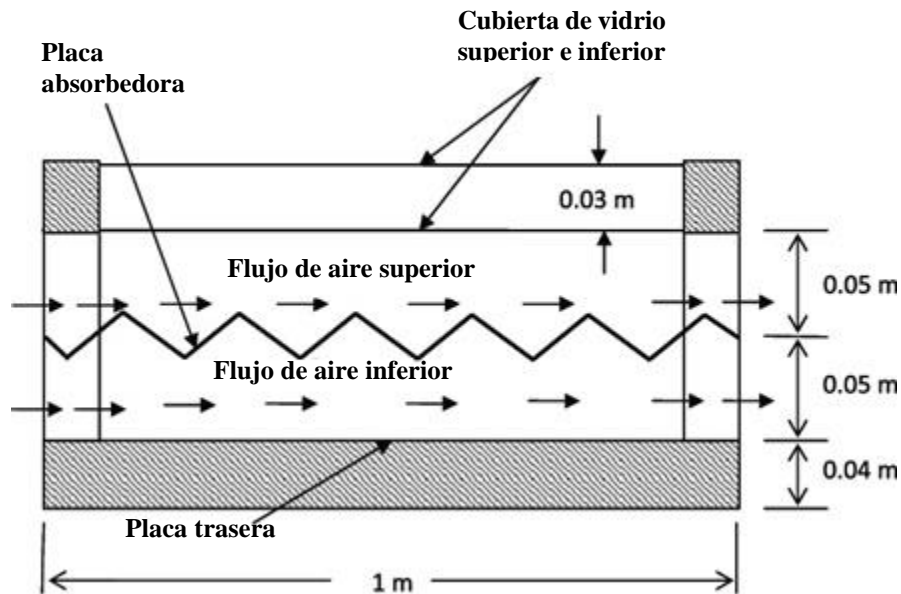


Figura 36. Diagrama de colector solar con placa en forma de zigzag [36]

### 3.5 Emisividad, absorptividad, reflectividad y transmisividad

La capacidad de absorber la radiación solar del colector estará dada por las propiedades de la superficie de la placa de almacenamiento de energía. Cuando la radiación choque con la superficie del colector solar, una parte de la energía será absorbida por la placa, otra parte será reflejada y si el colector fuera transparente otra parte más sería transmitida. La fracción absorbida por la superficie se llama absorptividad  $\alpha$ , la parte reflejada será la reflectividad  $\rho$  y la fracción transmitida sería la transmisividad  $\tau$ . Los valores de cada una de estas propiedades van de 0 a 1, que indican en qué cantidad de la radiación incidente absorbe, refleja o transmite respectivamente [34]

Absortividad	$\alpha = \frac{\text{Radiación absorbida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{abs}}{G}$	$0 \leq \alpha \leq 1$
Reflectividad	$\rho = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{ref}}{G}$	$0 \leq \rho \leq 1$
Transmisividad	$\tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{tr}}{G}$	$0 \leq \tau \leq 1$

De la primera ley de la termodinámica se requiere que la suma de la energía absorbida, reflejada y transmitida sea igual a la radiación incidente por lo que se tiene que

$$G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} = G$$

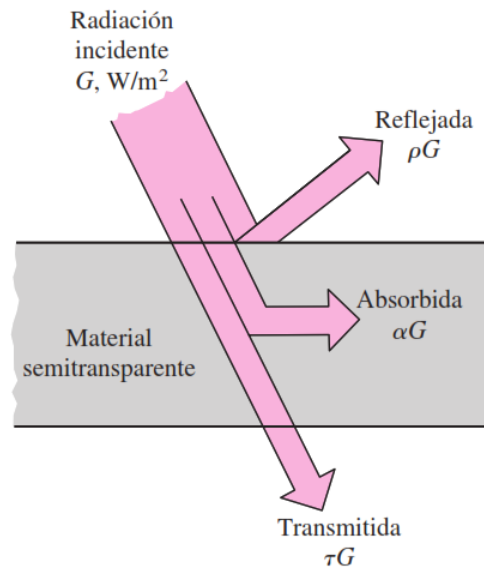
Dividiendo todo entre G se tendrá

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Y para superficies opacas la transmisividad es cero  $\tau = 0$ , por lo que se tiene que

$$\alpha + \rho = 1$$

En la Figura 37 se puede ver cada una y como interactúan en el material.



**Figura 37. Diagrama de la radiación reflejada, absorbida y transmitida en una superficie [34]**

El colector solar entre mayor sea la cantidad de energía absorbida, mayor será la temperatura del aire con el que esté en contacto y aumentará la eficiencia de la chimenea solar. El colector conforme vaya absorbiendo energía de la radiación solar irá aumentando su temperatura. Esto a su vez provocará que comience a emitir radiación generando pérdidas de energía. Así la emisividad de un cuerpo estará dada por  $\varepsilon$  que de igual manera irá de un valor entre cero y uno  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  siendo el valor de 1 para un cuerpo negro. Disminuyendo el valor de la emisividad, disminuirán las pérdidas de energía por radiación emitida. Esto es posible a través de pinturas y recubrimientos especiales que aumentan la absorptividad del material, disminuyen la radiación reflejada y disminuyen también la emisividad.

En la Figura 38 se puede observar el balance de un colector solar. La energía absorbida por la placa de almacenamiento en la chimenea solar se busca que posteriormente se transfiera al aire por convección. Esto se puede lograr de diferentes maneras y una opción, como ya se mencionó anteriormente, es a través de aumentar el área de transferencia.



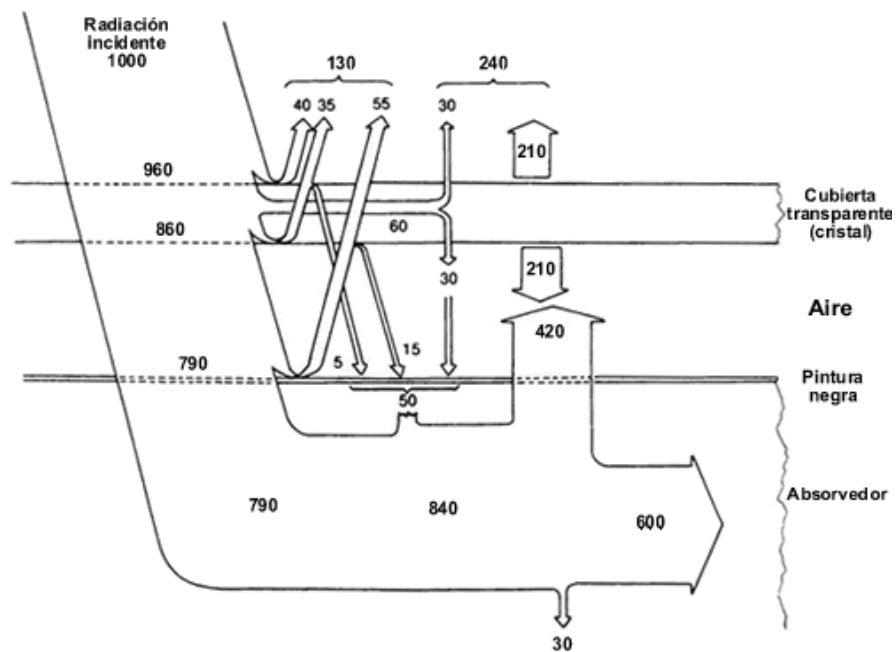


Figura 38. Balance energético sobre calentador solar, valores en Watts [37]

### 3.6 Pintura selectiva para aplicaciones solares

Una opción que permite mejorar la absorción de radiación solar es la aplicación de pinturas selectivas. Estas pinturas existen, pero de acuerdo con el Instituto de Energías Renovables de la UNAM no se fabrican en México. La recomendación para conseguirla fue hacer la compra a un proveedor en Estados Unidos. La pintura Solkote del fabricante Solec es fabricada para absorber la mayor cantidad de energía proveniente del sol. Ésta es tolerante a la alta temperatura, resistente a la humedad y a la degradación por luz UV. Es una solución más económica a la electrodeposición en vacío para superficies selectivas. Algunas otras propiedades que tiene son las siguientes:

- Bajo costo (50-75% más económico que otras superficies selectivas)
- Aplicación sencilla en spray (requiere una inversión baja)
- Tolerancia a altas temperaturas de hasta 538°C
- Excelente tolerancia a degradación por luz UV y humedad.
- Excelente durabilidad a largo plazo (no pierde absorptividad en el tiempo)
- No gasea si se cura correctamente
- Excelentes características ópticas
- Posibilidad de usarse en aplicaciones de alta y baja temperatura con cubierta incluyendo energía solar de concentración.
- Enviado ya premezclado, listo para usarse
- Excelente periodo de vida en almacén (un año desde la fecha de fabricación)
- Excelente recubrimiento para aplicaciones pasivas como muros Trombe
- Recubrimiento superior para colectores de aire caliente
- No recomendado para aplicaciones exteriores o sin cubierta de cristal.

### 3.6.1 Características ópticas de radiación de la pintura selectiva

De acuerdo con información del proveedor la eficiencia de SOLKOTE [38] depende tanto del sustrato como del grosor de la pintura. Sustratos de baja emisividad como el aluminio o el cobre dan las mejores propiedades ópticas. La emisividad puede variar entre 0.20 a 0.49 dependiendo del grosor de la película en seco, del sustrato y de la preparación de la superficie. La absorptividad estará en un valor entre 0.88 y 0.94. El grosor de la película húmeda de 0.020 a 0.025 mm y una buena limpieza del sustrato darán los mejores resultados. La adhesión a altas temperaturas dependerá de una buena preparación del sustrato y del curado.

Los sustratos donde se pueden aplicar son aluminio, cobre, acero, piedra, adobe, algunos plásticos, ladrillo y mampostería. No se recomienda utilizar primers porque estos aumentarán la emisividad, pero no afectarán la absorptividad del recubrimiento. La absorptividad es muy alta en cerámica o cementos, pero su selectividad es moderada.

Aquí se presentan algunas gráficas de la reflectividad sobre aluminio del recubrimiento.

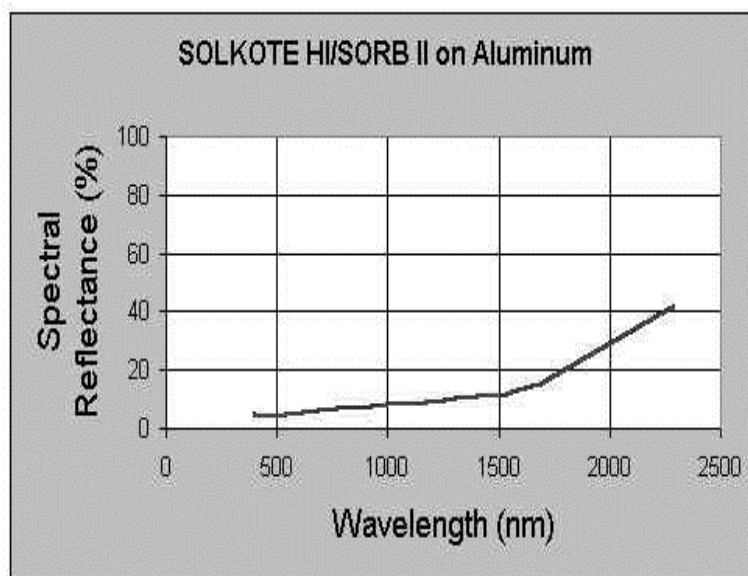


Figura 39. Reflectividad del recubrimiento en aluminio. Aumenta a mayores longitudes de onda [38]

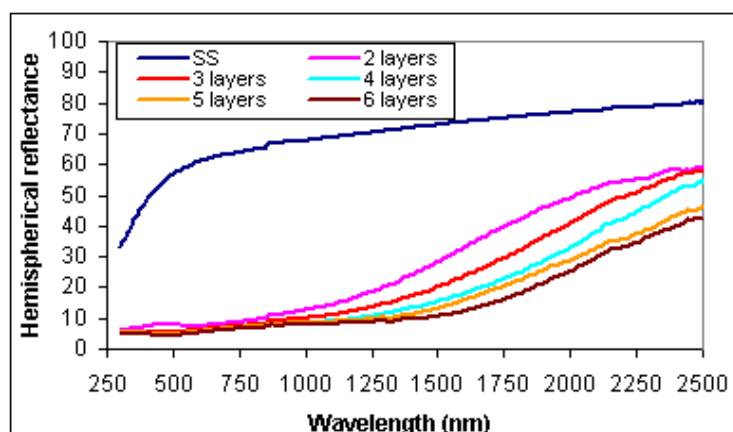


Figura 40. Reflectividad hemisférica para diferentes capas de pintura por longitud de onda [38]

Aquí en esta tabla se muestran los resultados de la emisividad y la absorptividad del recubrimiento a 400°C sobre acero inoxidable AISI 304 y su variación con el número de capas utilizadas.

	2 layers	3 layers	4 layers	5 layers	6 layers
Thickness (nm)	--	800	900	--	--
e	0.23274044	0.23986406	0.24446309	0.25277300	0.27234121
a	0.87036960	0.89712310	0.91374536	0.91630217	0.92443275

Figura 41. Emisividad y absorptividad del recubrimiento según el número de capas [38]

### 3.6.2 Preparación de la superficie

La preparación de la superficie es extremadamente importante se espera que los colectores funcionen sin mantenimiento por 20 años. La emisividad inicial del sustrato, así como la adhesión del recubrimiento pueden mejorarse significativamente a través de la cuidadosa atención de la preparación de la superficie. SOLKOTE presenta excelente adhesión en muchos sustratos con poco o sin preparación de la superficie. Sin embargo, se recomiendan los siguientes procedimientos sugeridos para asegurar unas excelentes propiedades ópticas y una durabilidad a largo plazo del producto.

### 3.6.3 Para sustratos metálicos.

Remover la grasa de los sustratos metálicos usando tolueno, xileno, acetona o algún otro solvente conveniente. Esto es considerado una preparación mínima de la superficie. El cobre, el aluminio y el acero inoxidable deberán ser ligeramente marcados con ácido para remover óxidos y disminuir así la emisividad. El aluminio tiene que volverse a recubrir para evitar futuras corrosiones. Las

superficies del acero dulce y galvanizado no deberán ser limpiadas con ácido, pero tal vez requieran de un primer. El uso de primer aumenta la emisividad, pero puede aumentar también la absorptividad.

#### **3.6.4 Sustratos pasivos.**

Los sustratos de mampostería deberán ser curados con aire por al menos un mes antes de la aplicación del SOLKOTE. La superficie deberá estar libre de toda pintura, de lechada suelta y polvo. La pintura SOLKOTE tiene una afinidad natural a la mayoría de la mampostería y superficies cerámicas, pero es extremadamente pequeña. Pueden ser utilizados primers apropiados o rellenos, para aumentar su cobertura. El SOLKOTE podrá tener una gran absorptividad y un largo periodo de vida en superficies de cemento, pero tendrá una selectividad limitada.

#### **3.6.5 Métodos de aplicación.**

El SOLKOTE fue formulado específicamente para ser aplicado con aire en espray atomizado. Pistolas sencillas usadas para la reparación de carrocerías de automóviles han sido probadas como una adecuada aplicación. También puede ser aplicado con equipo electrostático y HVLP, pero estos aparatos resultan más costosos. La presión de la pistola se debe mantener muy baja (25-35 PSI) para disminuir el sobre pintar y permitir un buen control del grosor. La pintura se deberá estar mezclando continuamente durante su aplicación. En el caso del contenedor de presión deberá estarse agitando continuamente. Una película de grosor de 0.020 a 0.025 mm es ideal, la cual será posible medir con un sensor durante su aplicación. No se recomienda la aplicación de equipos sin aire para el pintado, aunque se pueden utilizar. La temperatura del sustrato no deberá exceder los 32°C durante su pintado y la superficie deberá estar seca antes de su aplicación. Una buena ventilación y protección del operador es obligatoria.

#### **3.6.6 Secado y curado.**

El curado es altamente dependiente del tipo de sustrato, humedad y temperatura ambiente. La piel se forma entre 2 a 5 minutos. El absorbedor ya recubierto estará listo entre 1 y 3 horas después del secado a temperatura ambiente. El SOLKOTE se curará naturalmente a un punto donde ya no emitirá gases, esto será dentro de 3 días a temperatura ambiente de 16°C o superior. El curado será acelerado cociendo el recubrimiento a una temperatura de 107°C a 232°C por un periodo de 15 minutos a una hora. El cobre no deberá ser curado a una temperatura mayor a 204°C, ya que este se oxidará y disminuirá la adhesión del recubrimiento. Otros metales como aluminio y acero inoxidable deberán ser curados a temperaturas de hasta de 232°C. Las láminas absorbedoras ya recubiertas se podrán poner en el sol brillante para acelerar el curado. La dureza aumentará con el tiempo y la temperatura. La experimentación determinará el mejor proceso de curado para las condiciones ambientales de la aplicación.

Con el fin de realizar pruebas para el sistema se buscó conseguir pintura SOLKOTE. se encontró un cliente de ellos aquí en México en la ciudad de Guadalajara. Esta empresa se ofreció amablemente a vender un litro de la pintura. El costo que se pagó por este litro fue de \$1500.00 pesos. El costo de un galón traído directamente de Estados Unidos es de casi \$400.00 dólares, incluidos impuestos y envío.

### 3.6.7 Pintura selectiva TINOX

Se encontró también la posibilidad de utilizar aluminio o cobre ya recubierto con otro tipo de material selectivo. Este material está basado en trióxido de dicromo el cual tiene propiedades ópticas mejores. Este cuenta con 95% de eficiencia en la absorción del material y sólo un 5% en la emisividad [39]. En México tampoco hay productores de este tipo de material. Es necesario realizar un pedido grande a productores chinos para que se pueda hacer el envío. En posteriores prototipos se podría considerar, sin embargo, después de un análisis de costos, la mejor opción sigue siendo la pintura SOLKOTE.

Es posible también adquirir tiras de aluminio o cobre ya recubiertas con la pintura selectiva, esto a través de empresas alemanas y chinas que producen las tiras. Este recubrimiento tiene una eficiencia del 95% con una vida útil de 30 años. Para poder comprar una tira con algún fabricante se requiere una compra mínima de \$20,000 pesos, por lo que en este punto de la investigación no se ha podido realizar las pruebas sobre el colector solar.

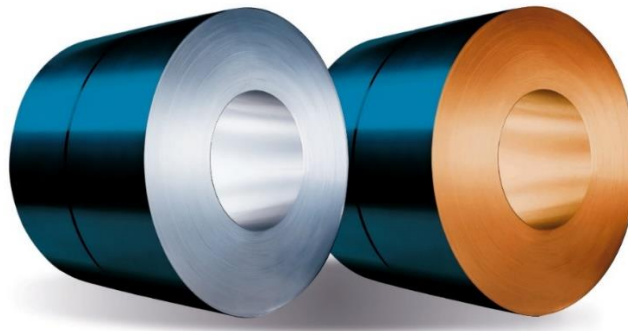
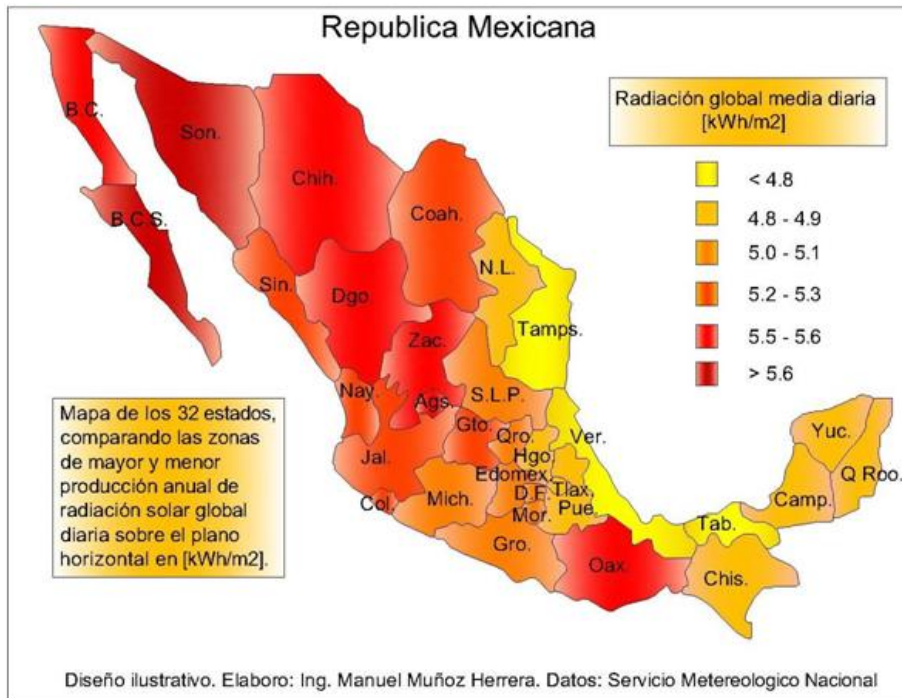


Figura 42. Rollos de aluminio y cobre recubiertos con TINOX [39]

### 3.7 Radiación solar en México

La República Mexicana cuenta con una de las mejores locaciones en el mundo donde se recibe en casi toda su extensión una gran cantidad de radiación solar. La latitud en la que se encuentra es casi la misma que el desierto del Sahara en África.

Como se puede observar en la Figura 43, los estados de Sonora y Baja California Sur cuentan con una radiación diaria promedio mayor a  $5.6 \text{ kWh/m}^2$ , mientras que el resto del país está entre  $4.8$  y  $5.6 \text{ kWh/m}^2$ . Únicamente los estados de Tamaulipas, Veracruz y Tabasco son los estados que tienen una radiación diaria promedio menor a  $4.8 \text{ kWh/m}^2$ . Gracias a esta radiación es posible decir que en cualquier parte de nuestro territorio se podrían instalar los generadores, tanto para producción de agua como de electricidad.



**Figura 43. Promedio de radiación solar en México [40]**

### 3.8 Potencial eólico en México

El sistema propuesto para la generación de energía eléctrica es un sistema híbrido termosolar-eólico. Por ello es importante conocer también en qué regiones se cuenta con este recurso del viento.

Se espera que para el año 2020 se cuente en México con 7000 MW instalados, que representa el 8% de la generación total del país, donde los aerogeneradores se encuentran mayormente concentrados en cuatro estados, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas y Coahuila [41].

En la Figura 43 se puede observar que los estados de Oaxaca, Baja California, Tamaulipas, Coahuila y Chihuahua cuentan con una buena potencia eólica. Este mapa sumado al de radiación solar permite escoger estas localidades donde el sistema híbrido presentado en esta tesis pueda funcionar mejor y así tener un retorno de inversión mucho más rápido. Aunque no se aprecia bien en el mapa, las costas también son regiones donde se puede explotar este recurso. Para sistemas de costa afuera o algunos de baja potencia se podrían colocar en estos lugares, pero considerando el riesgo debido a huracanes y fuertes vientos.

En la siguiente figura se puede observar el potencial eólico en México según la región. En el istmo de Tehuantepec en los estados de Oaxaca y Chiapas es donde más altas son las velocidades del aire. También es posible ver que toda la costa del Golfo de México tiene un gran potencial, así como en el norte del país en el estado de Tamaulipas. Hay regiones en Baja California donde se puede aprovechar también la energía del viento.

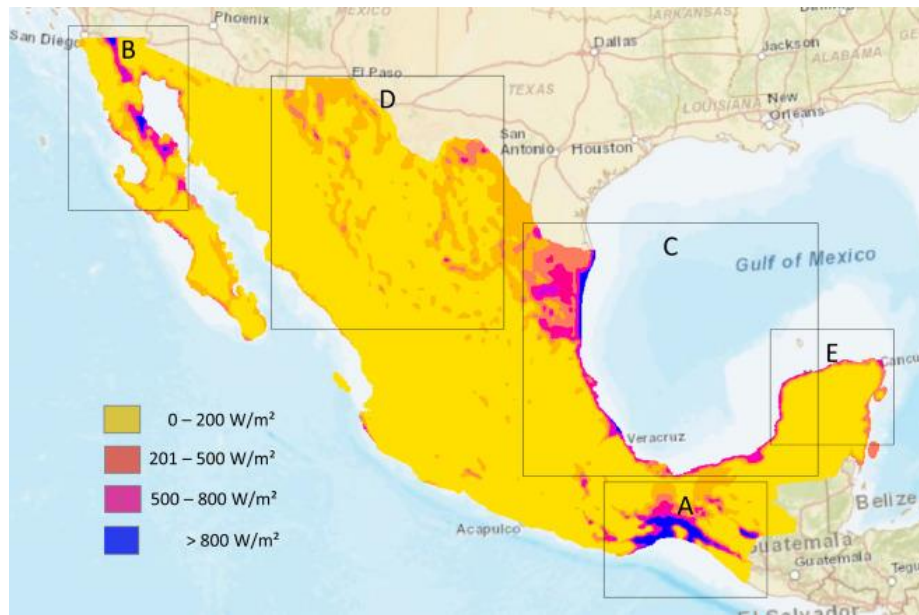


Figura 44. Potencial eólico en México [42]

Como se puede observar en la Figura 45 existen turbinas eólicas instaladas en 15 estados de la República y su capacidad instalada con su producción en Megawatts. Los demás estados también serían viables para la instalación del generador híbrido aquí mostrado más adelante en esta tesis. Tanto los estados mencionados anteriormente como los que se encuentran en la Figura 45 pueden representar opciones donde el retorno de inversión de un sistema híbrido pueda ser mucho más rápido.



Figura 45. Capacidad Instalada por estado MW [43]

### 3.9 Ecuación de potencia de las turbinas eólicas

De acuerdo con la literatura existente, el cálculo de la potencia de las turbinas eólicas está dado por las ecuaciones de conservación de la energía, conservación de masa y energía cinética, que lleva a la potencia del flujo de aire [44].

La energía cinética del aire está dada por

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3-22)$$

El flujo másico está dado por

$$\dot{m} = \rho vA \quad (3-23)$$

Si se sustituye el flujo másico en la energía cinética, dará la energía por unidad de tiempo que dicho en otras palabras será la potencia debida al flujo de aire

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad (3-24)$$

Del flujo de aire que hay, una parte moverá a la turbina y el resto de la corriente de aire pasará y no será aprovechada. Por esta razón si se resta la potencia de entrada y de salida de la corriente de aire queda de la siguiente manera.

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2}\rho(A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (3-25)$$

Y por conservación de masa se tiene que

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (3-26)$$

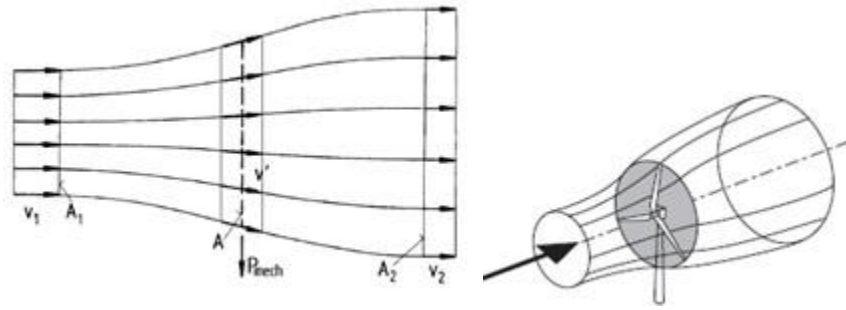
Sustituyendo estas ecuaciones se obtiene que

$$P = \frac{1}{2}\rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (3-27)$$

Sustituyendo el flujo másico se obtiene

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \quad (3-28)$$





**Figura 46. Flujo de aire a través de una turbina eólica. Al inicio se tienen un área y una velocidad  $A_1 V_1$ , después esa energía es aprovechada y se tiene una  $A_2 V_2$  [44]**

La energía aprovechada por la turbina se puede calcular, por la conservación de momento, lo cual se puede expresar como

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (3-29)$$

La potencia de la turbina está dada por el momento por la velocidad ejercida sobre la turbina, por lo que se describe como

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (3-30)$$

Esta potencia deberá ser igual a la ecuación de la resta de las potencias de la corriente de aire, que es la energía tomada por la turbina, por lo que queda como

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) &= \dot{m}(v_1 - v_2)v' \\ \frac{1}{2} \dot{m}(v_1 - v_2)(v_1 + v_2) &= \dot{m}(v_1 - v_2)v' \end{aligned} \quad (3-31)$$

Simplificando con diferencia de cuadrados se obtiene que

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (3-32)$$

La velocidad sobre la turbina será el promedio de la velocidad antes de la turbina y la velocidad después. Ahora bien, utilizando nuevamente la ecuación de conservación de masa se tendrá lo siguiente

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v' S \quad (3-33)$$

El flujo de aire se tendrá que conservar también en la turbina. Sustituyendo el promedio de las velocidades y la ecuación de potencia que se obtuvo anteriormente

$$\begin{aligned}
P &= \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \\
P &= \frac{1}{2} \rho v' S(v_1^2 - v_2^2) \\
P &= \frac{1}{2} \rho \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) S(v_1^2 - v_2^2) \\
P &= \frac{1}{4} \rho S(v_1^3 - v_1 v_2^2 + v_2 v_1^2 - v_2^3) \\
P &= \frac{1}{4} \rho S v_1^3 \left( 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 + \frac{v_2}{v_1} - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right) \tag{3-34}
\end{aligned}$$

Haciendo un cambio de variable  $V_2/V_1 = a$  derivando la potencia respecto al valor a, esto queda de la siguiente manera

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{da} &= \frac{1}{4} \rho S v_1^3 (1 - (a)^2 + a - (a)^3) \\
\frac{dP}{da} &= \frac{1}{4} \rho S v_1^3 (-2a + 1 - 3(a)^2) \tag{3-35}
\end{aligned}$$

Ahora, igualando a cero para obtener el máximo

$$(3a^2 + 2a - 1) = 0 \tag{3-36}$$

Obteniendo las raíces se obtiene que

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{1}{3} \\
a_2 &= -1
\end{aligned}$$

Por lo que la velocidad máxima se encuentra en el valor positivo. Sustituyendo en la ecuación de potencia

$$\begin{aligned}
\frac{v_2}{v_1} &= \frac{1}{3} \\
P &= \frac{1}{2} \rho \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) S(v_1^2 - v_2^2) \\
P &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \right) \rho S \left( v_1 + \frac{v_1}{3} \right) \left( v_1^2 - \left( \frac{v_1}{3} \right)^2 \right)
\end{aligned}$$

$$P = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \right) \rho S \left( \frac{4v_1}{3} \right) \left( \frac{8}{9} v_1^2 \right)$$

$$P = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \right) \rho S v_1^3 \quad (3-37)$$

Esta será la energía máxima que podrá extraerse de la turbina. Para obtener la eficiencia se puede dividir el máximo de la energía de la turbina entre el máximo de energía a la entrada de la turbina, por lo que queda

$$P_{max} = \frac{P_{turbina}}{P_{aire}} = \frac{\frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \right) \rho S v_1^3}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} = \frac{16}{27} = 0.593 = CP \quad (3-38)$$

Este valor de 0.593 será el coeficiente de potencia de la turbina, a este límite se le conoce como Límite de Betz.

Si se analiza la ecuación de potencia considerando la velocidad de entrada y de salida del aire, se puede observar que, si se disminuye la velocidad a la salida, el límite de Betz se puede romper, generando así mayor energía en la turbina, para este caso es hacer  $V_2$  más pequeña, que sea casi cero, por lo que la potencia disponible aumentará. Esto es gracias a que se generan turbulencias detrás de la turbina, la cual genera presiones de vacío.

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2) \quad (3-39)$$

Aunque parecería que es energía gratis, en realidad ésta se obtiene al generar los vórtices del flujo de aire que no está interactuando con la turbina. Por eso, algunos diseños se construyen geometrías por la parte exterior para aprovechar más flujo de aire y generar mayor potencia.

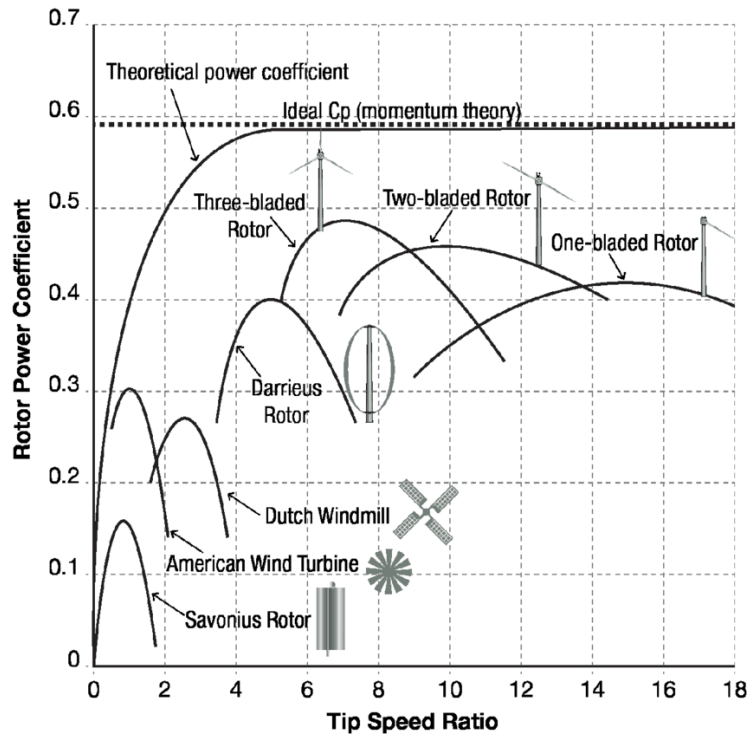
La selección de las turbinas eólicas se da principalmente según la velocidad del viento que haya disponible. El límite teórico para una turbina eólica es del 60%. Esta eficiencia varía según la velocidad del aire y como se puede mirar en la Figura 47, la eficiencia está representada por una parábola invertida. Las turbinas tienen su máximo de producción eléctrica en el punto más alto de esta campana.

### 3.10 Selección de turbinas eólicas

La relación de velocidad está dada por la velocidad angular de la turbina  $\omega$  el radio R de la turbina y la velocidad del aire  $V_1$ . Por lo que la ecuación queda como

$$X = \frac{\omega R}{V_1} \quad (3-40)$$

Después de calcular este valor se puede ir a la gráfica siguiente para realizar la selección de la turbina.



**Figura 47. Selección de turbinas eólicas según la razón de velocidad versus la eficiencia de la turbina [45]**

Cada una de las turbinas tiene un valor de máxima eficiencia. Ese punto de mayor eficiencia se encuentra en el punto máximo de las parábolas invertidas. Por ejemplo, para una turbina Darrieus, la relación de la velocidad angular, el radio de la turbina y la velocidad del aire será de  $X = 5$  donde se encuentre su máxima eficiencia de 0.4 como se muestra en la gráfica anterior.

Otra manera de selección es por el tipo de eje que se tiene, existen de eje horizontal y de eje vertical. Las turbinas Savonius, Darrieus y la de Rotor-H de eje vertical, tienen la ventaja de no tener que ser orientadas hacia la dirección del viento, a diferencia de la de eje horizontal.

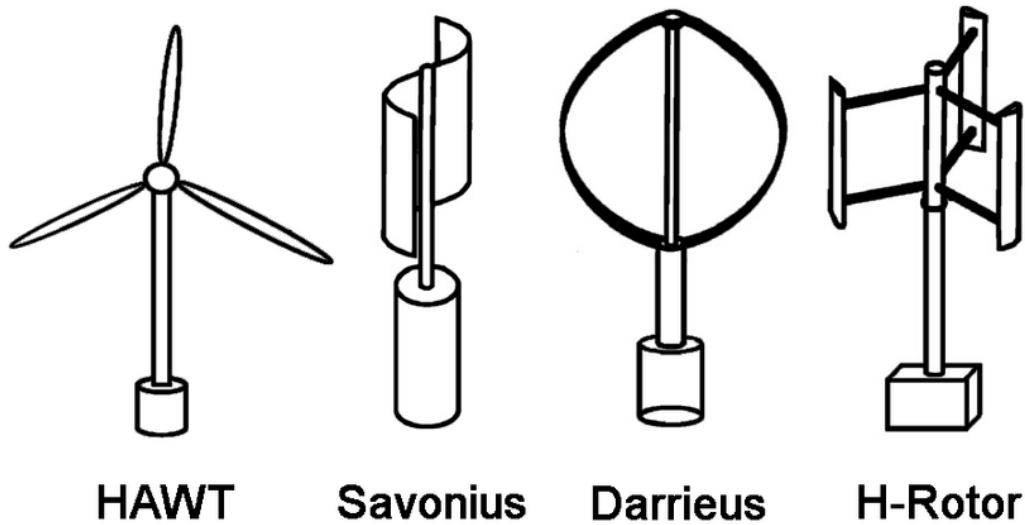
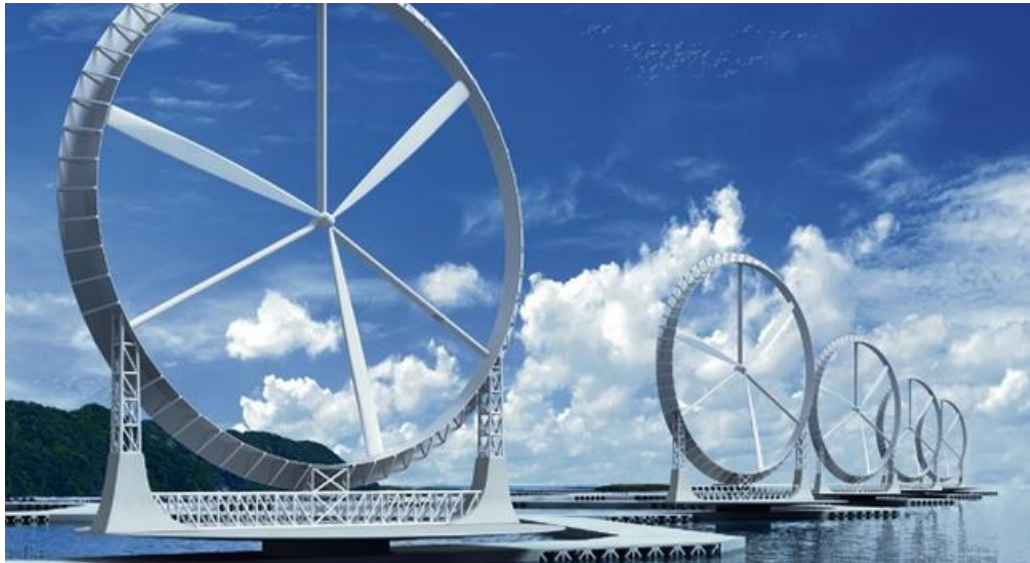


Figura 48. Tipos de turbinas eólicas según su eje.  
 1) HAWT. De eje horizontal 2) Savonius. Eje vertical.  
 3) Darrieus. Eje vertical. 4) H-Rotor. Eje Vertical. [46]

### 3.11 Turbinas entubadas

Existen otro tipo de turbinas que se encuentran entubadas o bien utilizan geometrías alrededor del rotor para la generación de turbulencias en la parte posterior de la misma. El objetivo de estas turbulencias es la generación de un vacío en la parte posterior para aumentar la eficiencia.

Gracias a que la turbina se encuentra entubada, los remolinos en la punta se evitan y aumenta la eficiencia por encima del límite teórico que se explicó en el punto anterior, ofreciendo hasta 5 veces más energía que las tradicionales. Este diseño inicialmente comenzó en Japón y eso ha llevado a diferentes tipos de diseños posteriormente [47]. Para el caso de las grandes turbinas es muy costoso y complicado hacer esto por su tamaño, pero es posible llegar a otras soluciones.



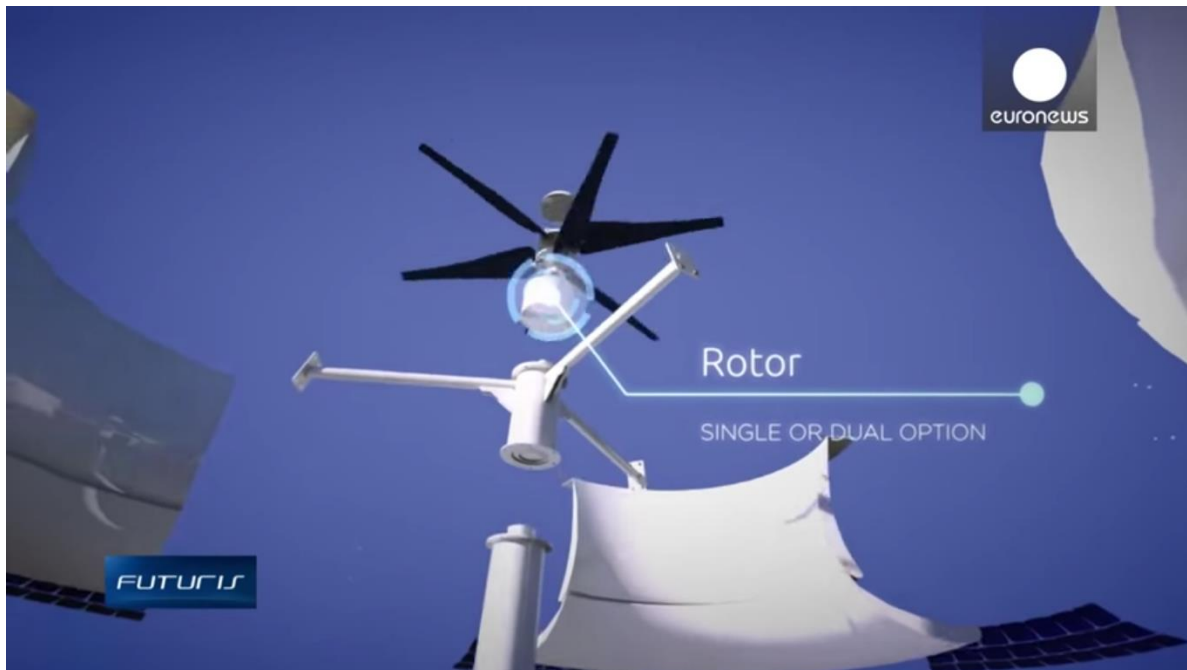
**Figura 49. Diseño Japonés para la generación de energía eléctrica de alta eficiencia [47]**

La empresa portuguesa Omniflow desarrolló una turbina eólica entubada que genera un vacío dentro del tubo y por un efecto de diferencia de presiones hace subir el aire hasta la turbina. Además, cuenta con baterías y paneles solares que permiten guardar la energía generada y dar iluminación por las noches. La empresa además ofrecía la opción de utilizar doble rotor para una mayor generación de energía [48]. Se basó en este diseño para adaptarlo al que se presenta en esta tesis. Con el diseño presentado aquí, es posible generar energía eléctrica con el calor producido por el colector solar y además al mismo tiempo por el viento.



**Figura 50. Generación de energía eólica y fotovoltaica para iluminación [49]**

La empresa Omniflow también ofrece la opción de tener doble rotor, esto permite aumentar la producción de energía eléctrica con la misma corriente de aire. Por ejemplo, en su modelo de 1 m de diámetro, con un solo rotor puede producir hasta 600 W en su máxima capacidad, pero con dos rotores puede aumentar hasta 1000 W. Esto con velocidades cercanas a 16 m/s. Este diseño aprovecha la instalación del soporte y permite reducción de costos a la vez.



**Figura 51. Diagrama de doble rotor para producción de energía eléctrica [48].**

En este capítulo se presenta la revisión de la tecnología relacionada con sistemas de generación de flujo de aire, absorción de calor y humedad. Factores básicos que deben tomarse en cuenta para el diseño del sistema de obtención de agua del aire que se desarrollará en el siguiente capítulo.

La selección de la turbina eólica podrá ser como la empresa Omniflow. Esta configuración permite captar la corriente de aire que provenga de la chimenea solar por la parte de abajo, además de poder aprovechar a su vez la corriente de aire que venga de manera horizontal corrientes naturales de aire. Esta opción podrá permitir que la inversión del sistema se pueda recuperar en un menor tiempo.

## **4. Diseño de generador pasivo de producción de agua del aire.**

---

En este capítulo se presenta la propuesta de diseño del generador pasivo de agua del aire. Después de la investigación realizada por varios años, se generó un nuevo diseño respecto a la chimenea solar de Manzanares, España y se mejoró el diseño de los colectores solares corrugados. En la siguiente sección de esta tesis se muestra lo que se presentó en la patente ante el IMPI con número de registro MX/E/2017/007247. Se describe aquí el funcionamiento del colector solar y algunas de las aplicaciones.

### **4.1 Requerimientos de diseño**

A partir de la investigación realizada, se definieron los siguientes requerimientos a cumplir por el generador de agua a partir del aire.

- ❖ Producción diaria de mínimo 10 litros de agua al día.
- ❖ Eficiencia de condensado del 20%
- ❖ Bajo costo y bajo mantenimiento
- ❖ Producción de energía eléctrica durante la noche
- ❖ Aprovechamiento de corriente de aire natural externa
- ❖ Aumentar la eficiencia de paneles solares fotovoltaicos.

#### **4.1.2 Propuesta de diseño para chimenea solar con colector solar bifacial.**

Con base en la investigación y buscando la mejora de los colectores solares corrugados, se definió que la mejor opción para el diseño de la placa de almacenamiento de energía es utilizar perfiles en V de acero inoxidable o bien aluminio con una separación entre ellos. Esto da la posibilidad de dejar pasar el aire caliente de la parte inferior de los perfiles hacia arriba, aumentando la eficiencia de transferencia de calor al aire. Con esto se mantiene aire fresco y frío por la parte inferior y el aire caliente se mantiene en la parte de arriba.

Conforme avanza el aire caliente a través del colector, se generan turbulencias tanto arriba como abajo, las cuales aumentan la transferencia de calor. Es posible tener un aislante en la parte inferior del colector o bien si es posible se puede poner también una cubierta de vidrio en la parte inferior haciéndolo un sistema bifacial de recolección. Los sistemas bifaciales pueden capturar energía tanto en la parte de arriba que está orientada hacia el sol y al mismo tiempo la energía indirecta por la parte inferior. Con esto se puede aumentar la eficiencia del colector y producir más agua, calor y energía. Se pueden poner también los ángulos en la misma posición, esto como alternativa para la producción.



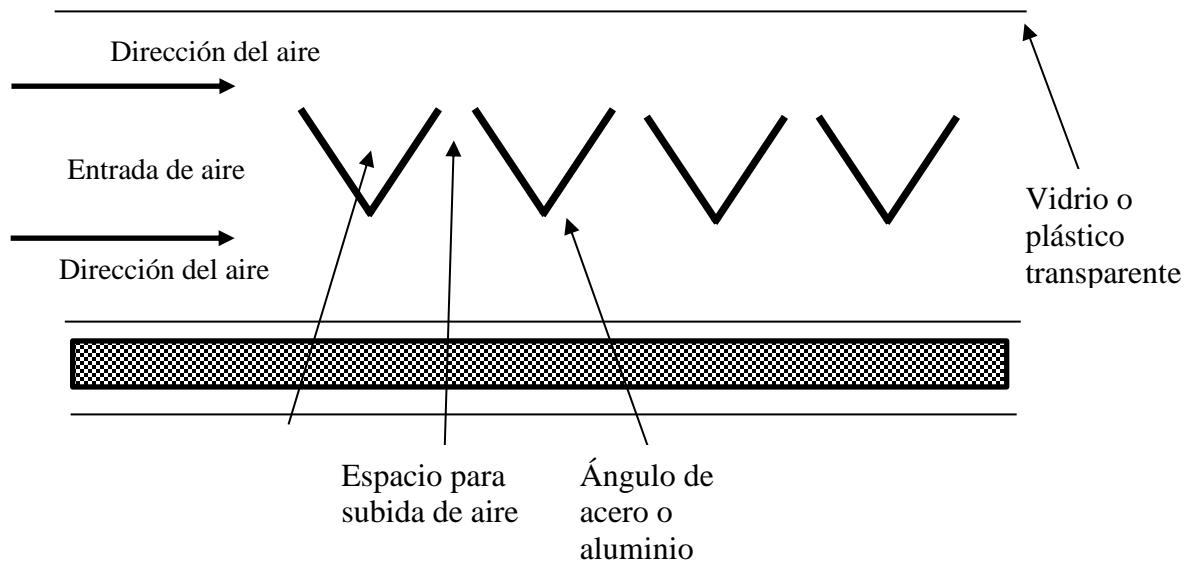


Figura 52. Diagrama de vista lateral de colector solar bifacial

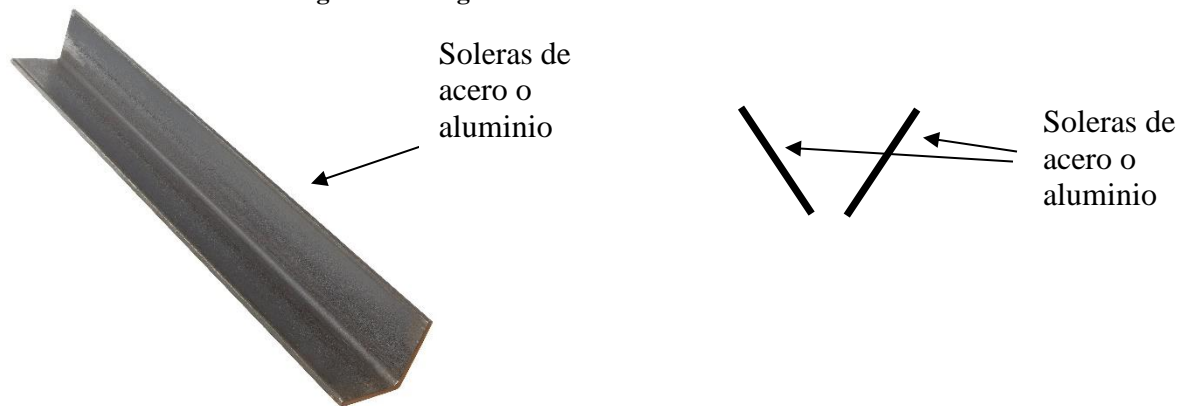


Figura 53. Ángulo de acero o aluminio para colector solar. Soleras en posición V

#### 4.1.4 Sistema simultáneo de producción de energía eléctrica y agua atmosférica

Es posible generar agua del aire y energía eléctrica. El colector solar calentará el aire y este subirá por una chimenea. En la chimenea habrá un filtro coalescente donde se producirá agua y el aire continuará subiendo hasta la parte superior donde se encontrará una turbina eólica para la producción de energía eléctrica. Este tipo de chimeneas solares se pueden hacer tan grande como se requiera y producir grandes cantidades de agua. La chimenea es necesaria para generar una diferencia de temperaturas entre el aire caliente cerca del colector y el aire frío fuera de la chimenea. Esto produce diferencia de densidades, generando un tiro dentro de la chimenea, transformando la energía térmica en energía cinética.

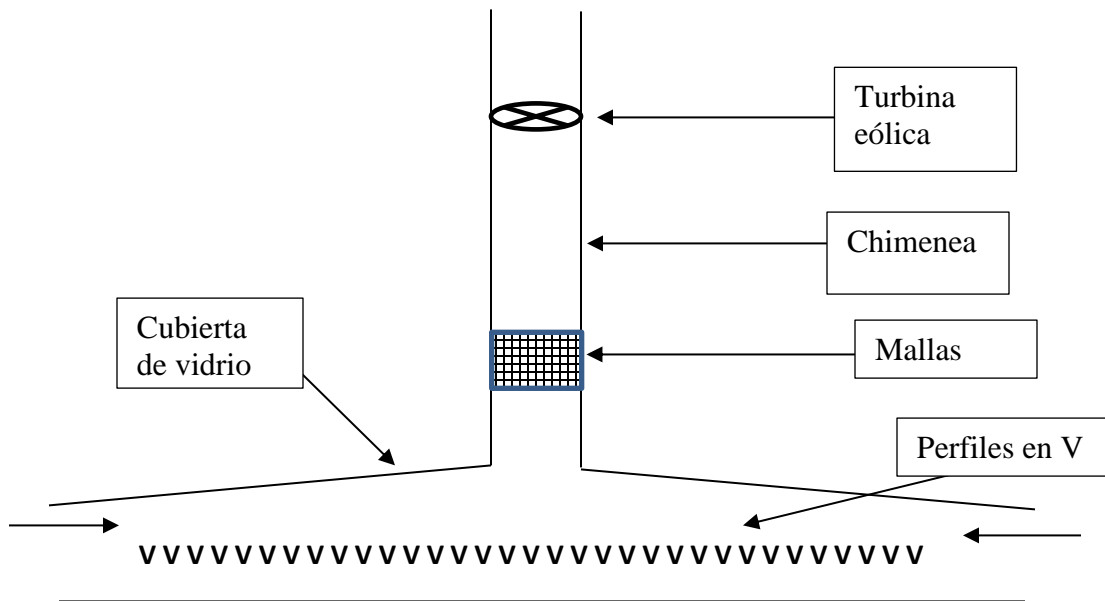


Figura 54. Diagrama de generación de agua del aire y generación eléctrica con chimenea solar y filtro coalescente

#### 4.1.5 Configuración alternativa del colector solar

En una configuración alternativa, es posible poner la chimenea por un costado. Esto aumenta el tiempo de residencia en el colector solar aumentando la temperatura del aire y la transferencia de calor entre los perfiles y el fluido de trabajo. Esta configuración también es más cómoda para mantenimiento y puesta en marcha del sistema.

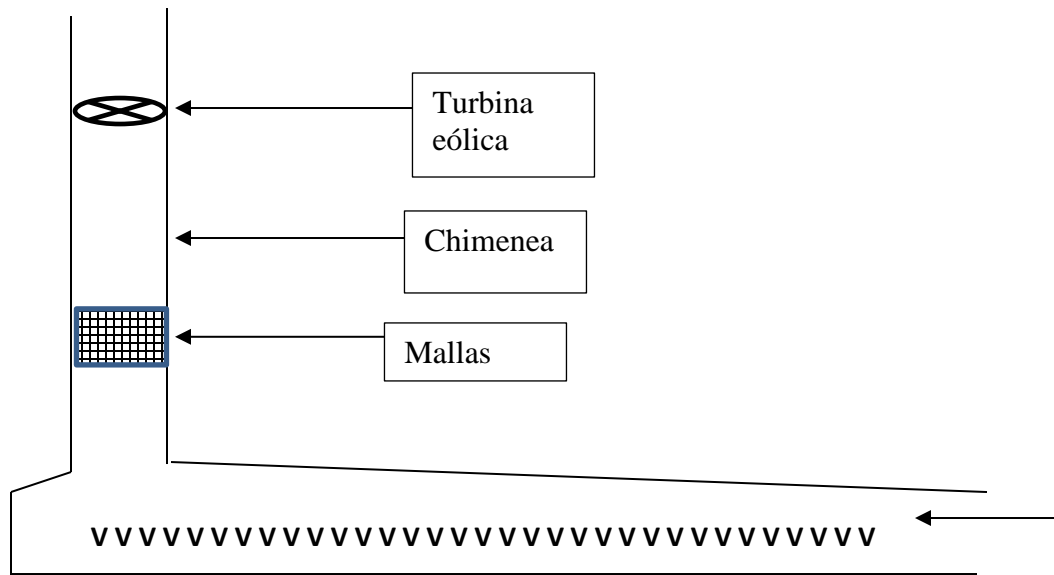
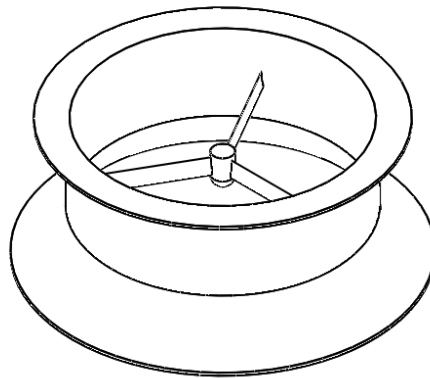


Figura 55. Diagrama de colector solar asimétrico para aumentar tiempo de residencia del aire dentro del colector solar

#### 4.2.1 Turbina eólica termosolar-eólica

Las turbinas eólicas que se encuentran dentro de tubos son más eficientes que las que no están confinadas, porque no existen remolinos en las puntas, esto debido a la diferencia de presiones que existe entre el intradós y el extradós.

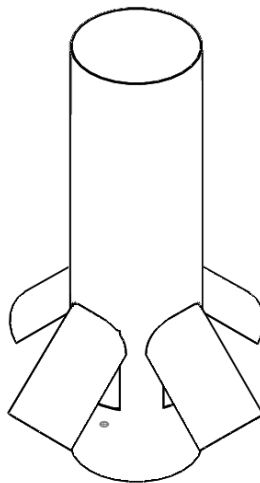
Por otro lado, según la universidad japonesa, es posible romper el límite de Bentz de las mismas generando una turbulencia en la salida, como se mencionó en el capítulo 3.4. Esto es posible agregando una muesca en la periferia del tubo.



**Figura 56. Diagrama de turbina eólica entubada para la generación de energía eléctrica**

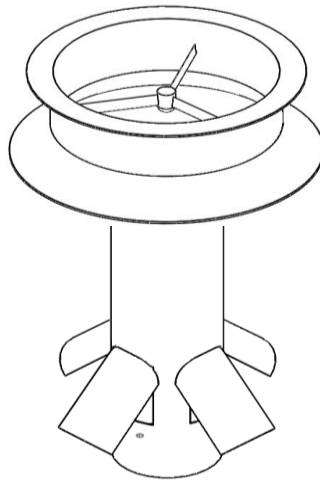
#### 4.2.2 Reguladores de entradas extras a chimenea

Para poder regular la temperatura y el flujo de aire dentro de la chimenea es posible poner ventilas en la base de la chimenea para que pueda entrar aire frío desde la parte de abajo. Este diseño, similar al flujo reversible en los aviones, puede ser importante para evitar que las altas temperaturas no afecten los elementos de condensación y la turbina eólica.



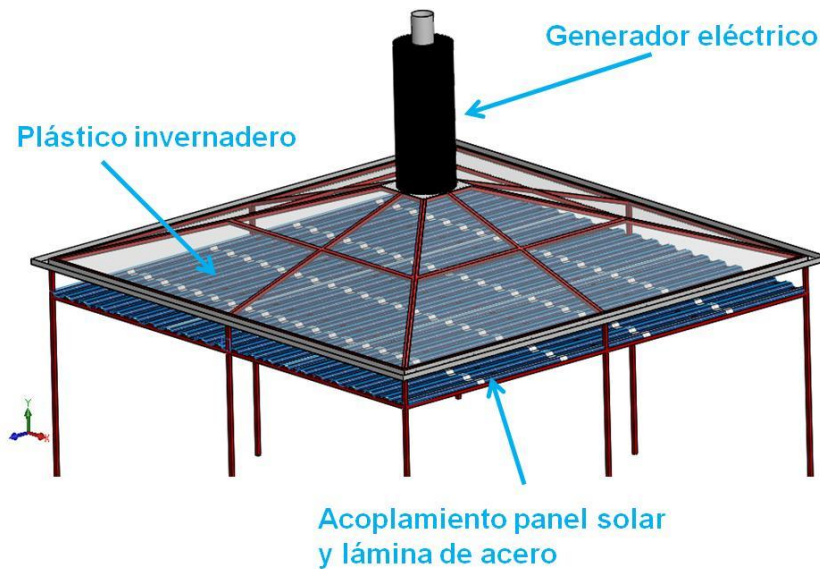
**Figura 57. Ventilass para regular flujo de aire ascendente de la chimenea**

El sistema acoplado de la turbina y la chimenea se vería como en la Figura 58. En este caso habría espacio entre la dona de la turbina eólica y la chimenea para permitir que el aire de afuera, en caso de que haya corrientes de aire pueda fluir también dentro de la turbina y así poder producir energía al mismo tiempo con energía eólica.

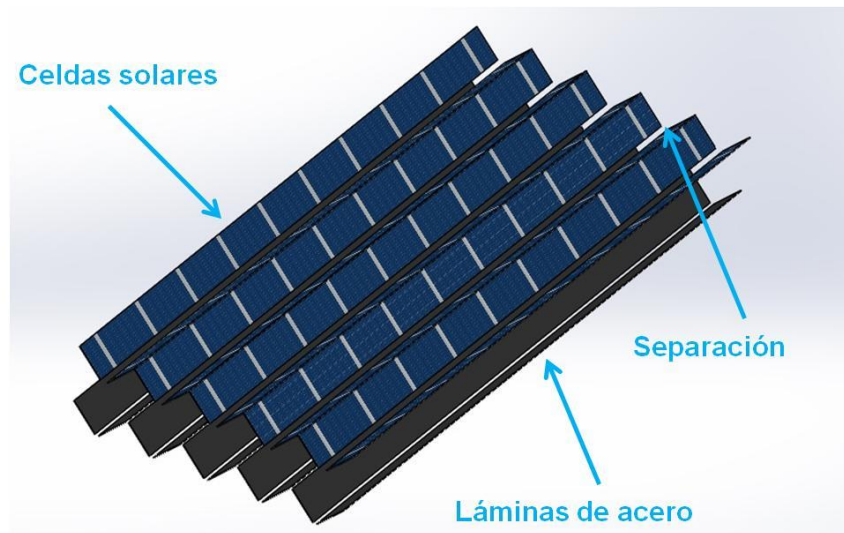


**Figura 58. Sistema acoplado chimenea turbina eólica**

El sistema completo se muestra como la Figura 61. En una configuración el colector solar se puede cubrir con paneles solares. Dentro de la chimenea se encontrará el generador. El calor se podrá almacenar tanto en los paneles solares como en los perfiles de acero. Esto permitiría que el sistema pueda producir energía no solo en el día, sino también en la noche. Al combinar la energía fotovoltaica con la energía térmica, se puede aumentar la eficiencia del sistema. Las pérdidas de calor de los paneles solares tradicionales se puede aprovechar para mover la turbina eólica. El calor podrá calentar el aire que posteriormente subirá por la chimenea para mover la turbina eólica.



**Figura 59. Diagrama de colector solar acoplado simétrico**



**Figura 60. Diagrama de acoplamiento entre celdas solares y láminas de acero para generación fotovoltaica-térmica-eólica**

#### **4.3.1 Primer prototipo y experimento mallas de acero tipo tamiz**

En la construcción del primer prototipo se realizó de la siguiente manera. Se compró un extractor de aire de 75 W de potencia de 8 in. Posteriormente se adaptó a una reducción de PVC de 8 in a 6 in. La malla utilizada fue obsequiada por la empresa LEYHO, S. A. de C. V. Esta malla es una de las más finas disponibles en el mercado. El material es de acero inoxidable 304, la cual tiene un costo de \$500.00 pesos.

La malla utilizada tiene una máxima eficiencia, usando como referencia a los estudios realizados por el MIT 17 empleando el grueso del hilo y la separación entre ellos. Utilizando estos dos valores, del grueso del hilo y la separación, es posible obtener un factor de relación entre ellos y saber que tan eficiente será la malla. Para este factor de relación, se esperaba que la malla se bloqueara con agua, ya que no contaría con el recubrimiento hidrofílico que permitiría el drenado de las gotas de agua. Sin embargo, no fue el caso, no se recolectó nada de agua, esto después de 1 hora de pruebas en diferentes días y en diferentes horarios.

Las condiciones de pruebas fueron para la velocidad entre 2 m/s y 4 m/s. Se utilizó un anemómetro digital Gm816 para realizar las mediciones. La humedad relativa fue de alrededor del 30% al 40%, utilizando los datos de la aplicación del celular Clima de Apple.

Debido a que el filtro es muy cerrado, la caída de presión es alta. Se notó que había flujo de retorno de aire, por lo que se decidió comprar un extractor de aire más potente para poder atravesar el filtro de manera más sencilla.



**Figura 61. Anemómetro digital Gm816. Acoplamiento de ventilador, reducción de 8" a 6" y malla de acero inoxidable tipo tamiz**

#### **4.3.2 Segundo prototipo y experimento con filtro coalescente**

Una vez hecha esta investigación descrita en los capítulos anteriores, se procedió a realizar la compra de un filtro eliminador de neblina de acero inoxidable aleación 304. El filtro que se adquirió tiene las siguientes características.

- Diámetro 6 [in]
- Número de mallas 50
- Densidad 144 [Kg/m<sup>3</sup>]
- Espesor 100 [mm]
- Estructura acero inoxidable 304



**Figura 62. Fotografía de la parte superior del eliminador de neblina de 6 [in] de diámetro**



**Figura 63. Fotografía de eliminador de niebla de 6[in]**

El costo de este filtro fue de \$1500.00 con el proveedor Materiales Textiles S. A. de C. V. Este filtro se puso dentro de un tubo de PVC para realizar las pruebas. El tubo de PVC de 6 in se ensambló con una reducción de PVC de 8 in a 6 in, esto con la finalidad de colocar un extractor de aire que pudiera meter aire dentro del tubo y hacia el filtro.

Después de haberse hecho las pruebas se encontró que el filtro no captura nada de agua después de estar prendido más de 1 hora de tiempo. De acuerdo con el fabricante la eficiencia de este tipo de filtro debería de ser de 99% sin embargo no fue así.

La velocidad de salida del extractor fue medida con un anemómetro. Las velocidades variaban entre 2 m/s hasta 4 m/s. Estas velocidades según las gráficas del proveedor coreano es la óptima para tener una eficiencia de recolección mayor al 90% [16]

Las pruebas fueron realizadas en la Ciudad de México. Las humedades relativas normalmente están rondando el 30% y 40%.

Las diferencias del experimento realizado en el MIT 17 con el realizado fueron las siguientes:

En el experimento de los autores del artículo generaron una atmósfera controlada de 100% de humedad. La máquina que generaba las gotas de agua aumentaba el agua que había en la cámara, por lo que el sistema estaba sobresaturado de agua. Las condiciones de 100% de humedad evitan que el agua se evapore, por lo que se elimina esta variable de evaporación en el experimento.

El recubrimiento utilizado por el MIT 17 como se pudo ver en una de las gráficas es importante tanto para generar coalescencia como evitar que se bloquee el filtro por tanta agua. En este filtro la separación de los hilos fue mucho más grande por lo que sería mucho más complicado este bloqueo.



**Figura 64. Acoplamiento de sistema de tubería para prototipo de generación de agua del aire**

#### **4.3.3 Tercer prototipo y experimento con extractor de 1/4 HP y agua en ebullición**

Debido a los experimentos anteriores se decidió comprar un motor más grande para superar la caída de presión de los filtros.

El motor que se compró fue uno AC a 110 V y con 1/4 HP de potencia. La entrada de aire es de 6 in y el aire es desplazado gracias a una turbina radial.

El tubo de PVC se colocó a la entrada del extractor junto con la malla fina de tamiz.

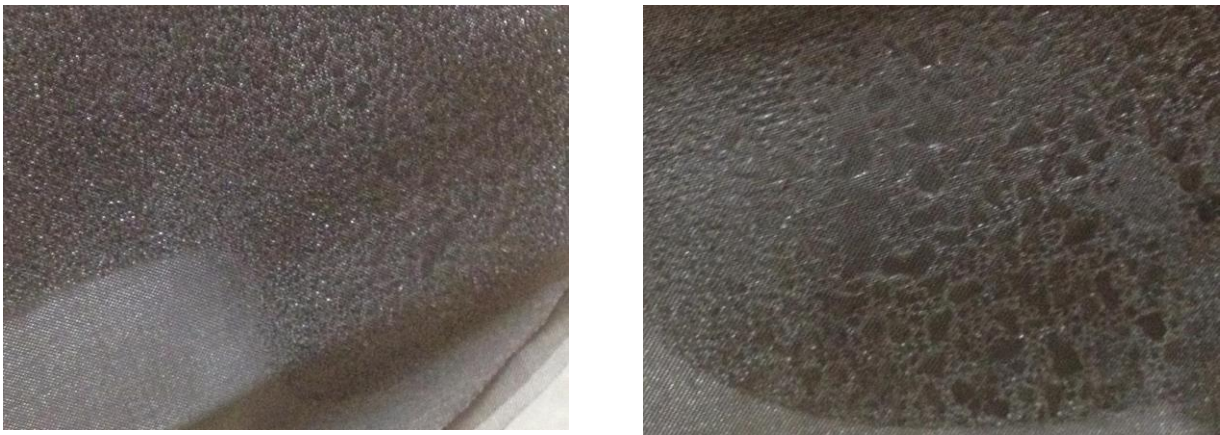


**Figura 65. Fotografías de extractor de aire de corriente alterna de 1/4 H.P. para prototipo**



Frente a la malla se colocó en una parrilla una olla con agua para que comenzara a hervir. Las gotas de agua en la ebullición son mucho más grandes que las del aire atmosférico. Este experimento tenía el objetivo de forzar la coalescencia de las gotas de agua en las mallas.

Una vez llegada a la temperatura de ebullición del agua se prendió el extractor y se dejó prendido durante 15 minutos. Las pruebas se realizaron en una habitación pequeña cerrada para aumentar la humedad relativa del cuarto y forzar la recolección de agua. No se contaban con equipos de medición para conocer estos datos. Lo que se observó se presenta en las siguientes imágenes. En ellas se alcanza a apreciar el agua recolectada.



**Figura 66. Fotografías de mallas tipo tamiz con gotas de agua por ebullición de agua**

Cabe mencionar que las gotas de agua que se obtienen de la ebullición de agua están del orden de  $50\ \mu\text{m}$  a  $1000\ \mu\text{m}$  [50]. Este tipo de gotas de agua son del orden de 10 a 50 veces más grandes que las encontradas en el aire normal.

La velocidad del extractor de aire se reguló al disminuir o aumentar el área de salida del caracol con un cartón. Fue posible encontrar que a mayores velocidades había reingreso de las gotas de agua, por lo que disminuía su recolección.

En la siguiente imagen se muestra el sistema completo armado. En la parte superior el primer extractor de aire, seguido de la reducción, la tubería de 6 in de PVC con el eliminador de niebla en el interior y una salida en T de PVC.



**Figura 67. Generador de agua del aire con sistema de humidificación**

#### **4.4 Pruebas de otros laboratorios**

En la Figura 68 se puede observar una imagen de un video en Youtube del usuario Chemtechfiltertech [51]. En este video se observa una prueba realizada a uno de los filtros eliminadores de niebla. El banco de pruebas está construido de la siguiente manera. Un tubo transparente de aproximadamente 4 metros, un aspersor de agua justo en la base del tubo. Este aspersor libera gotas de agua y tiene un gasto de agua de 10 l/hr. En este experimento no se utilizó ningún tipo de refrigeración, únicamente el filtro para atrapar las gotas.

Se colocaron dos etapas de recolección de agua de eliminadores de niebla. El primer filtro tiene una densidad de  $240 \text{ Kg/m}^3$ , material de acero inoxidable, diámetro del hilo 0.14 mm, altura o espesor del filtro 150 mm, diámetro del filtro 198 mm. Se comenta en el video que tiene una eficiencia del 100% para gotas de agua de  $10 \mu\text{m}$ . La segunda etapa tiene las mismas características, pero con hilos de diámetro de 0.28 mm.



**Figura 68. Eliminador de niebla para altos flujos de agua. Bloqueo del filtro por saturación [51]**

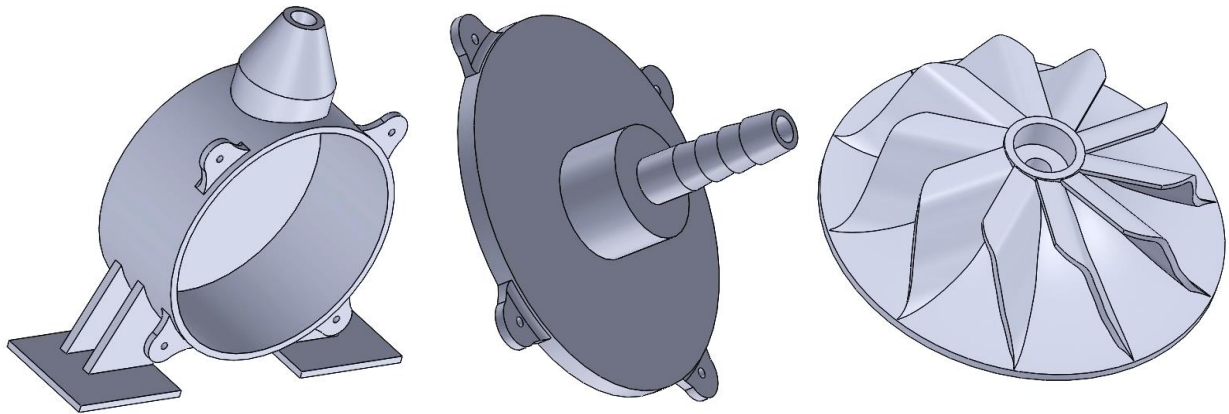
En el video se muestra que la primera etapa está totalmente bloqueada o inundada. Esto no es deseable porque la caída de presión necesaria es muy alta para que funcione.

#### **4.5 Construcción de bomba de agua para humidificación**

Después de realizar las pruebas, se puede concluir que en el experimento realizado por el MIT 17, afecta significativamente el tener una atmósfera de alta humedad. Una hipótesis es que el agua lanzada desde el generador de gotas de agua va colisionando con el agua que hay en la atmósfera controlada, así al llegar a los hilos del filtro la gota es mucho más grande de  $3\ \mu\text{m}$  que originalmente tiene. Por esta razón se decidió utilizar algún método para generar una atmósfera de 100% de humedad y buscar también que colisionen las gotas que vienen del aire con la cámara de humidificación.

Se buscó una bomba en el mercado que pudiera aguantar ciclos de trabajo sin parar de 4 hrs al menos. Sin embargo las bombas de agua con escobillas que normalmente hay disponibles no pueden estar encendidas más de 45 minutos. Los ciclos de trabajo de las bombas tradicionales están limitados por la temperatura. Los motores al contar con escobillas aumentan rápidamente la temperatura del embobinado y gracias a un sensor de temperatura, se apaga el motor por protección. Sabiendo esto se tuvo que fabricar una bomba de agua a la medida. Se realizó el diseño CAD y posteriormente se mandó a imprimir en 3D. En las siguientes figuras se puede ver el modelo CAD.

La bomba de agua cuenta con 3 piezas: la parte posterior, la parte frontal y el rotor o turbina. La entrada está pensada para una manguera de 1/2 pulgada y la salida para alimentar un sistema de aspersión de riego con una manguera de 1/4 pulgada. Se colocaron puntos de sujeción para simular una brida y sellar y sujetar tanto la tapa como la base.

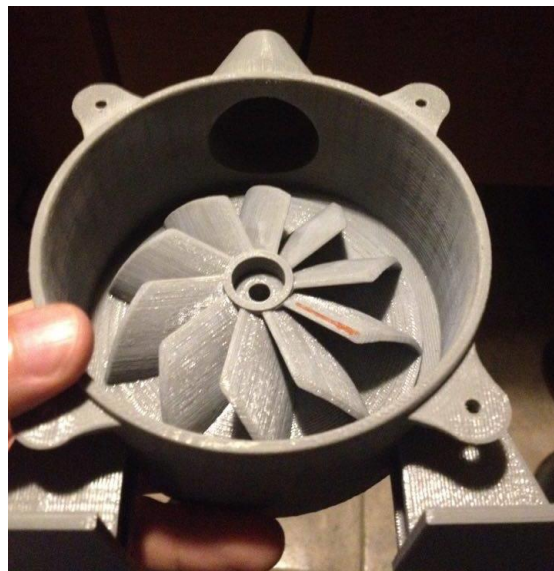


**Figura 69. Modelos CAD parte de atrás, parte frontal o tapa y rotor.**

Después de realizada la impresión, fue necesario lijar las paredes tanto de la carcasa de la parte trasera como de la parte delantera para que pudieran embonar.

En la investigación se encontró que una opción para lograr largos periodos de trabajo son los motores sin escobillas. Estos, al no generar fricción entre el rotor y el embobinado pueden trabajar por periodos más prolongados. Se compró un motor de un dron para esta función en especial, un Arduino para su control y una fuente de alimentación para mantenerlo encendido por al menos 4 horas. El rotor se diseñó sobre las piezas que vienen en el motor del dron.

A continuación, se muestran las imágenes de la turbina ya impresa, un ensamble preliminar y la puesta en prueba de esta.



**Figura 70. Ensamble preliminar rotor con la carcasa**



**Figura 71. Ensamble preliminar carcasa y tapa izquierda  
Puesta en marcha y prueba del rotor con Arduino derecha.**

#### **4.5.1 Problemas encontrados en el diseño y mejoras**

La bomba funciona muy bien sin colocar la tapa en la parte de enfrente, a altas revoluciones se encontró una gran vibración, por lo que se analizará la manera de anclarla de una mejor manera. La bomba de agua se colocó sobre una base de madera al igual que el motor por la parte de atrás. Al intentar alinear todos estos elementos se observó que es importante tener tanto la base del motor como la base de la bomba alineados totalmente. Más adelante se harán estas piezas en impresión 3D para asegurar que estén totalmente alineadas.

Al probar la bomba con la tapa de enfrente cerrada comenzó a vibrar mucho toda la estructura y la bomba. Una causa pudiera ser el efecto de la compresión y expansión del aire dentro de la cámara. Aunque el diseño podría permitir la entrada y la salida de aire, se puede pensar que la geometría no permite que esto suceda.

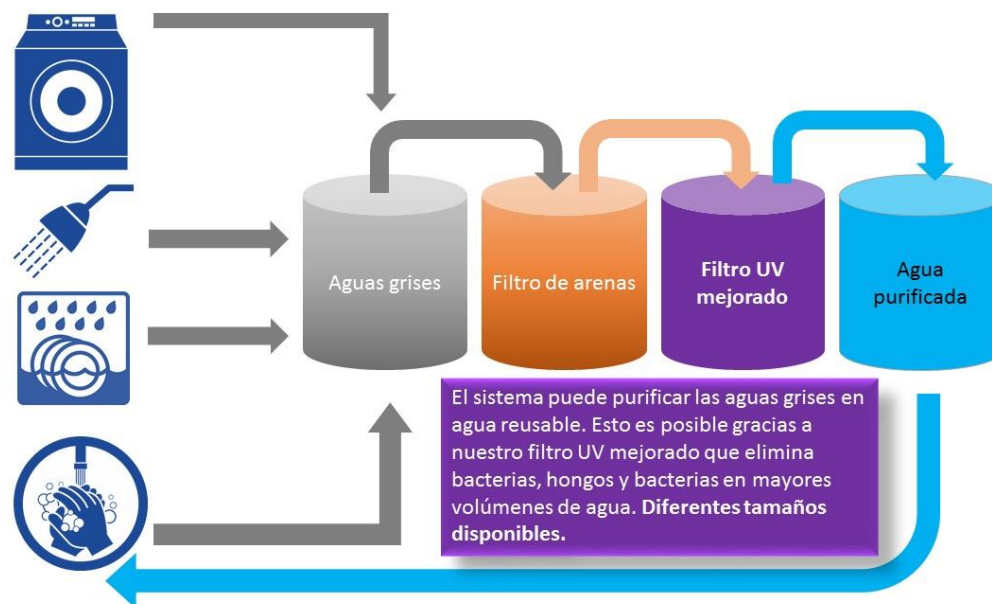
En el caso de acoplar el eje del motor al rotor se encontró que es necesario un sello mecánico para bombas. Estos sellos lamentablemente no se venden de manera comercial para 3 mm que es el diámetro del eje del motor de dron. Después de averiguar una solución se encontró que se podría pegar un cilindro circular en el eje para lograr hacerlo más grande y así lograr el diámetro de un sello comercial. Esto ya no se ha hecho por falta de recursos, posteriormente se buscará continuar con esta parte del proyecto.

#### **4.6 Recubrimiento superhidrofílico con bióxido de titanio para purificación de agua.**

Una manera de probar el recubrimiento es a través de la fotocatalisis. Las mallas recubiertas al estar presentes de luz ultravioleta generan radicales libres hidroxilos OH [52], los cuales eliminan virus, bacterias y algas. Se utilizó como medio visual de efectividad azul de metileno, el cual es un químico

color azul, que al estar al menos una hora en presencia de los radicales libres, disminuye su tono si es disuelto en agua.

La purificación de agua es muy importante hoy en día, porque permite la reutilización de agua no tan contaminada como las aguas grises o jabonosas. Con esta pequeña planta de tratamiento se puede ofrecer en diferentes lugares del país una opción para tener más agua disponible. En la Figura 72 se presenta un diagrama de cómo funcionaría este sistema.



**Figura 72. Diagrama de purificación de agua por fotocatalisis**

El agua jabonosa se recolecta y se hace pasar por un filtro de arenas primero. Aquí se remueve el jabón y cualquier otro tipo de partícula que pudiera estar suspendida en el agua. Posteriormente se manda a un reactor donde se lleva a cabo la fotocatalisis. Después de 6 a 8 horas de purificación, el agua es prácticamente potable y puede ser reutilizada nuevamente [52]. En el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología ICAT de la UNAM se han hecho estudios al respecto.

En las pruebas se encontró que efectivamente era posible lograr la decoloración del azul de metilo. Las mallas se expusieron a luz ultravioleta tipo C, la cual es la más efectiva para lograr la fotocatalisis. Después de 1 hora se encontró que la tonalidad en el azul había disminuido aproximadamente la mitad. Con esto se demostró que existe interacción entre la superficie y el agua, pero es necesario realizar más pruebas para poder determinar el ángulo de contacto del recubrimiento.

#### **4.7 Cuarto prototipo con generadores de niebla**

Con la experiencia obtenida de los demás prototipos y las pruebas realizadas, se construyó otro prototipo más. Al encontrar que no fue posible generar agua a partir del aire aún con 100% de humedad, el estudio de las mallas aún tiene otras aplicaciones que pueden ser para condiciones de

neblina o bien para torres de enfriamiento en producción de energía eléctrica o para procesos productivos donde también se utilizan.

Para este prototipo se consideró utilizar generadores de neblina ultrasónicos. El nebulizador ultrasónico permite generar gotas de agua de  $5.6 \mu\text{m}$  en promedio según los estudios realizado por el Centro Nacional de Biotecnología (NCBI) en Estados Unidos [53]. Las gotas generadas son aproximadamente del tamaño que existen en la humedad del aire regular. Según las especificaciones del vendedor, se comenta en la página que tiene un gasto de 500 ml/h, lo que representa un flujo muy alto comparado con los otros experimentos realizados por el MIT 17. Requieren estar sumergidos a una altura de 40 a 60 mm. Estos nebulizadores tienen un consumo de 24 W, con un voltaje de entrada de 24 V y 1 A [54]. Es posible realizar experimentos con este tipo de generadores para poder caracterizar las mallas utilizadas.

En este prototipo se decidió utilizar una hielera de unicel, la razón fue porque se podía comprar fácilmente en diferentes tiendas, mantiene además la temperatura del agua y es fácil de cortar para la tubería. En el caso de las pruebas realizadas a nivel del mar en la playa, no fue necesario transportar una caja rígida y en el lugar se compraron, evitando así pagos extras de equipaje.

Dentro de las hieleras se colocaron 3 generadores de neblina ultrasónicos con focos LED que cambian de color en el tiempo. Se decidió por este modelo, ya que la luz permite la visualización de las gotas de agua sobre la malla. Por un costado de la hielera, se abrió un orificio para meter una tubería de 4 pulgadas para la salida de las gotas de agua producidas por el generador de neblina.



**Figura 73. En la imagen del lado izquierdo se observa el interior de la hielera con los 3 generadores de neblina. En la imagen del lado derecho una toma de costado de la hielera.**

En la tapa posteriormente se adaptó una reducción de PVC de 8 in a 6 in y una sección de tubo de 6 in. Considerando los prototipos anteriores, se utilizó para éste un motor de drone sin escobillas, ya que son capaces de mantener ciclos de trabajo por largos periodos de tiempo, porque al no tener escobillas no aumenta la temperatura por la fricción, es posible regular más fácilmente la potencia del motor. Se realizó una cruceta de tubería de PVC en el centro de la reducción de 8 in para poder

anclar el motor y mantenerlo centrado en la entrada. Gracias a la conexión con un Arduino Uno, se puede aumentar y disminuir la potencia, por lo que puede ofrecer diferentes velocidades e inclusive funcionar en un giro opuesto para presiones de vacío. El programa que se realizó permite aumentar la velocidad de giro del drone de manera precisa aumentando o disminuyendo siempre en la misma cantidad la señal de entrada. Desde el teclado de la computadora se puede incrementar de manera regular el valor de la señal, llevarlo a la máxima potencia o apagarlo. Este mismo programa se podría posteriormente realizar a través de una aplicación en el celular para evitar trasladar la computadora en caso de querer realizar pruebas en otra localidad. Cabe mencionar que el motor se conectó a una fuente de alta potencia para poder ofrecer energía durante largos periodos de tiempo.



**Figura 74. Acoplamiento de la tapa de la hielera con tubería de PVC y reducción de 8 in a 6 in**





**Figura 75. Vista superior del motor del drone anclado a tubería de PVC**

Finalmente se colocaron las mallas frente a la salida del tubo para realizar las pruebas. Las mallas se sujetaron con un soporte para soldadura y unas pinzas, en la imagen se puede apreciar además un pequeño colector de agua donde las gotas que vayan escurriendo se puedan ir depositando ahí. Fue posible realizar las mediciones de recolección utilizando una jeringa. Con este armado es posible aumentar o disminuir la velocidad, probar diferentes mallas con diferentes grosores de hilo y separación entre ellos y variar el flujo de gotas de agua apagando y prendiendo los generadores de neblina.



**Figura 76. Armado completo con las mallas para iniciar las pruebas de recolección**

#### **4.7.1 Pruebas de eficiencia de las mallas**

Los materiales que se utilizaron para las pruebas fueron los siguientes

1. Mallas rígidas recubiertas con dióxido de titanio, (densidad 144 Kg/m<sup>3</sup>, 6 in diámetro)
2. Malla sombra flexibles recubiertas con dióxido de titanio.
3. Malla de acero inoxidable tamiz (LEYHO, S. A. de C. V.)
4. Malla sombra sin recubrir.

Se decidió para los experimentos usar una velocidad de 3.0 m/s donde según la literatura es una de las velocidades donde se alcanza la máxima eficiencia, esto ya comentado en capítulos anteriores de esta tesis. A excepción de la malla de acero inoxidable en todos los demás casos se utilizaron 3 capas de mallas. Aunque el proveedor comenta que la producción de neblina es de 500 ml/h durante las pruebas se encontró que el gasto era de 200 ml/h por cada nebulizador.

El tiempo de duración de las pruebas fue de 30 minutos. Las condiciones atmosféricas que se tenían fueron 24 °C de temperatura, 30% de humedad relativa, índice de UV 12, altura sobre el nivel del mar 2250 m, con una presión atmosférica de 0.77 atm. Con estos valores se puede calcular que la concentración de vapor de agua en la atmósfera era de 6.52 g/m<sup>3</sup>. Utilizando la velocidad de salida, la producción de agua de los nebulizadores y el área de salida, se puede calcular el gasto másico por segundo del sistema.

$$Q_{flujoaire} = AV_{salida} = \pi r^2 V = \pi \left( \frac{2[\text{in}](2.54[\text{cm}])}{100} \right)^2 (3) = 0.0243 [\text{m}^3/\text{s}]$$

Calculando el gasto másico de agua del nebulizador y agua en la humedad del aire respectivamente

$$\dot{Q}_{neb} = \frac{600[\text{g/h}]}{3600} = 0.1666[\text{g/s}]$$

$$\dot{Q}_{aguaaire} = DvQ_{flujoaire} = 6.52(0.0243) = 0.158 [\text{g/s}]$$

Por lo que el flujo total de agua fue de

$$\dot{Q}_{aguatotal} = \dot{Q}_{aguaaire} + \dot{Q}_{neb} = 0.325 [\text{g/s}]$$

El flujo de agua en 30 minutos sería el siguiente

$$\dot{Q}_{agua30min} = 0.325 * 1800 = 585.442 [\text{g/30min}]$$

Los resultados de los experimentos fueron los siguientes

No. Prueba	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Material	Mallas rígidas recubiertas de TiO2	Mallas flexibles recubiertas de TiO2	Malla acero inoxidable	Malla sombra sin recubrir	Malla sombra sin recubrir Carga eléctrica	Malla sombra sin recubrir Carga eléctrica
Agua recolectada [ml]	21	17	26	35	195	75
Flujo de agua [g/30min]	585.442	585.442	585.442	585.442	585.442	585.442
Eficiencia sin humedad del aire $\eta$	7%	5.66%	8.66%	11.66%	65%	25%
Eficiencia total $\eta$	3.58%	2.90%	4.44%	5.97%	33%	12.81%

Para las dos últimas pruebas se cargó eléctricamente el agua que se utilizó. Se encontró que hay una gran diferencia de eficiencias con agua cargada eléctricamente y sin cargar. El recubrimiento no mostró una mejora en la recolección, esto puede deberse a que son mallas muy abiertas comparadas con las demás. Es necesario mejorar el proceso de fabricación del recubrimiento y lograr realizarlo en mallas mucho más cerradas, además de utilizar nanopartículas de dióxido de titanio más pequeñas. La eficiencia obtenida sin considerar la humedad del aire demuestra que fue muy alta

cuando hubo carga eléctrica. Se requieren instrumentos de mayor precisión para conocer si la humedad que hay en el ambiente logra adherirse a las gotas de agua que hay en la malla por coalescencia o si la probabilidad de que esto ocurra sea muy pequeña por la diferencia de tamaños entre la gota del nebulizador y la que hay en el ambiente. Es necesario realizar más experimentos para determinar esto.

#### 4.8 Estimación de producción de agua y energía eléctrica

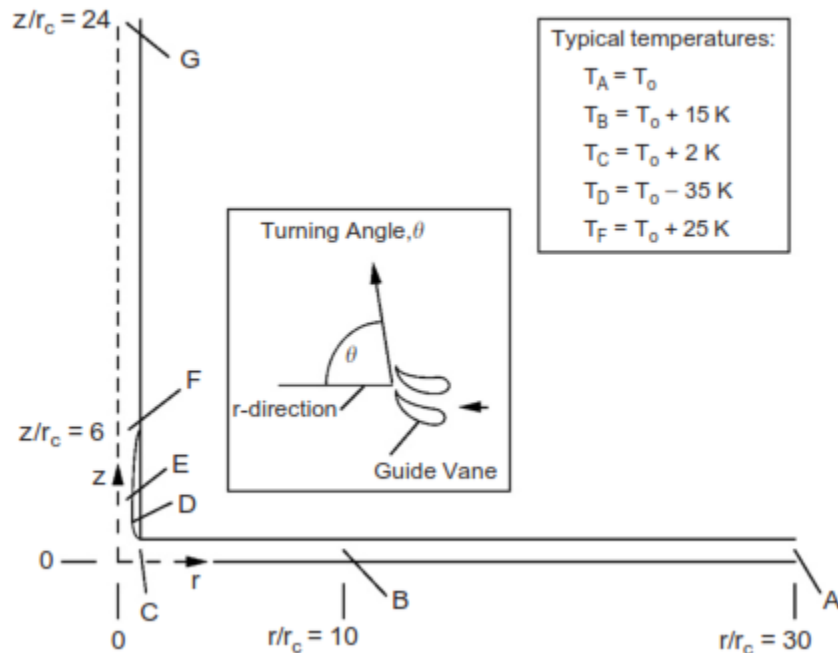


Figura 77. Diagrama de puntos de análisis de temperaturas [33].

La estimación de la producción de agua y energía eléctrica para la chimenea solar estará dada por el calentamiento del aire, a través de calentar la placa o los perfiles de almacenamiento de energía. La chimenea de manzanares que no cuenta con la placa de absorción solar es capaz de aumentar la temperatura en 15 grados. En la Figura 77 se puede observar que en el punto B alcanza una temperatura de  $T_B = T_0 + 15K$  donde la temperatura  $T_0$  es la temperatura ambiente. Posteriormente la temperatura descenderá dentro de la chimenea. Habrá un enfriamiento isentrópico que se puede calcular con la ecuación

$$C_p(T_D - T_B) + (K_D - K_B) = 0$$

si se desea conocer la temperatura  $T_D$  justo en la entrada de la chimenea, se puede despejar de la ecuación anterior

$$T_D = \frac{-(K_D - K_B)}{C_p} + T_B = -\frac{1}{2} \frac{(U_D^2 - U_B^2)}{C_p} + T_B$$

La velocidad en el punto B se puede calcular por conservación de masa, por lo que quedaría el cálculo con la siguiente ecuación

$$\dot{m}_B = \dot{m}_D = \rho U_B A_B = \rho U_D A_D$$

$$U_B = \frac{\dot{m}_D}{\rho A_B} = \frac{\rho U_D A_D}{\rho A_B} = \frac{12.17 \left( \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right)}{1.2 (\pi D_B h)} = \frac{12.17 \left( \pi \left( \frac{10.16}{2} \right)^2 \right)}{1.2 \left( \pi \left( 10 * \frac{10.16}{2} \right) 2 \right)} = 1.54 [\text{m/s}]$$

Utilizando  $T_0 = 298$ ,  $T_B = 308$  así la temperatura en D será

$$T_D = -\frac{\frac{1}{2}(U_D^2 - U_B^2)}{C_p} + T_B = -\frac{\frac{1}{2}(12.17^2 - 1.54^2)}{1.012} + 313 = 240.92 \text{ K}$$

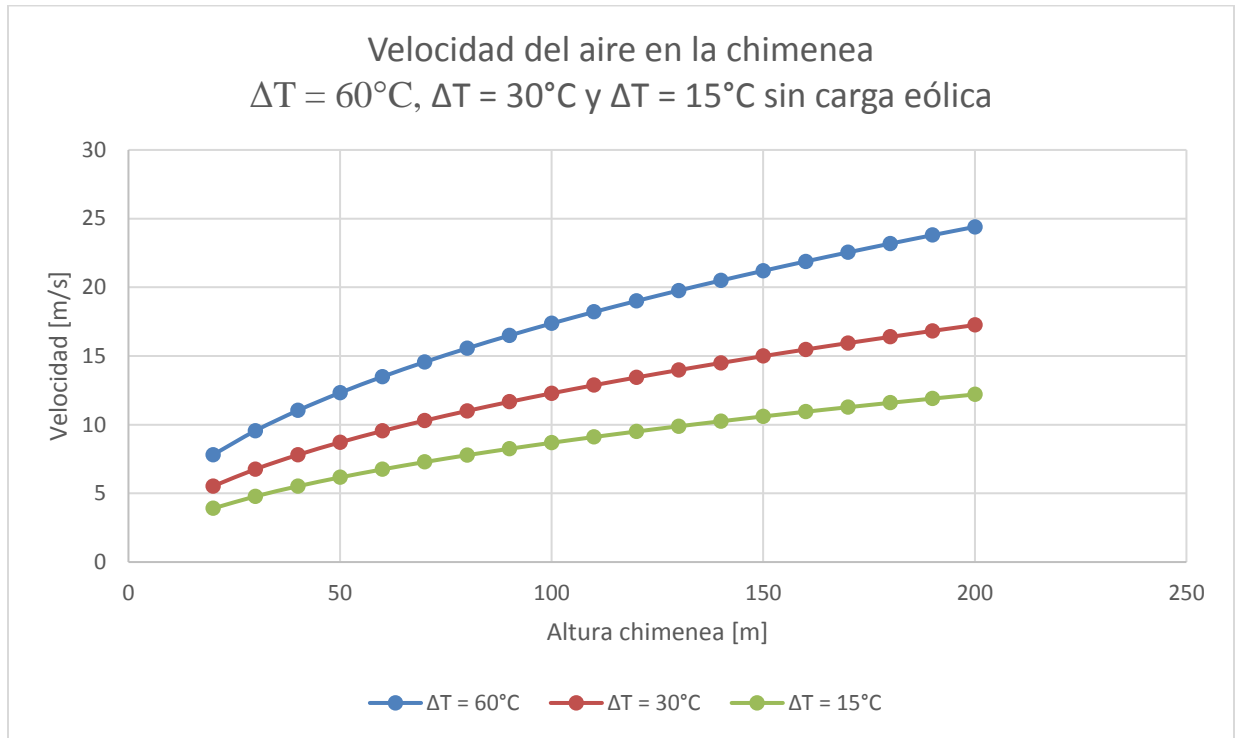
Esta temperatura corresponde a  $-33^\circ\text{C}$  que es suficiente para generar condensación del agua del ambiente e inclusive congelación. Este resultado es con una altura de 200 m.

La temperatura del colector solar puede alcanzar temperaturas mayores a los  $100^\circ\text{C}$ , esto es debido a que almacenará más energía de la que libera por convección. La temperatura que tomará el aire será la temperatura media entre la temperatura del medio ambiente y la temperatura máxima de la superficie de los perfiles. Suponiendo una temperatura del colector de  $120^\circ\text{C}$  y una temperatura ambiental de  $20^\circ\text{C}$ , la temperatura media será de  $60^\circ\text{C}$ . Por otro lado se podrá también calcular una temperatura media de  $30^\circ\text{C}$ , suponiendo  $80^\circ\text{C}$  como temperatura del colector. Con estos valores se pueden obtener las siguientes gráficas

Retomando las ecuaciones que se describieron en el capítulo 3, es posible calcular la velocidad dentro de la chimenea con la siguiente ecuación

$$u_0(h) = \left[ \frac{2(1 - \varepsilon_t)(\Delta T/T_0)gH'(1 - e^{-h/H'})}{e^{h/H} + \varepsilon + \frac{fh}{d}} \right]^{1/2}$$

La siguiente gráfica se calculó con los siguientes valores como constante,  $\Delta T_1 = 60$ ,  $\Delta T_2 = 30$ ,  $\Delta T_3 = 15$ ,  $T_0 = 298$ ,  $f = 0.01$ ,  $\varepsilon = 0.1$ ,  $\varepsilon_t = 0$ ,  $h/d = 19.2$



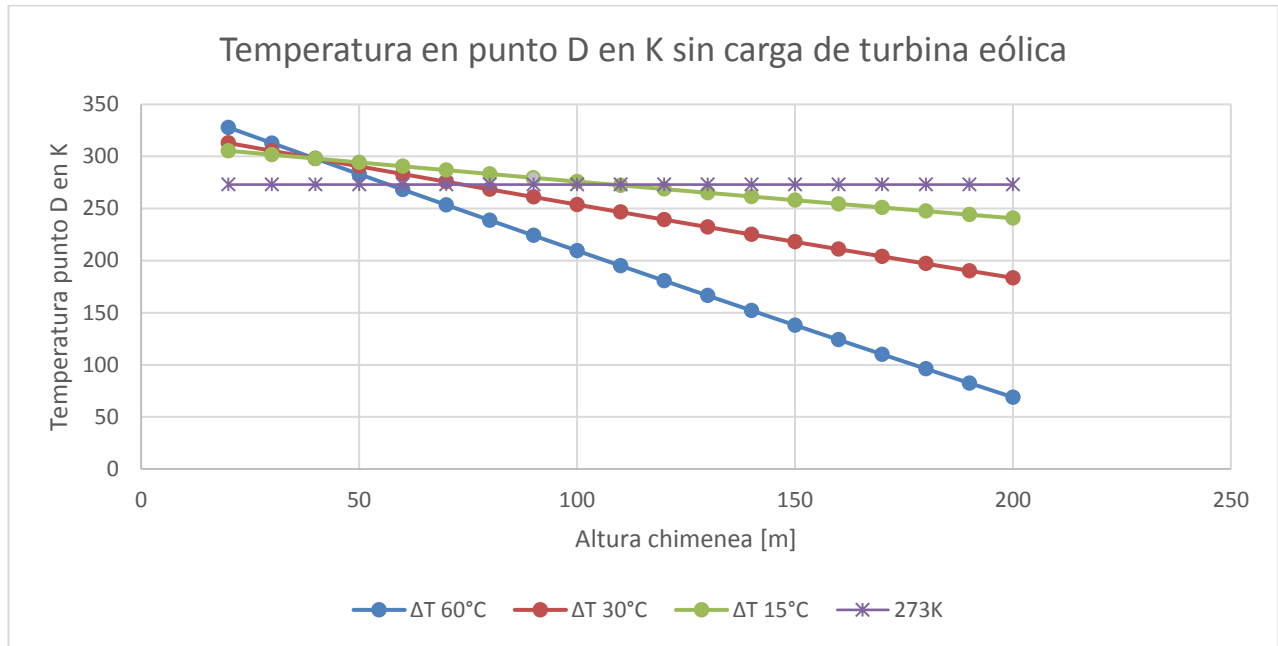
**Gráfica 1. Velocidad máxima de la chimenea solar con pérdidas por fricción según la altura de la chimenea con  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$  sin cargas en la turbina o producción de agua**

La siguiente gráfica, se tomó como referencia  $0^\circ\text{C}$  o  $273\text{ K}$  para conocer la temperatura de congelación del agua. Por debajo de esta temperatura se podría determinar que existe formación de gotas de agua más grandes. La temperatura en el punto D, es decir justo antes de la entrada a la chimenea se calculó con la siguiente ecuación

$$T_D = -\frac{1}{2} \frac{(U_D^2 - U_B^2)}{C_p} + T_B$$

Esto es considerando la velocidad en el punto B que se obtiene por conservación de masa. El punto B está a  $r/r_c = 10$ ,  $r_c = d/2$ . Se calculó la temperatura en el punto D de la misma manera con los siguientes valores,  $\Delta T_1 = 60$ ,  $\Delta T_2 = 30$ ,  $\Delta T_3 = 15$ ,  $T_0 = 298$ ,  $f = 0.01$ ,  $\varepsilon = 0.1$ ,  $\varepsilon_t = 0$ ,  $h/d = 19.2$  como constante este último valor que permite cambiar el tamaño del diámetro respecto a la altura de la chimenea.

Como se puede observar en la gráfica, es necesario tener una altura mínima de 50 metros para lograr alcanzar una temperatura de  $273\text{ K}$ . Si se utiliza el colector solar, la temperatura alcanzada en la chimenea será aún menor que sin el colector. Con solo 15 grados de diferencia en el colector, es posible alcanzar  $70^\circ\text{C}$  menos que sin colector.



**Gráfica 2. Temperatura en el punto D a la entrada de la chimena respecto a la  $\Delta T$  de temperatura en el colector y la altura**

Como se describió en el capítulo 3, la potencia eléctrica generada  $N_e$  está dada por la correlación experimental

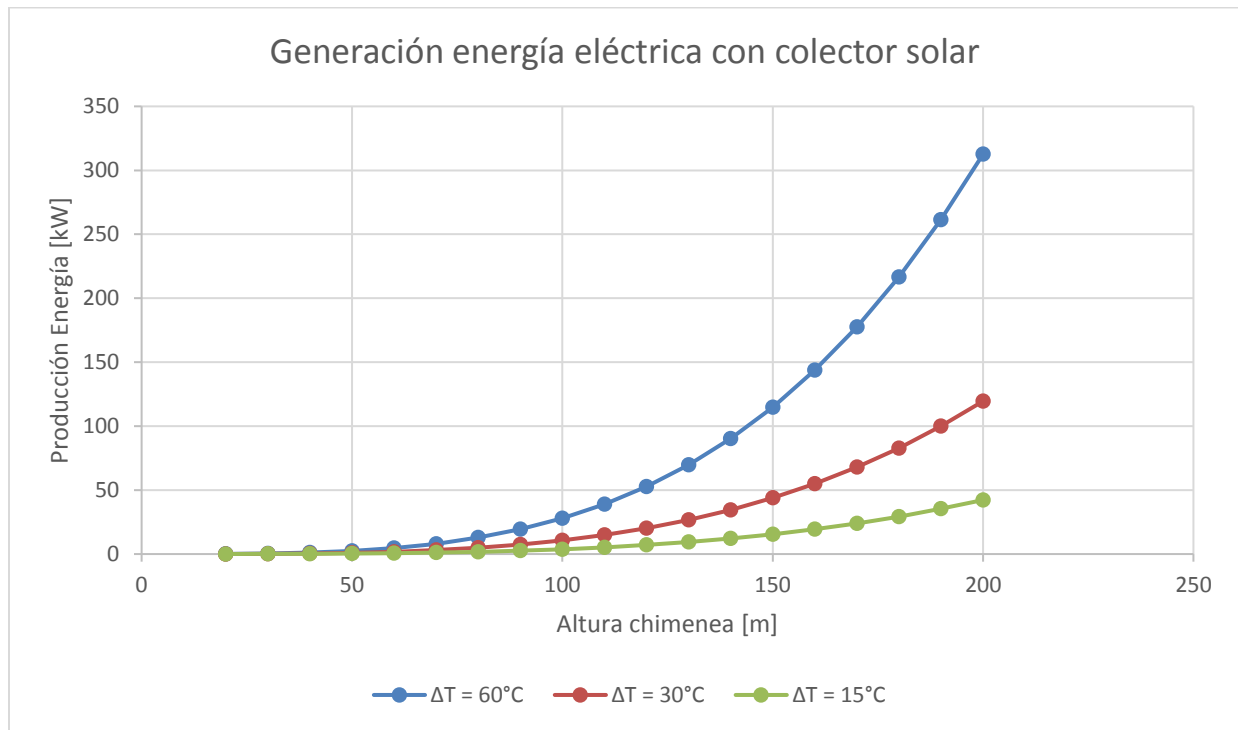
$$N_e = \dot{M} \eta_t \epsilon_t \Delta \phi$$

$\eta_t$  es la eficiencia de la turbina y el flujo másico está dado por

$$\dot{M} = \rho_0 u_0 \pi d^2 / 4$$

los valores para la turbina son  $\eta_t = 0.83$  y  $\epsilon_t = 0.67$ . La eficiencia de esta turbina de estancamiento aprovecha gran parte de la energía producida por la chimenea. La siguiente gráfica se construyó con estos valores y tomando los calculados anteriormente.

Con el colector solar se puede triplicar la producción de energía eléctrica. En el caso que la  $\Delta T_1 = 60$ , es posible que sean 7 veces más la producción eléctrica. Este valor se puede alcanzar si el colector solar almacena la energía por varios días. La temperatura promedio diaria, sería necesaria calcularla buscando que tan rápido se enfrían los perfiles durante el día.



**Gráfica 3. Producción de energía eléctrica en kW con diferentes  $\Delta T$  en el colector solar**

La producción de agua dependerá de la cantidad de agua que haya en el ambiente y la humedad de saturación a la que se llegue con el enfriamiento.

$$P_{agua} = \dot{M}\eta_s(q_A - q_S)$$

En el caso cuando se extrae el agua del flujo del aire, existe un mayor enfriamiento en el sistema, esto debido a que el agua almacena calor. Por esa razón delta de temperatura nueva generada por la extracción del agua está dada por la siguiente ecuación

$$\Delta T = T_0 + \eta_s(L/c_p)(q_A - q_S)$$

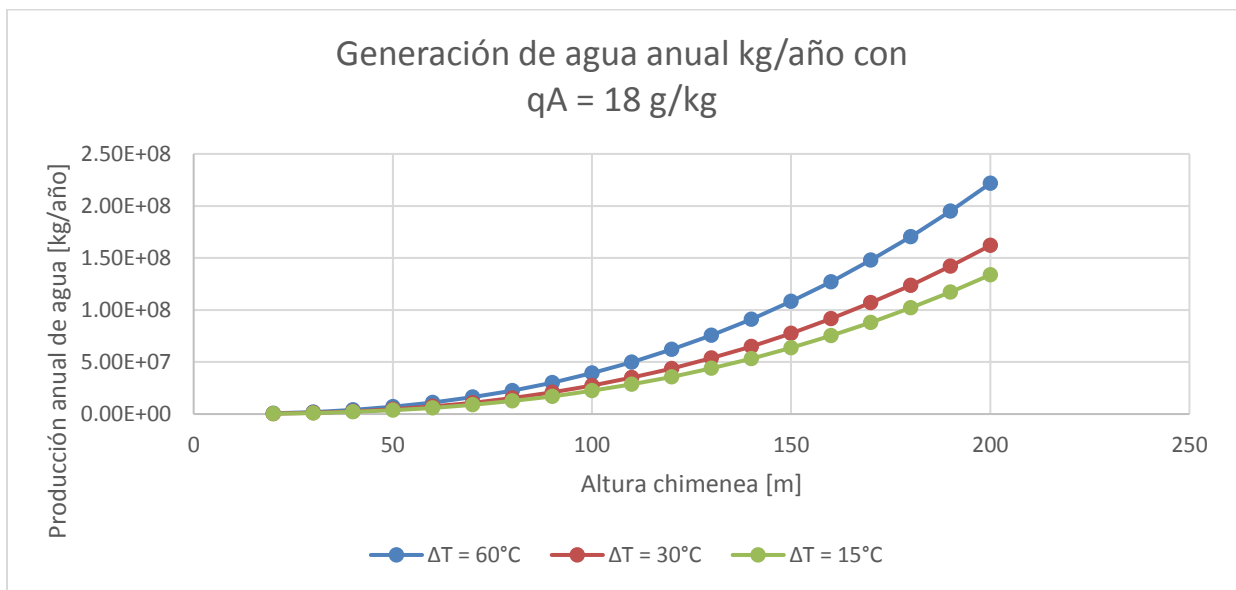
Donde  $\eta_s = 0.80$ ;  $L = 2503 \text{ kJ/kg}$ ;  $c_p = 1.05 \text{ kJ/kg/K}$ ;  $q_A = 18\text{g/kg}$ ;  $q_S = 1.6\text{g/kg}$ . Donde  $L$  es el calor latente de evaporación del agua,  $c_p$  el calor específico del aire y  $q_A$ ,  $q_S$  el contenido de agua por kilogramo de aire a temperatura ambiente y de saturación respectivamente. El valor de  $18 \text{ g/kg}$  para  $q_A$  se alcanza en lugares muy húmedos. Este valor cambiará según el lugar geográfico.

Los valores del sistema continuarán siendo  $\eta_t = 0.83$ ;  $\epsilon_t = 0.67$ ;  $\Delta T_1 = 60$ ;  $\Delta T_2 = 30$ ;  $\Delta T_3 = 15$ ;  $T_0 = 298$ ;  $f = 0.01$ ;  $\epsilon = 1.5$ ;  $h/d = 19.2$

La eficiencia de la separación es a través de un remolino. Esta eficiencia es muy superior a las mallas por un lado, y también permite separar el agua a velocidades más altas a diferencia de la separación en las mallas.

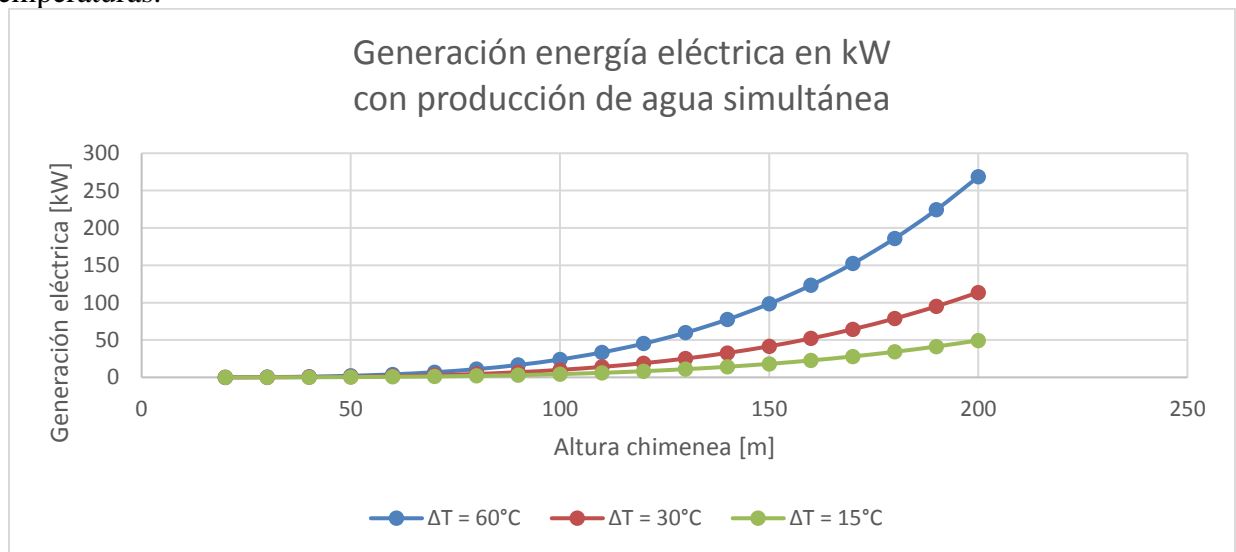


La producción anual se consideró un ciclo de trabajo de 6 horas al día, manteniendo el mismo flujo del aire durante el día. Aunque la radiación solar va variando durante el día, es posible compensar durante la noche la producción, ya que los perfiles almacenarán energía.



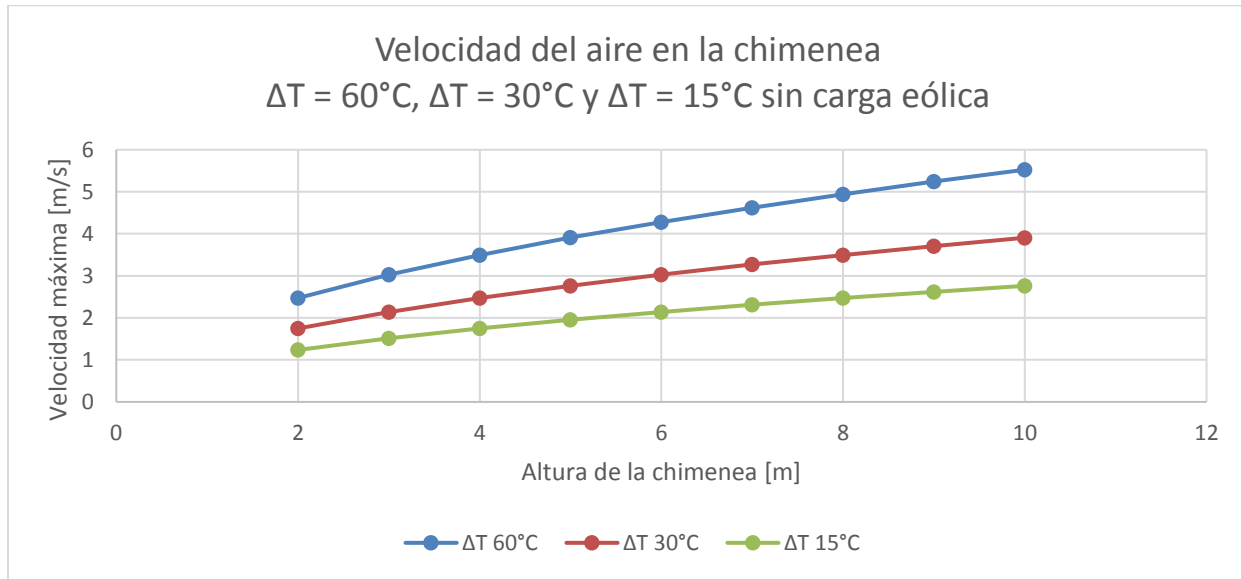
**Gráfica 4. Producción de agua anual en kg/año con diferentes  $\Delta T$  en el colector solar**

Finalmente la producción de energía eléctrica simultánea con la generación de agua del aire se calculó usando el ajuste de la diferencia de temperaturas por la extracción de la humedad del aire. La producción de energía eléctrica fue la siguiente para diferentes alturas de chimenea y temperaturas.



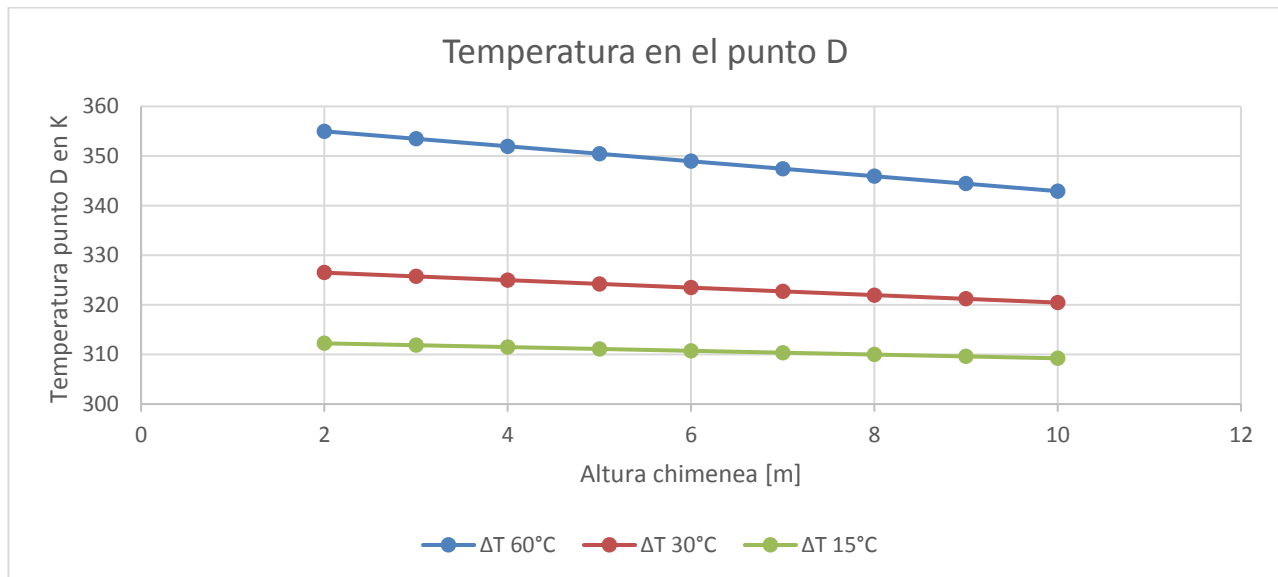
**Gráfica 5. Producción de energía eléctrica en kW con producción de agua simultánea con diferentes  $\Delta T$  en el colector solar**

En el caso de tamaños de chimenea más pequeños, se encontró que no existe una diferencia importante en la producción de energía eléctrica y no se alcanza la temperatura cercana a los 0 °C. Como se puede observar en la siguiente gráfica las velocidades no son tan importantes en estos tamaños.



**Gráfica 6. Velocidad de la chimenea solar para uso residencial respecto a la altura con  $\Delta T = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$  y  $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$**

Aunque ya se comentó anteriormente, por alturas de chimenea menores a 50 m, la caída de la temperatura no es tan considerable. La siguiente gráfica muestra la temperatura dentro de la chimenea, mostrando que no es lo suficientemente baja para lograrlo.



**Gráfica 7. Temperatura en el punto D a la entrada de la chimena respecto a la  $\Delta T$  de temperatura en el colector y la altura**

## 5. Conclusiones

---

El objetivo de la tesis fue desarrollar una solución al problema de escasez de agua en lugares con bajo flujo de aire, a través del estudio de mallas para la generación de agua a partir del aire con un proceso pasivo de recolección, es decir sin la utilización de sistemas de refrigeración o energía eléctrica. El objetivo se logra cumplir únicamente para chimeneas de gran tamaño. Como se comentó en los resultados y los cálculos termodinámicos, no es posible tener pequeños sistemas residenciales con chimeneas solares. La fuerza de flotación del aire no es lo suficientemente grande para generar velocidades importantes con chimeneas menores a 50 metros de alto. Las gotas de agua en el ambiente son mucho más chicas que las gotas de agua en la neblina, lo que imposibilita utilizar únicamente mallas para la recolección de agua del ambiente. Es necesario utilizar sistemas de refrigeración para sistemas pequeños.

Los filtros coalescentes son muy útiles para capturar gotas de agua sin la utilización de un proceso de refrigeración, la desventaja que presentan es que sus velocidades de operación están muy restringidas entre 2 m/s y 4 m/s para obtener la eficiencia máxima de recolección, lo que limita su utilización para mayores velocidades.

El proceso de captura de gotas de agua por filtros coalescentes es altamente complejo, existen más de 20 variables que afectan en la eficiencia del filtrado. Para líneas de procesos industriales donde existen flujos de aire con grandes cantidades de agua son muy útiles para recuperar el líquido, con bajas caídas de presión y bajo costo de inversión.

Con los cálculos realizados se puede observar que para tamaños de chimenea menores a 50 metros no es factible que se enfrie lo suficiente el aire para poderla condensar. La placa de absorción solar puede aumentar significativamente la eficiencia de la producción de agua y energía eléctrica. Usando un elemento absorbedor de la radiación solar, disminuye el tamaño de la chimenea, siendo uno de los elementos más costosos y más difíciles de construir. Para las chimeneas solares, se desarrollan velocidades muy altas dentro de la chimenea, por encima de los 4 m/s, por lo que las mallas no son la mejor opción para la colección de agua y es mejor la utilización de un ciclón, además de que permite aumentar significativamente su eficiencia en la recolección.

El colector solar puede ser utilizado para generar electricidad y agua al mismo tiempo. Los cálculos son muy prometedores por lo que continuar con su investigación y desarrollo podría ofrecer una alternativa importante en el futuro. En este tipo de desarrollos es necesario que tanto gobierno como empresas privadas se involucren, esto por la alta inversión requerida para su construcción.

## 6. Referencias bibliográficas

---

- [1] United Nations Department of Economic and Social Affairs. International Decade for Action ‘Water for Life’ 2005-2015. 24 noviembre 2014.  
[<http://www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml>]
- [2] Consejo Consultivo del Agua, A. C. C. (16 abril 2017)  
[<http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/diagnosticos-del-agua>]
- [3] Hoestra, A. – Breaking the Wall to Water Security, Berlin, Alemania, 18 Junio 2016.  
[<https://www.youtube.com/watch?v=NIGqbNNLEBg>]
- [4] Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Precipitación media anual C. (16 Julio 2020) [[http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm\\_PMedia.html](http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_PMedia.html)]
- [5] Caso, D. “Los estados del país que se acercan al ‘Día Cero’ del agua”. El financiero. C. (30 de enero de 2020). [<https://www.elfinanciero.com.mx/mundo/las-entidades-de-mexico-que-se-acercan-al-dia-cero-del-agua>]
- [6] Water Risk Atlas. C. (30 de enero de 2020) [<https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk>]
- [7] Iagua “La crisis del agua en México provoca que 12 millones de personas no tengan acceso a agua potable” C. (30 de enero de 2020) [<https://www.iagua.es/noticias/conacyt/crisis-agua-mexico-provoca-que-12-millones-personas-no-tengan-acceso-agua-potable>]
- [8] Brune. W. The solar spectrum. PennState Colege of Earth and Mineral Science.  
[<https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/683>] C. (25 de enero de 2020)
- [9] Schmidt, G. "Taking the measure of the greenhouse effect" NASA. Octubre 2010. C. (25 de enero de 2020) [[https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/schmidt\\_05/](https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/schmidt_05/)]
- [10] Objetivos de Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas. C. (30 de enero de 2020). [<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>]
- [11] Innovaqua. Generador de agua del aire. C. (30 de enero de 2020) [<https://innovaqua.com.mx/>]
- [12] Abreu, F. et al. “Chile: los atrapaniebla que capturan agua en Atacama, uno de los lugares más secos del mundo”. 29 mayo 2015  
[[http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/05/150521\\_atrapanieblas\\_chile\\_desierto\\_lp](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/05/150521_atrapanieblas_chile_desierto_lp)]
- [13] PALL Corporation. Coalescer Systems. C. (18 abril de 2017)  
[[https://shop.pall.com/INTERSHOP/web/WFS/PALL-PALLUS-Site/en\\_US/-/USD/ViewProduct-Start?SKU=gri78llc&CatalogID=Aerospace-Defense-Marine](https://shop.pall.com/INTERSHOP/web/WFS/PALL-PALLUS-Site/en_US/-/USD/ViewProduct-Start?SKU=gri78llc&CatalogID=Aerospace-Defense-Marine)]
- [14] Eliminadores de niebla. Materiales Textiles S. A. de C. V. C. (18 abril de 2017)  
[<http://www.matexsa.com.mx/eliminadores-de-niebla.html>]
- [15] Boegger Industrial Limited. C. (18 abril de 2017) [<http://www.demisterpads.com/demister-pad/pp-demister-pad.html>]
- [16] Dae Shin Demister [<http://www.dsdemister.com/eng/demister-pad.htm>] C. (18 abril de 2017)
- [17] Park, K. “Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting”. American Chemical Society Julio 29, 2013. [<https://doi.org/10.1021/la402409f>]
- [18] The University of Arizona, El proyecto biológico. C. (25 de enero de 2020)  
[<http://www.biologia.arizona.edu/biochemistry/tutorials/chemistry/page3.html>].
- [19] Atria Innovation. C. (25 de enero de 2020) [<https://www.atriainnovation.com/que-es-el-angulo-de-contacto/>]

- [20] Damar, M., Varanasi, K. “Electrostatically driven fog collection using space charge injection” 8 Junio 2018 [<https://doi.org/10.1126/sciadv.aao5323>]
- [21] Cengel, Y. “Thermodynamics, an Engineering Approach”. 9a Edición. Estados Unidos 2019.
- [22] Tabla de vapor saturado. Humedad relativa. C. (30 de enero de 2020) [<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Kinetic/relhum.html#c1>]
- 23 Brescher, S. “From leaves to clouds-revealing how trees emissions shape the air around us”. US Department of Energy. Phys.Org. C. (8 de febrero de 2020) [<https://phys.org/news/2018-05-cloudsrevealing-trees-emissions-air.html>]
- [24] “Droplet science: a short introduction” 4 Mayo 2018. C. (8 de febrero de 2020) [<https://international-pest-control.com/droplet-science-a-short-introduction/>]
- [25] Aerioxide TiO<sub>2</sub> P25. Evonik. C. (1 de febrero de 2020) [<https://products-re.evonik.com/lpa-productfinder/page/productsbytext/detail.html?channel=aerosil&pid=1822&lang=en>]
- [26] Solano Juvenal. “Tensiómetro digital para medir ángulos de contacto líquido-sólido”. Memorias del XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM. Sonora, México 2009. [[http://somim.org.mx/memorias/memorias2009/pdfs/A3/A3\\_42.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2009/pdfs/A3/A3_42.pdf)]
- [27] Lamb, D., y Verlinde, J. “Physics and Chemistry of Clouds”. Cambridge. Reino Unido 2011.
- [28] Ming, T. Science Direct. “Solar Chimneys” Wuhan 2016. [<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805370-6.00001-6>].
- [29] Bergerman, S. “Solar Chimney Pilot Plant Manzanares” C. (3 de agosto de 2020) [<https://www.sbp.de/en/project/solar-chimney-pilot-plant-manzanares/>]
- [30] IMCO Instituto Mexicano de la Competitividad A. C. “Análisis costo-beneficio de la instalación de paneles solares en las viviendas de la población más marginada de México”. C. (3 de agosto de 2020) [[https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2019/03/130319\\_EnergiaSolar\\_Documento.pdf](https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2019/03/130319_EnergiaSolar_Documento.pdf)]
- [31] ADRASE. Acceso de Datos de Radiación Solar de España. C. (3 de agosto de 2020) [<http://www.adrase.com/>]
- [32] Ming, T. “Thermodynamics Fundamentals”. Solar Chimney Power Plant Generating Technology. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology 2016.
- [33] Kashiwa, B. A. “The solar cyclone: A solar chimney for harvesting atmospheric water”. Los Alamos National Laboratory. Noviembre 2006. Denver, Colorado. [<https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.06.003>]
- [34] Cengel, Y. “Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico”. México 2007. 3ra Edición. P. 609.
- [35] Koulibaly, A. “Modelación de un colector solar para calentamiento de aire”. La Habana, Cuba. Diciembre 2015. C. (1 de febrero de 2020) [[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012015000300007](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000300007)]
- [36] El-Sabii, A. “Investigation of thermal performance of-double pass-flat and v-corrugated plate solar air heater”. Egipto 2011. [<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.042>].
- [37] Textoscientificos.com “Construcción de los colectores” C. (18 mayo 2020) [<http://www.textoscientificos.com/energia/calentador-solar/construccion-colectores>]
- [38] Solar Energy Corporation. Solkote. C. (11 de febrero de 2020) [<https://www.solec.org/solkote/solkote-technical-specifications/>]
- [39] World of renewables. “Intersolar 2010: Almeco-TiNOX presents highly selective absorbers and aluminum mirrors for solar thermal applications”. C. (30 de Enero de 2020)

- [[https://worldofrenewables.com/intersolar\\_2010\\_almecotinox\\_presents\\_highly\\_selective\\_absorbers/](https://worldofrenewables.com/intersolar_2010_almecotinox_presents_highly_selective_absorbers/)]
- [40] Centro de Estudios del Medio Ambiente y Energías Renovables. C. (18 abril de 2017) [<http://www.cemaer.org/energia-solar-en-mexico/>]
- [41] Miranda, M. “Con energía eólica México podría superar 7 mil MW de capacidad instalada”. Petroquimex. 25 de febrero de 2020. [<https://petroquimex.com/con-energia-eolica-mexico-podria-superar-7-mil-mw-de-capacidad-instalada/>].
- [42] Alemán-Nava, G. “Renewable energy research progress in Mexico: A review”. Elsevier. Abril 2014. [<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>]
- [43] Forbes. “Los estados con mayor potencial de energía eólica”. 9 Febrero 2016. [<https://www.forbes.com.mx/los-estados-con-mayor-potencial-en-energia-eolica/>]
- [44] Jaramillo, O. Organización Latinoamericana de Energía. 6 septiembre de 2013. C. (9 de febrero de 2020) [<https://slideplayer.es/slide/1722978/>]
- [45] Kadn, A. Research Gate.. C. (30 enero de 2020). [[https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-aerodynamic-efficiencies-of-common-types-of-wind-turbines-Source-NREL\\_fig36\\_255380937](https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-aerodynamic-efficiencies-of-common-types-of-wind-turbines-Source-NREL_fig36_255380937)]
- [46] Kozak, P. Research Gate. C. (30 de enero de 2020). [[https://www.researchgate.net/figure/The-major-wind-turbine-types-including-the-propeller-type-horizontalaxis-wind-turbine\\_fig3\\_263161316](https://www.researchgate.net/figure/The-major-wind-turbine-types-including-the-propeller-type-horizontalaxis-wind-turbine_fig3_263161316)]
- [47] Better World Solutions. “Japanese breakthrough triples wind power”. C. (30 de enero 2020) [<https://www.betterworldsolutions.eu/japanese-breakthrough-triples-wind-power/>].
- [48] Omniflow [<https://www.omniflow.pt/>]. C. (30 de enero de 2020)
- [49] Trilhos energéticos. "Omniflow - Use of Energy". C. (30 de enero de 2020) [<http://trilhosenergeticos.pt/omniflow-use-your-energy/>]
- [50] Tong, L. S. y Tang Y. S. “Boiling heat Transfer and two-phase flow” 2da Edición. CRC Press. 1997 Estados Unidos. P. 277
- [51] Chemtechfiltertech. “Two stage demister” C. (11 de febrero de 2020). [<https://www.youtube.com/watch?v=CFSmrDnlAZ0>]
- [52] Reséndiz, R. “Diseño de un sistema de captación y purificación de agua de lluvia mediante fotocatalisis solar”. UNAM. Ciudad de México. 2012.
- [53] Kooij, S. “Size distribution of droplets produced by ultrasonic nebulizers”. US National Library of Medicine. National Institutes of Health. 16 Abril 2019. [<https://doi.org/10.1038/s41598-019-42599-8>]
- [54] “WXLAA Ultrasonic Mist Maker Fogger Niebla Agua Fuente Estanque atomizador humidificador de Aire”. Amazon. C. (8 de febrero de 2020)

## Apéndices

---

### A1 Especificaciones kit motor drone

#### **Kit De Motor Brushless A2212 1000kv Drone Helices**

Modelo: A2212

KV: 1000

MAX Eficiencia: 80%

Eficacia máxima actual: 4-10A (> 75%)

Capacidad de corriente: 12A / 60

Sin corriente de carga: 10 V: 0,5 A-aplicarán a la ESC: 30A

Aplicar a la Lipo : 2 - 3S.

Aplicar a las de NiCd / NiMH: 6 - 9S.

Motor Dimensiones: 27,5 x 27 mm

Diámetro del eje: 3,17 mm

Peso: aprox 50g

#### **30A Brushless ESC:**

Salida: 30A continuo, explosión 40A hasta 10 segundos.

Voltaje de entrada: 2-4 células de batería de Li-poli o 5-12 células de batería de NiCd / NiMH

BEC: 2A / 5V (modo lineal).

Velocidad máxima: 210,000rpm de 2 polos BLM, 70,000rpm durante 6 polos BLM, 35,000RPM de 12 polos BLM. (BLM: motor sin escobillas)

Tamaño: 45 \* 24 \* 11mm / 1.8 \* 0.9 \* 0.4in

Peso: 25 g / 0,9 oz

#### **1045 Hélices:**

Diámetro del eje: 6,0 mm

ajustable por el adaptador de orificio (3 mm, 3,2 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 6,35 mm, 7.95mm)

de espesor de 9,7 mm centro:

Peso: 15 gramos / par entre ejes Recomendado: 550 mm - 700 mm

#### **A2212 Motor Brushless Dron**

Especificaciones:

1x A2212 13T 1000KV sin escobillas del motor

1x Motor establece

1x 30A ESC

1x 1045 Hélice

Salida: 30A continuo, explosión 40A hasta 10 segundos.

Voltaje de entrada: 2-4 células de batería de Li-poli o 5-12 células de batería de NiCd / NiMH

BEC: 2A / 5V (modo lineal).

Velocidad máxima: 210,000rpm de 2 polos BLM, 70,000rpm durante 6 polos BLM, 35,000RPM de 12 polos BLM. (BLM: motor sin escobillas)

## Apendice A2

### Diagrama de conexión de motor brushless al Arudino Uno

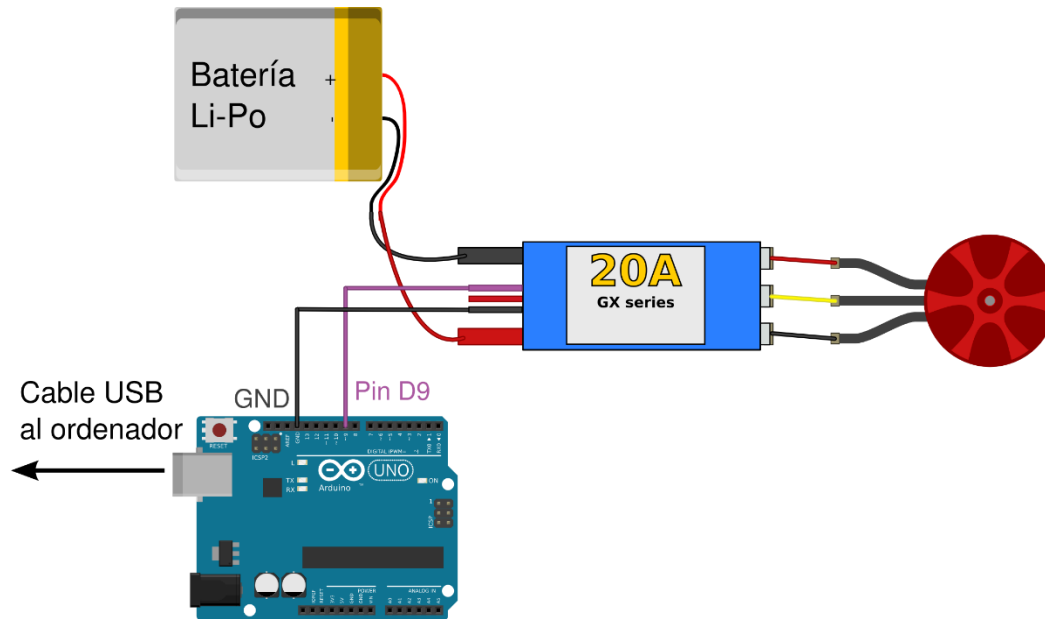


Figura Diagrama de conexión motor del drone, ESC, Arduino y baterías (en el caso de esta tesis se sustituyó las baterías por una fuente de poder)