

UNIVERSIDAD ADOLFO IBAÑEZ

TESIS DE MAGÍSTER

**Captura de agua de niebla con atrapanieblas:
Estudio de mallas basadas en superficies regladas.**

Autor:
Kevin Urtubia Cerpa

Profesor guía:
Jacques Dumais

Comité de defensa:
Tomás Trehela
Danilo Carvajal

*Tesis realizada acorde a los requerimientos para el grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Energía y Medioambiente.*

de la

Facultad de Ingeniería y Ciencias

12 de septiembre de 2024

UAI

FACULTAD DE
INGENIERÍA Y
CIENCIAS

*Dedicado a mi madre y padre,
Lorena y Sergio.
Angela, mi compañera.
Mi perrita, Mandy.
El bebé que viene en camino.
El agradecimiento como una praxis.*

Agradecimientos

Hoy, 18 de agosto de 2024, en el día de mi cumpleaños número 26, celebro no solo un año más de vida, sino también la culminación de este escrito, que ha sido un regalo que me he otorgado a mí mismo tras dos años de dedicación. Este día me ha llevado a reflexionar sobre el camino recorrido, y quiero comenzar agradeciendo a ese niño, Kevin Urtubia, que, a pesar de las adversidades, logró llegar a este punto crucial, donde se encuentra a las puertas de defender su tesis de magíster.

La vida nos enfrenta constantemente a desafíos de diversa índole, y aunque a veces nos cueste, debemos apoyarnos en los demás. A lo largo de este viaje, he tenido la suerte de contar con personas que han estado a mi lado, acompañándome y haciendo la vida un poco más llevadera. A mi madre, Lorena Cerpa, quien es la persona que más quiero en este mundo, le debo más de lo que las palabras pueden expresar. Ella siempre ha hecho todo lo posible para que tuviera un futuro mejor, para que no me faltara un plato de comida, y para que pudiera estudiar en la universidad.

Por otro lado, quiero expresar mi gratitud a mi padre, Sergio Gonzales. Aunque nuestra relación no siempre ha sido sencilla, con el tiempo he aprendido a valorar su paciencia, su protección y las enseñanzas que me ha dado. Los años me han permitido comprenderlo mejor.

También quiero agradecer a los muchos profesores que han confiado en mí a lo largo de mi vida académica. En particular, al profesor Luis Caminos, quien siempre tuvo una palabra de aliento, una sonrisa, y me mostró el fascinante mundo de los atrapanieblas. Asimismo, agradezco profundamente a mi profesor guía, Jacques Dumais. Es una persona que admiro por su vasto conocimiento y experiencia en el ámbito académico, y por su habilidad para decir la palabra justa o tomar la decisión adecuada en momentos difíciles. Agradezco sinceramente su apoyo técnico, emocional y económico durante estos dos años.

Además, quiero expresar mi agradecimiento a mis psicólogas, Elissa Cofré y Constanza Rivas, por orientarme y darme herramientas valiosas a lo largo de mi terapia. De igual manera, estoy inmensamente agradecido con mi compañera de vida, Ángela Miranda, quien me ha acompañado en este y otros procesos a lo largo de estos meses, brindándome su incondicional comprensión y cariño, dándome las fuerzas necesarias para llegar hasta aquí.

Finalmente, solo me queda dar las gracias a todas aquellas personas que han estado a mi lado. Aunque mantener relaciones a lo largo del tiempo es complejo, los recuerdos permanecen, y siempre es posible regresar a esos lugares o momentos simplemente evocándolos en nuestra mente. Por ello, quiero dejar este extracto:

*"Time is an illusion that helps things make sense
So we are always living in the present tense
It seems unforgiving when a good thing ends
But you and I will always be back then
You and I will always be back then"*

— Rebecca Sugar

Índice general

Resumen	VII
Abstract	IX
Índice de tablas	X
Índice de figuras	XII
Abreviaciones	XIII
Nomenclatura	XV
Alfabeto griego	XVII
1 Introducción	1
1.1 Crisis hídrica	1
1.2 Atrapanieblas	3
1.3 Niebla	5
1.4 Calidad y uso del agua de niebla	7
1.5 Metas cuantitativas para la captación de niebla	7
2 Estado del arte	9
2.1 Generalidades atrapanieblas	9
2.2 Atrapanieblas V-shaped	15
2.3 Filtros de Placas Paralelas Onduladas	18
2.4 Superficies Regladas	22
3 Definición del problema, hipótesis y objetivos	23
4 Metodología y materiales	25
4.1 Consideraciones generales	25
4.2 Experimentos atrapanieblas V-Shaped	29
4.3 Experimentos atrapanieblas basados en Superficies Regladas (SR) en 2.5D	33
5 Resultados y discusión	37
5.1 Comentarios iniciales sobre metodología experimental	37
5.2 Resultados y discusión atrapanieblas V-shaped	39
5.3 Resultados y discusión atrapanieblas SR en 2.5D	43
6 Conclusiones	51
Referencias	55

A Complementos Estado del Arte y Marco Teórico.	61
B Complementos Metodología	63
C Complementos Resultados	73
D Experimentos extra	79

UNIVERSIDAD ADOLFO IBAÑEZ

Resumen

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Energía y Medioambiente.

Captura de agua de niebla con atrapanieblas: Estudio de mallas basadas en superficies regladas.

por Kevin Urtubia Cerpa

Existe una cantidad considerable de zonas en el mundo que experimentan una crisis hídrica latente, la cual se pronostica que aumentará a lo largo de los años. Los atrapanieblas son una tecnología sustentable diseñada para obtener agua de la niebla en zonas áridas, lo que los convierte en una posible solución a la crisis hídrica. Este proyecto tiene como objetivo incrementar recolección de agua de los atrapanieblas basados en superficies regladas existentes (modelos de arpa multicapa) mediante la implementación de mallas en forma de V (V-Shaped) y Mallas Paralelas Onduladas (MPO).

Se realizaron dos grandes experimentos, uno para cada tipo de malla, bajo condiciones de laboratorio utilizando pequeños prototipos en un túnel de niebla, el cual genera niebla artificial. Los resultados de estos experimentos indicaron que un modelo en forma de V con hilos verticales en ángulos de aproximadamente 30° presenta un beneficio en la recolección de agua del 14.6 % y 14.8 % en comparación con los prototipos de referencia. Por otro lado, el modelo MPO muestra una ventaja de aproximadamente 25.5 % en la recolección de agua.

Asimismo, se concluye que los modelos basados en superficies regladas disminuyen la recolección de agua en proporción cuadrática con el aumento de la velocidad del viento, pero incrementan linealmente su recolección con el número de hilos.

Estos hallazgos son relevantes ya que podrían mejorar significativamente la eficiencia de los atrapanieblas, haciéndolos más viables y efectivos para su implementación en regiones áridas. La mejora en la tecnología de recolección de agua de niebla puede contribuir sustancialmente a la sostenibilidad del recurso hídrico.

Palabras clave: Atrapanieblas, Recolección de Agua, Diseño de Arpa, Superficies Regladas, Diseño de Malla.

UNIVERSIDAD ADOLFO IBAÑEZ

Abstract

Faculty of Engineering and Science

Master of Science in Engineering, concentration energy and environment

Fog Water Capture with Fog Collectors: Study of Meshes Based on Ruled Surfaces

by Kevin Urtubia Cerpa

There are a significant number of regions in the world experiencing a latent water crisis, which is predicted to worsen over the years. Fog collectors are a sustainable technology designed to harvest water from fog in arid areas, offering a potential solution to the water crisis. This project aims to increase the water harvesting efficiency of existing fog collectors based on ruled surfaces (multi-layer harp models) by implementing V-Shaped meshes and Wavy Parallel Meshes (MPO).

Two major experiments were conducted, one for each type of mesh, under laboratory conditions using small prototypes in a fog tunnel that generates artificial fog. The results from these experiments indicated that a V-Shaped model with vertical threads at angles of approximately 30° provides a water collection benefit of 14.6 % and 14.8 % compared to the reference prototypes. On the other hand, the MPO model shows an improvement of approximately 25.5 % in water collection.

Additionally, we observe that prototypes based on ruled surfaces decrease water collection quadratically with increasing wind speed, but increase their collection linearly with the number of threads.

These findings are significant as they could greatly enhance the efficiency of fog collectors, making them more viable and effective for deployment in arid regions. Improvements in fog water harvesting technology can substantially contribute to water resource sustainability.

Keywords: Fog Collectors, Water Harvesting, Harp Design, Ruled Surfaces, Mesh Design.

Índice de tablas

1.1	Clasificación de la niebla.	5
4.1	Parámetros experimento asociado a modelos V-Shaped.	30
4.2	Parámetros asociados al ángulo de un atrapanieblas V-Shaped	30
4.3	Detalle nomenclatura de prototipos en experimento asociado a atrapanieblas V-Shaped	32
5.1	Cálculo coeficiente de variación para resultados obtenidos en experimento de modelos V-shaped.	38
5.2	Valores promedio del coeficiente de variación para modelos SR en 2.5D.	38
5.3	Cálculo de agua total recolectada por hilo.	43
5.4	Valor de constantes experimentales de expresión matemática propuesta.	48
B.1	Detalles de experimentos de calibración de balanza.	68
B.2	Resultados promedios y tiempo de lectura corregido en la balanza.	69
C.1	Resultados en detalle de cálculo de Coeficiente de variación para distintos modelos de atrapanieblas SR y velocidades del flujo.	73
C.2	Cálculo de R^2 para prototipos SR	75
D.1	Parámetros geométricos de cada modelo, del flujo y consideraciones varias para realización de experimento extra asociado a modelo MPO.	81

Índice de figuras

1.1	Efectos en el ciclo del agua debido a cambios medioambientales.	2
1.2	Número de meses por año en los cuales se excedió la escasez de agua del 100 %	2
1.3	Monitor de sequía en Chile.	3
1.4	Atrapanieblas.	4
1.5	Recolección de niebla en distintas zonas del mundo por medio de <i>Standard Fog Collector</i> y <i>Large Fog Collector</i>	5
1.6	Lugares con potencial para instalación de atrapanieblas	6
1.7	Estimación de recolección de agua de niebla para distintos grupos de atrapanieblas.	7
2.1	Fenómenos físicos en la captura de niebla.	10
2.2	Tabla resumen de coeficientes de arrastre para formas típicas en atrapanieblas.	11
2.3	Malla tipo arpa con flujo de niebla ortogonal.	12
2.4	Fallas estructurales típicas en atrapanieblas.	15
2.5	Esquema simplificado de un atrapanieblas V-shaped.	16
2.6	Resultados para un atrapanieblas V-Shape por De la jara 2012.	17
2.7	Resultados de eficiencia de recolección de agua y fuerza sobre la malla en modelos V-shape.	18
2.8	Modelo 3D filtro de placas paralelas.	18
2.9	Tipos de separadores con distintas modificaciones en búsqueda de aumentar la eficiencia de recolección y disminuir la pérdida de presión a través del filtro.	21
2.10	Esquema generalizado de una superficie reglada y ejemplo arquitectónico.	22
3.1	Vista superior y frontal de un atrapanieblas plano, V-Shaped, V-Shaped extendido y Mallas Paralelas Onduladas (MPO).	24
4.1	Detalles máquina de bobinado de hilo.	26
4.2	Detalles túnel de niebla.	27
4.3	Software balanza Kern.	28
4.4	Comportamiento estándar de atrapanieblas con respecto al agua recolectada en el tiempo.	29
4.5	Esquemas de un atrapanieblas V-Shaped.	30
4.6	Vistas de prototipos plano y V-Shaped fabricados	31
4.7	Estructura base y de anclaje de prototipos en tunel de niebla.	32
4.8	Esquemas detallados de vista en planta de prototipos MH, MZZ y MPO para distinto número de filamentos.	33
4.9	Esquema de montaje de filamentos para la fabricación de prototipos y vistas de prototipos MPO fabricados.	34

4.10	Estructura base de experimentación y canaleta en detalle.	35
5.1	Agua recolectada en el tiempo para modelos SR.	37
5.2	Agua total recolectada en experimento N°1 para ángulos específicos. . .	40
5.3	Tendencias de la recolección total de agua en experimento N°1.	41
5.4	Comparación de tendencias de modelo V-Shaped con hilos verticales e hilos horizontales.	42
5.5	Relación lineal entre el número de hilos y el agua recolectada en mo- delos V-Shaped.	43
5.6	Recolección total de agua para los distintos modelos y número de fi- lamentos.	44
5.7	Variación del agua recolectada total con respecto a la velocidad del flujo para distintos modelos y número de hilos.	45
5.8	Variación del agua total recolectada con respecto al número de hilos para distintos modelos y velocidad del flujo.	46
5.9	Mapas de color de diferencia porcentual del agua recolectada total del modelo MPO con respecto a los modelos MZZ y MH.	47
5.10	Mapa de color de la diferencia porcentual de recolección total de agua del modelo MZZ con respecto a modelo MH.	48
5.11	Comparación teórica experimental atrapanieblas SR.	49
5.12	Mapa de calor y curvas de nivel del agua recolectada total en relación con el número de hilos y la velocidad del flujo.	50
A.1	Resultados estudio químico efectuado en muestras de agua recolecta- da por atrapanieblas en la localidad del Tofo, La Higuera	61
A.2	Metas cuantitativas para distintos niveles de costos en un proyecto de atrapanieblas.	62
A.3	Comparación de costos entre LFC y atrapanieblas V-Shape.	62
B.1	Diagrama electrónico para máquina de bobinado de hilo.	67
B.2	Gráfica de velocidad de flujo en la salida del túnel de niebla con res- pecto a la frecuencia eléctrica del motor del equipo.	68
B.3	Plano conjunto del sistema de anclaje de prototipos V-Shape.	70
B.4	Plano detalle del sistema de anclaje de prototipos V-Shape.	70
B.5	Plano detalle de canaleta para capturar agua y fijar atrapanieblas SR. .	71
C.1	Proyección lineal de la recolección total de agua con respecto al núme- ro de hilos para cada modelo y velocidad del flujo.	76
C.2	Proyección cuadrática de la recolección total de agua con respecto a la velocidad para cada modelo y número de hilos.	77
D.1	Vistas principales de prototipos fabricados para experimento asocia- do a modelo MPO.	79
D.2	Esquemas detallados para atrapanieblas MPO.	80
D.3	Resultados de experimento extra asociado a modelo MPO.	81
D.4	Diferencia absoluta entre modelos estudiados(MPO,PV Y PR)	82

Abreviaciones

ACE	Aerodynamics Collection Efficiency
AT	Agua Total
BWR	Boiling Water Reactor
CV	Coeficiente de Variación
LFC	Large Fog Collector
LWC	Liquid Water Content
MH	MultiHarp
MPO	Mallas Paralelas Onduladas
MZZ	Mini ZigZag
NCh	Norma Chilena
ONU	Organización de las Naciones Unidas
P	Plano
PLA	PolyLactic Acid
PPO	Placas Paralelas Onduladas
PR	Plano Rashel
PV	Plano Vertical
SFC	Standard Fog Collector
SR	Superficies Regladas
V	V-shaped
h	horizontal
pH	potencial de Hidrógeno
v	vertical

Nomenclatura

A	Área frontal atrapanieblas
A_{∞}	Área de flujo de niebla libre que pasa por la malla
A_{op}	Área de las aberturas de la malla
A_t	Valor observado
B	Largo canal de drenaje
C	Ancho canal de drenaje
C_0	Coeficiente de caída de presión
C_{pb}	Caída de presión en el primer codo
C_d	Coeficiente de arrastre
D	Separación hilos centro-centro
E	Longitud abertura placa
F	Distancia de separación entre placa con abertura y canal de drenaje
F_{Ad}	Fuerza de adhesión
F_{CAH}	Fuerza de sujeción
F_{Drag}	Fuerza de arrastre
F_{Grav}	Fuerza de gravedad
F_t	Valor pronosticado
L_e	Longitud extra
L_o	Longitud total hilo
N_c	Número de capas de malla
Pr	Profundidad total del filtro PPO
Re	Número de Reynolds
St	Número de Stokes
$\dot{W}_{coll}$	Flujo másico de agua recolectada por unidad de área en un atrapanieblas
a	Separación entre placas en prototipos SR
b	Espesor placa en prototipos SR
c	Separación entre agujeros en placa de prototipos SR
d	Diámetro filamentos
$d_{\infty}(r_g)$	Tramo de líneas de corriente cuyas gotas de radio r_g serán interceptadas por el hilo directamente aguas abajo
f	Relación de flujo libre
f_m	Factor de mezclado
$m(r_g)$	Masa provenientes de gotas de radio r_g
n	Número de agujeros en placa de prototipos SR
n_{cd}	Número de codos en filtros PPO
n_d	Número de datos de la muestra
n_h	Número de hilos prototipo
r_g	Radio de una gota de fluido
s	Solidez
t	Tiempo
u	Velocidad promedio a través de la malla
u_{∞}	Velocidad del flujo imperturbado

w_{coll}	Agua total recolectada en un periodo de tiempo
w_h	Agua total recolectada por un hilo en un periodo de tiempo

Alfabeto griego

α	Ángulo del codo de un filtro PPO
β	Ángulo de incidencia de la niebla
χ	Fracción Incidente
δ	Espaciado entre placas de filtros PPO
η_0	Eficiencia global de separación de gotas en un filtro PPO
η_{ACE}	Eficiencia de recolección aerodinámica
η_B	Eficiencia de separación de gotas por etapa o codo
η_{Capt}	Eficiencia de captación de gotas
η_{Drain}	Eficiencia de drenaje
η_{tot}	Eficiencia total de recolección de agua
γ_w	Tensión superficial del agua
λ	Longitud de onda
μ_{air}	Viscosidad dinámica del aire
ϕ	Fracción Filtrada
ρ_{air}	Densidad del aire
ρ_w	Densidad del agua
θ	Ángulo prototipo V-shape
θ_{adv}	Avance del ángulo de contacto
θ_{rec}	Retroceso del ángulo de contacto

Capítulo 1

Introducción

1.1. Crisis hídrica

El aumento de los gases de efecto invernadero (CO_2 , vapor de agua, CH_4 , etc.) ha provocado un incremento en la temperatura media global ([Melillo, Richmond, y Yohe, 2014](#); [Neelin, 2011](#)). Estos gases (junto con las nubes) en una proporción normal permiten la vida en el planeta, pues acumulan la radiación infrarroja que emite la tierra, manteniendo una temperatura ideal para la vida. El problema radica en que, desde la revolución industrial, estos gases presentan un alto crecimiento, que en algunos casos es acelerado, promoviendo un aumento de 1°C en la temperatura media global a la fecha ([Neelin, 2011](#)).

Por otro lado, la disminución de las precipitaciones aumenta la probabilidad de sequías y, a su vez, el incremento de las mismas podría provocar fenómenos indeseados como inundaciones, aluviones, problemas en la agricultura, etc ([Douville y cols., 2021](#)). Si se consideran las precipitaciones promedio entre los años 1891–2019, se observa una disminución en Chile, Brasil, gran parte de África y el sur de Europa, mientras que se aprecian aumentos en Argentina, el norte de Europa y Asia ([Caretta y cols., 2022](#)). Además, según el mecanismo *Wet-get-wetter*, se espera que las regiones donde históricamente las precipitaciones han sido abundantes, continúen recibiendo mayores cantidades de lluvia en el futuro, mientras que las regiones donde la evaporación excede las precipitaciones, serán más áridas ([Neelin y cols., 2022](#)).

Dado lo anterior, es importante destacar que estos efectos de disminución en las precipitaciones y aumento de la temperatura media global afectan en gran medida al ciclo del agua (Figura 1.1). Estos factores son los principales conductores climáticos y tienen una gran influencia en la disminución de la nieve acumulada en las montañas o glaciares, reduciendo el caudal de los ríos, la humedad del suelo y el agua subterránea, lo que incrementa la probabilidad de sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas, con importantes efectos socioeconómicos y medioambientales. Asimismo, se observa en la figura 1.2 que existe una gran cantidad de zonas en el mundo donde al menos 6 de los 12 meses del año presentan una sequía que excede el 100 % del agua dulce disponible mensualmente para la región.

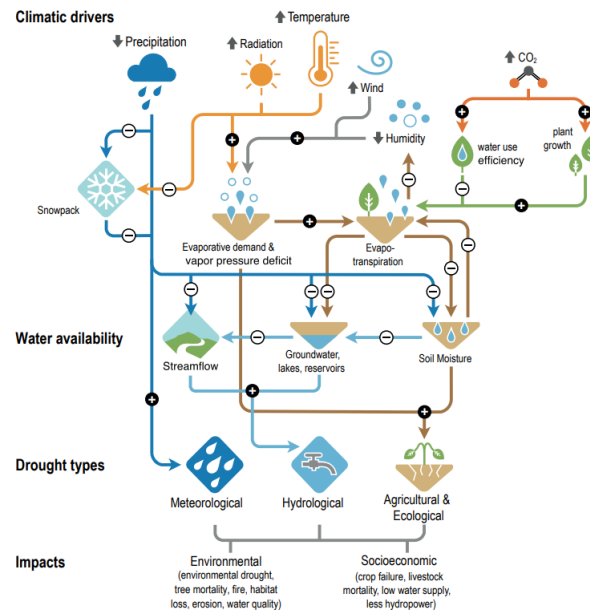


FIGURA 1.1: Efectos en el ciclo del agua por aumento de la temperatura, disminución de las precipitaciones y aumento del CO₂ (Douville y cols., 2021).

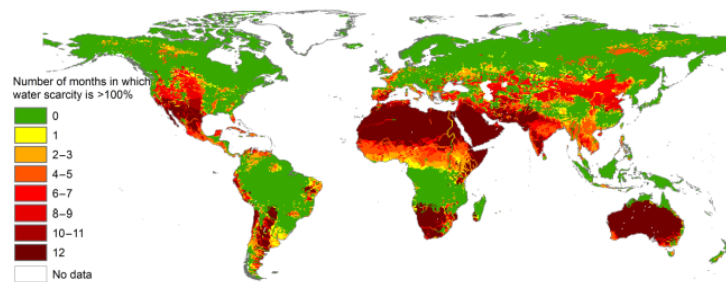


FIGURA 1.2: Número de meses por año en los cuales se excedió la escasez de agua del 100 %. Promedio entre 1996 y 2005 (Mekonnen y Hoekstra, 2016).

A nivel nacional, se observa un aumento de la temperatura media, con una tendencia de 0.15 °C/década y una disminución de las precipitaciones con una tendencia de -28 mm/década, siendo el 2021 el año más seco desde 1998 y el segundo año más seco desde 1961 (Gutiérrez, Villarroel, Aravena, Vilches, y Vázquez, 2022). Esto se refleja en los niveles de sequía en Chile en distintos periodos (Figura 1.3), destacando el periodo entre 2018 y 2021 con una sequía generalizada en gran parte del país, especialmente en el centro de Chile, con niveles extremos.

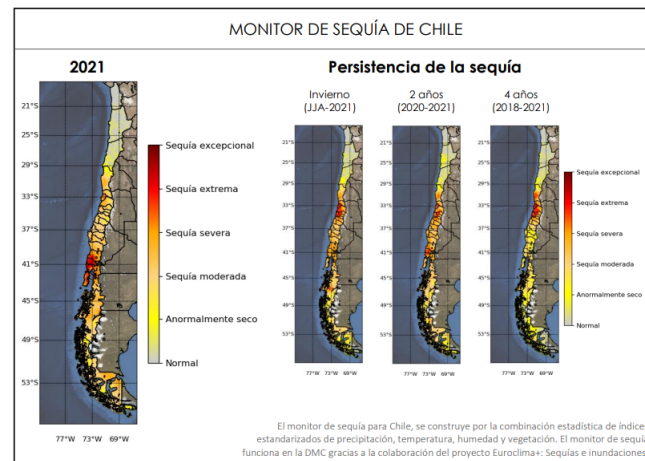


FIGURA 1.3: Monitor de sequía en Chile. Se observa la persistencia de la sequía en periodos cortos de 1 a 4 años (Gutiérrez y cols., 2022).

En general, se observa que en Chile y en gran parte del mundo existe una creciente sequía que se debe combatir. Esto motiva la realización de proyectos sustentables que promuevan la obtención de agua dulce para diversas aplicaciones (regadío, consumo humano, etc.) en las zonas afectadas y por ello, proyectos como los atrapanieblas pueden contribuir a mitigar esta problemática general. Sin embargo, para abordar este desafío latente, es crucial un desarrollo conjunto de esta y otras tecnologías innovadoras.

1.2. Atrapanieblas

En la naturaleza, diversos seres vivos aprovechan la niebla para obtener agua y sobrevivir, como el escarabajo del desierto de Namib (Hamilton y Seely, 1976), la planta *Cotula fallax* (Andrews, Eccles, Schofield, y Badyal, 2011) y *Tillandsia landbeckii* en el desierto de Atacama al norte de Chile (Rundel y cols., 1997). Inspirados en estos ejemplos naturales, los atrapanieblas son una tecnología que permite obtener agua para el consumo humano, especialmente en zonas áridas donde el recurso es escaso, destacando que las mejores zonas para implementar esta tecnología son las que tienen una gran cantidad de eventos de niebla durante el año (Schemenauer y Cereceda, 1994). Los atrapanieblas se construyen principalmente con una estructura metálica o de madera, apoyada con tensores, la cual soporta una malla (usualmente de tipo Raschel, materiales metálicos inoxidables, hilos de nylon, materiales compuestos, etc.) que permite el paso de flujo de niebla de advección o, en algunos casos, niebla de montaña (ver sección 1.3). La malla captura las pequeñas gotas contenidas en la niebla, que luego son depositadas por efecto de la gravedad en una canaleta y finalmente en un estanque de almacenamiento (Figura 1.4).

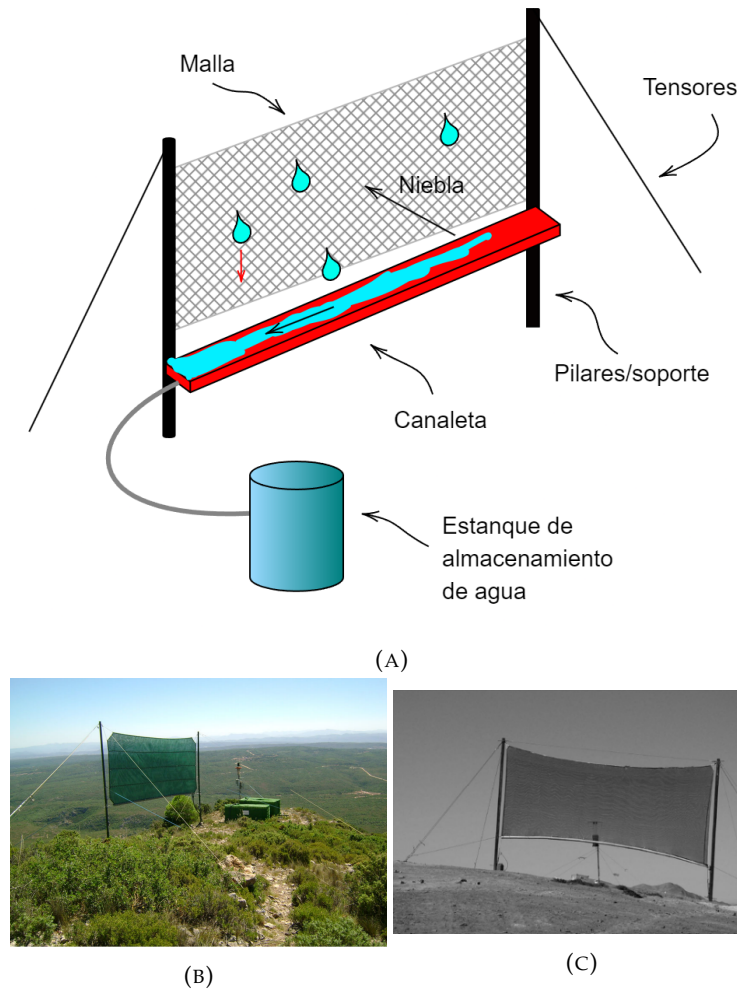


FIGURA 1.4: A) Esquema simplificado de un atrapanieblas típico. B) Atrapaniebla de 18 m² emplazado en el Monte Machos en Valencia, España (Klemm y cols., 2012). C) Atrapaniebla con malla Raschel doble en el desierto de Atacama, Chile (Rivera, 2011).

En cuanto a la cantidad de agua que se puede recolectar, en El Tofo, una zona costera de Chile, durante los años 90 se instalaron 50 atrapanieblas, cada uno con una malla doble de polipropileno de área de 48 m², que entregaban 3 l/m²/día de agua fresca, sumando un total promedio de 11000 l/día (Schemenauer y Cereceda, 1994). Por otro lado, un proyecto en dos localidades de Sudáfrica, se lograba recolectar en promedio 1.021 l/m²/día y 4.6 l/m²/día y a pesar de que en promedio las recaudaciones de agua eran bajas, habían días donde se recolectaban como máximo 3800 litros (Olivier y de Rautenbach, 2002). En Perú, en un proyecto en las Lomas de Atiquipa, se instalaron 28 atrapanieblas con un rendimiento promedio de 21.5 l/m²/día, presentando un alto rendimiento debido al relieve, orientación y cercanía al mar de la zona (Molina, Guevara, y cols., 2009). Finalmente, una implementación reciente de 10 atrapanieblas de 1 m² en Valle Cruceños en Bolivia, considerada una zona con alta escasez de agua, recolectó en promedio 6.01 l/m²/día, con máximos de 8.93 l/m²/día (Castelli y cols., 2023). Así existen muchos más proyectos que se pueden revisar de la literatura, siendo Chile un país donde se observan altos rendimientos (Figura 1.5).

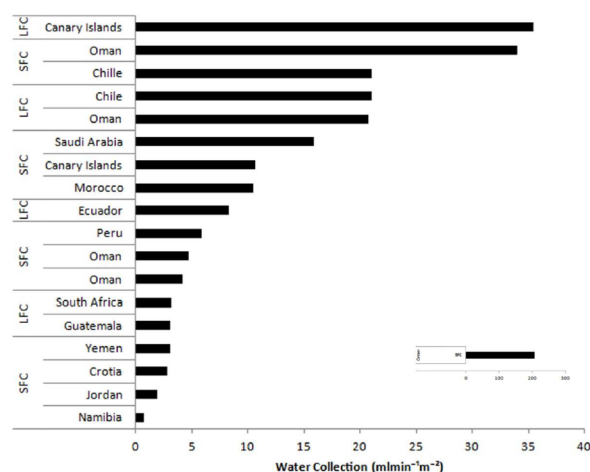


FIGURA 1.5: Recolección de niebla en distintas zonas del mundo por medio de *Standard Fog Collector* (SFC, atrapanieblas de $1 \times 1 \text{ m}^2$ que usualmente se usa para realizar estudios.) y *Large Fog Collector* (LFC, grandes atrapanieblas comunes.). Notar que las unidades se encuentran en $\text{ml}/\text{min} \cdot \text{m}^2$ (Azeem, 2021).

1.3. Niebla

Como este proyecto está enfocado en realizar modificaciones geométricas en mallas de atrapanieblas para mejorar su eficiencia de recolección de agua de niebla aumentando los niveles de competitividad de los mismos y así aportando a resolver la problemática de escasez hídrica, es importante conocer el recurso natural con el cual se estará trabajando. La niebla se define como una nube que se encuentra a nivel de superficie permitiendo una visibilidad horizontal de menos de 1000 m (Sampurno Bruijnzeel, Eugster, y Burkard, 2006), tal como se muestra en la Tabla 1.1. Otra característica importante de la niebla es el tamaño de las gotas, que suelen tener dimensiones entre 5 y $50 \mu\text{m}$ en aire saturado, aunque pueden alcanzar valores mayores a 0.2 mm debido a la coalescencia de las gotas por el viento, promoviendo la precipitación de ellas por su tamaño (Glickman, 2000; Curić y Janc, 1995).

TABLA 1.1: Clasificación de la niebla en función a los niveles de visibilidad considerando un punto de medición dentro de la misma. Los datos fueron obtenidos por mediciones hechas en Pico del Este, Puerto Rico (Sampurno Bruijnzeel y cols., 2006).

Visibilidad (m)	Clase	LWC (ml/m^3)
<100	Niebla muy densa	81.9
100-250	Niebla densa	85.4
251-500	Niebla media	22.6
501-1000	Niebla ligera	12.6
1001-2000	Neblina	4.1
>2000	No niebla	-

Otra forma de clasificar la niebla es según su ubicación geográfica y por consiguiente, en la forma en que se produce la niebla. Esta se genera por un efecto de condensación del vapor de agua presente a niveles de superficie formando pequeñas gotas

o cristales que no precipitan por su tamaño. La formación de gotas o cristales depende de la temperatura; si el proceso se realiza a una temperatura igual o inferior a la de congelación del agua, se formarán cristales en un proceso de sublimación inversa. Más aún, para que ocurra este proceso de condensación, los niveles de vapor de agua deben ser altos y debe existir un mecanismo que permita la saturación de la masa de aire, esto se logra disminuyendo la temperatura o aumentando los niveles de humedad (Neelin, 2011).

Entonces, ya definido el fenómeno de formación, es posible clasificar la niebla en función del lugar de generación o el tipo de proceso por el cual se origina, considerando que solo se enfocará en las nieblas no estáticas, ya que estas deben movilizarse a cierta velocidad para favorecer la recolección inercial de las gotas mediante la malla de los atrapanieblas. La primera es la niebla de advección que se genera en primavera o inicios de verano, producto de corrientes de niebla provenientes del mar gracias al rápido calentamiento de la tierra (baja inercia térmica) con respecto al océano, en otras palabras, como la tierra está a una mayor temperatura, el aire a su alrededor se encuentra a una menor densidad que el del océano, provocando movimientos advectivos por la diferencia de presión. La segunda es la niebla orográfica (o de montaña), formada por el enfriamiento adiabático de una masa de aire húmeda que sube por la presencia de una montaña, provocando la saturación (Sampurno Bruijnzeel y cols., 2006).

Ahora bien, la Figura 1.6a muestra localizaciones potenciales para la instalación de atrapanieblas, pues presentan alta calidad de niebla. Estas zonas, también, comparten una alta escasez de agua (Veáse Fig. 1.2), siendo razones importantes para promover la instalación de esta tecnología y realizar un aporte frente a esta problemática. Específicamente, en la figura 1.6b se cuantifica la calidad de niebla en distintas partes del mundo.

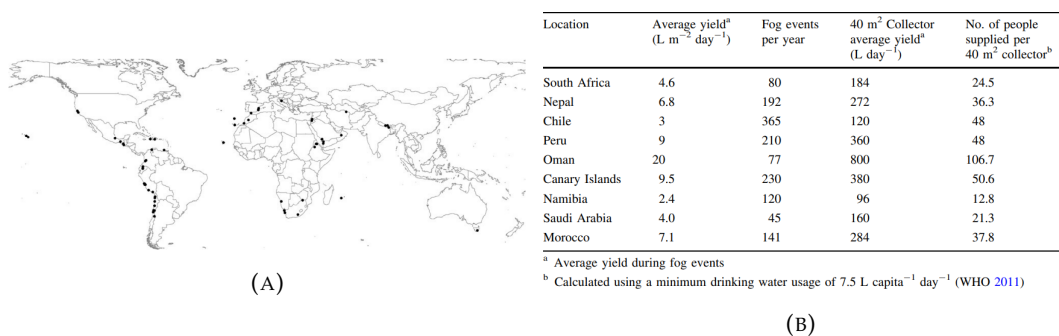


FIGURA 1.6: A) Lugares con potencial para instalación de atrapanieblas en el mundo (Klemm y cols., 2012). B) Tabla resumen de agua de niebla potencial para ser capturada en lugares específicos (Domen y cols., 2014).

A nivel nacional, el norte de Chile es privilegiado por la presencia de la niebla llamada Camanchaca, con rangos de *Liquid Water Content* (LWC) entre 0.22 y 0.73 g/m³ (Schemenauer y Joe, 1989), lo que representa una gran oportunidad para la instalación de atrapanieblas en el país. Otra investigación muestra el estudio de 6 estaciones en distintas zonas del país, donde es posible apreciar que si se instalan 100 atrapanieblas tradicionales en Alto Patache o Cerro Moreno en función de lo obtenido por un SFC, es posible obtener aproximadamente 30000 m³/año o 0.13 l/s, siendo una cantidad no menor (Fig. 1.7) (Larrain y cols., 2002). Notar que en Chile la cosecha

de agua de niebla se concentra entre los meses de septiembre y marzo, con un peak en el mes de noviembre, por lo cual, es necesaria la inclusión de estanques de almacenamiento. Por último, destacar que el periodo de obtención de agua de niebla es opuesto al de la posible agua de lluvia que se puede recolectar, ya que esta se concentran entre marzo y septiembre con peak en junio (Cereceda, Hernández, Leiva, y de Dios Rivera, 2014).

Estimated collection data according to yields obtained at the six fog stations in Northern Chile					
Daily presumed collection data according to Fog collector number using 40 m ² collection net (l)					
Site	SFC	1 Collector	20 Collectors	50 Collectors	100 Collectors
Alto Patache	7.81	312.4	6248	15,620	31,240
Cerro Guatalaya	0.93	37.2	744	1860	3720
Cerro Moreno	8.26	330.4	6608	16,520	33,040
Paposo	3.36	134.4	2688	6720	13,440
Falda Verde	1.43	57.2	1144	2860	5720
El Tofo	2.98	119.2	2384	5960	11,920

FIGURA 1.7: Estimación de recolección de agua de niebla para distintos grupos de atrapanieblas (1,20,50 y 100) basados en estudios hechos por medio de SFC en distintos periodos en las localizaciones específicas en Chile (Larrain y cols., 2002).

1.4. Calidad y uso del agua de niebla

El agua de niebla es apta para beber, ya que generalmente cumple con los parámetros de la norma NCh 409 (INN, 2005) para calidad del agua de consumo humano, siendo el pH el único componente que usualmente se encuentra fuera de norma, indicando ciertos niveles de acidez (Fig. A.1). Aun así, por si solos no son dañinos para el cuerpo humano; ciertos frutos cítricos presentan niveles de pH inferiores a 3. No obstante, siempre es necesario realizar pruebas de calidad del agua recolectada en una localización específica, frente a posibles cambios en su composición e incluso la presencia de microorganismos que puedan afectar la salud. Notar que para regadío, los niveles de pH presentes en el agua de niebla incluso pueden ser beneficiosos para algunas plantas (Cereceda y cols., 2014).

Los usos del agua de niebla incluyen: agrícola, minero, agua para uso doméstico (bebida y otros), bebederos para animales, uso agroindustrial o como materia prima para otros productos, usos turísticos y recreacionales, y recuperación de la flora nacional. En Chile, la población con mayor beneficio del agua de niebla es la del Norte Grande y Norte Chico debido a la gran presencia del recurso en la zona (Cereceda y cols., 2014).

1.5. Metas cuantitativas para la captación de niebla

Para establecer el potencial económico de la captación de niebla, se presentan las siguientes metas cuantitativas que promueven el uso de este recurso como una fuente viable de agua potable (Cereceda y cols., 2014):

- Costo máximo por área del atrapanieblas.
- Precio máximo del agua potable.
- Mínima tasa de captación promedio.

- Mínima tasa de eficiencia de captación.

Cada una de estas metas presentan valores establecidos (Fig. A.2) bajo ciertos supuestos que permiten realizar los cálculos, tales como considerar que el flujo de niebla disponible es de $40 \text{ l/m}^2/\text{día}$, el precio del agua de niebla debe ser como mínimo de 3 USD/m^3 , costo fijo anual de mantención de 1000 USD por proyecto, más 160 USD/LFC y una tasa de captación de $8 \text{ l/m}^2/\text{día}$ promedio al año (Cereceda y cols., 2014).

Entonces, dados estos valores mínimos que permiten un proyecto de atrapanieblas viable, es posible mejorar, por un lado, la localización geográfica en la cual se posicionan este tipo de proyectos maximizando el agua disponible para su recolección y por otro lado, mejorar la eficiencia de recolección de agua para así lograr superar la captación mínima promedio independiente de la posición geográfica en la cual se posicione la tecnología y así disminuir el precio por unidad de volumen y lograr una mayor competitividad. En lo que respecta a esta tesis se busca abordar el segundo punto mencionado: **Aumentar la tasa de recolección de agua de niebla con nuevas implementaciones de mallas en atrapanieblas** y realizar un aporte al objetivo 6 de agenda 2030 de la ONU que busca Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (Organización de las Naciones Unidas, 2018).

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Generalidades atrapanieblas

A lo largo de los años se ha estudiado extensamente la tecnología de los atrapanieblas destacando dos áreas fundamentales de estudio. La primera de ellas se basa en el diseño de los colectores de niebla y la segunda, en el estudio del posicionamiento geográfico de los mismos, ambas con objetivos de maximizar el agua de niebla recolectada. De forma indistinta, las dos corrientes necesitan el conocimiento de los modelos fundamentales para entender el comportamiento de la niebla sobre el colector. Es por ello, que se comenzará introduciendo los distintos avances en esta área.

Primero, es posible expresar la Eficiencia Total de Recolección de Agua (η_{tot}) como una razón entre el flujo de agua recolectada por unidad de área del colector que efectivamente sale de la canaleta en dirección a los estanques de almacenamiento en $\text{g/s} \cdot \text{m}^2$ ($\dot{W}_{coll}$) con respecto al flujo de agua presente en la niebla en movimiento, el cual se obtiene por la multiplicación del agua contenida en la niebla en g/m^3 (LWC) y la velocidad del flujo imperturbado en m/s (u_{∞}) (Rivera, 2011).

$$\eta_{tot} = \frac{\dot{W}_{coll}}{u_{\infty} \cdot LWC} \quad (2.1)$$

La ecuación anterior se utiliza con condiciones constantes de la niebla, sin embargo, en terreno se observa que el recurso presenta un comportamiento que varía con el tiempo y por ello, se expresa una nueva forma de obtener η_{tot} para atrapanieblas planos, considerando w_{coll} el agua recolectada en g en un intervalo de tiempo de duración de un evento con propiedades similares de la niebla Δt , además, el ángulo de incidencia de la niebla β y el área frontal de la malla de un colector plano (A en m^2) (Montecinos, Carvajal, Cereceda, y Concha, 2018).

$$\eta_{tot} = \frac{w_{coll}}{\int_0^{\Delta t} LWC \cdot u_{\infty} \cdot \cos(\beta) \cdot A dt} \quad (2.2)$$

Por otro lado, es aceptable definir la η_{tot} en función de los fenómenos físicos que involucran la recolección de agua en un atrapanieblas. Específicamente como una multiplicación de tres eficiencias (Ec. 2.3): La primera es la Eficiencia de Recolección Aerodinámica (η_{ACE}) que representa la proporción de niebla libre que efectivamente atraviesa la malla. Este fenómeno se puede explicar porque existirá una proporción de la niebla libre que no podrá atravesar la malla producto a que si un fluido se enfrenta a un objeto sólido, este intentará evitarlo (Fig. 2.1a). En segundo lugar, la

Eficiencia de Captación de Gotas (η_{Capt}) que se define como la fracción de gotas en la trayectoria de recolección que son efectivamente recolectadas o dicho de otro modo, la porción de gotas de la niebla que pasa por la malla que impactan con los hilos y son capturadas. Además, este fenómeno considera que no todas las gotas que siguen su línea de flujo son recolectadas, pues estas deben tener una inercia mínima (un tamaño mínimo) para mantener su dirección a pesar de que la línea de flujo evite el impacto con el hilo de la malla (Fig. 2.1b). Finalmente, la Eficiencia de Drenaje (η_{Drain}) la cual se define como el agua que logra llegar a la canaleta luego de ser capturada por la malla. Esta última puede ser influenciada por el reingreso de las gotas al flujo luego de ser capturadas por los hilos de la malla, por derrames o posibles filtraciones en el sistema (Rivera, 2011). Por lo tanto, matemáticamente se expresa como:

$$\eta_{tot} = \eta_{ACE} \cdot \eta_{Capt} \cdot \eta_{Drain} \quad (2.3)$$

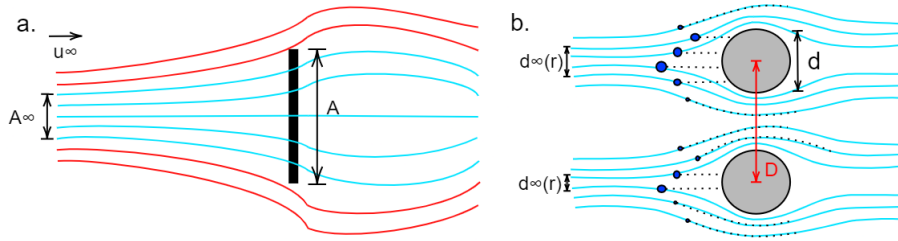


FIGURA 2.1: a. Fenómeno macroscópico en la captura de niebla. b. Fenómeno microscópico en la captura de gotas.

Luego de conocer los fenómenos fundamentales en la recolección de agua con atrapanieblas, muchos investigadores han propuesto distintos modelos donde se expresan las eficiencias de la ecuación 2.3 en función de variables geométricas de los colectores y también, las propiedades de la niebla. Lo primero es definir la Relación de Área de Flujo Libre ($f = A_{op}/A$), siendo una relación entre el área de las aberturas de la malla (A_{op}) y el área total de la malla sin aberturas (A). Otro concepto importante a la hora de diseñar o seleccionar una malla es la Solidez ($s = 1 - f$), la cual se define como el área efectiva que puede recolectar gotas de la niebla. Entonces, se propone en un primer modelo que expresa la η_{ACE} como (Rivera, 2011):

$$\eta_{ACE} = \frac{s}{1 + \sqrt{C_0/C_d}} \quad (2.4)$$

es importante destacar que C_d es el Coeficiente de Arrastre de una placa plana de área A y C_0 es el Coeficiente de Caída de Presión en la malla. Este último se puede expresar con la ecuación 2.5, que se presentará a continuación. Dicha ecuación incluye un término K_{Re} , que depende del número de Reynolds del flujo sobre un hilo de la malla (Re_d), es decir, donde la longitud característica es el diámetro de los hilos d (Ec. 2.6) (Shi, Anderson, Tulkoff, Kennedy, y Boreyko, 2018).

$$C_0 = K_{Re} \left[1.3s + \left(\frac{s}{1-s} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

$$K_{Re_d} = -2.32 \cdot 10^{-8} (Re_d)^3 + 2.12 \cdot 10^{-5} (Re_d)^2 - 0.0065 (Re_d) + 1.71 \quad (2.6)$$

con

$$Re_d = \frac{\rho_{air} u_{\infty} d}{\mu_{air}} \quad (2.7)$$

Una conclusión de este modelo es que existe un máximo en η_{ACE} para un $s \approx 0.5$ en un atrapanieblas con una malla de una capa (Ver Fig. 1.4), máximo en el orden de 25 % que dependerá de la relación de aspecto de un atrapanieblas (b/h , siendo b el ancho y h el alto), pues este término es importante en el coeficiente de arrastre para una forma plana (Fig. 2.2). Cabe destacar que para una geometría cóncava se observa un $C_d = 2.3$, lo cual es mayor al de una forma plana ($1.18 \leq C_d \leq 2$) obteniendo valores superiores en la η_{ACE} , sin embargo, esta forma cóncava de la malla provocada por el efecto del viento sobre la malla en terreno promueve que se pierdan gotas en la recolección (Rivera, 2011). Asimismo, por medio de modelos computacionales se ha evidenciado que una estructura cóncava presenta beneficios producto que disminuye la caída de presión en la malla provocando un mayor impulso del flujo de agua y aumentando la η_{ACE} (Carvajal, Silva-Llanca, Larraguibel, y González, 2020).

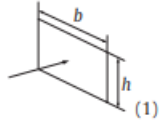
Geometry	Aspect ratio (b/h)	Drag coefficient (C_d)
	1	1.18
	5	1.2
	10	1.3
	20	1.5
	∞	2.0
		2.3

FIGURA 2.2: Tabla resumen de coeficientes de arrastre para formas típicas en atrapanieblas (Rivera, 2011).

Por otra parte, la η_{Capt} se puede expresar, según el contexto del problema, como una función del número de Stokes (Ec.2.8), número que representa la relación entre la fuerza inercial y el arrastre viscoso en una gota de agua (Ec.2.9), destacando r_g como el radio de la gota, ρ_w la densidad del agua y μ_{air} la viscosidad dinámica del aire. La conclusión más importante de este modelo radica en que la η_{Capt} aumenta mientras mayor sea el St , es decir, es necesario incluir hilos o estructuras con un diámetro pequeño para maximizar el St ($\gg 1$), dado que las otras variables en la ecuación del número de Stokes son constantes cuando se piensa en el diseño (Park, Chhatre, Srinivasan, Cohen, y McKinley, 2013; Labbé y Duprat, 2019).

$$\eta_{Capt} \approx \frac{St}{St + \pi/2} \quad (2.8)$$

$$St = \frac{2\rho_w r_g^2 u_{\infty}}{9\mu_{air} d} \quad (2.9)$$

Existen dos fenómenos más que influyen en la recolección agua, el primero es el reingreso de las gotas al flujo y en segundo lugar la acumulación de agua en la malla producto de la captación de gotas, lo cual aumenta la solidez operativa de la estructura. El primero se debe a la Fuerza de Arrastre sobre una gota que ya ha sido captada por los hilos ($F_{Drag} \approx \rho_{air} u_{\infty}^2 r_g^2$) y la Fuerza de Adhesión ($F_{Ad} = \gamma_w(1 + \cos(\theta_{rec}))r_g$) de la misma y el segundo fenómeno es función de la Fuerza de Gravedad aplicada a la gota ($F_{Grav} = \rho_w g r_g^3$) y la Fuerza de Sujeción ($F_{CAH} = \gamma_w(\cos\theta_{rec} - \cos\theta_{adv})r_g$) que surge de la histéresis del ángulo de contacto (θ_{rec} y θ_{adv} , $\theta = (\theta_{adv} + \theta_{rec})/2$). Si se reflexiona en torno a estas ecuaciones, para que una gota reingrese al flujo debe cumplir que $F_{Drag} > F_{Ad}$ y del mismo modo, si $F_{CAH} \Rightarrow F_{Grav}$ es posible que la gota no caiga por efecto de gravedad, dado que se adhiere al hilo hasta alcanzar un volumen crítico, es decir, existe una alta probabilidad de acumulación de gotas en malla. Una solución para este segundo fenómeno son las mallas con hilos verticales (Fig. 2.3) que permiten que el agua deslice sin quedar atrapada por hilos transversales, como ocurriría con una malla tipo Rashel, esto podría provocar que se incluya una mayor cantidad de hilos verticales evitando una gran acumulación de gotas y aumentando la eficiencia de captación y drenado de las mismas (Shi y cols., 2018).

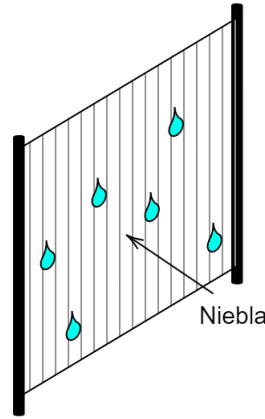


FIGURA 2.3: Malla tipo arpa con flujo de niebla ortogonal.

Otro estudio publicado en el año 2020, introduce la presencia de atrapanieblas tipo arpa multicapa para aumentar la eficiencia de recolección de agua. El primer concepto fundamental propuesto es la Fracción Filtrada ($\phi = A_{\infty}/A$, con A_{∞} como el área del flujo de niebla libre que pasa por la malla 2.1a) que se define como un fenómeno macroscópico que representa la porción del flujo libre de niebla que efectivamente pasa por la malla. Luego, es posible expresar la η_{tot} como la ecuación 2.10, considerando que $\int_a^b m(r_g)dr_g$ representa la fracción de masa de agua líquida entregada por gotas de radios (r_g) que se encuentran en un intervalo dado por $[a,b]$, la razón $d_{\infty}(r_g)/d$ como la eficiencia de impacto inercial de una gota de radio r_d y $(d_{\infty}(r_g)/d)$ la probabilidad de que una gota impacte con un hilo considerando una malla de una capa, es decir, la integral presente en la ecuación 2.10 representa la fracción de masa de agua que atraviesa la malla sin ser interceptada por los hilos (Azeem y cols., 2020), dicho de otro modo, el corchete maximiza su valor cuando la integral es 0, lo cual significa que toda la masa de agua que pasa por la malla es capturada por los hilos provocando un aumento considerable en la eficiencia de recolección de agua.

$$\eta_{tot} = \eta_{ACE} \cdot \eta_{Capt} \cdot \eta_{drain} = \frac{A_{\infty}}{A} \cdot \left[1 - \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{d_{\infty}(r_g)}{d}\right)^{N_c} m(r_g) dr_g\right] \cdot \eta_{drain} \quad (2.10)$$

Además, si se obtiene el límite donde $d_{\infty} \rightarrow d$ en la ecuación 2.10, que considera el supuesto que la mayor proporción de agua capturada proviene de las gotas más grandes, las cuales son efectivamente capturadas por poseer una inercia suficiente para separarse de la línea de flujo (Fig. 2.1b) y también considerando que $\eta_{Drain} = 1$ pues se busca encontrar una ecuación general del fenómeno en el diseño, se obtiene la siguiente relación: (Notar que χ es la Fracción Incidente y N_c es el número de capas de hilos de un atrapanieblas multicapa.)

$$\lim_{d_{\infty} \rightarrow d} \eta_{tot} = \eta_{ACE} = \frac{A_{\infty}}{A} [1 - (1 - s)^{N_c}] = \phi \cdot \chi \quad (2.11)$$

Ahora bien, es posible definir la Fracción Filtrada como una función del comportamiento del flujo de niebla (considerando u como la velocidad promedio del flujo a través de la malla) y parámetros geométricos del aparato, específicamente:

$$\phi = \frac{A_{\infty}}{A} = \frac{u}{u_{\infty}} = \sqrt{\frac{C_d}{c_0}} \quad (2.12)$$

De la ecuaciones anteriores, se podría concluir que la η_{ACE} es el término de mayor interés en el diseño de atrapanieblas y esta aumenta si se incrementa ϕ o χ , pero es importante considerar que ambas presentan una relación inversa y depende principalmente de la solidez, es decir, si aumenta esta se incrementa la Fracción Incidente de gotas sobre la malla, pero provoca una reducción de la Fracción Filtrada y en caso contrario, si disminuye se observa el efecto opuesto. Más aún, el problema se podría reducir a la maximización de η_{ACE} sujeto a esta restricción inversa entre ϕ y χ . Se concluye que los atrapanieblas multicapa son más eficientes que los de una capa, es más, se estima que 10 capas entregan un máximo de 49 % para la η_{ACE} con una solidez del 0.17. No obstante, luego de $N_c \approx 5$ hay pequeños aumentos en la eficiencia de recolección aerodinámica, por lo cual, para aprovechar de forma eficiente los materiales, se define un óptimo con $N_c = 4$, una solidez entre 0.25 - 0.35 y $\eta_{ACE} \approx 40$ %. Finalmente, los resultados experimentales en terreno confirman la superioridad de la malla multicapa óptima, recolectando aproximadamente cuatro veces más agua que una malla rashel doble (Azeem y cols., 2020).

Por otro lado, un área escasamente estudiada de los atrapanieblas se basa en los efectos que tienen las distintas fuerzas aplicadas sobre la malla y la estructura en cuanto a su resistencia mecánica. Estas fuerzas se dividen en (Holmes, Rivera, y de la Jara, 2015):

- Fuerza de gravedad: Contribuida principalmente por peso de los componentes. La malla húmeda, la canaleta con agua, etc.
- Fuerzas dinámicas: Corresponde al montaje y mantenimiento de los atrapanieblas y la carga ejercida por el viento, siendo la más relevante en la operación.

- c. Fuerzas sísmicas: Cuando los atrapanieblas son posicionados en zonas sísmicas, tales como Chile, es importante considerar los efectos de estas cargas sobre la estructura.

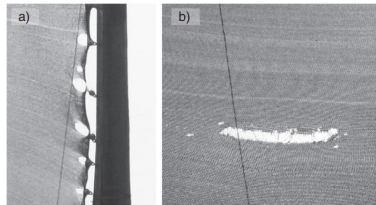
Entonces, considerando la fuerza ejercida por el viento como el efecto más importante en cuanto al diseño de un atrapanieblas, se muestra que la carga ejercida por esta (en N) se define considerando una malla Rashel con ratios de aspecto menores a 0.6, el coeficiente de arrastre de un panel no poroso como 1.05 y una densidad del aire de 1.15 kg/m^3 , como (Holmes y cols., 2015):

$$F_{Drag} = C_d \cdot \rho_{air} \cdot \frac{u_{\infty}^2}{2} \cdot A = 0.604 \cdot s \cdot u_{\infty}^2 \cdot A \quad (2.13)$$

Esta fuerza genera problemas asociados a la deformación elástica o plástica de la malla provocando una curvatura (Fig. 2.4a), aumentando el coeficiente de arrastre (Figura 2.2) promoviendo que aumente η_{ACE} , pero a su vez, se incrementa la fuerza de arrastre sobre la malla (Ec. 2.13) y que se pierdan ciertas gotas porque no logran alcanzar la canaleta. También, rotura en puntos de concentración de esfuerzos, observándose comportamientos anisotrópicos en ciertos casos (Fig. 2.4b). Es importante comentar que en algunas ocasiones la estructura completa se ve afectada por el viento provocando un derrumbe total (Fig. 2.4c). Debido a esto, se deben considerar estas cargas a la hora de diseñar porque usualmente los atrapanieblas son posicionados en zonas con escaso acceso y es complejo realizar mantenimientos periódicos, aunque también es posible generar planes de mantenimiento basados en la confiabilidad (Holmes y cols., 2015).



(A)



(B)



(C)

FIGURA 2.4: A) Hundimiento de la malla producto de la fuerza de arrastre (Holmes y cols., 2015). B) Rotura por efecto de los concentradores de esfuerzo (Holmes y cols., 2015). C) Derrumbe de atrapanieblas producto del viento (Holmes y cols., 2015).

2.2. Atrapanieblas V-shaped

Un Atrapanieblas V-shaped es aquél que tiene al menos una composición como la mostrada en la Figura 2.5a, es decir, presenta al menos tres soportes con una disposición en V conteniendo una malla entre ellos. Notar que además, es posible generar una estructura en zigzag como la mostrada en la Figura 2.5b al considerar varios Atrapanieblas V-shaped. De esta manera, se podría identificar una diferencia extra con respecto a los modelos actuales, en este caso, un atrapanieblas V-Shaped forma parte de un grupo de atrapanieblas 3D, estos poseen tal característica pues la profundidad alcanza valores iguales o mayores al ancho. Por otro lado, los modelos de una capa como los observados en la sección anterior (2.1) forman parte de un grupo de atrapanieblas en 2D y también, estos logran formar parte de un grupo distinto, los modelos en 2.5D cuando poseen una cierta profundidad que presenta valores mucho menores a su ancho, por ejemplo, la inclusión de un atrapanieblas de cuatro capas de malla tipo arpa como se comentó en la sección previa.

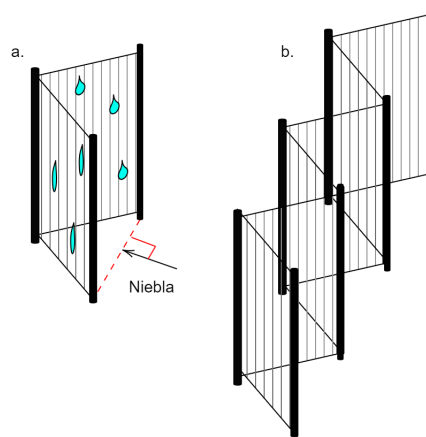


FIGURA 2.5: a) Esquema simplificado de un atrapanieblas V-shaped.
b) Esquema simplificado de un atrapanieblas en zigzag.

El único artículo encontrado que habla de este tipo de atrapanieblas es el de Holmes et. al 2015, donde se demuestra por medio de simulaciones numéricas que la eficiencia de un atrapanieblas V-Shaped es mayor a la de un atrapanieblas plano con malla tipo rashel (Fig. 2.7a). Es importante destacar que las validaciones experimentales de su modelo y el modelo como tal no son del todo claras, sin embargo, muestra resultados sumamente positivos para los atrapanieblas V-shaped con eficiencias aproximadamente de 3 veces la de los atrapanieblas comunes. Más aún, considera que esta tecnología es mejor dado que:

1. Se incrementa el área de recolección, promoviendo una mayor recolección de agua en un mismo espacio físico (Misma área frontal).
2. Impacto oblicuo de las gotas de niebla sobre la malla. De hecho, según el modelo desarrollado por De la Jara en 2012 se concluye que si se modifica el ángulo de incidencia de las gotas de niebla, debería aumentar la eficiencia de impactos de las gotas en las fibras 2.6a. Esto se debe a que se encuentra una diferencia de 2 % entre la eficiencia global y la aerodinámica después de la solidez del 50 %, lo cual se explica principalmente porque existe un aumento de la eficiencia de impacto de las gotas dado que al aumentar la solidez el conjunto de hilos desvía una mayor cantidad de niebla y como se muestra en la figura 2.6b, la trayectoria de las mismas presenta un impacto angulado con los hilos promoviendo que a pesar de que el flujo se desvía por el aumento de la solidez, este de igual forma impacta pero en un ángulo oblicuo, entonces se propone la hipótesis que un atrapanieblas en forma de V provocaría una influencia positiva en la eficiencia de impacto y por consiguiente en la eficiencia global de recolección, concluyendo lo propuestos en la figura 2.6c.

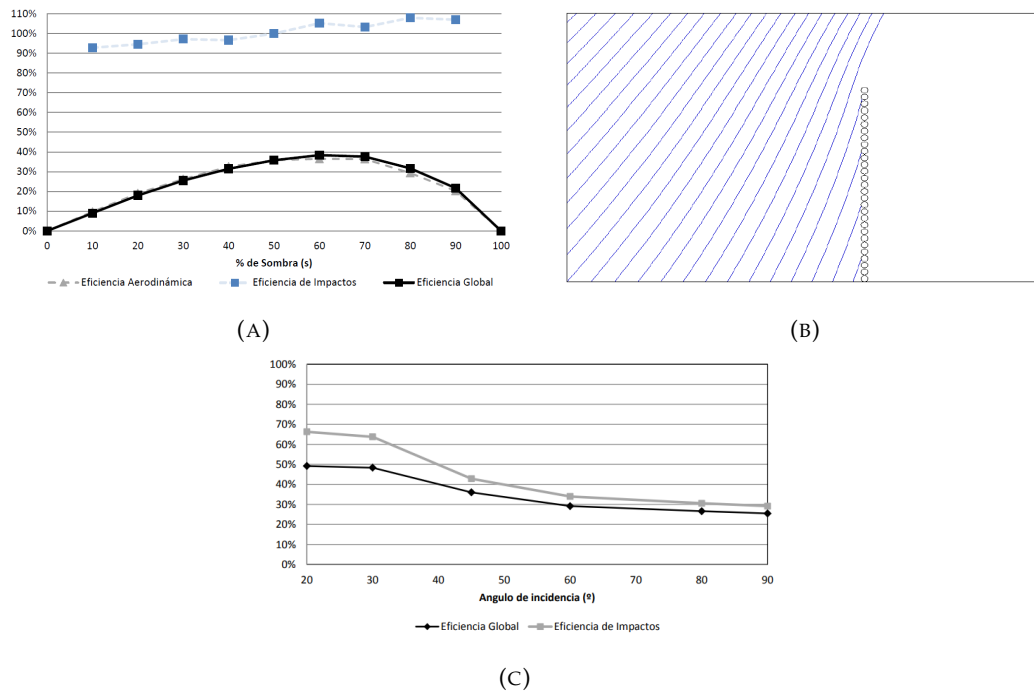


FIGURA 2.6: A) Resultados modelo De la jara para las eficiencias en un atrapanieblas plano para distintas solidedces (De la Jara, 2012). B) Trayectoria de las gotas para una solidez de 90 % (De la Jara, 2012). C) Resultados de la eficiencia global y de impacto para una solidez del 30 % y distintos ángulos de incidencia $((180-2\theta)/2)$ (Ver Fíg. 3.1b) (De la Jara, 2012).

3. Como se sabe según Azeem et al. (2020), η_{ACE} es el componente más relevante en la eficiencia total de recolección de agua, lo que subraya la importancia de optimizar este parámetro en el diseño de atrapanieblas. En este contexto, el modelo de Rivera (2011) sugiere que un aumento en el coeficiente de arrastre de una malla sólida (cuando $s = 1$) conduce a un incremento en la eficiencia de recolección aerodinámica y por ello, es un importante aporte a la eficiencia total de recolección de agua. Este hallazgo se alinea con los prototipos V-Shaped, donde un mayor coeficiente de arrastre producto a la forma de la malla mejora la capacidad de recolección, reforzando así la importancia de estos factores en el diseño óptimo de atrapanieblas.
4. La malla es más resistente a la ruptura debido a una configuración zigzag que permite la inclusión de pilares intermedios (Fig 2.5) en comparación a un LFC (Fig 1.4), evitando los efectos de la figura 2.4. Es decir, es posible disminuir los costos de mantención, provocando una disminución del posible precio por metro cúbico. No obstante, se observa un aumento en el costo de inversión inicial por un mayor uso de materiales, traslado y posible mano de obra extra. Cabe destacar que este aumento de los materiales de la estructura también se debe a que como aumenta el coeficiente de arrastre por la forma, también incrementa la fuerza de arrastre sobre la malla (Ec. 2.13 y Fig. 2.7b).
5. Existe una mejora con respecto a los atrapanieblas planos, dado que se observa un aumento del flujo de niebla a través de la malla producto de un incremento en la velocidad del flujo sobre la misma debido al menor bloqueo al paso del fluido (véase Ec. 2.12).

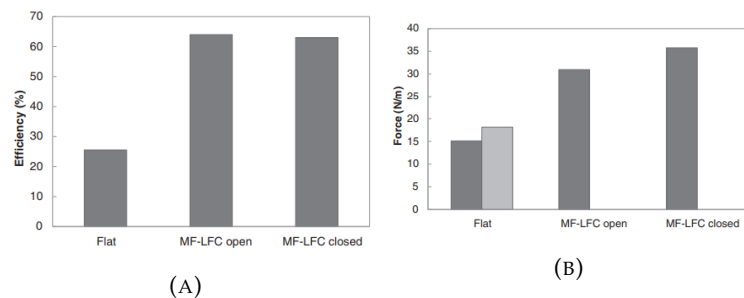


FIGURA 2.7: A) Comparación de la eficiencia de recolección de agua en distintos modelos de atrapanieblas (Holmes y cols., 2015). B) Comparación de la fuerza sobre distintos modelos de atrapanieblas producto del efecto del viento (Holmes y cols., 2015).

Por último, se concluye según un estudio somero de los costos (Fig. A.3) que a pesar de que estos aumentan de 46.4 USD/ m^2 en atrapanieblas comunes a 57.5 USD/ m^2 para atrapanieblas V-Shaped, se compensa con el gran incremento de la eficiencia de recolección de agua con estos últimos, siendo una gran razón (en conjunto con los otros puntos expuestos) para estudiar este tipo de modelos con un mayor detalle.

2.3. Filtros de Placas Paralelas Onduladas

Los Filtros de Placas Paralelas Onduladas (PPO) son aparatos que permiten separar las gotas de agua de un fluido para generar como producto aire seco en distintos procesos industriales. El sistema de separación se basa en el impacto inercial de gotas en las paredes del filtro producto a la forma ondulada que presentan sus paredes (Fig. 2.8), debido a esto, las gotas más grandes son las más fáciles de capturar. Posterior a su captura, estas aumentan su volumen por coalescencia y caen por efecto de la gravedad.

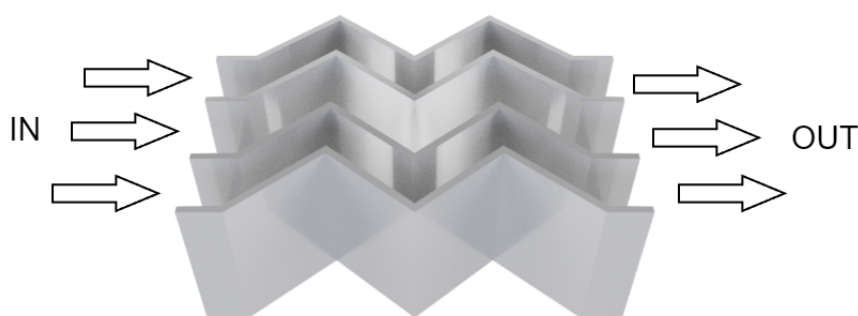


FIGURA 2.8: Modelo 3D filtro de placas paralelas.

La captura de gotas con filtros PPO es ampliamente utilizada en la industria, como por ejemplo, aplicaciones en un boiling water reactor (BWR) o reactor de agua en ebullición para lograr separar del vapor de agua las pequeñas gotas contenidos en el mismo y lograr aire con menores niveles de humedad (de mejor calidad para el proceso) (Nakao, Nagase, Aoyama, y Murase, 1999), también en sistemas de extracción de petróleo (James, Azzopardi, Wang, y Hughes, 2005), el cuidado de las

turbinas en barcos marinos por la alta humedad del aire (Wilkinson, 1999), aplicaciones en desalinizadoras (Zheng y cols., 2019), filtrado de aerosoles (Zhang, Niu, Wang, Wang, y Guo, 2019), entre otras aplicaciones, siendo el sistema de preferencia por su costo/eficiencia (Y. Wang y James, 1998).

En lo que respecta al conocimiento específico, el modelo analítico matemático para este tipo de sistemas con forma de zigzag (Fig 2.9.a) más actualizado fue propuesto en el año 1981 (Burkholz, 1981), el cual se expresa como (Considerando η_B como la eficiencia por codo (o por etapa), ρ_w la densidad de las gotas, u_∞ la velocidad del fluido, r_g radio de las gotas, α ángulo del codo, μ_{air} la viscosidad dinámica del gas, δ el espaciado entre placas, n_{cd} el número de codos y η_0 la eficiencia global de separación):

$$\eta_B = \frac{2\rho_w u_\infty r_g^2 \alpha}{9\mu_{air} \delta} \quad (2.14)$$

$$\eta_0 = 1 - (1 - \eta_B)^{n_{cd}} \quad (2.15)$$

luego, si se incluye el número de Stokes utilizando la misma definición para la ecuación 2.9 pero con distintas variables, sería posible definir la eficiencia global de separación como (Wilkinson, 1999):

$$\eta_B = St\alpha \quad (2.16)$$

$$\eta_0 = 1 - (1 - St\alpha)^{n_{cd}} \quad (2.17)$$

además, si se considera que en la primera etapa del filtro existe un factor de mezclado (f_m), siendo un término correctivo debido a que la distribución de gotas en el primer codo es diferente a la de los demás (Wilkinson, 1999; Koopman y cols., 2014), se podría definir la eficiencia global como (Considerando que C_{pb} es la caída de presión en el codo, c es una constante experimental que usualmente es 0.257 y W es un parámetro geométrico (Fig. 2.9a)):

$$\eta_0 = 1 - (1 - St\alpha)(1 - f_m St\alpha)^{n-1} \quad (2.18)$$

$$f_m = 1 - \exp\left(\frac{cC_{pb}}{cC_{pb} - 18St\delta/W}\right) \quad (2.19)$$

Si bien existe el modelo analítico/experimental expuesto con anterioridad, usualmente los estudios se basan en analizar el fenómeno en función de simulaciones numéricas (Galletti, Brunazzi, y Tognotti, 2008; Narimani y Shahhoseini, 2009; Rafee, Rahimzadeh, y Ahmadi, 2010; Kavousi, Behjat, y Shahhoseini, 2013; Guan, Yuan, Yang, y Gu, 2016; Yuan, Fan, y Lin, 2016; Liu y Qu, 2017; Zhang y cols., 2019; P. Wang y cols., 2020; Makowski, Laskowski, y Tyrański, 2021; Cai y cols., 2022; Tang y cols., 2022; Zhao, Zhao, Cong, y Shen, 2022; J. Wang, Ji, y Liu, 2022; Fang y cols., 2023) con el objetivo de estudiar variaciones geométricas y/o de materiales (Fig. 2.9) con la finalidad de alcanzar una alta eficiencia de separación de gotas, pero sin aumentar en demasía la pérdida de presión a través del filtro (Bell y Strauss, 1973).

En función de los distintos análisis numéricos, analíticos y experimentales realizados por diversos autores se obtienen múltiples conclusiones en búsqueda de aumentar la eficiencia de separación. En primer lugar, los filtros PPO aumentan la eficiencia de separación con el aumento de la velocidad debido que a se incrementa el impacto inercial de las gotas, sin embargo, con el aumento de la velocidad crece el reingreso de gotas al flujo disminuyendo al eficiencia y por ello, el óptimo se encuentra en velocidades intermedias (B. Chen y cols., 2020). Luego, el óptimo de la eficiencia de recolección se encuentra con el ángulo $\alpha \approx 30^\circ$ con profundidad total del separador (Pr) entre $3 \cdot \lambda$ y $4 \cdot \lambda$, siendo λ la "longitud de onda" de los modelos propuestos en la fig. 2.9 (Ushiki, Nishizawa, Beniko, y Iinoya, 1982; Wilkinson, 1999; Mao y cols., 2018). Más aún, para un modelo tipo zigzag (Fig. 2.9a) se espera que la mínima pérdida de presión ocurra con $\delta/\lambda = 0.24$ para todo Reynolds (Banitabaei, Rahimzadeh, y Rafee, 2012). Asimismo, los modelos con canales de drenaje (Fig. 2.9d) presentan mayores eficiencias que los modelos zigzag para gotas más pequeñas (James, Wang, Azzopardi, y Hughes, 2003), sin embargo, aumenta la pérdida de presión (J. Li, Huang, y Wang, 2007), es más, para valores bajos de λ/δ se observan las mayores pérdidas, pero las más altas eficiencias, destacando que para $\lambda/\delta > 7.11$ se presentan pequeños aumentos de la eficiencia de separación y la pérdida de presión (M. H. Estakhrsar y Rafee, 2016). En cuanto a las dimensiones del canal de drenaje (Fig. 2.9d), se demuestra que la pérdida de presión y la eficiencia son sumamente sensibles al largo del canal de drenaje (B) en comparación al ancho de canal (C) con una escasa relevancia, específicamente, se estima que la máxima eficiencia pero con un alto coste de pérdida de presión se encuentra con $B = 2.25 C$, no obstante, si se desea que la pérdida de presión disminuya en una gran proporción con una baja disminución de eficiencia de separación se debe cumplir que $B = 2 C$ (M. H. H. Estakhrsar y Rafee, 2013). En esta misma línea, este tipo de modelos presenta mejores rendimientos que los modelos con doble canal de drenaje (Fig. 2.9g) en cuanto a la eficiencia de separación, pero a costo de una mayor pérdida de presión que los modelos con doble canal (S. Li y cols., 2020). Por último, la inclusión de un placa con abertura previo al canal del drenaje con $F = B$ y $E = C$ considerando que $C = 2 B$ (Fig. 2.9f) presenta mayores eficiencias que el modelo sin la placa para gotas con diámetro entre 1 y 15 μm (Noh, Kim, y Yook, 2020).

Por otro lado, si se utilizan placas perforadas (Fig. 2.9i) se observa que la eficiencia de separación no es incrementada en una gran magnitud (1-3 %), pero sí la pérdida de presión se ve disminuida en aproximadamente 30 % con respecto al modelo zigzag base observando un gran potencial por esto último (Fang y cols., 2021). Igualmente, si se incluyen generadores de vórtices (Fig. 2.9h) como tuberías/placas con distintas geometrías, se observa que en todos los casos existe un incremento de la eficiencia de separación, considerando que el mejor de los casos se obtiene con presencia de una tubería cuadrada (Yang, Xu, Wang, Song, y Wang, 2021). Luego, si se considera el sistema compuesto de la Figura 2.9k se presentan eficiencias más altas que los sistemas individuales (mayor a 95 %) y también, el modelo compuesto promueve mayores eficiencias para velocidades bajas y gotas más pequeñas con respecto a los modelos individuales (Solo banco de tubos o modelo PPO) (Liu y cols., 2017).

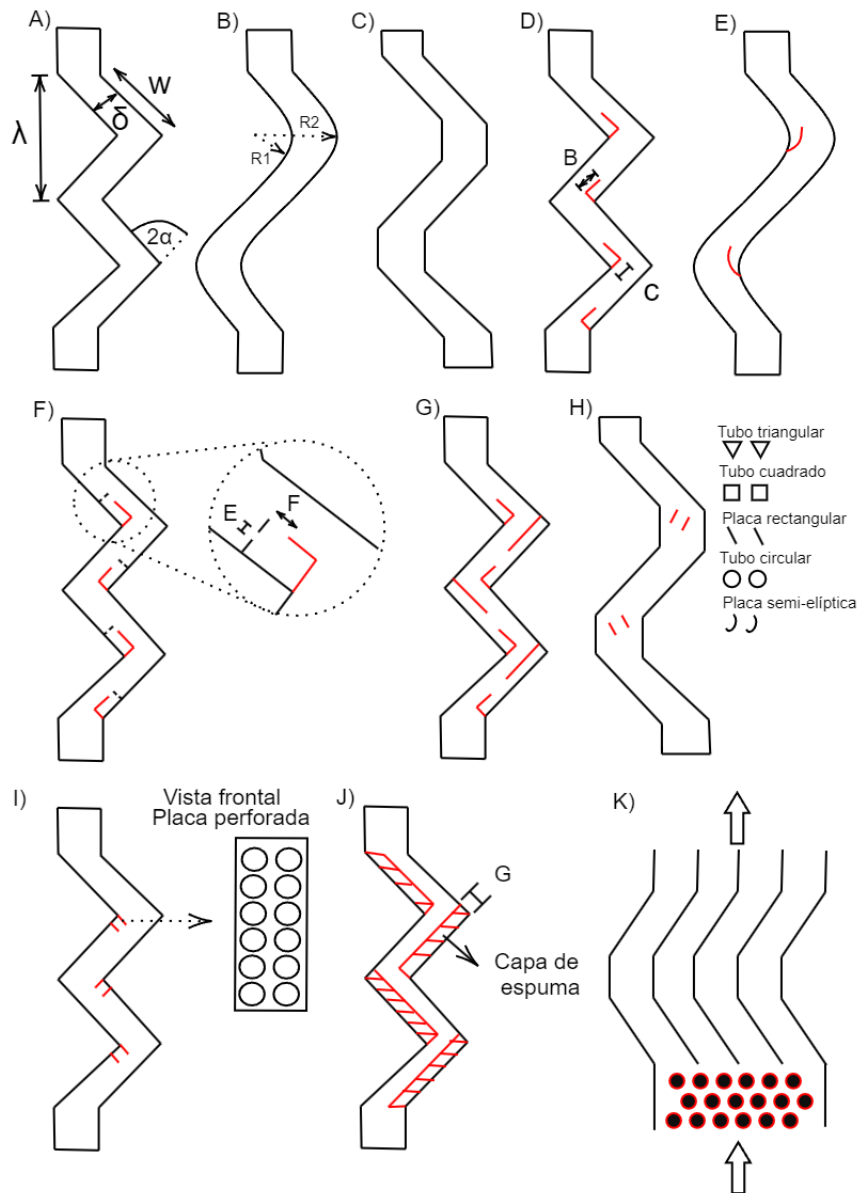


FIGURA 2.9: Tipos de separadores con distintas modificaciones en búsqueda de aumentar la eficiencia de recolección y disminuir la pérdida de presión a través del filtro. A) Zigzag (Ushiki y cols., 1982). B) Placas onduladas (Sorokin y cols., 1966). C) H1-V (Zamora y Kaiser, 2011). D) Zigzag con canales de drenaje (James y cols., 2003). E) Placas onduladas con canales de drenaje (Venkatesan y cols., 2013, 2014). F) Zigzag con placa con abertura (Noh y cols., 2020; Kim y cols., 2021). G) Zigzag con doble canal de drenaje (Liu y Qu, 2017; S. Li y cols., 2020). H) Separador con generadores de vórtices (Yang y cols., 2021). I) Zigzag con placa perforada (Fang y cols., 2021). J) Material poroso en las paredes de separador zigzag (Xu y cols., 2017a, 2017b). K) Banco de tubos previo a placas verticales (Liu y cols., 2017).

Por último, la rugosidad de las paredes del filtro sí es un parámetro importante, pues a mayor rugosidad existe un aumento de la eficiencia de recolección para gotas

más pequeñas en altas velocidades (Ma, Wu, y Ji, 2019; Alamshahi, Rahimzadeh, Rafee, Moghimi, y Talebizadehsardari, 2020). Entonces, en función de este incremento por efecto de la rugosidad, se incluyen materiales porosos al interior del ducto, específicamente, si se incluye el material espumoso como en la figura 2.9j se muestran mayores eficiencias que un modelo tipo zigzag simple y con canales de drenaje (Xu y cols., 2017b, 2017a).

2.4. Superficies Regladas

Una superficie formada por un infinito sistema de líneas rectas es una Superficie Reglada (Fig. 2.10a), donde cada una de estas rectas poseen el nombre de generatriz, líneas que son guiadas por medio de una directriz (Edge, 2011). Este tipo de superficies han sido ampliamente estudiadas matemáticamente (Edge, 2011), sin embargo no ha sido el único campo que las ha utilizado, pues han sido aplicadas en áreas como la construcción, la arquitectura (Fig. 2.10b) y también computacionalmente en el diseño asistido por computador (Flöry y Pottmann, 2010; H.-Y. Chen y Pottmann, 1999).

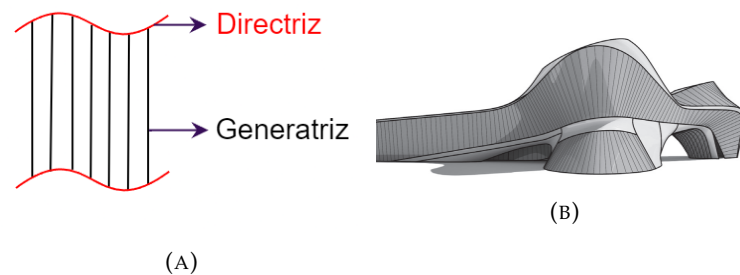


FIGURA 2.10: A) Esquema generalizado de una superficie reglada. B) fachada del Centro de Arte Contemporáneo de Cagliari, obra de Zaha Hadid Architects (Flöry y Pottmann, 2010)

En lo que respecta al caso particular asociado a los atrapanieblas, también es posible determinar un punto de encuentro en las superficies regladas (SR) para todos estos modelos formados con hilos verticales u horizontales (Fig. 2.3), pues mantienen una estructura similar dado que la malla forma una “Superficie” constituida por generadores finitos (Filamentos) y la estructura superior e inferior como directriz, por ello, es posible determinar que el modelo tipo arpa, el modelo V-Shaped y los prototipos que propondremos en las siguientes secciones forman un grupo de atrapanieblas basados en estas superficies regladas.

Capítulo 3

Definición del problema, hipótesis y objetivos

Según lo expuesto en el estado del arte, se observa que los atrapanieblas pasivos solo presentan un máximo de eficiencia de $\approx 40\%$ a la actualidad en los prototipos con malla arpa multicapa, entonces, en busca de aumentar la eficiencia total de recolección de agua se proponen dos implementaciones considerando la aplicación de prototipos en forma de V y también, sistemas basados en filtros PPO, ambos considerados dentro de una familia de atrapanieblas relacionados con las superficies regladas. Específicamente, se considerará un modelo V-Shaped (Fig. 3.1b) con el cual se busca aumentar la eficiencia de recolección con respecto a un atrapanieblas plano (Fig. 3.1a) y también, con respecto a su versión extendida (Fig. 3.1c), producto que si es más beneficioso este último modelo no sería prudente incluir la versión angulada porque se incorporan costos innecesarios en el diseño, materiales, manufactura, etc. En segundo lugar, considerando las altas eficiencias de separación de gotas (Símil con eficiencia de recolección) que logran los filtros PPO, existe la posibilidad de que al implementar esta tecnología se aumente considerablemente la eficiencia de recolección de agua en comparación a los atrapanieblas actuales, por lo cual, se propone el modelo de la figura 3.1d que incorpora una malla basada en estos filtros (Más detalles en sección 4.3). Entonces, se expone la siguiente hipótesis general:

Se espera que de la familia de atrapanieblas basados en superficies regladas, el modelo V-Shaped y MPO (Fig. 3.1) presenten mayores rendimientos con respecto a la recolección de agua de un modelo tipo arpa multicapa.

Finalmente, en función de la problemática y la hipótesis propuesta, se plantean los siguientes objetivos:

- Objetivo General
 1. Evidenciar el incremento en la tasa de recolección de agua en atrapanieblas V-Shaped y de Mallas Paralelas Onduladas (MPO) con respecto al modelo arpa multicapa.
- Objetivos específicos
 1. Cuantificar la tasa de recolección de agua en distintos prototipos físicos en túnel de niebla realizando modificaciones en las variables fundamentales.
 2. Exponer los beneficios y obstáculos de metodología basada en el seguimiento de la recolección de agua en el tiempo.

3. Expresar matemáticamente la recolección de agua de atrapanieblas pertenecientes a la familia de superficies regladas.

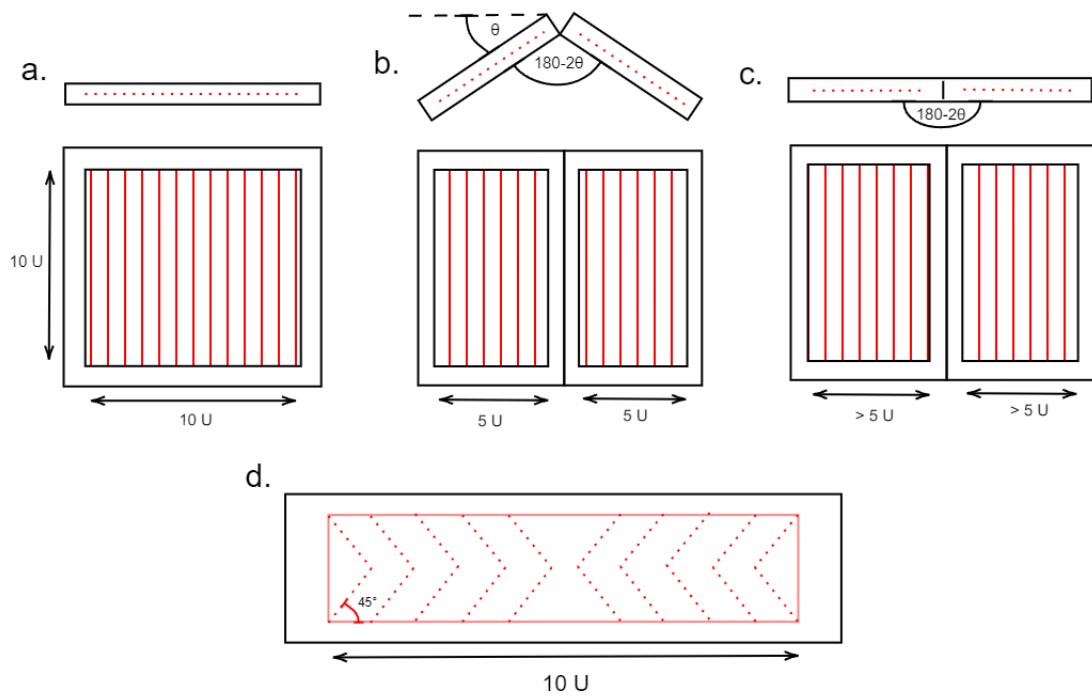


FIGURA 3.1: Vista superior y frontal de un atrapanieblas plano, V-Shaped, V-Shaped extendido y Mallas Paralelas Onduladas (MPO) respectivamente.

Capítulo 4

Metodología y materiales

4.1. Consideraciones generales

Para comenzar, tanto en los experimentos para los atrapanieblas V-shaped, como en los experimentos de los atrapanieblas MPO se busca determinar la cantidad de agua recolectada por un pequeño prototipo de atrapanieblas posicionado frente a niebla artificial con el objetivo de realizar comparaciones entre los distintos prototipos para determinar el mayor rendimiento, proceso que se llevará a cabo bajo condiciones relativamente estacionarias. Para lograr este objetivo, se dispone de un conjunto de máquinas y herramientas presentes en el laboratorio de biomimética de la Universidad Adolfo Ibáñez y co/mo se trabajará principalmente con planchas de acrílico transparente de distintos espesores y ácido poliláctico (PLA) para pequeñas piezas estructurales, se recurrirá a utilizar la cortadora laser que posee la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la universidad, en conjunto con las impresoras 3D del Design Lab y también, dado el uso de metales (Principalmente perfiles de aluminio) se disponen de distintas herramientas de maquinado. En cuanto a la fabricación de la malla tipo arpa, se utilizará una máquina de bobinado de hilo fabricada en este proyecto (Fig. 4.1a), la cual fue construida con perfiles de aluminio para la estructura, dos motores paso a paso: Uno permite un movimiento lineal horizontal transmitiéndolo por medio de un husillo (M1) y el segundo un movimiento rotacional (M2), los cuales son controlados mediante un arduino y también, con la ayuda de dos MicroStep Driver DM542, permitiendo variar el número de pasos de cada motor y además, la presencia 8 botones que posibilita acciones de retroceso-avance de los motores 1 y 2 de forma independiente, combinada y automática (Fig. 4.1c), todo esto se mantiene funcionando con una fuente de poder de 24V-6.5A (Revisar código de arduino y esquema eléctrico en el apéndice B.1 y B.2 respectivamente). Luego, para construir la malla tipo arpa, se fija un marco al eje del motor 2, este enrollara el hilo en una posición fija y para que el bobinado se realice a lo largo de todo el marco, se utiliza el motor 1 que mediante un husillo promueve el movimiento lineal horizontal del hilo (Fig. 4.1b). Posterior al termino del bobinado, se inspecciona que la separación entre los hilos sea la adecuada y se aplica un material adhesivo para fijar los mismos.

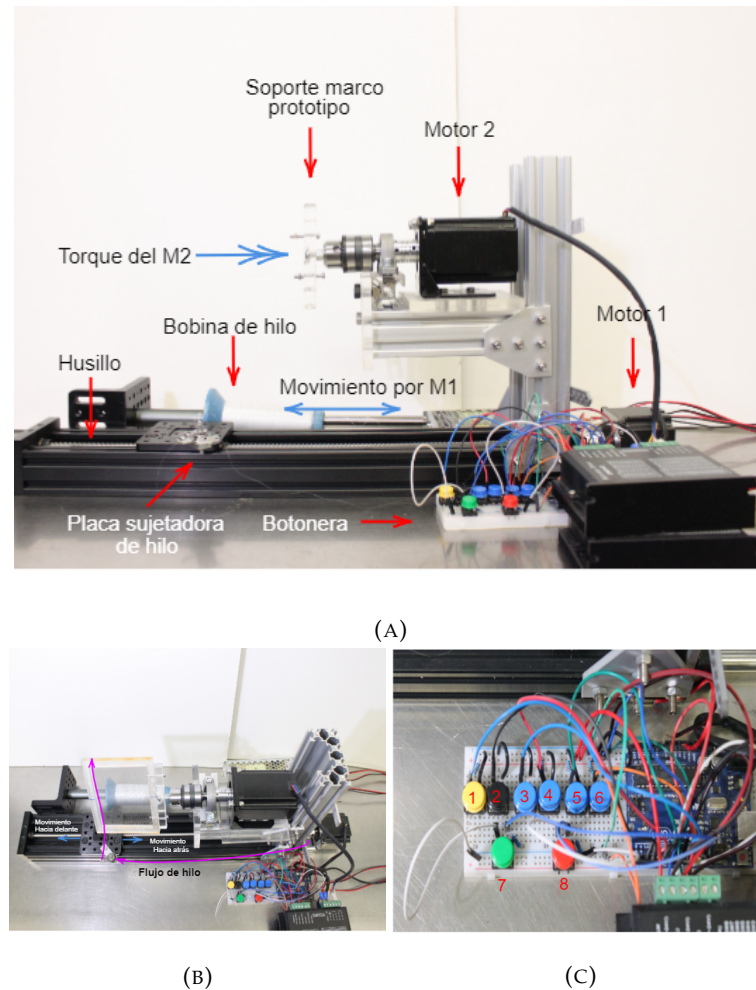


FIGURA 4.1: A) Vista frontal máquina de bobinado de hilo y componentes principales. B) Flujo del hilo con el cual se fabrican los prototipos. C) Circuito eléctrico máquina con detalle de botones.

Por otro lado, para la formación de niebla artificial se utiliza un túnel de niebla (Fig. 4.2a y 4.2b), este cuenta con un rango de velocidades del flujo entre 0 y 17.5 m/s (en un área de 200 mm x 200 mm) los cuales se regulan modificando la frecuencia sobre la turbina con el controlador interno de la máquina, pero como no cuenta con una interfaz para visualizar la velocidad del flujo (Ver Fig. 4.2c, la pantalla solo permite visualizar la frecuencia en Hz), se utiliza un termo-anemómetro de hélice Kimo VT 210, el cual debe ser usado solo con la turbina encendida y así medir el flujo de aire evitando que este se enfrente a las gotas de niebla y se descomponga, realizando mediciones a 200 mm de la salida del flujo (Gráfica en Apéndice B.3). Asimismo el túnel de niebla presenta un estanque de aproximadamente 0.4 m³ (No es el tamaño útil del estanque, es el tamaño del compartimiento) donde se posicionan 2 nebulizadores ultrasónico modelo DK12-36 con 12 cabezales que provocan vibraciones en el agua impulsando la formación de niebla estática y en conjunto con la turbina, generan un flujo de niebla que pasa por un *Honeycomb* promoviendo un flujo relativamente uniforme hacia la salida del túnel. La mayor parte del flujo vuelve a entrar por el otro ducto pero existe una cierta cantidad de la niebla que se filtra hacia la habitación. Notar que la temperatura en el lugar de experimentación y del flujo no varía en demasía (≈ 20 °C), por lo cual, es una variable sin importancia para estos experimentos. Por otra parte, para encender la máquina se debe conectar a corriente

alterna, luego se debe verificar que se enciendan las tres luces presentes en el panel de control (Fig. 4.2c), después se debe girar la perilla de 0 a 1 y presionar el botón encendido 1, posterior a esto se debe entrar en la cabina y utilizar el botón de encendido interno, modificar la frecuencia al valor deseado y volver a presionar el botón de encendido interno para comenzar el proceso de experimentación.

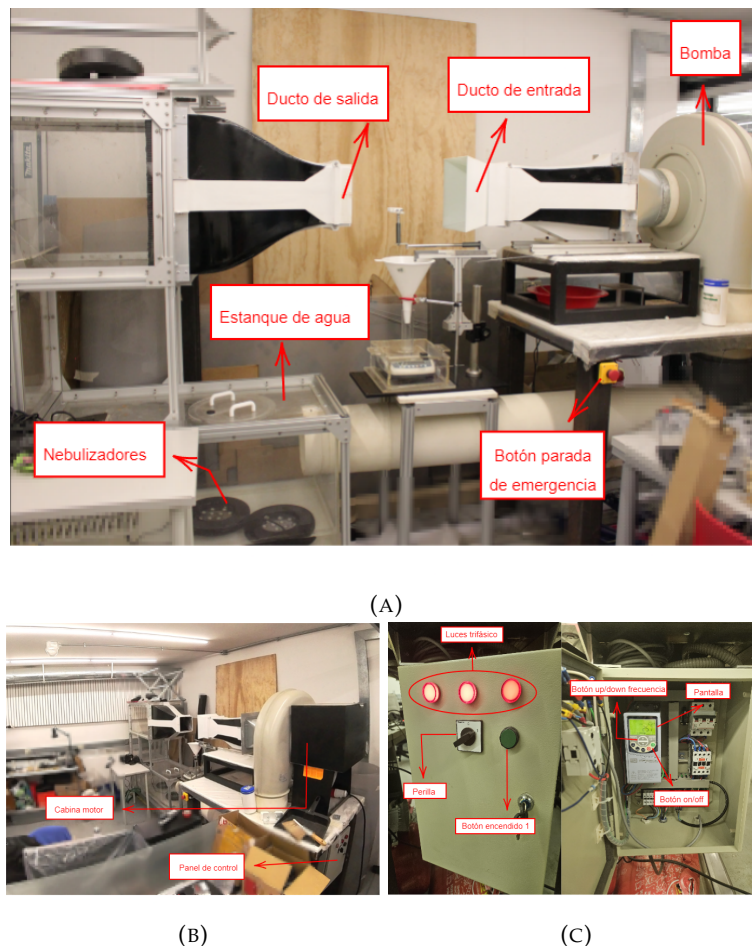


FIGURA 4.2: A,B) Túnel de niebla y componentes principales. C) Panel de control túnel de niebla.

Ahora bien, para realizar las mediciones del agua recolectada en el tiempo se utilizó una balanza de precisión Kern 440, la cual tiene un software propio (Fig. 4.3) que permite guardar los datos del valor medido cada cierto intervalo de tiempo y trasladar esta información en un archivo de texto para posteriormente transferirlos a una hoja de cálculo de MS Excel o Python. Durante experimentaciones de prueba, se percató de una pequeña demora en la toma de datos lo que podría conducir en grandes errores si el intervalo de tiempo es pequeño, específicamente, se realizaron pruebas con carga estática y variable en periodos de 25, 17, 10 y 5 minutos (4 iteraciones cada uno) con toma de datos por segundo obteniendo un error de aproximadamente un -4 % y por ello, si se considera que se tomarán, por ejemplo, datos cada 1 s en el programa se debe definir que el periodo de toma de datos debe ser de 0.957 s disminuyendo los errores a menos de un 1 %, esto se debe a que si a la máquina se le solicita tomar datos cada 1 s, por problemas varios, la balanza estará tomando datos en promedio cada 1.043 s, que en grandes escalas de datos incrementa inmensamente el error (Apéndice B.4).

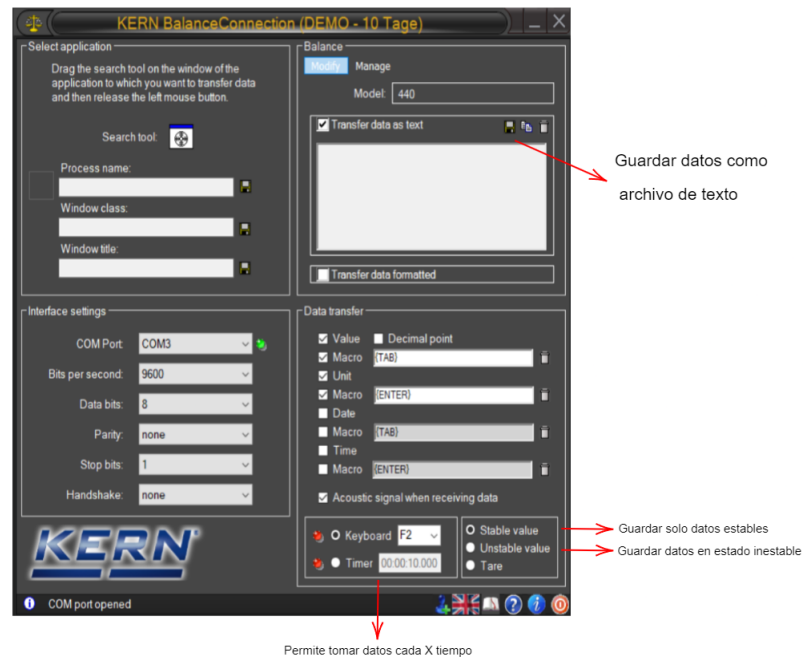


FIGURA 4.3: Software balanza Kern.

En cuanto a la visualización de datos, se debe verificar en cada experimento que la recolección presente un comportamiento aproximadamente lineal posterior a la saturación inicial de la malla, es decir, la curva se asemeje a la figura 4.4b. En caso de que la curva se asemeje a una variación de la figura 4.4a, se debe repetir el experimento porque se observa la presencia de valores relativamente constantes o curvas que cambian su pendiente de forma acelerada a lo largo de la recolección, esto se podría deber a alguna fuga de agua en el proceso, lo cual debe ser solucionado para obtener resultados comparables con experimentos previos. En esa misma línea, se debe verificar cuáles son los beneficios y obstáculos de la metodología de seguimiento de recolección de agua en el tiempo, pues se estima que permitirá obtener resultados más robustos debido a un aumento de la supervisión del proceso mediante datos. De igual manera, exponer sus complicaciones, ya que es una metodología que no se ha implementado con anterioridad en el estudio de los atrapanieblas en laboratorio.

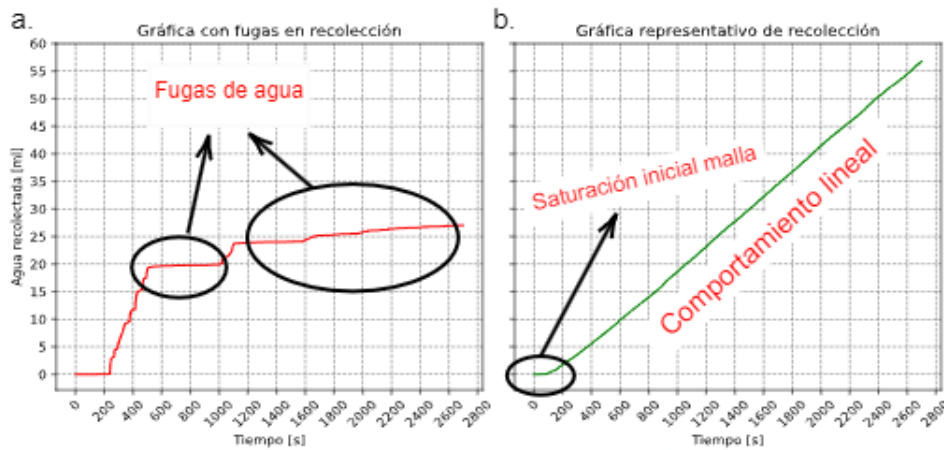


FIGURA 4.4: a) Ejemplo de comportamiento de la recolección de agua en el tiempo en un atrapanieblas con fugas de fluido. b) Ejemplo de comportamiento lineal de la recolección de agua en el tiempo en un atrapanieblas.

Por último, es necesario definir los parámetros y variables generales en el problema a abordar dado que son múltiples, pues es posible modificar distintos elementos de la geometría en la malla y la estructura de un atrapanieblas, además del espacio físico donde se posicionan y el tiempo de experimentación. En primer lugar, el tipo de prototipo a analizar: Plano (P), V-shaped (V), V-shaped extendido (V*) y MPO (Con sus respectivas variaciones asociadas a los atrapanieblas basados en *superficies regladas* [SR] en 2.5D). En segundo lugar, el tipo de malla a utilizar: tipo arpa con una separación entre hilos (D) y un diámetro de hilo (d). En lo que respecta al túnel de niebla, es posible variar la velocidad del flujo (u_∞), mantener el agua del estanque en un rango de [100,120] mm de altura para evitar posibles variaciones en el LWC presente en la niebla. Además, la distancia entre la salida del túnel y los prototipos de prueba será de 200 mm, la distancia entre la salida del túnel de viento y la entrada del otro ducto será de 455 mm y por último, el prototipo se posicionará centrado con respecto a la sección transversal del ducto de salida del flujo. Asimismo, es necesario comentar que el primer experimento se basa en una comparación entre modelos de 2.5D (Malla tipo arpa multicapa) y modelos 3D (V-shaped), siendo diferentes porque el modelo 2.5D representa un punto intermedio entre un modelo 2D y 3D, pues la profundidad del atrapanieblas es mucho menor que el ancho. Luego, un atrapanieblas 2D es aquel que presenta una sola capa de malla y finalmente, el modelo V forma parte de los atrapanieblas 3D, pues la profundidad del atrapanieblas supera o se tiende a acercar al ancho del prototipo. Por otro lado, en lo que respecta al segundo experimento, como una forma de realizar comparaciones efectivas entre los modelos basados en Superficies Regladas, se dispone a realizar solo comparativas entre modelos en 2.5D. Notar que este último experimento se realiza debido a los positivos resultados de un proceso previo para los modelos MPO (Revisar Apéndice D).

4.2. Experimentos atrapanieblas V-Shaped

En este primer experimento se buscará realizar mediciones del agua capturada por 3 modelos distintos (Plano, V-Shaped y V-Shaped extendido) para luego hacer los

análisis respectivos, donde las condiciones para este primer experimento se presentan en la tabla 4.1 , 4.2 y basándose en el modelo de la figura 4.5 con el objetivo de que la proyección de la malla de un atrapanieblas V-Shaped tenga las mismas dimensiones que una malla de un atrapanieblas Plano ($2R = 100$ mm).

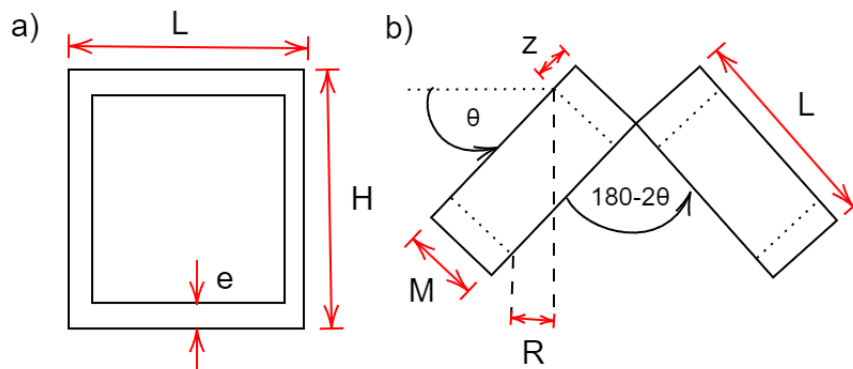


FIGURA 4.5: a) Esquema vista frontal de un marco. b) Esquema vista superior de un atrapanieblas V-shaped.

TABLA 4.1: Parámetros experimento asociado a modelos V-Shaped. Notar que no se incluye la variación de la orientación de los hilos, las cuales son horizontales y verticales para cada uno de los modelos.

	Modelo	P	V	V*
Malla	Tipo	Arpa	Arpa	Arpa
	Diámetro hilos (d) (mm)	0.12	0.12	0.12
	Espaciado entre hilos (D) (mm)	2	2	2
	Solidez	0.06	0.06	0.06
	N° de capas (N_c)	1	1	1
Marco	N° de marcos	1	2	2
Niebla	Velocidad (m/s)	4	4	4
Varios	Tiempo por experimento (s)	900	900	900
	N° de iteraciones	3	3	3

TABLA 4.2: Distintas dimensiones del marco en función del ángulo θ . El ángulo nulo representa el marco de un atrapanieblas plano y los demás representan dimensiones de uno V-shaped y su versión extendida.

θ (°)	-	10	30	50
L (mm)	120	71	78	98
H (mm)	120	120	120	120
e (mm)	10	10	10	10
M (mm)	10	10	10	10
R (mm)	-	50	50	50
Z (mm)	10	10	10	10

Ahora bien, en cuanto al prototipo construido para este experimento, se usaron como materiales acrílico de 10 mm de espesor para el marco, hilo de nylon de 0.12 mm

el cual fue bobinado en la estructura y fijado con un material adhesivo. Luego del secado, se corta una capa de hilos para solo mantener el prototipo con una de ellas. Como se especifica en la tabla 4.1, si se fabrica un prototipo plano solo se utiliza un marco (Fig. 4.6a y 4.6b) y si se quiere fabricar los otros modelos, son necesario dos de ellos para posicionarlos con respecto a un ángulo en el sistema de anclaje (Fig. 4.6c y 4.6d).

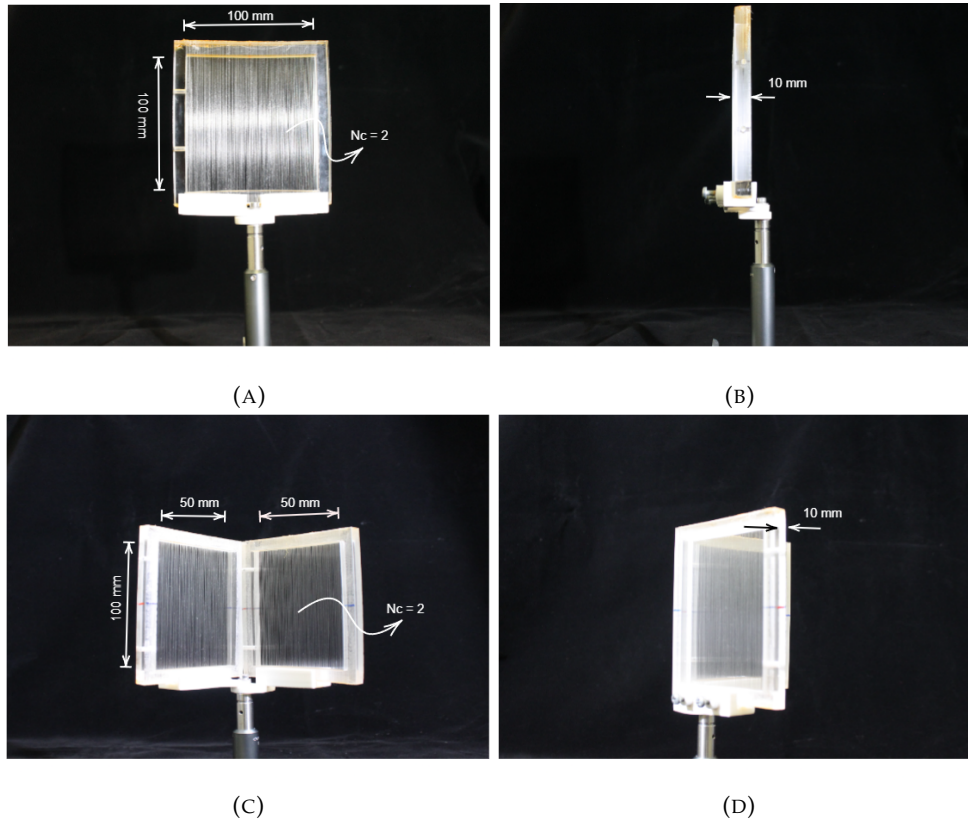


FIGURA 4.6: A) Vista frontal de un prototipo plano con hilos verticales. B) Vista lateral prototipo plano con hilos verticales. C) Vista frontal de un prototipo V-Shaped con hilos verticales. D) Vista lateral de un prototipo V-Shaped con hilos verticales.

Al momento de exponer el prototipo ante el flujo de niebla se debe generar una estructura basal que permita sostener el prototipo frente a un flujo de niebla de 4 m/s y a su vez, poseer al menos 3 grados de libertad en la estructura base (Fig. 4.7a) y 2 grados de libertad en la estructura de anclaje del prototipo (Fig. 4.7b y 4.7c). La estructura basal se diseñó con artículos de Thorlabs y perfiles estructurales y el sistema de anclaje fue diseñado en Autodesk Inventor 2023 y fabricado con PLA en una impresora 3D Creality Cr10 S Pro V2, además del uso de tornillos M4. El sistema de anclaje permite capturar el marco del prototipo con un sistema de prensado que cuenta con un espaciador entre los tornillos y el marco para evitar que la torsión de estos corte los hilos del prototipo. Adicionalmente, cuenta con aberturas para la instalación de marcos de distintas longitudes y también, permite una variación angular continua (Con identificadores cada 15°) con respecto al perno central, esto último diseñado especialmente para los experimentos con atrapanieblas V-Shaped (Planos de diseño en Apéndice B.5).

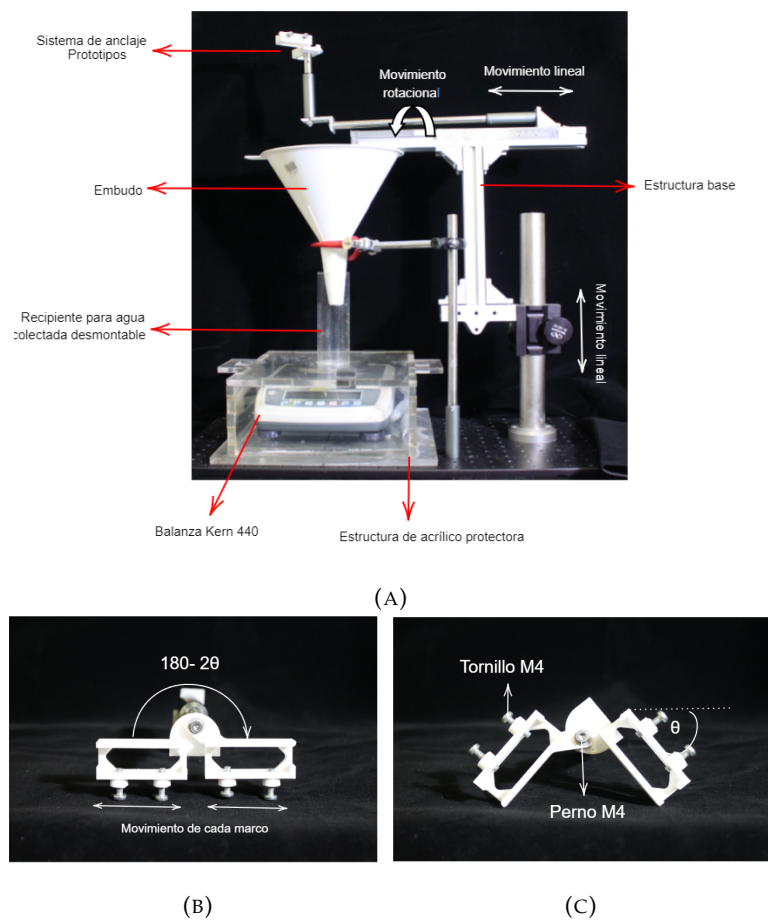


FIGURA 4.7: A) Estructura base de experimentación y sus elementos principales. B) Elemento de anclaje de prototipos en un ángulo de 180°. C) Elemento de anclaje de prototipos en un ángulo inferior a 180°.

Por último, para la muestra de resultados se definirán distintas designaciones para todos los casos en la siguiente tabla (Notar que los marcos se posicionarán de forma horizontal y vertical para estudiar el comportamiento de la recolección con ambas direcciones de los hilos):

TABLA 4.3: Detalle nomenclatura de prototipos en experimento asociado a atrapanieblas V-Shaped.

Modelo	Plano	Plano	V-Shaped	V-Shaped	V-Shaped ext.	V-Shaped ext.	V-Shaped
Designación	Pv0	Ph0	Vv10	Vh10	Vv10*	Vh10*	Vv30
Orientación hilos	ver.	hor.	ver.	hor.	ver.	hor.	ver.
θ (°)	-	-	10	10	10	10	30

V-Shaped	V-Shaped ext.	V-Shaped ext.	V-Shaped	V-Shaped	V-Shaped ext.	V-Shaped ext.
Vh30	Vv30*	Vh30*	Vv50	Vh50	Vv50*	Vh50*
hor.	ver.	hor.	ver.	hor.	ver.	hor.
30	30	30	50	50	50	50

4.3. Experimentos atrapanieblas basados en Superficies Regladas (SR) en 2.5D

Para estudiar los atrapanieblas SR, es necesario definir una metodología que permita comparar los modelos tipo arpa multicapa con los nuevos diseños propuestos. Dado que la geometría de la malla en planta será modificada (Ver Fig. 4.8), ya no es posible realizar comparaciones directas basadas en el número de capas. Sin embargo, sí es viable comparar los modelos en función del número de hilos, ya que se busca verificar si la nueva geometría realmente ofrece un beneficio frente a los otros prototipos. Al mantener constante la cantidad de hilos, se esperaría que la probabilidad de captura de una gota por un hilo se mantenga constante entre los modelos. No obstante, la nueva geometría podría provocar modificaciones en la Fracción Filtrada u otros efectos, los cuales serán objeto de estudio. Entonces, se propone que se realizarán prototipos de tres modelos representativos: Multiharp (MH), Mini ZigZag (MZZ) y Mallas Paralelas Onduladas (MPO), cada uno fabricado con hilos verticales de nylon de 0.12 mm de diámetro. Estos filamentos estarán dispuestos en distintas distribuciones geométricas en un área de 20 x 100 mm para 100, 150, 200 y 250 hilos con las dimensiones presentes en la figura 4.8.

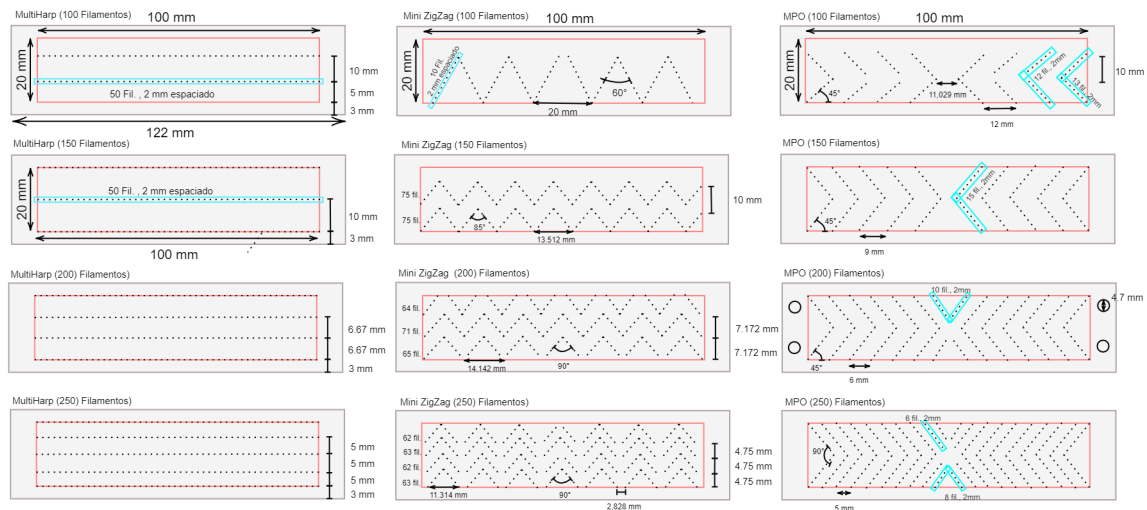


FIGURA 4.8: Esquemas detallados de vista en planta de prototipos MH, MZZ y MPO para distinto número de filamentos.

La estructura de estos prototipos (Fig 4.9b y 4.9c) serán fabricados por dos placas de acrílico transparente de 122 x 26 mm con 10 mm de espesor, estas contendrán cuatro agujeros pasantes de 4.7 mm de diámetro como el modelo MPO de 200 filamentos de la figura 4.8. Por estos agujeros pasarán 4 varillas roscadas de 3/16 in con 155 mm de largo, además se debe contar con 16 tuercas por prototipo, las cuales permitirán tensar los hilos cuando estos estén instalados. En esa misma línea, para realizar el montaje de los filamentos se conducirá un hilo de longitud L_o (según la ecuación 4.1 y la Fig. 4.9a, notar que la variable L_e se considera como una longitud extra del hilo para lograr realizar el nudo final, por lo cual, queda a disposición de la persona que realiza el prototipo.) a través de n agujeros que se encuentren separados por 2 mm, hebra que pasará entre ambas placas de acrílico ya instaladas con sus respectivos pilares.

$$L_o = n(a + 2b + c) - c + L_e \quad (4.1)$$

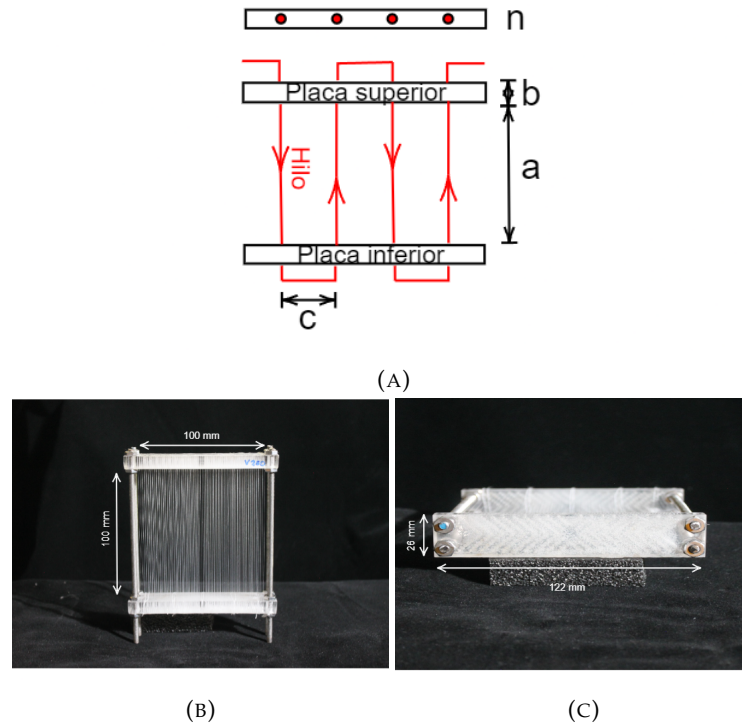


FIGURA 4.9: A) Esquema de montaje de filamentos para la fabricación de prototipos. B) Vista frontal prototipo MPO con 250 hilos. C) Vista en planta de prototipo MPO con 250 hilos.

En cuanto al sistema de anclaje en el lugar de experimentación del túnel de niebla, se diseñó una canaleta (Fig. 4.10b y 4.10c, plano de diseño en Apéndice B.6) de acrílico transparente que permitiría montar los prototipos con ayuda de sus propias varillas roscadas y 4 tuercas extra para fijarlos, así disminuyendo el tiempo necesario para la instalación entre prototipos. La función de esta canaleta es transportar el agua recolectada por la malla hacia la balanza mediante un tubo flexible de 10 mm de diámetro interno. Además, evita que el agua que cae por gravedad desde la malla regrese al flujo de niebla después de la captura, permitiendo, a diferencia del experimento anterior, aumentar significativamente la velocidad del flujo. Esto permite estudiar el comportamiento de la recolección bajo distintas velocidades de la niebla. Específicamente, se realizarán pruebas con todos los prototipos a velocidades de 4, 8, 12 y 16 m/s, ya que se estima que un aumento en la velocidad del flujo disminuirá la recolección de agua para una misma cantidad de hilos y un modelo específico. Luego, esta canaleta se ancla a la estructura base (Fig. 4.10a) fabricada con elementos estructurales y piezas de aluminio, en conjunto con artículos de Thorlabs.

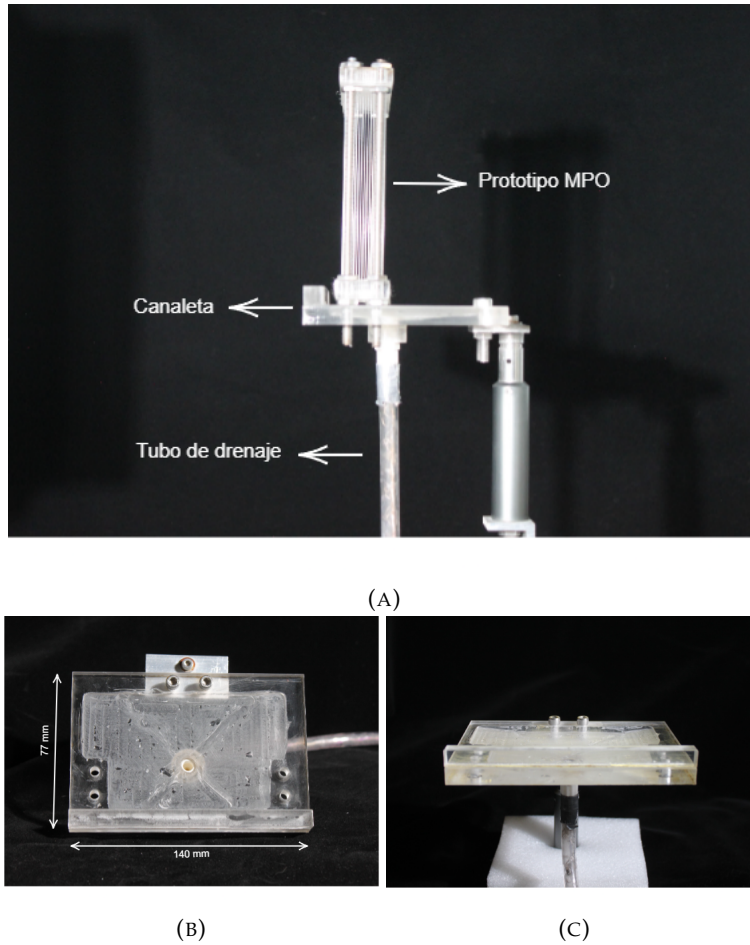


FIGURA 4.10: A) Estructura base de experimentación y elementos principales. B) Canaleta vista en planta. C) vista frontal canaleta.

En cuanto al proceso de experimentación, se mantiene el tiempo de 15 min (900 s) por prueba, dado que estos prototipos presentan el mismo comportamiento aproximadamente lineal de la figura 4.4b y por consiguiente, no sería lo óptimo sobrepasar los 15 min, dado que usualmente se observan 5 min de saturación de la malla y los 10 minutos restantes son suficientes para obtener una pendiente representativa del comportamiento. Además, se realizarán 3 iteraciones para cada modelo, número de hilos y velocidad constante, es decir, según la regla de la multiplicación se tendrían que realizar $3 \text{ (Modelos)} \times 4 \text{ (N}^\circ \text{ de hilos)} \times 4 \text{ (velocidades)} = 48$ pruebas para cada iteración, lo cual corresponde a $48 \times 3 \text{ (iteraciones)} = 144$ combinaciones en total. Por último, la nomenclatura para la muestra de los resultados se basará en "Nombre abreviado del modelo- "Número de hilos", por ejemplo, si se desea mostrar los resultados en una gráfica para mostrar el modelo MPO con 100 filamentos, se designará como "MPO100".

Capítulo 5

Resultados y discusión

5.1. Comentarios iniciales sobre metodología experimental

La metodología del seguimiento del agua recolectada por segundo es un proceso que permite obtener una mayor comprensión del proceso de recolección, pues se realiza un seguimiento continuo en todo el rango de experimentación. Uno de los primeros hallazgos que se pueden obtener de la implementación de esta metodología es que se logra observar que en ambos experimentos y en todas las pruebas realizadas se presenta una primera etapa de saturación de la malla y posteriormente, una tasa prácticamente constante de agua recolectada (Fig. 5.1) con un R^2 promedio de ≈ 0.98 - 0.99 para el primer experimento (Ver tabla 5.1) y de ≈ 0.99 para el segundo (Ver tabla C.2).

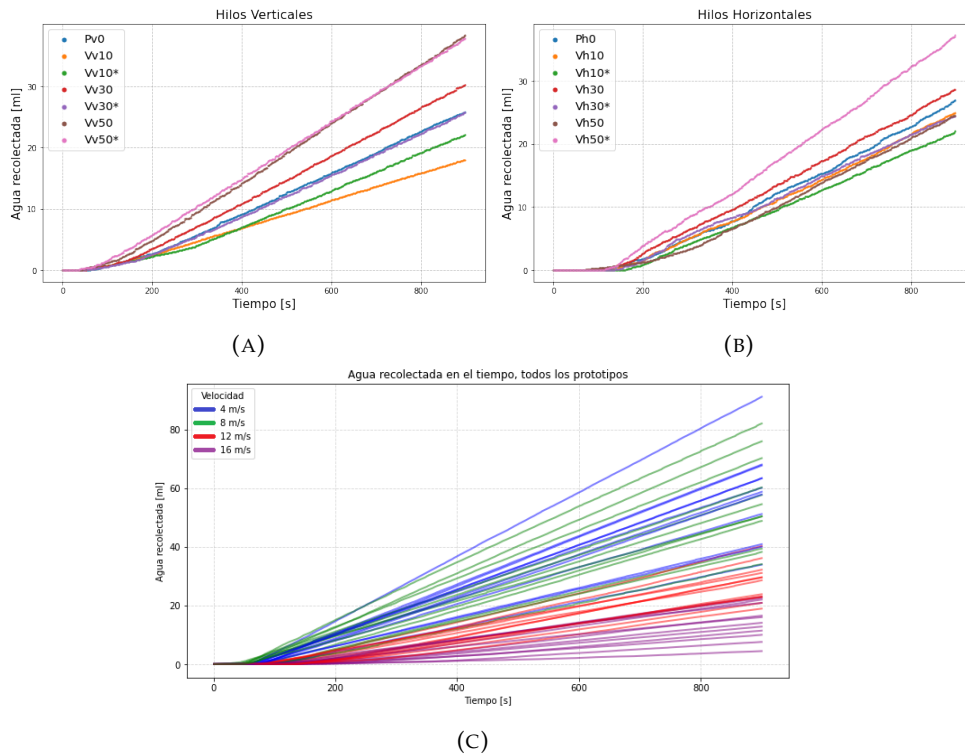


FIGURA 5.1: A) Agua recolectada en el tiempo de los distintos modelos de experimento V-Shaped con hilos verticales. B) Agua recolectada en el tiempo de los distintos modelos de experimento V-Shaped con hilos horizontales. C) Agua recolectada en el tiempo para los modelos SR en 2.5D con una distinción en la velocidad del flujo por color.

Esta metodología se propuso porque se observaba que no todas las mallas lograban la saturación en el mismo tiempo inicial (Revisar Fig. 5.1) y eso podría provocar que si solo se obtenía y evaluaba un valor único al terminar el estudio en un tiempo t , se podría incluir un error debido al fenómeno comentado, específicamente para experimentos de corta duración, donde la etapa de saturación es un porcentaje importante del ensayo. Entonces, como se explicó en la metodología, se realizaron tres experiencias para cada modelo y así tener la mayor cantidad de datos posibles debido al tiempo disponible. De todo este procedimiento se calculó el coeficiente de variación ($CV = \text{Desviación estándar} / \text{Media}$, Tabla 5.1 y 5.2) del agua total recolectada, la pendiente considerando los datos desde el tiempo inicial ($t = 0$ s) y la pendiente desde el segundo donde todas las pruebas alcanzan la saturación ($t = 300$ s para el primer experimento y $t = 500$ s para el segundo experimento) para cada uno de los modelos. Este coeficiente de variación representa de forma porcentual el grado de variabilidad de la muestra, es decir, es un valor que permite entender qué tanto varían los datos con respecto a la media de forma porcentual.

TABLA 5.1: Cálculo de coeficiente de variación (CV) para resultados obtenidos (3 mediciones) en experimento de modelos V-shaped en relación al agua total recolectada, la pendiente de la regresión lineal desde el estado sin saturación ($t = 0$ s) y desde el estado saturado ($t = 300$ s). Además, se incluye el valor de R^2 para las regresiones de ambos casos.

Modelo	CV Agua Total	CV $t=0s$	CV $t=300s$	$R^2(t=0s)$	$R^2(t=300s)$
Vh10	16.60 %	15.20 %	12.80 %	0.9824	0.9967
Vh30	16.90 %	18.00 %	20.50 %	0.9904	0.9990
Vh50	16.20 %	13.70 %	13.30 %	0.9596	0.9994
Vh10*	11.90 %	10.40 %	10.30 %	0.9814	0.9984
Vh30*	5.20 %	6.00 %	7.20 %	0.9874	0.9973
Vh50*	18.30 %	18.40 %	16.70 %	0.9892	0.9972
Vv10*	10.70 %	11.40 %	24.30 %	0.9735	0.9995
Vv30*	9.70 %	11.30 %	16.40 %	0.9894	0.9995
Vv50*	10.80 %	10.60 %	12.10 %	0.9978	0.9994
Vv10	5.50 %	33.70 %	16.40 %	0.8736	0.9776
Vv30	12.40 %	15.10 %	17.20 %	0.9934	0.9996
Vv50	18.80 %	17.20 %	19.00 %	0.9949	0.9995
Ph0	14.40 %	15.30 %	8.10 %	0.9785	0.9968
Pv0	2.70 %	1.30 %	10.50 %	0.9863	0.9994
Promedio	12.20 %	14.10 %	14.60 %	0.9770	0.9971

TABLA 5.2: Valores promedio del coeficiente de variación para todos los modelos del experimento SR en 2.5D con respecto a la velocidad, resumen de Apéndice C.1. Notar que para cada combinación se realizaron 3 mediciones.

u_∞ [m/s]	CV Agua Total	CV $t=0s$	CV $t=500s$	Prom.
4	11.3 %	10.9 %	10.7 %	11.0 %
8	12.2 %	12.2 %	12.5 %	12.3 %
12	22.6 %	22.8 %	18.7 %	21.4 %
16	37.7 %	37.8 %	43.5 %	39.7 %
Prom.	21.0 %	20.9 %	21.4 %	

De los resultados obtenidos se puede concluir que si se analiza cada experimento de forma independiente, el CV se mantiene prácticamente constante entre las distintas formas de medir el agua recolectada con una diferencia máxima de $\approx 2\%$, es decir, si se considera la pendiente o el agua total recolectada para comparar los distintos prototipos se obtendrían conclusiones similares, esto es posible dado que solo se consideraron las mediciones donde no se observaban fugas a lo largo del periodo de recolección disminuyendo el valor del coeficiente de variación para el caso donde la medida es el agua total recolectada, siendo una ventaja al implementar esta metodología dado que se logra un mayor control generalizado del proceso. En este contexto, si se observa la tabla 5.2 se logra apreciar que mientras aumenta la velocidad del flujo el CV aumenta considerablemente debido a que cuando se incrementa la velocidad, también es más errática la captura de gotas, porque muchas de ellas son devueltas al flujo posterior a ser capturadas por los hilos de la malla.

5.2. Resultados y discusión atrapanieblas V-shaped

El estudio realizado con los atrapanieblas en forma de V reveló resultados significativos que merecen especial atención. En primer lugar, como es posible apreciar en la figura 5.2a, cuando se considera una malla con hilos verticales, el agua total recolectada en el modelo V-Shaped (Vv) aumenta con el ángulo. Se observa que este modelo supera en promedio al modelo plano (Pv) y a su versión extendida (Vv*) en un 14.6 % y 14.8 % respectivamente para 30° . Asimismo, para 50° , se registra una mejora de 32.83 % y 1.3 % en los respectivos casos. Por lo tanto, se podría concluir que el modelo V-Shaped sí es una opción viable para ángulos cercanos a 30° . A pesar de que en los 50° se observa una gran ventaja con respecto al modelo plano, el beneficio en relación al modelo extendido es mínimo, y por consiguiente, no se observa gran viabilidad. Por otro lado, cuando se considera un modelo V-Shaped con malla de hilos horizontales (Fig. 5.2b), es posible observar que, nuevamente, para 30° se obtienen los mejores resultados con una ventaja de 6.07 % y 4.19 % en relación al modelo Plano y la versión extendida. Notar que entre ambas comparaciones, en sus respectivos mejores casos, el modelo V-Shaped con hilos verticales en 30° es la mejor alternativa con una ventaja de 5.16 % en la recolección de agua bajo las mismas condiciones sobre el modelo V-Shaped de hilos horizontales.

Por otra parte, aunque no permite entregar resultados exactos, se realiza un ajuste de los puntos a expresiones cuadráticas con $R^2 = 1$ (Fig. 5.3), lo cual logra aproximar el comportamiento del fenómeno y observar la tendencia de los datos obtenidos. Entonces, se observa que en primer lugar existen ciertos rangos donde cada modelo presenta un mayor rendimiento con respecto a otros, específicamente, si consideramos el caso del modelo V-Shaped con hilos verticales se cumple que para ángulos entre 21.99° y 50° existe una ventaja del rendimiento con respecto al modelo plano y la versión extendida, con una ventaja máxima aproximado de 21 % y 15 % respectivamente y en un ángulo de $\approx 33^\circ$, siendo un valor cercano al obtenido en el análisis anterior. Luego, en el caso del modelo V-Shape de hilos horizontales se observa que entre los 16.05° y 37.49° existe un mejor rendimiento del modelo V-Shaped con respecto a los otros prototipos, con una ventaja porcentual máxima aproximada de 6.24 % con respecto al modelo plano y 17.18 % en relación a su versión extendida, todo esto en un ángulo de 29.09° . Notar que en ambos casos, la ventaja máxima del modelo V-Shape se logra para ángulos medios ($\approx 30^\circ$), dado que para ángulos más pequeños ($\approx 0^\circ$) se observa que los resultados tienen una mayor cercanía o ventaja por parte de los otros modelos, pues presentan estructuras similares y por el

contrario, para ángulos más grandes ($\approx 50^\circ$), el modelo extendido presenta mayores rendimientos dado que al posicionar un modelo V-Shaped estirado, este logra un aumento máximo para este experimento de 64 % en el área frontal total para un ángulo de 50° , es decir, como se consideró que la proyección del área frontal de un atrapanieblas V-Shaped es de 10000 mm^2 , el modelo estirado presenta un área frontal de 16400 mm^2 . Finalmente, como se espera que el área frontal del modelo extendido crezca con la relación $1/\sin(90-\theta)$, mientras mayor sea el ángulo, mucho menos viable será utilizar un prototipo V-Shaped.

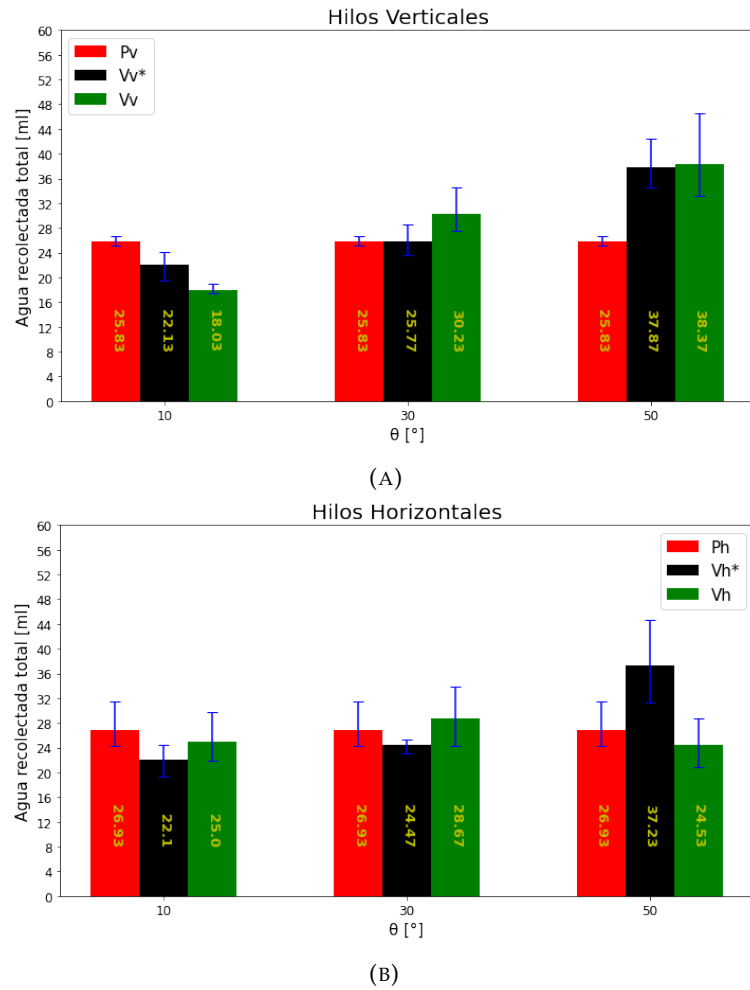


FIGURA 5.2: A) Agua total recolectada en experimento N°1 para ángulos específicos con modelos de hilos verticales. B) Agua total recolectada en experimento N°1 para ángulos específicos con modelos de hilos horizontales.

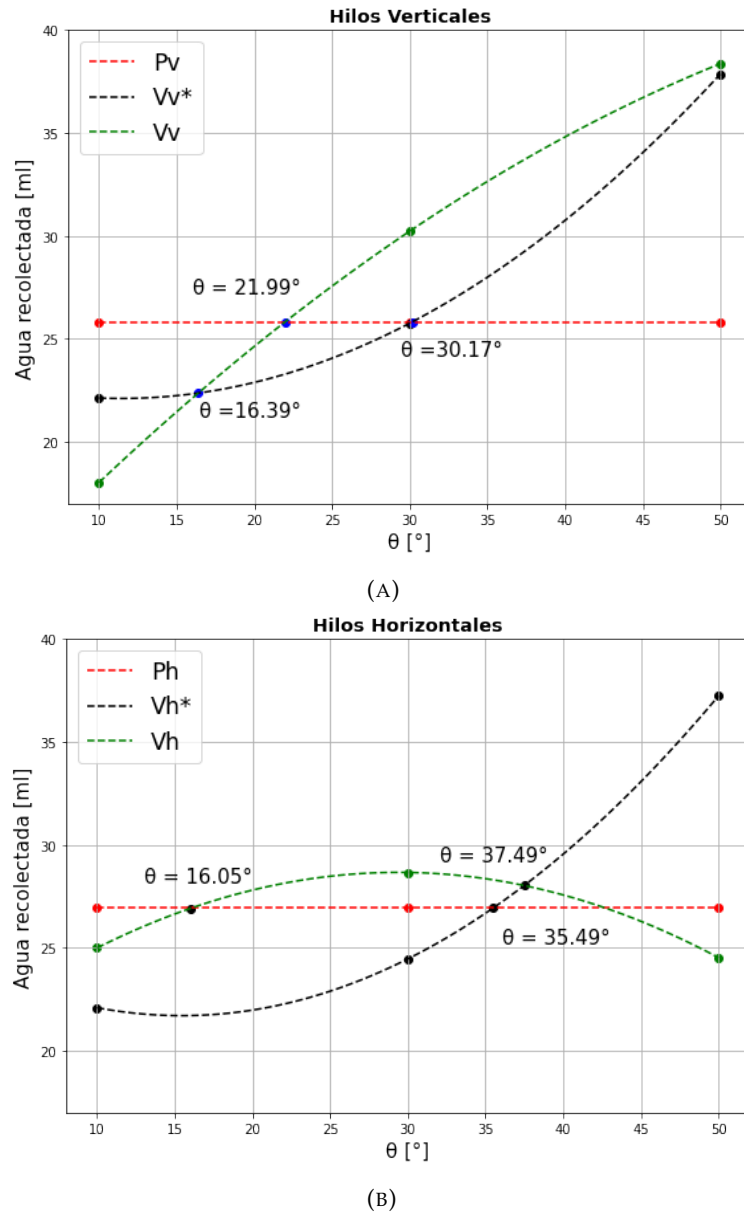


FIGURA 5.3: A) Tendencias de la recolección total de agua en experimento N°1 con modelos de hilos verticales. B) Tendencias de la recolección total de agua en experimento N°1 con modelos de hilos horizontales.

Si se compara el caso V-Shaped para ambas orientaciones de hilos en una zona donde ambos son modelos factibles, pues presentan recolecciones mayores a ambos prototipos de referencia (Plano y V-Shaped extendido), y considerando el punto donde se maximiza la diferencia entre el modelo V-Shaped con cada orientación de hilos y su respectiva comparación con los demás modelos, es posible verificar lo siguiente. Dado el beneficio máximo para el caso de hilos horizontales en un ángulo de 29.09° con un 6.24 %, y para el caso de hilos verticales con un ángulo de 33.64° y un 21.38 %, se podría concluir finalmente que el caso óptimo de los modelos V-Shaped sería un modelo con hilos verticales en un ángulo cercano a 33.64° , para la solidez y las condiciones de laboratorio descritas. Esto ocurre debido a que por inspección se puede

verificar en la Fig. 5.4 que en el ángulo óptimo descrito para el modelo de hilos verticales (33.64°) siempre estará sobre la curva de hilos horizontales en un 11.64 % y no así el otro caso, donde se observa que si se considera el ángulo de 29.09° , el modelo de hilos verticales presenta solo una ventaja de 3.76 % con respecto al modelo de hilos horizontales, siendo una razón suficiente para no considerar esta segunda propuesta y descartar definitivamente los hilos en formato horizontal.

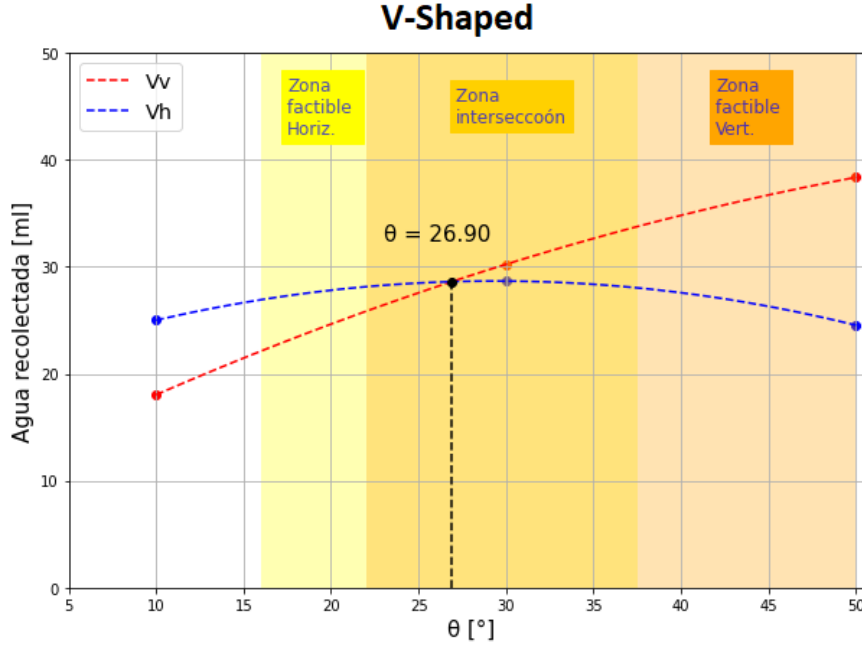


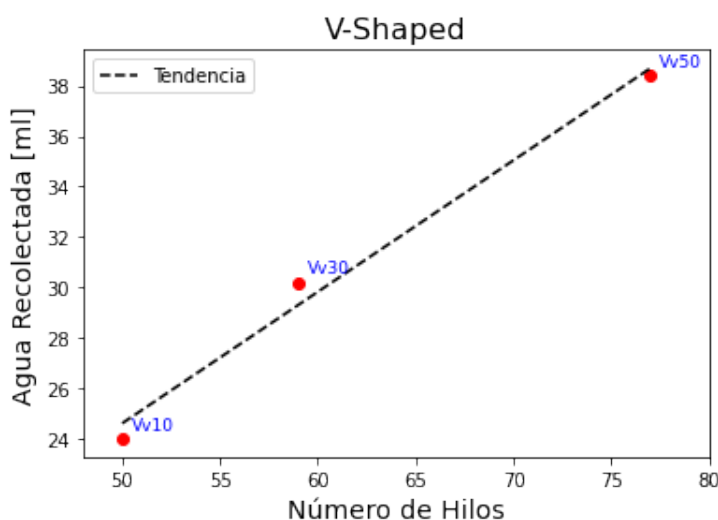
FIGURA 5.4: Comparación de tendencias de modelo V-Shaped con hilos verticales e hilos horizontales.

Dado que el caso más viable es el de hilos verticales, es posible demostrar por medio de la tabla 5.3 y la gráfica 5.5 que la recolección por hilo de un prototipo V-Shaped con hilos verticales es aproximadamente la misma que la de un prototipo plano con la misma orientación de hilos. Es decir, el incremento en el agua recolectada total de un modelo V-Shaped ocurre casi exclusivamente por el aumento del número de hilos con respecto a su versión plana. Por consiguiente, para esos casos, considerando el supuesto de que todos los hilos recolectan la misma cantidad de agua, se cumple que (Siendo w_{coll} el agua total recolectada, w_h el agua total recolectada por hilo y n_h el número de hilos del modelo):

$$w_{coll} = w_h \cdot n_h \quad (5.1)$$

TABLA 5.3: Cálculo de agua total recolectada por hilo en el tiempo de experimentación.

Prototipo	Nº de hilos Exp.	Agua recolectada (ml)	Agua recolectada por hilo (ml/hilo)	% relativo agua recolectada por hilo
Vv10	50	24.0	0.48000	92.90
Vv30	59	30.2	0.51243	99.18
Vv50	77	38.4	0.49827	96.44
Pv0	50	25.8	0.51667	100.00
			Promedio	97.13

FIGURA 5.5: Relación lineal entre el número de hilos y el agua recolectada en modelos V-Shaped con $R^2=0.98$.

5.3. Resultados y discusión atrapanieblas SR en 2.5D

Por otra parte, para exponer los resultados de este segundo experimento se presenta la Fig. 5.6 que muestra una comparación entre todos los modelos estudiados para distintas velocidades permitiendo observar en detalle las distintas diferencias e información para cada caso. Lo primero que es posible destacar es que el modelo que más recolecta es el MPO de 250 hilos considerando 4 m/s con un valor de 91.15 ml, luego, en segundo lugar, se encuentra nuevamente el modelo MPO con 250 hilos, pero frente a un flujo con una velocidad de 8 m/s y 82.04 ml de agua recolectada total en el tiempo de experimentación. También, se observa que los modelos con mayor velocidad (12 y 16 m/s) son los que menos agua recolectan en el tiempo de estudio producto que existe un gran reingreso de las gotas capturadas al flujo de niebla, ya que la fuerza de arrastre supera en gran medida a la fuerza asociada a la tensión superficial de la gota sobre el hilo, siendo el modelo MH con 100 y 150 hilos los peores casos. En general se podría decir que los modelos MPO presentan un gran rendimiento a bajas velocidades con respecto a los otros modelos, rendimiento que es mermado por el aumento de la velocidad, siendo esto último aplicado para todos los prototipos.

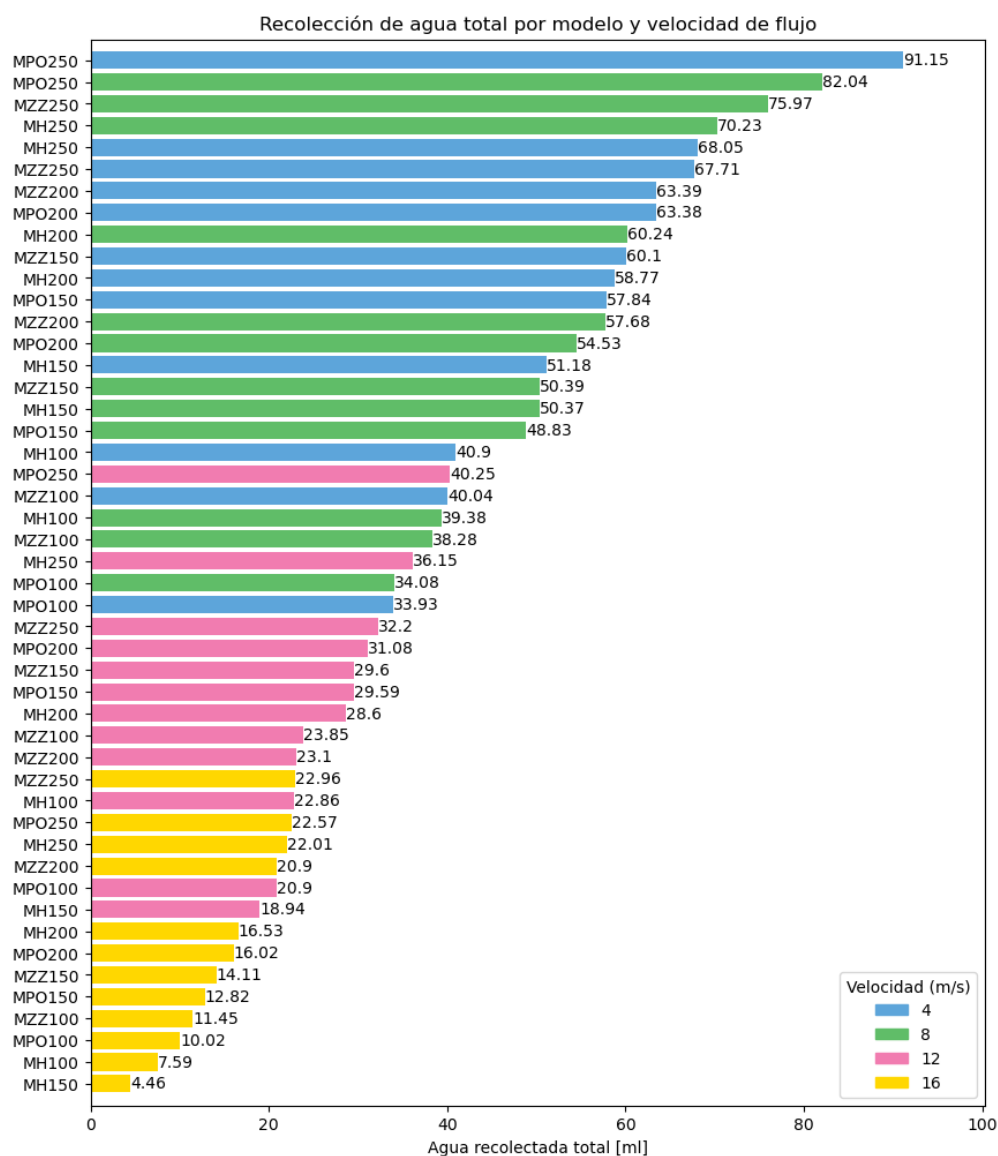


FIGURA 5.6: Recolección total de agua para los distintos modelos y número de filamentos con una distinción por color en la velocidad del flujo.

Por otra parte, a modo de visualizar los datos de manera específica y detallada se proponen las gráficas que se presentan a continuación. En primer lugar, se presenta una gráfica donde se relaciona el agua recolectada total para cada experimento, la velocidad del flujo y el modelo respectivo considerando que el número de hilos se mantiene constante en cada esquema (Fig. 5.7). Entonces, lo primero que es posible concluir de la gráfica es que independiente del número de hilos y el modelo, en la mayoría de los casos se reducirá la recolección de agua con el aumento de la velocidad del flujo. Luego, cuando se consideran 100 hilos en los modelos se observa que presentan recolecciones similares para distintas velocidades producto que en todos los casos la malla es sumamente abierta y la forma propia de cada modelo no afecta en demasía a los resultados dado que poseen una baja densidad de malla, esto se podría interpretar como una especie de “falta de identidad” entre los distintos modelos. Más aún, cuando aumenta la cantidad de hilos, es posible verificar que los modelos comienzan a presentar una mayor diferencia entre ellos, específicamente,

el modelo MPO con 250 hilos posee una ventaja significativa para todas las velocidades sin considerar el caso de 16 m/s y por otro lado, se observa que el prototipo MZZ para 8 m/s supera a MH y luego, para 12 m/s, ocurre el caso contrario.

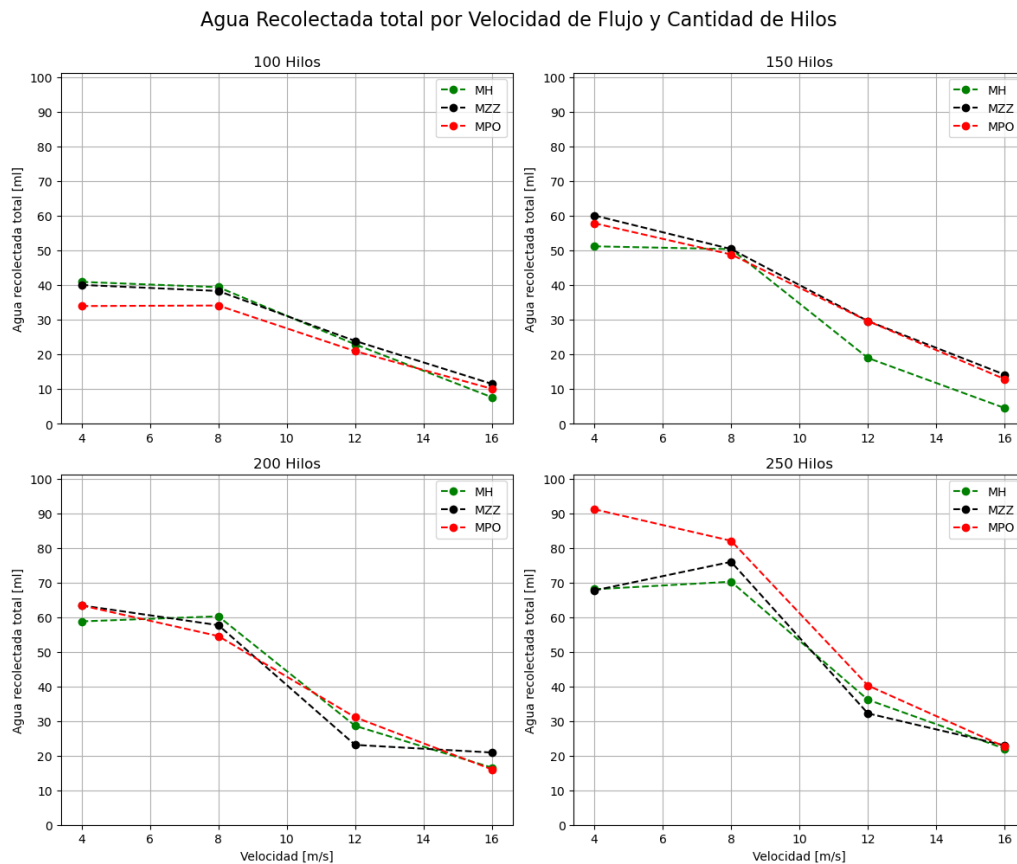


FIGURA 5.7: Variación del agua recolectada total con respecto a la velocidad del flujo para distintos modelos y número de hilos.

En segundo lugar, se busca relacionar la recolección de agua total obtenida de forma experimental con el número de hilos y el tipo de modelo, considerando que la velocidad del flujo se mantiene constante para cada gráfica (Fig. 5.8). Por lo tanto, es posible concluir que para todos los casos se aumenta la recolección de agua total con la presencia de más hilos debido a que aumenta la probabilidad de capturar las gotas de la niebla que entra a la malla, es decir, aumenta la *fracción incidente*. No obstante, se espera que el agua recolectada alcance un valor máximo para una cierta cantidad de hilos mayor a 250 y posteriormente comience a disminuir hasta llegar a cero con una malla de solidez igual a 1, esto ocurre porque al incrementar el número de filamentos, también, disminuye la Fracción Filtrada. En esta misma línea, por inspección se podría decir que mientras aumenta la velocidad del flujo, nuevamente, se reduce la recolección y también, se reduce la pendiente de recolección por número de hilos, dicho de otro modo, al aumentar la velocidad del flujo las mallas tipo SR presentan una recolección de agua más independiente del número de hilos presentes en la misma, dado que a menor pendiente (Agua recolectada / N° de hilos), decrece la importancia en incluir una mayor cantidad de hilos, pues se va a mantener una recolección de agua similar (Fig. 5.8).

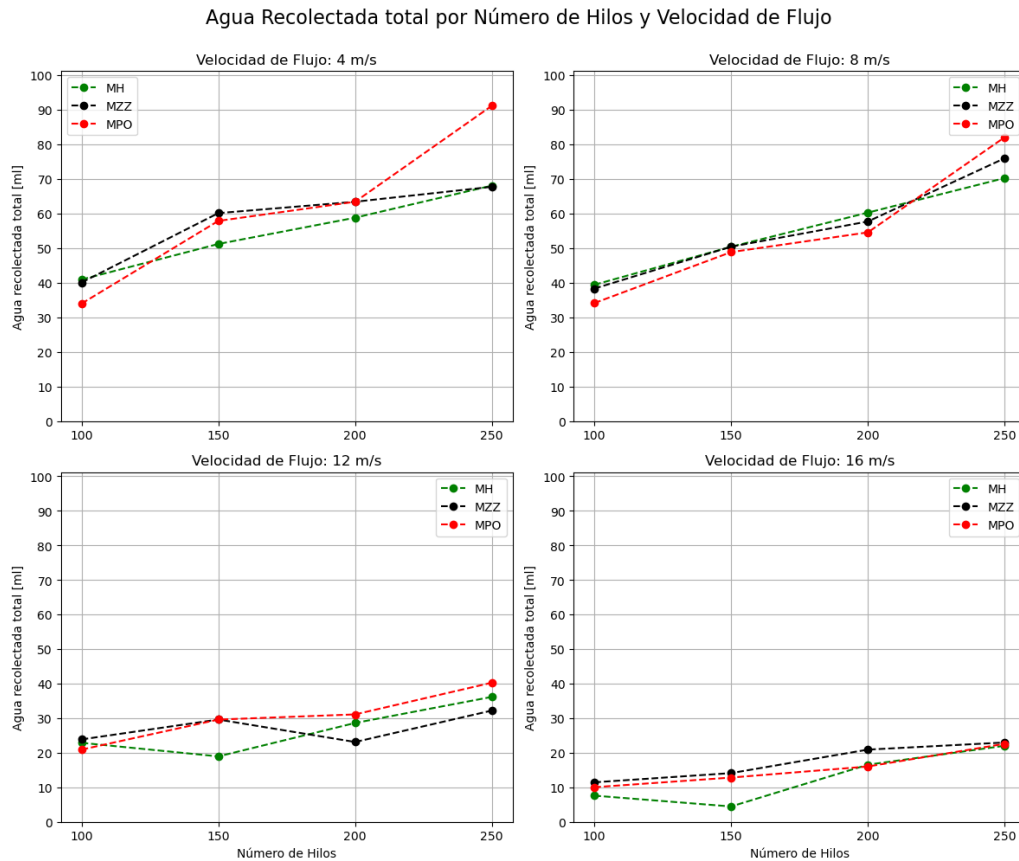


FIGURA 5.8: Variación del agua total recolectada con respecto al número de hilos para distintos modelos y velocidad del flujo.

En tercer lugar, se busca representar la ventaja o desventaja porcentual que presenta el modelo MPO con respecto a los otros prototipos (Fig. 5.9). Primero, en la comparación que se realiza con respecto al modelo Mini ZigZag se puede verificar visualmente que el modelo MPO supera en recolección total de agua para mayor cantidad de hilos y menor velocidad del flujo. Más aún, en el mejor de los casos supera al modelo MZZ con un 25.72 % para 250 hilos y 4 m/s. Por el contrario, otra verificación importante se basa en que para pequeñas cantidades de hilos (100 y 150) el modelo MZZ presenta mayor eficiencia bajo las mismas condiciones, sin embargo, se requiere que el nuevo modelo presente mejores resultados para mayores cantidades de hilos (cercanas a 250), debido a que se busca optimizar el número de hilos que maximice la cantidad de agua recolectada para una cierta velocidad, dado que se utiliza la mayor proporción del espacio del modelo de 2.5D con un gran aumento en la eficiencia de recolección, sin incurrir en excesivos costos de inversión inicial como lo sería un modelo 3D y por todo ello, es preferible utilizar un modelo MPO a un malla con forma de Mini ZigZag. Por otro lado, si se considera la comparación realizada con el modelo MultiHarp, sin considerar los 65.19 %, 24.31 % y 36.01 % que podrían ser datos atípicos, pues no presentan gran relación con los datos de la periferia y también considerando que la velocidad de 12 y 16 m/s son las situaciones más errática estadísticamente hablando, la mayor recolección se obtiene para 250 hilos y 4 m/s, con una ventaja de 25.35 %. En cambio, si se consideran los valores obtenidos para 100 hilos, es posible decir que para mallas menos densas, al igual que para el caso MZZ, el modelo MPO presenta una alta desventaja. Si bien es importante considerarlo frente a posibles diseños con mallas de baja densidad, el modelo MPO es

mejor alternativa que los otros modelos, pues los óptimos se encuentran para mayor cantidad de hilos.

Diferencia porcentual de recolección total de agua para modelos MPO con respecto a MZZ y MH.

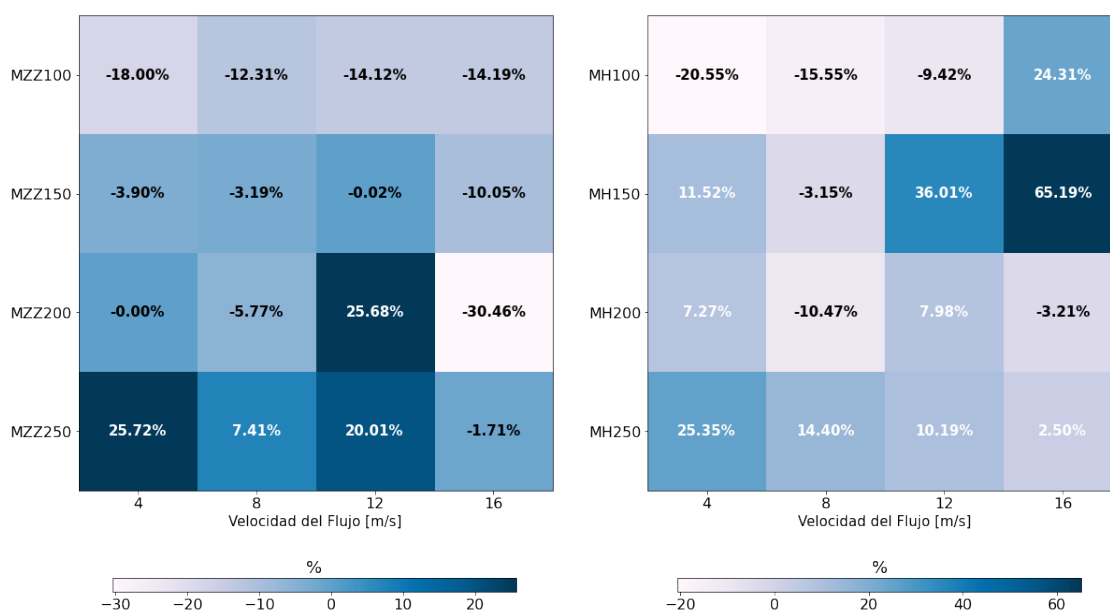


FIGURA 5.9: Mapas de color de diferencia porcentual del agua recolectada total del modelo MPO con respecto a los modelos MZZ y MH.

Para finalizar la muestra de resultados experimentales se presenta la figura 5.10 donde se observa una comparación entre el modelo MZZ y MH considerando que los porcentajes 33.71 %, 36.02 % y 68.37 % parecen ser resultados atípicos porque presentan valores excesivos y no acorde a los resultados colindantes, esto se debe al comportamiento errático de los atrapanieblas en altas velocidades. En primer lugar, se podría observar que rangos donde los atrapanieblas SR son útiles (número de hilos en el rango 200-250 y bajas velocidades 4-8 m/s) se podría decir que ambos modelos presentan comportamientos similares, destacando que el modelo MZZ presenta un comportamiento superior en la recolección de agua con un 7.55 % para 250 hilos en una velocidad de 8 m/s y notando que para 4 m/s es indistinto utilizar uno u otro modelo para aquella cantidad de hilos. Ahora bien, si se consideran 200 hilos se podría decir que el modelo MZZ presenta una ventaja de 7.28 % con una velocidad de 4 m/s y una desventaja de 4.44 % con 8 m/s. Entonces, se podría concluir que el modelo MZZ presenta una ventaja de $\approx 7\%$ con respecto al modelo MH, considerando que si existe una velocidad promedio en la zona de instalación de 4 m/s se deben utilizar modelos (Con su respectiva escala dado que estos son modelos de laboratorio) de 200 hilos y en caso contrario, si existe una velocidad promedio de aproximada de 8 m/s es necesario incluir un modelo MZZ con 250 hilos (nuevamente, con su respectiva escala). Notar que es necesario evaluar económicamente si una mejora de la recolección de un $\approx 7\%$ es suficientemente ventajosa para utilizar uno u otro modelo, ya que es importante recordar que el modelo MH de 250 hilos para 4 m/s presenta igual recolección que el modelo MZZ y para 8 m/s presenta una ventaja de 4.44 % para 200 hilos, por consiguiente, también es importante revisar el valor del agua total recolectada en ml.

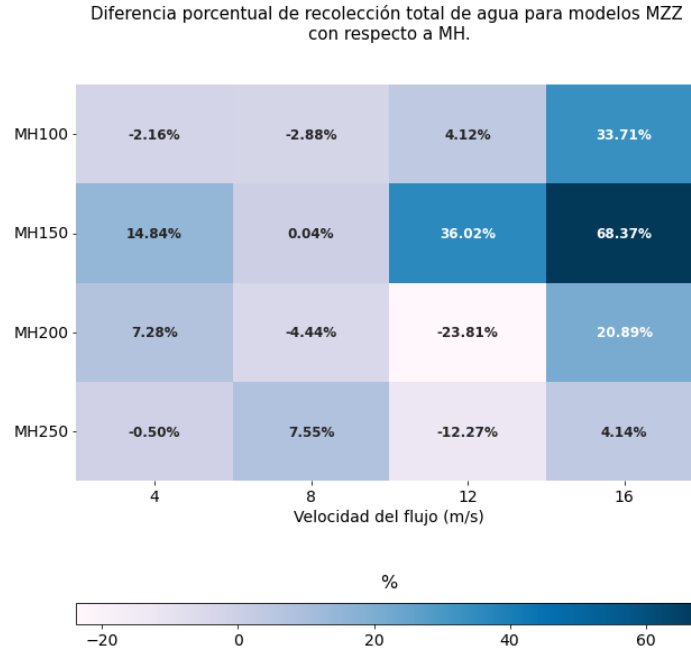


FIGURA 5.10: Mapa de color de la diferencia porcentual de recolección total de agua del modelo MZZ con respecto a modelo MH.

Posterior a exponer los resultados, se propone una ecuación (Ec. 5.2) que permite relacionar los elementos estudiados en este segundo experimento (El agua recolectada w_{coll} en ml, el tiempo t en segundos, el número de hilos n_h y la velocidad del flujo libre u_∞ en m/s, siendo K_1, K_2 y K_3 constantes). Notar que los valores de las constantes (Tab. 5.4) dependen del modelo, porque se buscaba minimizar el ECM para cada uno de los casos y también, destacar que la expresión es válida solo para $4 \leq u_\infty \leq 8$, $100 \leq n_h \leq 250$ y $t \geq 0$ considerando que la recolección se encuentra en estado estacionario.

$$\frac{dw_{coll}}{dt} = K_1 \cdot n_h - K_2 \cdot u_\infty^2 + K_3 \quad (5.2)$$

TABLA 5.4: Valor de constantes experimentales de expresión matemática propuesta.

Modelo	K_1 (ml/s)	K_2 (s·ml/m ²)	K_3 (ml/s)	ECM
MZZ	0.00015	0.00021	0.04740	6.6233×10^{-5}
MPO	0.00023	0.00023	0.03773	8.1662×10^{-5}
MH	0.00017	0.00022	0.04277	3.9612×10^{-5}

Luego, si se aplica el método de separación de variables a la ecuación 5.2 se obtiene la ecuación general del agua recolectada para los modelos basados en superficies regladas en 2.5D (con recolección de agua inicial w_0 en un tiempo inicial ($t = 0$ s) y una recolección de agua en un tiempo determinado $w_{coll}(t)$):

$$w_{coll}(t) = K_1 \cdot n_h \cdot t - K_2 \cdot u_\infty^2 \cdot t + K_3 \cdot t + w_0 \quad (5.3)$$

Esta ecuación permite capturar la linealidad del estado estacionario de recolección de agua en el tiempo (Fig. 5.1c), la linealidad asociada al número de hilos (Fig. C.1) y por último, la relación cuadrática con la velocidad del flujo (Fig. C.2), todo esto con elevados valores de R^2 para cada uno de los casos estudiados, lo que implica una alta representatividad de los datos experimentales con la expresión matemática, específicamente, se observan valores de 0.9236, 0.8839 y 0.8635 para los modelos MH, MPO Y MZZ respectivamente (Fig. 5.11).

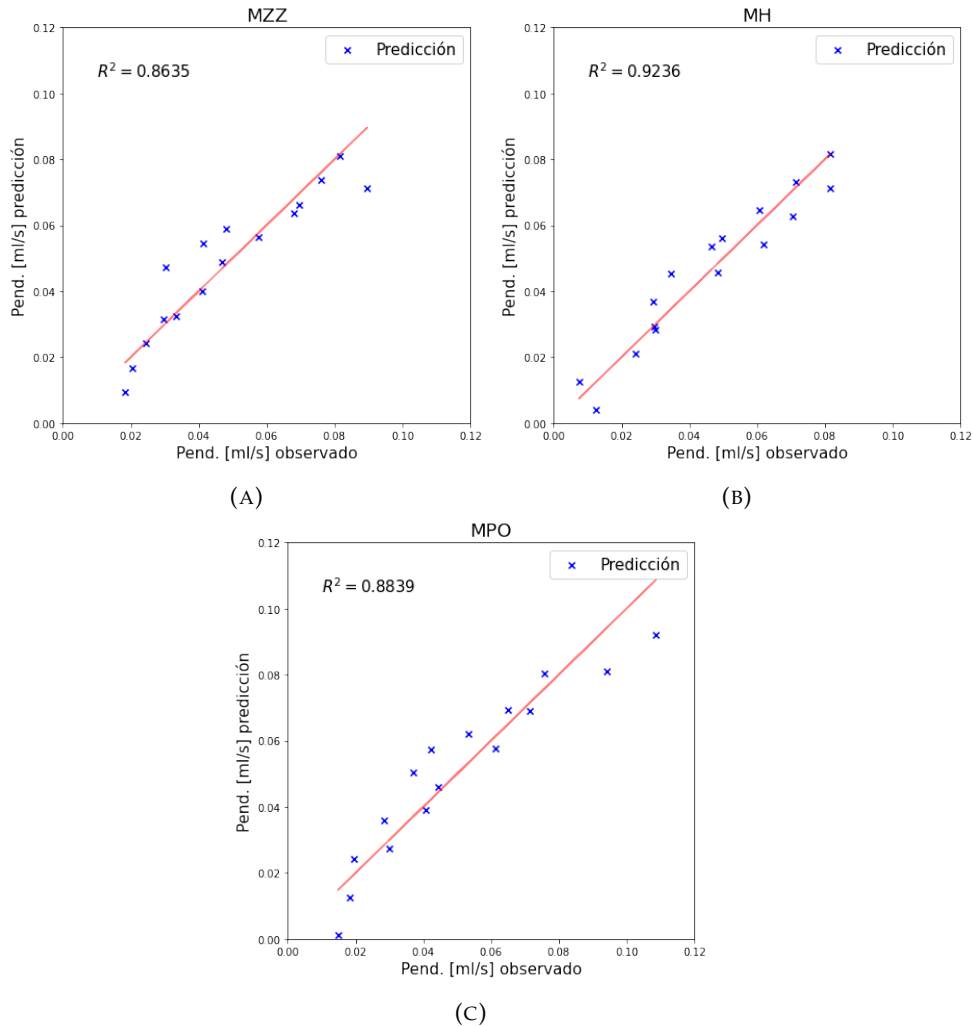


FIGURA 5.11: A) Comparación entre pendiente del agua recolectada en el tiempo (ml/s) observada (Experimental) y predicción (Teórica) para modelos MZZ. B) Comparación entre pendiente observada y predicción para modelos MH. C) Comparación entre pendiente observada y predicción para modelos MPO.

Por último, dada la linealidad demostrada del agua recolectada con respecto al tiempo para una velocidad y número de hilos dada, se procede a calcular el valor del agua recolectada para el rango estudiado (Fig. 5.12). De la gráfica se desprenden las mismas conclusiones obtenidas por los datos experimentales, es decir, independiente del modelo, el agua recolectada decrece cuando se aumenta la velocidad y crece cuando se aumenta el número de hilos, observando que los mayores rendimientos se presentan en el modelo MPO.

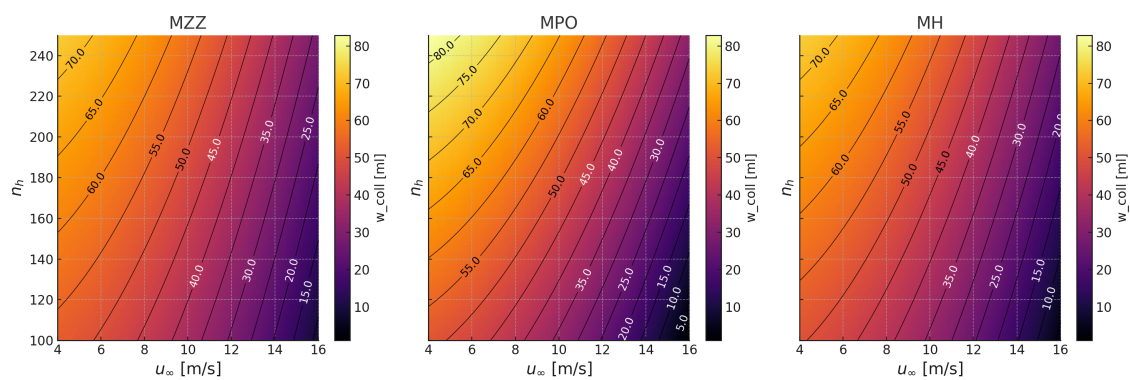


FIGURA 5.12: Mapa de calor y curvas de nivel del agua recolectada total en relación con el número de hilos y la velocidad del flujo.

Capítulo 6

Conclusiones

La presente investigación ha abordado de manera integral el estudio de los atrapanieblas como una solución innovadora y sostenible para la recolección de agua en zonas áridas. A través de un enfoque metodológico detallado y experimental, se ha logrado comparar diferentes modelos de atrapanieblas, destacando la eficiencia del modelo V-Shaped y de Mallas Paralelas Onduladas (MPO) en condiciones específicas. Los resultados obtenidos no solo confirman la viabilidad de estos sistemas, sino que también proporcionan una base sólida para futuras mejoras y aplicaciones prácticas.

En primer lugar, la metodología aplicada al estudio de los atrapanieblas, basada en la obtención de datos por segundo de un volumen de agua durante un periodo de 15 minutos, permite visualizar el comportamiento lineal de la recolección de agua después de la saturación inicial de la malla. Aunque esta metodología es más robusta, es indistinto utilizar el valor de la pendiente o el valor final del agua recolectada en un tiempo t , dado que el fenómeno muestra una linealidad posterior a la saturación y la proporción de tiempo que la malla tarda en saturarse es baja, por lo cual este fenómeno no resulta significativo en el proceso. Sin embargo, la visualización de los datos a lo largo de todo el proceso de experimentación permite un mayor control del evento, ya que en ciertas ocasiones se presentan fugas de agua, lo cual es necesario corregir para evitar datos que perjudiquen la investigación.

En segundo lugar, los resultados del primer experimento indican que los modelos V-Shaped con hilos verticales (Vv) son una alternativa viable de implementación. Tanto los valores específicos como las tendencias de los datos muestran que, para ángulos intermedios (aproximadamente 30°), existe un beneficio en la recolección de agua del 14.6 % y 14.8 % en comparación con el modelo plano (Pv) y su versión extendida (Vv*), respectivamente. Además, el modelo Vv supera en un 5.16 % al modelo en V-Shaped con hilos horizontales (Vh).

Luego, dado que el modelo con hilos verticales es el prototipo con mayor viabilidad, se ha demostrado que la tasa de recolección por hilo de un modelo en forma de V con esta orientación de filamentos es aproximadamente igual a la de un modelo plano (Pv). Esto sugiere que el aumento en la recolección total de agua en un modelo Vv se debe principalmente al incremento del número de filamentos, según la relación: $w_{coll} = w_h \cdot n_h$, donde el agua recolectada total (w_{coll}) se calcula como el agua recolectada por hilo (w_h) multiplicada por el número de hilos (n_h).

Finalmente, aunque este modelo muestra viabilidad en laboratorio en términos de la cantidad de agua que puede capturar comparado con los modelos estudiados,

es crucial realizar un análisis económico y un estudio en terreno para validar sus posibles aplicaciones prácticas y su viabilidad económica.

En el segundo experimento vinculado al estudio de atrapanieblas basados en Superficies Regladas (SR) en 2.5D, se llega a la conclusión de que en estas estructuras de malla se reduce la recolección total de agua de forma cuadrática a medida que aumenta la velocidad. Por otro lado, la recolección de agua aumenta linealmente con el incremento del número de filamentos presentes en el prototipo. Además, se observa que a medida que disminuye la cantidad de hilos, la similitud en la cantidad de agua recolectada entre los distintos modelos aumenta, independientemente de la velocidad del flujo. Por el contrario, a medida que aumenta la cantidad de hilos, los prototipos comienzan a diferenciarse más entre sí en términos de recolección de agua, mostrando una especie de “identidad personal” asociada a la estructura de la malla. También se demuestra que a medida que aumenta la velocidad, la recolección de agua se vuelve más independiente del número de hilos, es decir, a altas velocidades, la cantidad total de agua recolectada será similar tanto en modelos con 100 como con 250 filamentos.

En cuanto a los resultados específicos, se concluye que el modelo MPO muestra los mejores resultados, con una ventaja de aproximadamente el 25,5 % en la recolección total de agua en comparación con los modelos MiniZigZag (MZZ) y MultiHarp (MH), bajo las condiciones en las que los modelos SR presentan su mejor desempeño: bajas velocidades (4 y 8 m/s) y una alta cantidad de filamentos (200 y 250). Además, es importante destacar que el modelo MPO muestra una desventaja cuando se consideran mallas con una menor cantidad de filamentos, independientemente de la velocidad. En consonancia con lo anterior, la proposición de una ecuación que relaciona los elementos estudiados en este experimento proporciona un marco teórico robusto para entender y predecir la recolección de agua en atrapanieblas SR. Esta ecuación, derivada y validada mediante datos experimentales, representa una herramienta fundamental para el diseño y la optimización de estructuras de atrapanieblas al ofrecer una forma de calcular la cantidad de agua recolectada en función de variables clave como el tiempo, la velocidad del flujo y el número de hilos.

Es importante señalar que esta investigación marca el inicio de un camino continuo en el estudio de los atrapanieblas V-Shape y SR. Los fundamentos establecidos en este trabajo guiarán futuras investigaciones en esta área, abriendo diversas líneas de estudio para seguir profundizando en el tema.

En primer lugar, respecto a los modelos V-Shape, sería prudente explorar ángulos (θ) intermedios y superiores, junto con un análisis detallado de la influencia de la velocidad del flujo.

En segundo lugar, es crucial investigar cómo afectan las cargas del viento a las estructuras 3D, identificando los materiales necesarios y las medidas de mantenimiento requeridas para su implementación efectiva en el terreno. Este análisis debe incluir una evaluación económica para determinar la viabilidad técnica y financiera de los atrapanieblas.

En tercer lugar, en el caso del experimento relacionado con los atrapanieblas SR en 2.5D, sería interesante explorar un rango de velocidades más bajo (0 a 4 m/s) para determinar el valor óptimo de la velocidad del flujo. También se sugiere investigar prototipos con más de 250 filamentos para comprender cómo afecta la densidad de malla a la recolección de agua y si existe un punto en el que se pierde la distintiva “identidad personal” de cada modelo. Del mismo modo, se espera que se realicen

distintas modificaciones de la malla del modelo MPO, cambios basados en las implementaciones que se han realizado con los filtros PPO (Revisar Fig. 2.9).

Por último, se propone la implementación en terreno de sistemas de captura basados en los modelos MPO, MZZ y MH para validar los resultados obtenidos en esta investigación y verificar su eficacia en condiciones reales. Esta etapa práctica será fundamental para confirmar la viabilidad y eficiencia de los atrapanieblas estudiados.

En resumen, tras analizar los argumentos y conclusiones obtenidas, se observa que, al menos en el ámbito del laboratorio, se confirma la hipótesis planteada. Los modelos V-Shape y MPO muestran una recolección de agua superiores en comparación con los otros modelos estudiados. Es importante destacar que este trabajo no solo contribuye al conocimiento científico sobre la recolección de agua de niebla, sino que también sienta las bases para el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles. Estas tecnologías tienen el potencial de generar un impacto significativo en la disponibilidad de agua en regiones áridas, abordando así un desafío fundamental en la seguridad hídrica global.

Referencias

- Alamshahi, F., Rahimzadeh, H., Rafee, R., Moghimi, M. A., y Talebizadehsardari, P. (2020). Effects of roughness on the performance of a threaded zigzag demister using rsm and $k-\omega$ turbulent models. *Sādhanā*, 45(1), 283. doi: 10.1007/s12046-020-01510-2
- Andrews, H. G., Eccles, E. A., Schofield, W. C. E., y Badyal, J. P. S. (2011). Three-dimensional hierarchical structures for fog harvesting. *Langmuir*, 27(7), 3798–3802. doi: 10.1021/la2000014
- Azeem, M. (2021). *Scientific design of multilayer fog collectors* (PhD thesis). Technical University of Liberec, Faculty of Textile Engineering, Liberec, Czech Republic.
- Azeem, M., Guérin, A., Dumais, T., Caminos, L., Goldstein, R. E., Pesci, A. I., ... Dumais, J. (2020). Optimal design of multilayer fog collectors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(6), 7736–7743. doi: 10.1021/acsami.9b19727
- Banitabaei, S. A., Rahimzadeh, H., y Rafee, R. (2012). Determination of minimum pressure drop at different plate spacings and air velocity in a wave-plate mist eliminator. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7(4), 590-597. doi: 10.1002/apj.611
- Bell, C. G., y Strauss, W. (1973). Effectiveness of vertical mist eliminators in a cross flow scrubber. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 23(11), 967–969. doi: 10.1080/00022470.1973.10469867
- Burkholz, A. (1981). Mist elimination. En G. M. Bragg y W. Strauss (Eds.), *Air pollution control, part iv* (p. Chapter 4). New York, USA: Wiley Interscience.
- Cai, Z., Wang, P., Luo, X., Huang, J., Qin, Z., Mei, J., y Zhao, W. (2022). Numerical investigation on the influence of class number and wavelength on the performance of curved vane demisters. *Atmosphere*, 13(10). doi: 10.3390/atmos13101711
- Caretta, M., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., ... Supratid, S. (2022). *Water. in: Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (Inf. Téc.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. doi: 10.1017/9781009325844.006
- Carvajal, D., Silva-Llanca, L., Larraguibel, D., y González, B. (2020). On the aerodynamic fog collection efficiency of fog water collectors via three-dimensional numerical simulations. *Atmospheric Research*, 245, 105123. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105123
- Castelli, G., Sanchez, A. C., Mestrallet, A., Montaña, L. C., de Armentia, T. L., Salbitano, F., y Bresci, E. (2023). Fog as unconventional water resource: Mapping fog occurrence and fog collection potential for food security in southern bolivia. *Journal of Arid Environments*, 208, 104884. doi: 10.1016/j.jaridenv.2022.104884
- Cereceda, P., Hernández, P., Leiva, J., y de Dios Rivera, J. (2014). *Agua de niebla. nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable en zonas áridas y semiáridas* (1.ª ed.). KS OmniScriptum Publishing.
- Chen, B., Wang, B., Mao, F., Ke, B., Wen, J., Tian, R., y Lu, C. (2020). Review on separation mechanism of corrugated plate separator. *Annals of Nuclear Energy*, 144, 107548. doi: 10.1016/j.anucene.2020.107548
- Chen, H.-Y., y Pottmann, H. (1999). Approximation by ruled surfaces. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 102(1), 143-156. (Computational Methods in Computer Graphics) doi: 10.1016/S0377-0427(98)00212-X
- Curić, M., y Janc, D. (1995). On the sensitivity of the continuous accretion rate

- equation used in bulk-water parameterization schemes. *Atmospheric Research*, 39(4), 313–332. doi: 10.1016/0169-8095(95)00022-4
- De la Jara, E. (2012). *Modelación computacional del impacto de gotas de niebla en fibras cilíndricas paralelas* (Master's thesis). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Domen, J. K., Stringfellow, W. T., Camarillo, M. K., y Gulati, S. (2014). Fog water as an alternative and sustainable water resource. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(2), 235–249. doi: 10.1007/s10098-013-0645-z
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R., Arias, P., Barlow, M., ... Zolina, O. (2021). *Water cycle changes. in climate change 2021: The physical science basis* (Inf. Téc.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. doi: 10.1017/9781009157896.010
- Edge, W. (2011). *The theory of ruled surfaces*. Cambridge University Press.
- Estakhrsar, M. H., y Rafee, R. (2016). Effects of wavelength and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels. *Applied Mathematical Modelling*, 40(2), 685–699. doi: 10.1016/j.apm.2015.08.023
- Estakhrsar, M. H. H., y Rafee, R. (2013). Effect of drainage channel dimensions on the performance of wave-plate mist eliminators. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30(6), 1301–1311. doi: 10.1007/s11814-013-0032-9
- Fang, C., Zou, R., Luo, G., Ji, Q., Sun, R., Hu, H., ... Yao, H. (2021). Cfd simulation design and optimization of a novel zigzag wave-plate mist eliminator with perforated plate. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116212. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116212
- Fang, C., Zou, R., Luo, G., Li, C., Lv, M., Wang, L., ... Yao, H. (2023). Numerical simulation and optimization of coupled demister with directing and perforated plate in msf plants. *Desalination*, 547, 116192. doi: 10.1016/j.desal.2022.116192
- Flöry, S., y Pottmann, H. (2010). Ruled surfaces for rationalization and design in architecture. En *Life in: formation. on responsive information and variations in architecture* (pp. 103–109). Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA).
- Galletti, C., Brunazzi, E., y Tognotti, L. (2008). A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels. *Chemical Engineering Science*, 63(23), 5639–5652. doi: 10.1016/j.ces.2008.08.013
- Glickman, T. S. (2000). *Glossary of meteorology*. Boston, MA, USA: American Meteorological Society.
- Guan, L., Yuan, Z., Yang, L., y Gu, Z. (2016). Numerical study on the penetration of droplets in a zigzag demister. *Environmental Engineering Science*, 33(1), 35–43. doi: 10.1089/ees.2014.0367
- Gutiérrez, R., Villarroel, C., Aravena, C., Vilches, C., y Vázquez, R. (2022). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile* (Inf. Téc.). Oficina Cambio Climático de la Sección Climatología de la Dirección Meteorológica de Chile.
- Hamilton, W. J., y Seely, M. K. (1976). Fog basking by the namib desert beetle, *Onymacris unguicularis*. *Nature*, 262(5566), 284–285.
- Holmes, R., Rivera, J. d. D., y de la Jara, E. (2015). Large fog collectors: New strategies for collection efficiency and structural response to wind pressure. *Atmospheric Research*, 151, 236–249. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.06.005
- INN. (2005). *Agua potable - parte 1 - requisitos*. Santiago, Chile. (NCh409/1.Of2005, Norma Chilena Oficial)

- James, P., Azzopardi, B., Wang, Y., y Hughes, J. (2005). A model for liquid film flow and separation in a wave-plate mist eliminator. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(5), 469–477. doi: 10.1205/cherd.03363
- James, P., Wang, Y., Azzopardi, B., y Hughes, J. (2003). The role of drainage channels in the performance of wave-plate mist eliminators. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(6), 639–648. doi: 10.1205/026387603322150499
- Kavousi, F., Behjat, Y., y Shahhosseini, S. (2013). Optimal design of drainage channel geometry parameters in vane demister liquid–gas separators. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(7), 1212–1222. doi: 10.1016/j.cherd.2013.01.012
- Kim, M.-W., Noh, S.-Y., Zahir, M. Z., y Yook, S.-J. (2021). Performance improvement of a horizontal zigzag type mist eliminator using slit plates. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(5), 2229–2236. doi: 10.1007/s12206-021-0439-x
- Klemm, O., Schemenauer, R. S., Lummerich, A., Cereceda, P., Marzol, V., Corell, D., ... others (2012). Fog as a fresh-water resource: overview and perspectives. *Ambio*, 41(3), 221–234. doi: 10.1007/s13280-012-0247-8
- Koopman, H. K., Çağatay Köksoy, Özgür Ertunç, Lienhart, H., Hedwig, H., y Delgado, A. (2014). An analytical model for droplet separation in vane separators and measurements of grade efficiency and pressure drop. *Nuclear Engineering and Design*, 276, 98–106. doi: 10.1016/j.nucengdes.2014.05.034
- Labbé, R., y Duprat, C. (2019). Capturing aerosol droplets with fibers. *Soft Matter*, 15(35), 6946–6951. doi: 10.1039/C9SM01205B
- Larrain, H., Velásquez, F., Cereceda, P., Espejo, R., Pinto, R., Osses, P., y Schemenauer, R. S. (2002). Fog measurements at the site “falda verde” north of chañaral compared with other fog stations of chile. *Atmospheric Research*, 64(1), 273–284. doi: 10.1016/S0169-8095(02)00098-4
- Li, J., Huang, S., y Wang, X. (2007). Numerical study of steam-water separators with wave-type vanes. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15(4), 492–498. doi: 10.1016/S1004-9541(07)60114-1
- Li, S., Wang, P., Luo, X., Wang, Y., Yang, X., Thakur, A. K., y Zhao, W. (2020). Numerical analysis of chevron demisters with drainage hooks in optimizing separation performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 119522. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119522
- Liu, Y., y Qu, Z. (2017). Numerical investigation of moisture separators with corrugated plates. *Energy Procedia*, 105, 1501–1506. (8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 8–11 October 2016, Beijing, China) doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.450
- Liu, Y., Yu, D., Jiang, J., Yu, X., Yao, H., y Xu, M. (2017). Experimental and numerical evaluation of the performance of a novel compound demister. *Desalination*, 409, 115–127. doi: 10.1016/j.desal.2017.01.022
- Ma, W., Wu, X., y Ji, Z. (2019). Design and performance measurement of wave-plate mist eliminator with microstructural feature plate surface. *Desalination and Water Treatment*, 160, 378–387. doi: 10.5004/dwt.2019.24307
- Makowski, L., Laskowski, J., y Tyrański, M. (2021). Influence of modification of the geometry of the wave-plate mist eliminators on the droplet removal efficiency—cfd modelling. *Processes*, 9. doi: 10.3390/pr9091499
- Mao, F., Tian, R., Chen, Y., Chen, B., Wang, B., y Sun, L. (2018). Re-entrainment in and optimization of a vane mist eliminator. *Annals of Nuclear Energy*, 120, 656–665. doi: 10.1016/j.anucene.2018.06.011
- Mekonnen, M. M., y Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. doi: 10.1126/sciadv.1500323
- Melillo, J. M., Richmond, T. C., y Yohe, E., G. W. (2014). *Climate change impacts in the*

- united states: *The third national climate assessment* (Inf. Téc.). U.S. Global Change Research Program. doi: 10.7930/J0Z31WJ2
- Molina, S. M. G., Guevara, J. T., y cols. (2009). Gestión ambiental de las tierras secas del sur del Perú: cosecha del agua de neblinas en lomas de atiquipa. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 30(3), 34–38.
- Montecinos, S., Carvajal, D., Cereceda, P., y Concha, M. (2018). Collection efficiency of fog events. *Atmospheric Research*, 209, 163–169. doi: 10.1016/j.atmosres.2018.04.004
- Nakao, T., Nagase, M., Aoyama, G., y Murase, M. (1999). Development of simplified wave-type vane in bwr steam dryer and assessment of vane droplet removal characteristics. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 36(5), 424–432. doi: 10.1080/18811248.1999.9726225
- Narimani, E., y Shahhoseini, S. (2009). A comparison between two types of vaned mist eliminators. *Journal of Chemical Engineering Research*, 33(5), 123–129. doi: 10.1016/j.ces.2009.04.012
- Neelin, J. D. (2011). *Climate change and climate modeling* (1.^a ed.). Cambridge University Press.
- Neelin, J. D., Martinez-Villalobos, C., Stechmann, S. N., Ahmed, F., Chen, G., Norris, J. M., ... Lenderink, G. (2022). Precipitation extremes and water vapor. *Current Climate Change Reports*, 8(1), 17–33. doi: 10.1007/s40641-021-00177-z
- Noh, S.-Y., Kim, M.-W., y Yook, S.-J. (2020). Performance investigation of a vertical wave-plate mist eliminator with perforated plates. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(12), 2681–2689. doi: 10.4209/aaqr.2020.05.0191
- Olivier, J., y de Rautenbach, C. (2002). The implementation of fog water collection systems in south africa. *Atmospheric Research*, 64(1), 227–238. doi: 10.1016/S0169-8095(02)00094-7
- Organización de las Naciones Unidas. (2018). *La agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para américa latina y el caribe* (Inf. Téc.). Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Park, K.-C., Chhatre, S. S., Srinivasan, S., Cohen, R. E., y McKinley, G. H. (2013). Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting. *Langmuir*, 29(43), 13269–13277. doi: 10.1021/la402409f
- Rafee, R., Rahimzadeh, H., y Ahmadi, G. (2010). Numerical simulations of airflow and droplet transport in a wave-plate mist eliminator. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(10), 1393–1404. doi: 10.1016/j.cherd.2010.03.001
- Rivera, J. d. D. (2011). Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors. *Atmospheric Research*, 102(3), 335–342. doi: 10.1016/j.atmosres.2011.08.005
- Rundel, P. W., Palma, B., Dillon, M. O., Sharifi, M. R., Nilsen, E. T., y Boonpragob, K. (1997). *Tillandsia landbeckii* in the coastal atacama desert of northern chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 70, 341–349.
- Sampurno Bruijnzeel, L., Eugster, W., y Burkard, R. (2006). Fog as a hydrologic input. En M. Anderson (Ed.), *Encyclopedia of hydrological sciences* (pp. 573–601). John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/0470848944.hsa041
- Schemenauer, R. S., y Cereceda, P. (1994). Fog collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum*, 18(2), 91–100.
- Schemenauer, R. S., y Joe, P. I. (1989). The collection efficiency of a massive fog collector. *Atmospheric Research*, 24(1), 53–69. doi: 10.1016/0169-8095(89)90036-7
- Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B., Kennedy, B. S., y Boreyko, J. B. (2018). Fog harvesting with harps. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(14), 11979–11986. doi: 10.1021/acsami.7b17488

- Sorokin, Y. L., Popchenkov, I. N., y Burkat, V. S. (1966). Determining the optimum cross section of a venetian-blind separator. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2(12), 781–784. doi: 10.1007/BF01146295
- Tang, Y., Xu, Y., Zhang, B., He, C., Chen, Q., y Ren, J. (2022). An integrated computational strategy for the geometric design and prioritization of wave-plate mist eliminators. *Process Safety and Environmental Protection*, 158, 674–686. doi: 10.1016/j.psep.2021.12.039
- Ushiki, K., Nishizawa, E., Beniko, H., y Iinoya, K. (1982). Performance of a droplet separator with multistage rows of flat blades. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 15(4), 292–298. doi: 10.1252/jcej.15.292
- Venkatesan, G., Kulasekharan, N., y Iniyan, S. (2013). Influence of turbulence models on the performance prediction of flow through curved vane demisters. *Desalination*, 329, 19–28. doi: 10.1016/j.desal.2013.09.001
- Venkatesan, G., Kulasekharan, N., y Iniyan, S. (2014). Numerical analysis of curved vane demisters in estimating water droplet separation efficiency. *Desalination*, 339, 40–53. doi: 10.1016/j.desal.2014.02.013
- Wang, J., Ji, Z., y Liu, Z. (2022). Experimental and numerical investigation on the gas–liquid separation performance of a novel vane separator with grooves. *Chemical Engineering Research and Design*, 180, 306–317. doi: 10.1016/j.cherd.2021.12.049
- Wang, P., Jiang, J., Li, S., Yang, X., Luo, X., Wang, Y., ... Zhao, W. (2020). Numerical investigation on the fluid droplet separation performance of corrugated plate gas-liquid separators. *Separation and Purification Technology*, 248, 117027. doi: 10.1016/j.seppur.2020.117027
- Wang, Y., y James, P. (1998). The calculation of wave-plate demister efficiencies using numerical simulation of the flow field and droplet motion. *Chemical Engineering Research and Design*, 76(8), 980–985. (Separation Processes) doi: 10.1205/026387698525630
- Wilkinson, D. (1999). Optimizing the design of waveplates for gas-liquid separation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 213(4), 265–274. doi: 10.1243/0954408991529870
- Xu, Y., Yang, Z., y Zhang, J. (2017a). Study on performance of wave-plate mist eliminator with porous foam layer as enhanced structure. part ii: Experiments. *Chemical Engineering Science*, 171, 662–671. doi: 10.1016/j.ces.2017.05.030
- Xu, Y., Yang, Z., y Zhang, J. (2017b). Study on performance of wave-plate mist eliminator with porous foam layer as enhanced structure. part i: Numerical simulation. *Chemical Engineering Science*, 171, 650–661. doi: 10.1016/j.ces.2017.05.031
- Yang, L., Xu, M., Wang, J., Song, L., y Wang, J. (2021). Experimental and numerical analysis of a demister with vortex generators. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 33, 83–95. doi: 10.1016/j.cjche.2020.07.045
- Yuan, S., Fan, Y., y Lin, H. (2016). Influence of discrete particle diameter and separating velocity on the separation efficiency of wave-plate separator including coalescence and breakup model. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 37(9), 1324–1333. doi: 10.1080/01932691.2015.1092876
- Zamora, B., y Kaiser, A. (2011). Comparative efficiency evaluations of four types of cooling tower drift eliminator, by numerical investigation. *Chemical Engineering Science*, 66(6), 1232–1245. doi: 10.1016/j.ces.2010.12.023
- Zhang, W., Niu, F., Wang, S., Wang, H., y Guo, Z. (2019). Study on performance of mesoscopic impactor filters for aerosol removal. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2019, 7036957. doi: 10.1155/2019/7036957

- Zhao, C., Zhao, J., Cong, M., y Shen, H. (2022). Simulation study on the corrugated plate gas–liquid separator with the assistance of the drainage hook. *ACS Omega*, 7(48), 44134-44146. doi: 10.1021/acsomega.2c05581
- Zheng, M., Han, D., Huang, L., Gu, Y., Fan, J., y Chen, J. (2019). Experimental and numerical evaluation of plate type separator used in desalination. *Desalination*, 450, 33-45. doi: 10.1016/j.desal.2018.10.027

Apéndice A

Complementos Estado del Arte y Marco Teórico.

Las siguientes figuras complementan el análisis técnico y económico de la recolección de agua mediante atrapanieblas, proporcionando datos relevantes para la toma de decisiones en el diseño y aplicación de estas tecnologías.

Elemento analizado	NCh 409 Calidad Agua Potable	Muestra de agua de niebla tomada de un neblinómetro limpio capturando agua		Muestra de agua tomada de un colector expuesto a 25 hrs de un día despejado
		Muestra1	Muestra 2	
pH	6,5-8,5	5,18	5,66	5,03
Cianuro (CN)	0,2	No muestreado	No muestreado	No muestreado
Cloruro (CL)	400	0,58	1,61	42,9
Flúor (F)	1.5	No muestreado	No muestreado	No muestreado
Mercurio (Hg)	0,001	No muestreado	No muestreado	No muestreado
Arsénico (As)	0.01	<0,01	<0,01	0,0169
Cadmio (Cd)	0.01	<0,005	<0,005	0,0013
Cobre (Cu)	1	No muestreado	No muestreado	No muestreado
Cromo (Cr-IV)	0.05	<0,001	<0,001	0,0025
Hierro (Fe)	0,3	<0,05	<0,05	0,052
Magnesio (Mg)	125	0,03	0,05	2,8
Manganeso (Mn)	0.1	0,0032	0,005	0,0497
Amonio (NH3)	0.25	No muestreado	No muestreado	No muestreado
Nitrito (N02)	1	No muestreado	No muestreado	No muestreado
Nitrato (N03)	50	0,048	0,25	5,9
Plomo (Pb)	0.05	<0,005	<0,005	0,0033
Selenio (Se)	0.01	No muestreado	No muestreado	No muestreado
Zinc (Zn)	5	No muestreado	No muestreado	No muestreado

FIGURA A.1: Resultados estudio químico efectuado en muestras de agua recolectada por atrapanieblas en la localidad del Tofo, La Higuera (Cereceda y cols., 2014).

		Caso Base	Caso base más distribución y almacenamiento	Caso Base más recursos humanos	Caso base más distribución, almacenamiento y recursos humanos
Costo máximo por unidad de área (m ²)		\$ 24,41	\$ 24,41	\$ 19,72	\$ 19,72
Precio mínimo del agua sin subsidio (USD/m ³)		\$ 3,03	\$ 5,12	\$ 3,57	\$ 5,66
Tasa de captación mínima (L/m2/día)		8	14	10	15
Eficiencia mínima de captación (%)	20% 34% 24% 38%				

FIGURA A.2: Metas cuantitativas para distintos niveles de costos en un proyecto de atrapanieblas (Cereceda y cols., 2014).

Cost comparison between a typical flat LFC and a modular funnel LFC, both with 150 m² of frontal area (projected area).

Item	Flat		Modular funnel	
	USD	%	USD	%
Structure	2 002	28.8	2 326	27.0
Cables	652	9.4	1 375	15.9
Trough	60	0.9	107	1.2
Mesh	206	3.0	363	4.2
Erection (labour, transp., materials)	4 035	58.0	4 457	51.7
Total	6 956	100.0	8 628	100.0
Total cost per m ² frontal area	46.4		57.5	

FIGURA A.3: Comparación de costos entre LFC y atrapanieblas V-Shape (Holmes y cols., 2015).

Apéndice B

Complementos Metodología

Este apéndice reúne elementos adicionales que complementan la metodología empleada en este estudio. A continuación, se presentan los códigos, esquemas y tablas que apoyan el desarrollo y la implementación de los experimentos descritos en el cuerpo principal del texto.

B.1. Código arduino máquina de bobinado de hilo

El siguiente código fue utilizado para controlar la máquina de bobinado de hilo, diseñada específicamente para este proyecto. Esta máquina permite el bobinado preciso de hilos en las estructuras utilizadas en los experimentos de los modelos V-Shaped. A continuación se muestra el código completo en lenguaje Arduino:

```
//Pines
int forwardButton = 2; // Pin botón independiente para avanzar.
int backwardButton = 3; // Pin botón independiente para retroceder.
int M1forwardButton = 4; // Pin botón avance motor 1 (Movimiento horizontal).
int M1backwardButton = 5; // Pin botón retroceso motor 1.
int M2forwardButton = 6; // Pin botón avance motor 2 (Movimiento rotatorio).
int M2backwardButton = 7; // Pin botón retroceso motor 2.
int driverDIR1 = 10; // DIR- pin motor 1.
int driverPUL1 = 11; // PUL- pin motor 1.
int driverDIR2 = 12; // DIR- pin motor 2.
int driverPUL2 = 13; // PUL- pin motor 2.
int startButtonPin = 8; // Pin botón inicio función automática.
int stopButtonPin = 9; // Pin botón termino funcion automática.
bool isRunning = false; //Variable para rastrear si la función está en ejecución.

// Variables
int pd = 1500; // Periodo de retraso de pulso (µs).
int longDelay = 500; // Periodo de traso de pulso (µs).
int stepNumber1 = 50; // Número de pasos en el motor 1 para cada botón presionado
(50 = 2 mm de separación entre hilos).
int stepNumber2 = 200; // Número de pasos en el motor 2 para cada botón presionado
(200 = 180° de giro).
int stepNumberOnly1 = 50;
int stepNumberOnly2 = 200;
```

```

void setup() {
  pinMode (driverPUL1, OUTPUT);
  pinMode (driverDIR1, OUTPUT);
  pinMode (driverPUL2, OUTPUT);
  pinMode (driverDIR2, OUTPUT);
  pinMode(startButtonPin, INPUT);
  pinMode(stopButtonPin, INPUT);
  Serial.begin(9600);}

void loop() {
  digitalWrite(driverPUL1, HIGH);
  digitalWrite(driverPUL2, HIGH);

  int i;
  int j;

  //1) Uso simultáneo motores 1 y 2:
  // 1.1) Movimiento constructivo de malla:

  if(digitalRead(forwardButton) == LOW) {
    digitalWrite(driverDIR1,LOW);
    digitalWrite(driverDIR2,HIGH);
    for (i = 0; i < stepNumber1; i++) {
      digitalWrite(driverPUL1,HIGH);
      delayMicroseconds(pd);
      digitalWrite(driverPUL1,LOW);
      delayMicroseconds(pd);}

    delay(longDelay); // Delay largo para evitar que ambos movimientos se superpongan.

    for(j=0; j < stepNumber2; j++){
      digitalWrite(driverPUL2,HIGH);
      delayMicroseconds(pd);
      digitalWrite(driverPUL2,LOW);
      delayMicroseconds(pd);}}

  // 1.2) Movimiento destructivo de malla:

  if(digitalRead(backwardButton) == LOW) {
    digitalWrite(driverDIR1,HIGH);
    digitalWrite(driverDIR2,LOW);
    for (i = 0; i < stepNumber1; i++){
      digitalWrite(driverPUL1,HIGH);
      delayMicroseconds(pd);
      digitalWrite(driverPUL1,LOW);
      delayMicroseconds(pd);}

    for(j=0; j < stepNumber2; j++){
      digitalWrite(driverPUL2,HIGH);
      delayMicroseconds(pd);
      digitalWrite(driverPUL2,LOW);

```

```
    delayMicroseconds(pd);}}

// 2) Uso independiente de los motores:
// 2.1) Motor 1:

if(digitalRead(M1forwardButton) == LOW) {
    digitalWrite(driverDIR1,LOW);
    for (i = 0; i < stepNumberOnly1; i++){
        digitalWrite(driverPUL1,HIGH);
        delayMicroseconds(pd);
        digitalWrite(driverPUL1,LOW);
        delayMicroseconds(pd);}}

if(digitalRead(M1backwardButton) == LOW) {
    digitalWrite(driverDIR1,HIGH);
    for (i = 0; i < stepNumberOnly1; i++){
        digitalWrite(driverPUL1,HIGH);
        delayMicroseconds(pd);
        digitalWrite(driverPUL1,LOW);
        delayMicroseconds(pd);}}

// 2.2) Motor 2:

if(digitalRead(M2forwardButton) == LOW) {
    digitalWrite(driverDIR2,HIGH);
    for (j = 0; j < stepNumberOnly2; j++){
        digitalWrite(driverPUL2,HIGH);
        delayMicroseconds(pd);
        digitalWrite(driverPUL2,LOW);
        delayMicroseconds(pd);}}

if(digitalRead(M2backwardButton) == LOW) {
    digitalWrite(driverDIR2,LOW);
    for (j = 0; j < stepNumberOnly2; j++){
        digitalWrite(driverPUL2,HIGH);
        delayMicroseconds(pd);
        digitalWrite(driverPUL2,LOW);
        delayMicroseconds(pd);}}

// 3) Construcción automática de malla:

if(digitalRead(startButtonPin) == LOW){
    while(digitalRead(stopButtonPin) == HIGH){
        digitalWrite(driverDIR1,LOW);
        digitalWrite(driverDIR2,HIGH);
        for (i = 0; i < stepNumber1; i++) {
            digitalWrite(driverPUL1,HIGH);
            delayMicroseconds(pd);
            digitalWrite(driverPUL1,LOW);
            delayMicroseconds(pd);}
```

```
delay(longDelay);

for(j=0; j < stepNumber2; j++){
    digitalWrite(driverPUL2,HIGH);
    delayMicroseconds(pd);
    digitalWrite(driverPUL2,LOW);
    delayMicroseconds(pd);}}
}
```

B.2. Diagrama electrónico máquina de bobinado de hilo

En esta sección se presenta el diagrama electrónico correspondiente a la máquina de bobinado de hilo utilizada en los experimentos. Esta fue diseñada para permitir un bobinado preciso de los hilos en las mallas de atrapanieblas, asegurando una distribución uniforme y controlada.

La Figura B.1 muestra el esquema de conexiones entre los componentes principales del sistema, incluyendo el microcontrolador Arduino, los drivers y motores que controlan el movimiento horizontal y rotatorio del sistema. Este diagrama es esencial para entender el funcionamiento de la máquina y para replicar o ajustar el sistema en futuros estudios.

El motor M1 controla el movimiento horizontal del hilo, mientras que el motor M2 maneja el movimiento rotatorio, ambos gestionados a través de los drivers DM542, los cuales se comunican con el Arduino. Este diseño permite un control preciso y coordinado de los movimientos, lo cual es crucial para garantizar la calidad del bobinado.

De esta manera, el diagrama no solo documenta el diseño técnico, sino que también proporciona una guía para la implementación y el posible ajuste del sistema en futuros experimentos.

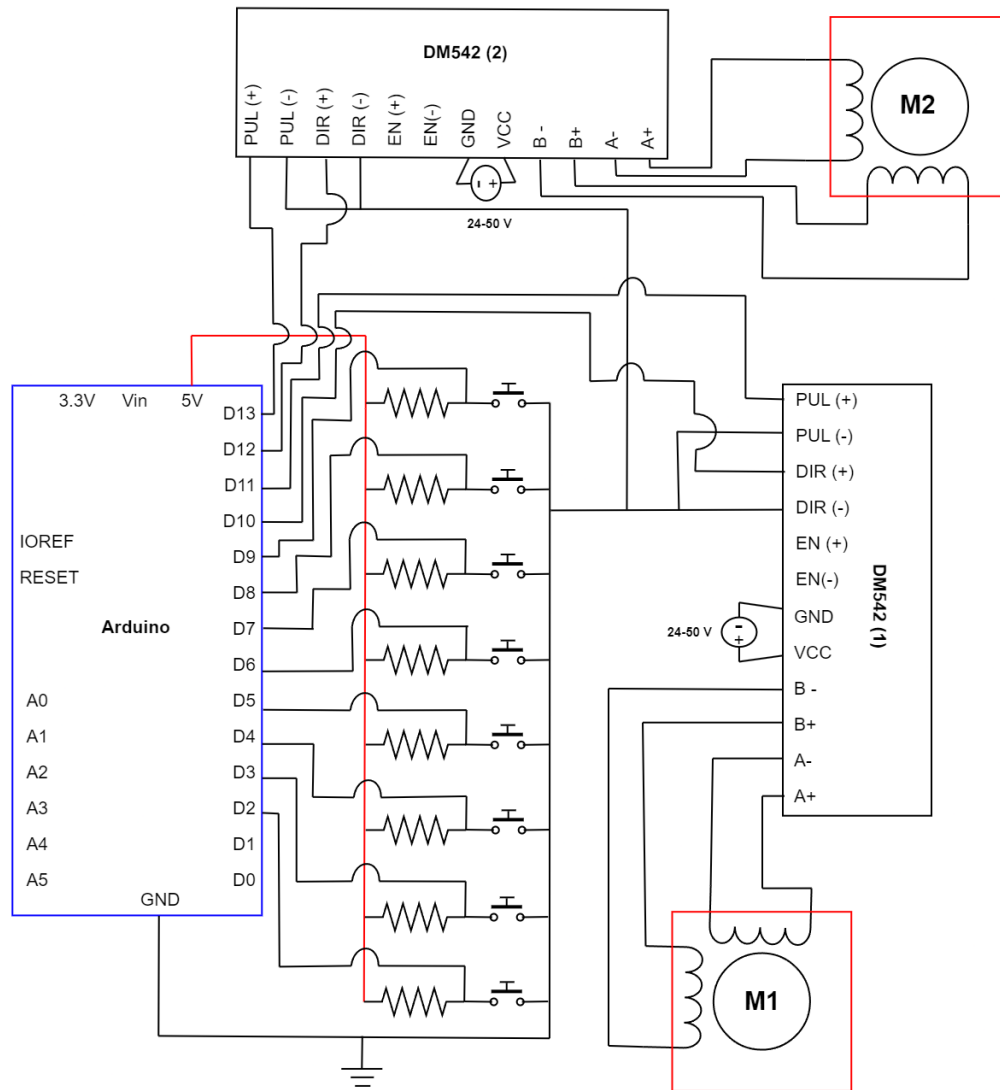


FIGURA B.1: Diagrama electrónico para máquina de bobinado de hilo.

B.3. Frecuencia de control de túnel de niebla

Se presenta una gráfica que describe la relación lineal entre la frecuencia eléctrica del motor del túnel de niebla y la velocidad del flujo de aire generado. Esta información es crucial para calibrar y controlar con precisión las condiciones experimentales durante las pruebas con atrapanieblas.

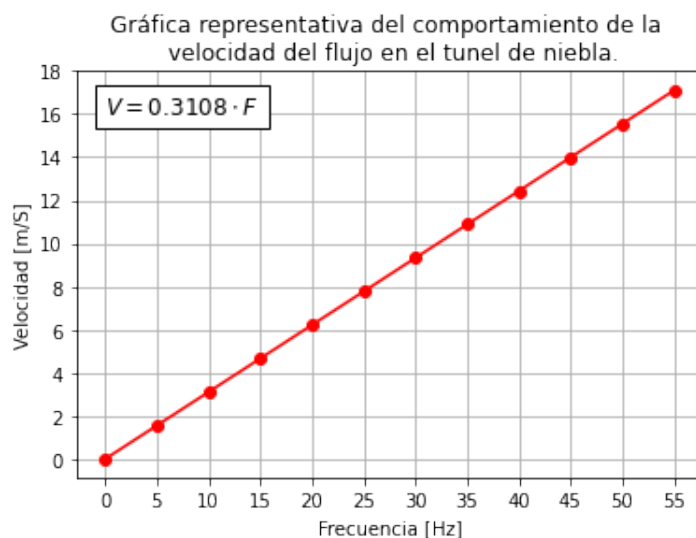


FIGURA B.2: Gráfica de velocidad de flujo en la salida del túnel de niebla con respecto a la frecuencia eléctrica del motor del equipo.

B.4. Calibración balanza

Se detallan los experimentos realizados para calibrar la balanza utilizada en las mediciones de masa durante los experimentos. La precisión en la medición de la masa es crucial para asegurar la exactitud de los datos obtenidos y, por lo tanto, la fiabilidad de los resultados.

TABLA B.1: Detalles de experimentos de calibración de balanza.

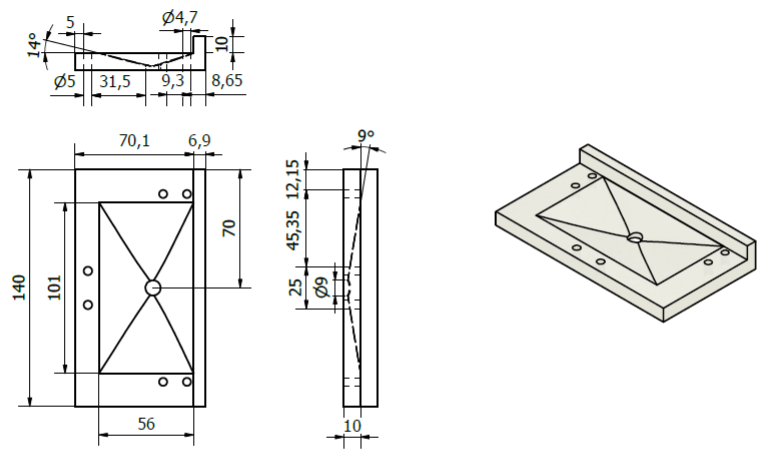
Tipo experimento		Estático				Variable
Tiempo exp. (min)		5	10	17	25	25
Tiempo exp. (s)		300	600	1020	1500	1500
Tiempo por dato teo. (s)		1	1	1	1	1
N° datos teo.		300	600	1020	1500	1500
Ite. 1	N° datos exp.	289	576	977	1449	1437
	Error	11	24	43	51	63
	Error porcentual (%)	3.7	4.0	4.2	3.4	4.2
	Tiempo por dato exp. (s)	1.038	1.042	1.044	1.035	1.044
Ite. 2	N° datos exp.	289	573	976	1436	1436
	Error	11	27	44	64	64
	Error porcentual (%)	3.7	4.5	4.3	4.3	4.3
	Tiempo por dato exp. (s)	1.038	1.047	1.045	1.045	1.045
Ite. 3	N° datos exp.	287	576	977	1432	1440
	Error	13	24	43	68	60
	Error porcentual (%)	4.3	4.0	4.2	4.5	4.0
	Tiempo por dato exp. (s)	1.045	1.042	1.044	1.047	1.042
Ite. 4	N° datos exp.	289	576	973	1435	1433
	Error	11	24	47	65	67
	Error porcentual (%)	3.7	4.0	4.6	4.3	4.5
	Tiempo por dato exp. (s)	1.038	1.042	1.048	1.045	1.047

TABLA B.2: Resultados promedios y tiempo de lectura corregido en la balanza.

Error porc. min. (%)	3.667
Error porc. max. (%)	4.608
Error porc. prom. (%)	4.133
Tiempo prom. por dato exp. (s)	1.043
Tiempo corregido (s) (Valor que se incluye en el programa Kern)	0.957

B.6. Planos canaleta

Se presenta el plano técnico detallado de la canaleta utilizada para capturar agua y fijar los atrapanieblas SR en los experimentos. La canaleta es un componente crucial en el diseño experimental, ya que no solo permite la recolección eficiente del agua capturada por los atrapanieblas, sino que también proporciona un soporte estructural para mantener la malla en su posición durante los ensayos.



Designed by	Checked by	Approved by	Date	
Kevin Urtubia	K.U.	K.U.	21/11/23	
UAI		Canaleta		
		Plano detalle	Edition 1	Sheet 1 / 1

FIGURA B.5: Plano detalle de canaleta para capturar agua y fijar atrapanieblas SR.

Apéndice C

Complementos Resultados

Este apéndice presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos en los experimentos con atrapanieblas V-Shape y SR bajo distintas condiciones de velocidad de flujo y configuraciones de hilos. Los datos incluyen cálculos del coeficiente de variación, R^2 , y proyecciones lineales y cuadráticas de la recolección de agua, lo que permite una evaluación exhaustiva del rendimiento de cada modelo.

TABLA C.1: Resultados en detalle de cálculo de Coeficiente de variación para distintos modelos de atrapanieblas SR y velocidades del flujo, considerando el cálculo para el agua total recolectada, los datos asociados a la pendiente obtenida desde el tiempo inicial ($t=0s$) y el tiempo posterior a la saturación de la malla ($t=500s$).

$u_{\infty}(m/s)$	Mod.	CV Agua Total	CV $t=0s$	CV $t=500s$
4	MZZ100	6.50 %	6.10 %	7.30 %
4	MZZ150	8.10 %	8.30 %	8.60 %
4	MZZ200	5.60 %	5.90 %	5.10 %
4	MZZ250	9.20 %	7.60 %	6.40 %
4	MH100	18.50 %	17.90 %	16.90 %
4	MH150	7.50 %	7.70 %	8.70 %
4	MH200	6.50 %	6.10 %	5.70 %
4	MH250	17.10 %	16.80 %	16.00 %
4	MPO100	2.40 %	0.90 %	2.40 %
4	MPO150	17.10 %	16.50 %	15.60 %
4	MPO200	16.00 %	16.20 %	15.00 %
4	MPO250	21.20 %	20.20 %	20.60 %
Prom.		11.30 %	10.90 %	10.70 %
8	MZZ100	22.00 %	22.70 %	19.00 %
8	MZZ150	6.80 %	7.80 %	9.70 %
8	MZZ200	6.90 %	7.70 %	7.30 %
8	MZZ250	16.30 %	17.10 %	14.50 %
8	MH100	15.00 %	12.80 %	10.60 %
8	MH150	17.10 %	16.80 %	22.30 %
8	MH200	6.20 %	5.70 %	7.30 %
8	MH250	21.30 %	20.50 %	20.30 %
8	MPO100	4.10 %	3.60 %	2.80 %
8	MPO150	12.70 %	12.60 %	13.60 %
8	MPO200	12.80 %	13.50 %	15.30 %
8	MPO250	5.40 %	5.70 %	6.80 %

Prom.		12.20 %	12.20 %	12.50 %
12	MZZ100	20.20 %	20.20 %	12.60 %
12	MZZ150	8.20 %	7.40 %	5.20 %
12	MZZ200	58.40 %	58.70 %	49.10 %
12	MZZ250	22.90 %	23.10 %	19.70 %
12	MH100	13.90 %	14.00 %	12.60 %
12	MH150	25.30 %	27.60 %	22.60 %
12	MH200	25.10 %	27.20 %	34.80 %
12	MH250	19.30 %	16.90 %	16.60 %
12	MPO100	22.40 %	21.40 %	11.60 %
12	MPO150	18.00 %	18.80 %	14.00 %
12	MPO200	8.40 %	9.50 %	6.50 %
12	MPO250	28.80 %	28.40 %	19.50 %
Prom.		22.60 %	22.80 %	18.70 %
16	MZZ100	10.90 %	9.70 %	43.20 %
16	MZZ150	49.70 %	50.20 %	61.60 %
16	MZZ200	34.40 %	30.30 %	54.00 %
16	MZZ250	27.30 %	26.10 %	31.10 %
16	MH100	56.10 %	55.70 %	58.80 %
16	MH150	33.20 %	42.70 %	0.30 %
16	MH200	43.50 %	42.20 %	51.70 %
16	MH250	46.10 %	45.50 %	51.50 %
16	MPO100	26.50 %	26.70 %	30.80 %
16	MPO150	49.60 %	49.10 %	50.20 %
16	MPO200	49.70 %	49.80 %	61.10 %
16	MPO250	24.90 %	25.20 %	27.70 %
Prom.		37.70 %	37.80 %	43.50 %

TABLA C.2: Cálculo de R^2 para prototipos SR desde el tiempo inicial ($t=0s$) y punto de saturación de la malla ($t=500s$)

Mod.	u_{∞} (m/s)	R^2 (t=0s)	R^2 (t=500s)
MZZ100	4	0.9984	0.9999
MZZ150	4	0.9988	0.9998
MZZ200	4	0.9987	1.0000
MZZ250	4	0.9979	1.0000
MH100	4	0.9981	1.0000
MH150	4	0.9984	0.9999
MH200	4	0.9981	1.0000
MH250	4	0.9986	1.0000
MPO100	4	0.9958	0.9997
MPO150	4	0.9977	1.0000
MPO200	4	0.9990	1.0000
MPO250	4	0.9988	1.0000
MZZ100	8	0.9962	1.0000
MZZ150	8	0.9993	1.0000
MZZ200	8	0.9994	1.0000
MZZ250	8	0.9990	1.0000
MH100	8	0.9966	1.0000
MH150	8	0.9984	0.9999
MH200	8	0.9996	1.0000
MH250	8	0.9996	1.0000
MPO100	8	0.9938	0.9995
MPO150	8	0.9967	0.9999
MPO200	8	0.9994	1.0000
MPO250	8	0.9995	1.0000
MZZ100	12	0.9807	0.9997
MZZ150	12	0.9831	0.9999
MZZ200	12	0.9941	0.9991
MZZ250	12	0.9949	0.9999
MH100	12	0.9878	0.9998
MH150	12	0.9659	0.9993
MH200	12	0.9956	0.9995
MH250	12	0.9941	0.9997
MPO100	12	0.9799	0.9998
MPO150	12	0.9856	0.9999
MPO200	12	0.9975	0.9999
MPO250	12	0.9941	0.9992
MZZ100	16	0.9625	0.9998
MZZ150	16	0.9823	0.9997
MZZ200	16	0.9942	0.9969
MZZ250	16	0.9911	0.9997
MH100	16	0.9373	0.9998
MH150	16	0.9595	0.9957
MH200	16	0.9759	0.9996
MH250	16	0.9870	0.9998
MPO100	16	0.9714	0.9991
MPO150	16	0.9779	1.0000

MPO200	16	0.9956	0.9998
MPO250	16	0.9957	0.9999
Promedio		0.9904	0.9997

Ajuste lineal para recolección total de agua con respecto al número de hilos.

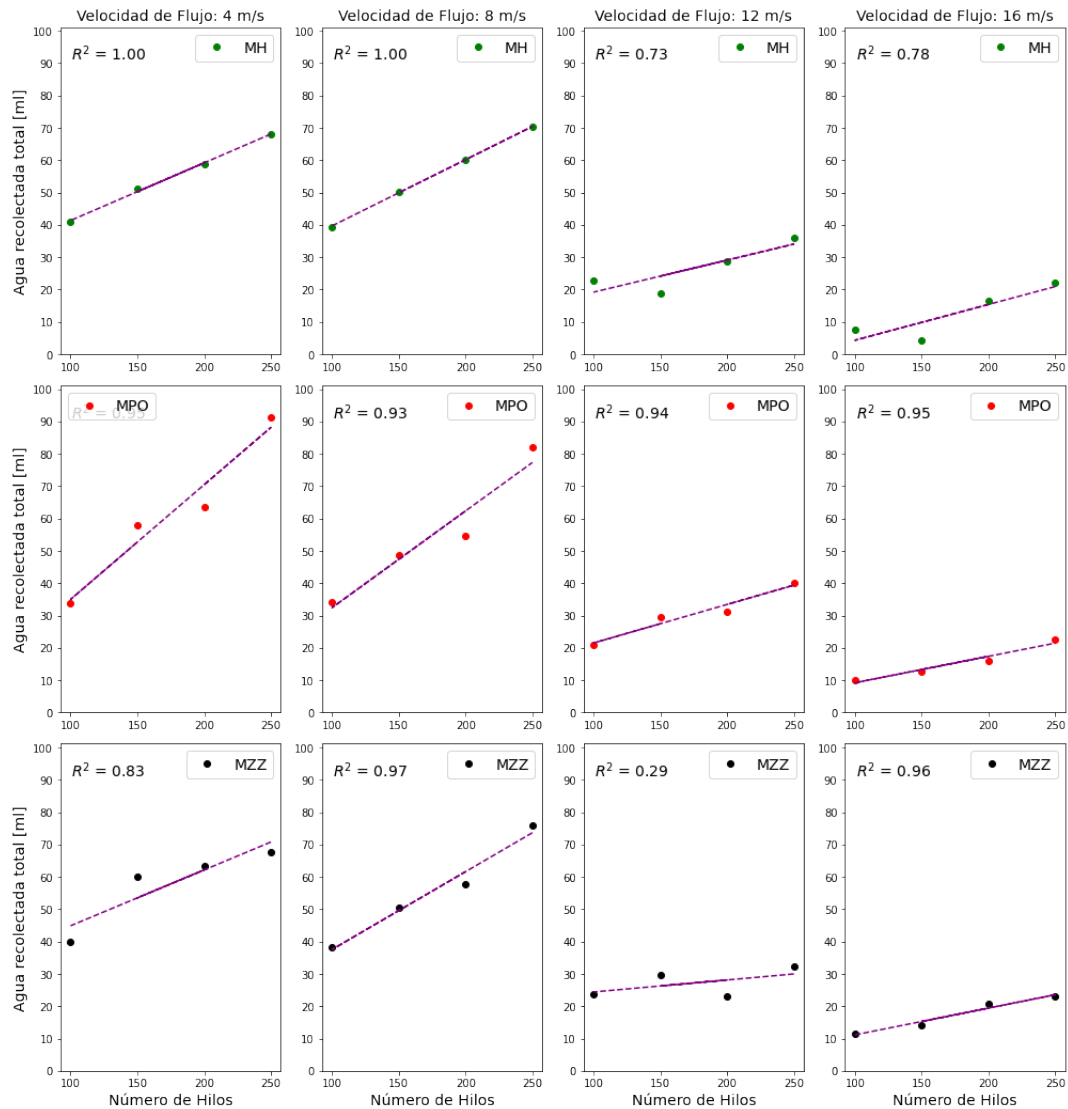


FIGURA C.1: Proyección lineal de la recolección total de agua con respecto al número de hilos para cada modelo y velocidad del flujo.

Ajuste cuadrático recolección total de agua con respecto a la velocidad.

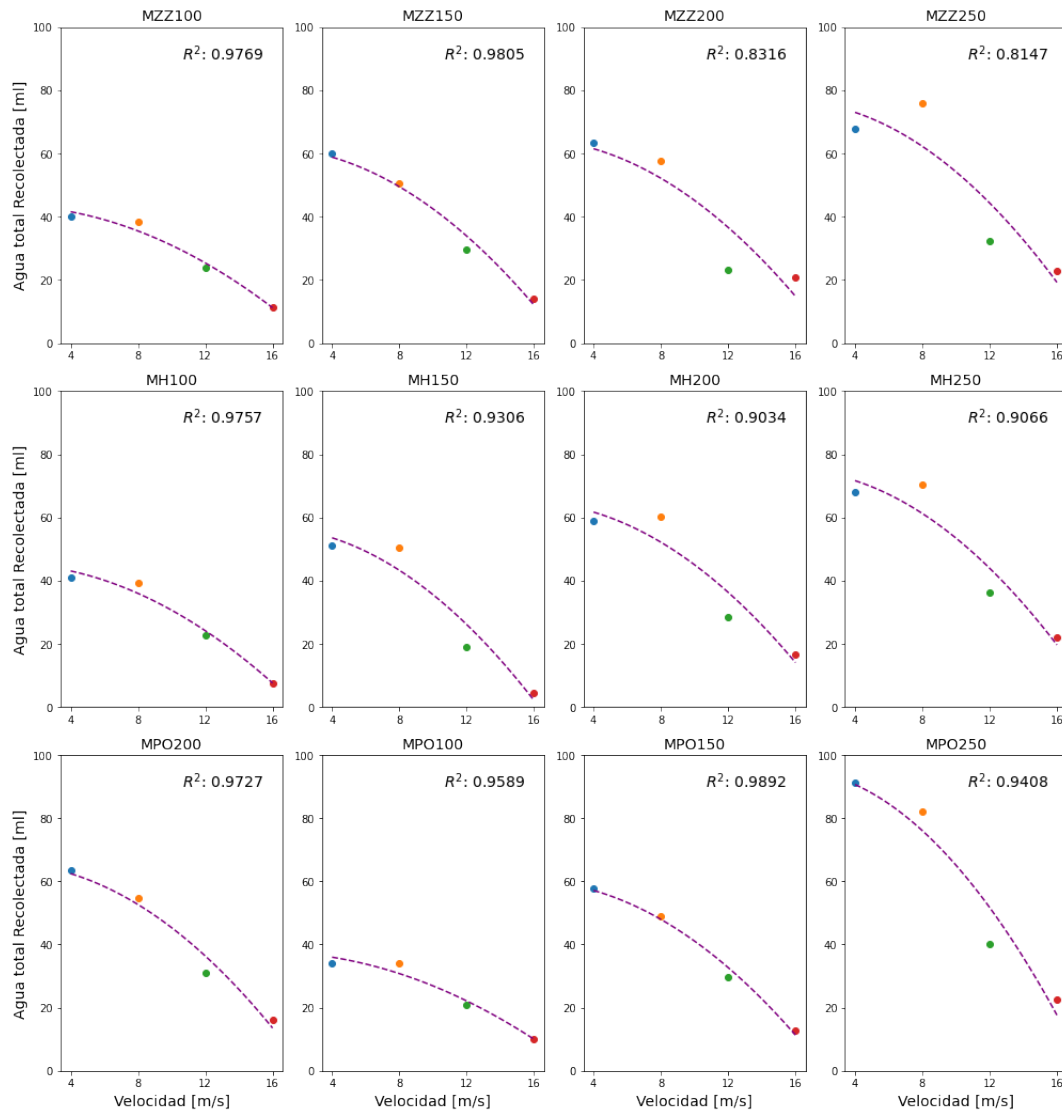


FIGURA C.2: Proyección Cuadrática de la recolección total de agua con respecto a la velocidad para cada modelo y número de hilos.

Apéndice D

Experimentos extra

D.1. Experimento atrapanieblas MPO:

Previo a la elaboración del experimento asociado con los atrapanieblas SR en 2.5D se realizó un trabajo con un modelo MPO y sus respectivos atrapanieblas comparativos (Fig. D.1) con el objetivo de determinar rápidamente si los modelos MPO presentaban ventajas con respecto a los modelos actuales.

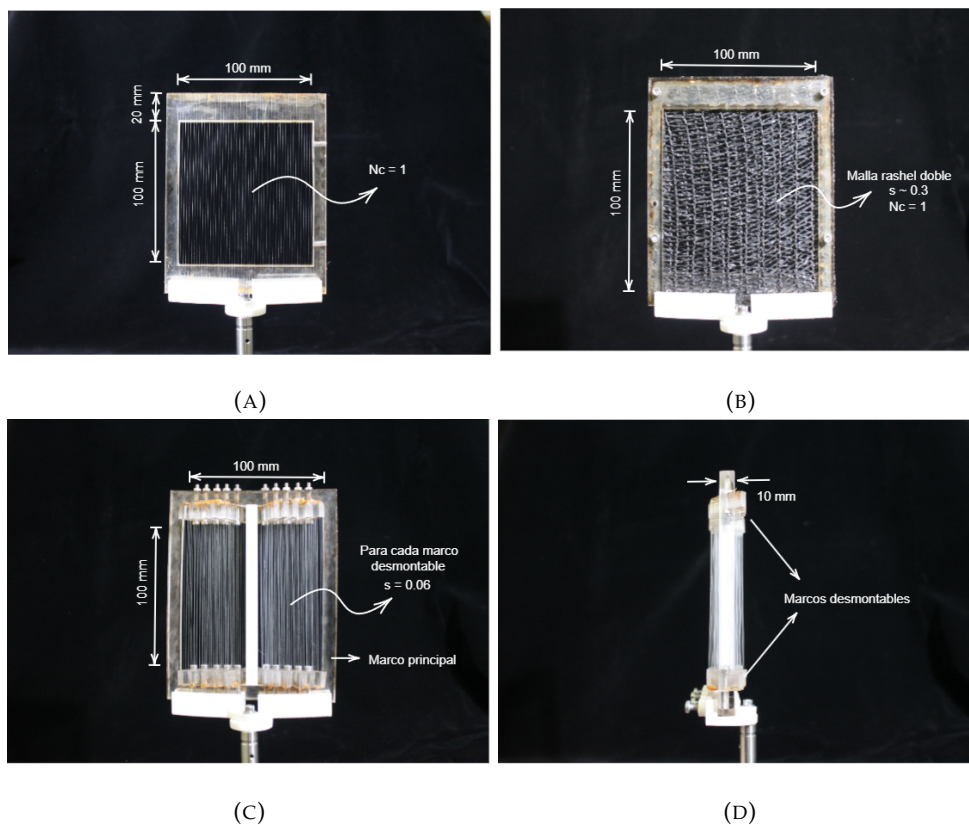


FIGURA D.1: A) Vista frontal modelo base de hilos verticales. B) Vista frontal de modelo base con malla raschel. C) Vista frontal de atrapanieblas MPO. D) Vista lateral de atrapanieblas MPO.

El modelo MPO de la figura D.1c y D.1d se fabricó mediante la metodología del bobinado con la máquina construida para realizar estos experimentos, para ello se dispuso un marco de acrílico transparente de 10 mm de espesor (Ver detalles de diseño en figura D.2 y tabla D.1), al cual se le hicieron 10 agujeros por el costado superior e

inferior, lo que permitía introducir tornillos para anclar los 10 marcos desmontables con el hilado respectivo de una Solidez de 0.06. La ventaja de este modelo es que el tornillo permitía tensar y modificar el ángulo α del modelo MPO, esto facilitaba el estudio de distintos ángulos, en este caso se utilizó 45° y 90° . Por otro lado, para fabricar el modelo tipo arpa con una solidez de 0.06 (Fig. D.1a) se utilizó la misma metodología para fabricar los marcos de los modelos del experimento V-Shape, es decir, el bobinado mediante la máquina bobinadora y posterior fijación de los hilos con un material adhesivo. En tercer lugar, se fabricó un prototipo con malla tipo Rashel (Fig. D.1b) con una solidez de ≈ 0.3 , esta se introdujo entre dos marcos de acrílico fijado con 4 pernos. Notar que el objetivo de cada uno de los prototipos era generar una proyección de su malla en un área de 100×100 mm. Además, se debe recalcar que cada prueba experimental (3 iteraciones por cada modelo) tuvo una duración de 15 minutos (900s), ya que en ese rango todos los modelos ya se encuentran saturados y con datos suficiente para identificar la pendiente de la recta de recolección por segundo en un estado estacionario. En cuanto a la velocidad del flujo de niebla, esta será de 4 m/s para cada prueba y modelo (Ver detalles en Tabla D.1).

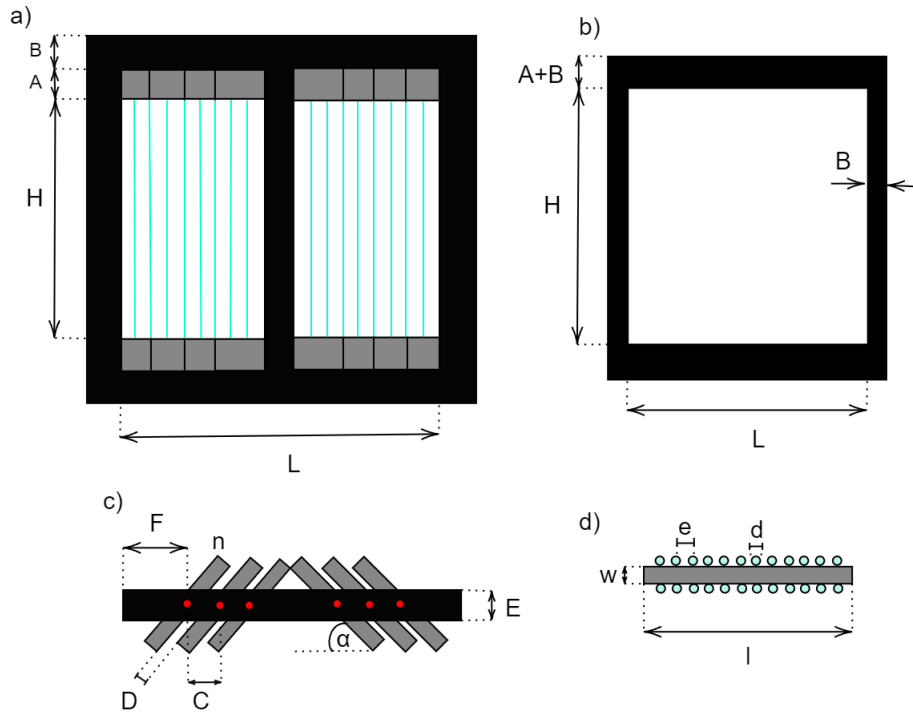


FIGURA D.2: Esquemas detallados para atrapanieblas MPO. a) Vista frontal atrapanieblas MPO. b) Marco representativo para los modelos planos. c) Vista superior modelo MPO. d) Vista superior de marco desmontable de modelo MPO con los hilos instalados.

TABLA D.1: Parámetros geométricos de cada modelo, del flujo y consideraciones varias para realización de experimento extra asociado a modelo MPO.

	Modelo	Plano Rashel	Plano Vertical	MPO	MPO	MPO
Malla	Tipo	Rashel doble	Arpa	Arpa	Arpa	Arpa
	Diámetro hilos (d) (mm)	-	0.12	0.12	0.12	0.12
	Espaciado entre hilos (D) (mm)	-	2	2	2	2
	Solidez	~0.3	0.06	-	-	-
	Nº de capas (N_c)	1	1	-	-	-
	Disposición	-	-	Convergente	Divergente	-
Marco	Nº de marcos	1	1	-	-	-
	A (mm)	10	10	10	10	10
	B (mm)	10	10	10	10	10
	C (mm)	-	-	7.5	7.5	7.5
	D (mm)	-	-	0.303	0.303	0.303
	E (mm)	10	10	10	10	10
	F (mm)	-	-	18.75	18.75	18.75
	H (mm)	100	100	100	100	100
	L (mm)	100	100	100	100	100
	w (mm)	-	-	5	5	5
	l (mm)	-	-	25	25	25
	n	-	-	10	10	10
	α (°)	-	-	45	45	90
Niebla	Velocidad (m/s)	4	4	4	4	4
Varios	Tiempo por experimento (s)	900	900	900	900	900
	Nº de iteraciones	3	3	3	3	3
	Designación	PR	PV	F45	T45	90

Ahora bien, en lo que respecta a los resultados, en primer lugar se logra apreciar que nuevamente existe una primera etapa de saturación y luego un comportamiento lineal (Fig. D.3a), destacando que el modelo MPO para todos sus ángulos y orientaciones posee una saturación inicial igual entre ellos y con un tiempo menor a los modelos tipo arpa y con malla Rashel. Además, si se comparan las recolecciones totales de agua (D.3b), es posible verificar que el modelo MPO, independiente del ángulo y de la posición (Convergente[F45] o divergente[T45]) superan en gran medida a los modelos tipo arpa y con malla rashel. más aún, notar que es posible que el modelo con malla rashel supere al modelo tipo arpa en gran medida porque este último tiene una sola capa y con una solidez muy baja (6 %).

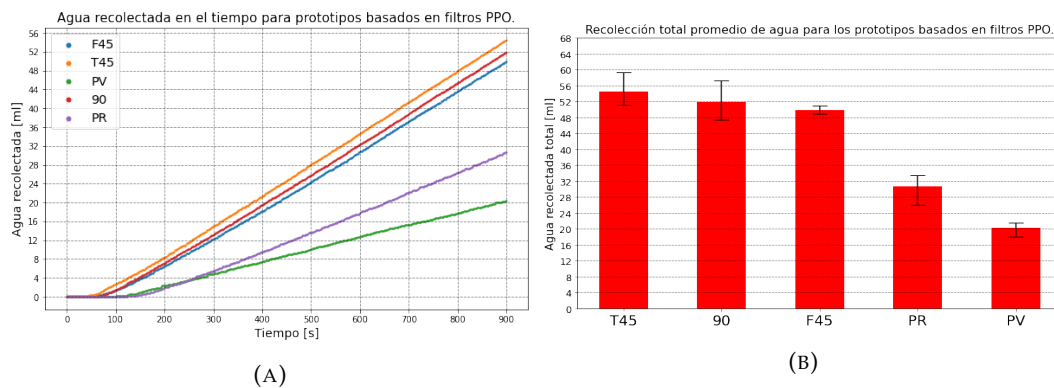


FIGURA D.3: A) Recolección lineal del agua con respecto al tiempo para los distintos modelos propuestos. B) Recolección total de agua para cada modelo.

Luego, para ser más específicos, se calculan las diferencias absolutas entre los distintos modelos (D.4). En primer lugar, se puede observar como el modelo PV es el que

presenta una mayor desventaja con respecto a los otros modelos con una diferencia de ≈ 30 ml con respecto al modelo MPO, es decir, una desventaja de $\approx 60\%$ y 10.3ml con respecto al modelo PR. Luego el modelo PR presenta una diferencia de ≈ 20 ml con respecto al modelo MPO, es decir, una desventaja de $\approx 40\%$.

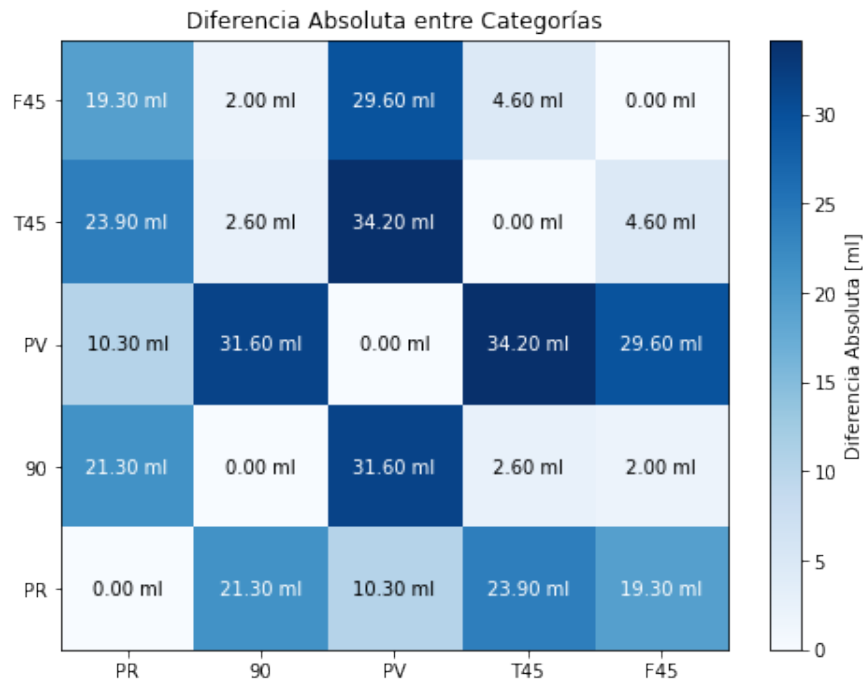


FIGURA D.4: Diferencia absoluta entre modelos estudiados. Notar que la recolección va en este orden: $T45 > 90 > F45 > PR > PV$.

De todo lo anterior, es posible concluir que el modelo MPO presenta una gran ventaja con respecto a los otros modelos, sin embargo, se debe definir con mayor detalle una metodología que permita determinar correctamente cuál es la ventaja de este modelo y por ello surge el segundo experimento explicado en esta tesis (Sección 4.3).