

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERIA

MODELACIÓN COMPUTACIONAL DEL IMPACTO DE GOTAS DE NIEBLA EN FIBRAS CILÍNDRICAS PARALELAS

EMILIO ALFONSO DE LA JARA HARTWIG

Tesis para optar al grado de

Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

JUAN DE DIOS RIVERA AGÜERO

Santiago de Chile, Enero, 2012

© 2012, Emilio Alfonso de la Jara Hartwig.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERIA

MODELACIÓN COMPUTACIONAL DEL IMPACTO DE GOTAS DE NIEBLA EN FIBRAS CILÍNDRICAS PARALELAS

EMILIO ALFONSO DE LA JARA HARTWIG

Tesis (Proyecto) presentada(o) a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN DE DIOS RIVERA AGÜERO

MAGDALENA WALCZAK

PILAR CERECEDA TRONCOSO

RICHARD LEBOEUF

MIGUEL FELIX RÍOS OJEDA

Para completar las exigencias del grado de

Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Enero, 2012

A mis padres, opas, millos, hermanos y Catalina.

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a la Pontificia Universidad de Chile y todas las personas que la componen (profesores, compañeros, secretarias, auxiliares, etc.) y en especial al departamento de Ingeniería Mecánica, donde pude aprender que en Chile podemos hacer tecnología con nuestras propias manos, cerebros y corazones.

Agradezco a mis compañeros de Acquaniebla del Centro del Desierto, por todo lo que me han enseñado profesional y personalmente, donde a partir de una mirada multidisciplinaria me han enseñado cómo se puede vislumbrar la verdad a partir del complemento de distintas visiones.

Agradezco de manera muy especial al profesor Juan de Dios Rivera, a quien le agradezco de manera muy profunda todo su tremendo apoyo y estímulo en lo profesional, y sobre todo, como persona.

Finalmente agradecer a mis padres, hermanos y Catalina por su permanente apoyo y amor incondicional, en conjunto con mis abuelos, que siempre estimularon mi inquietud intelectual y científica, la cual pretendo poder transformar en algo útil para mi país y el mundo a través de este trabajo y muchos otros que pretendo concretar en el futuro.

INDICE GENERAL

Pág.

DED	ICAT	ORIA	ii
AGR	ADE	CIMIENTOS	iii
IND	ice d	DE TABLAS	vi
IND	ICE D	DE FIGURAS	/ii
Nom	enclat	tura	tii
RES	UME	N x	iv
ABS	TRAG	CTx	vi
I.	Intro	ducción	. 1
	1.1.	Estado del arte de los atrapanieblas	. 1
	1.2.	Funcionamiento de los atrapanieblas	. 5
	1.3.	Objetivos de la tesis	. 8
II.	Cara	cterización de las gotas de niebla	10
	2.1.	Análisis de la niebla advectiva "Camanchaca"	11
	2.2 7	Fransporte de gotas de niebla	16
III.	Impa	acto de gotas de niebla en una fibra aislada	22
	3.1	Modelos del impacto de partículas en una fibra cilíndrica	22
	3.2	Modelo computacional del impacto de gotas en una fibra cilíndrica	33

IV.	Imp cilín	acto de gotas de niebla en mallas de fibras idicas paralelas	39
	4.1	Modelos de elementos finitos de mallas de fibras cilíndricas paralelas	42
	4.2	Modelos de elementos finitos de una malla de fibras cilíndricas paralelas a distintos ángulos de incidencia	
		respecto al flujo	54
V.	Con	clusiones	58
BIB	LIOG	RAFIA	61
A N	ЕXO	O S	63

INDICE DE TABLAS

2-1: Resumen de las variables microscópicas y macroscópicas de la niebla
camanchaca en base a Schamenauer y Joe (1989)16
2-2: Velocidad de sedimentación de gotas de distintos diámetros
3–9: Datos de entrada del modelo RANS con k-ε
 3 – 10: Resultados numéricos de la validación de las ecuaciones de Navier Stokes (RANS) con modelo de turbulencia k-ε. Los valores de la fuerza de arrastre son obtenidos al integrar los valores de las presiones en el borde del
cilindro
4 – 1: Constantes y datos de entrada de los modelos de mallas de fibras cilíndricas
paralelas de 1mm de diámetro45

INDICE DE FIGURAS

Figura	1-1:	Mapa	cuyos	puntos	indican	los	lugares	donde	se	han	realizado	
e	studio	os y apl	icacion	es de atr	apaniebl	as (<mark>b</mark>	ttp://ww	w.fogqı	uest	.org/)	2

- 2-2: Distribución de diámetros de las gotas en la niebla (línea negra) junto a la distribución de LWC_d (línea gris) dado en mg/m³, para cada rango de diámetros de las gotas dado en μm (Schemenauer y Joe, 1989)......14

2-3: Distribución de diámetros de las gotas en la niebla con el contenido líquido
(LWC _d) de cada uno de las gotas (Westbeld et al., 2009) 14
2-5: Coeficiente de arrastre de una esfera según su número de Reynolds. La recta (1) representa la aproximación de Stokes, la curva (2) la aproximación de Oseen y la curva (3) la aproximación de Van Dyke. (Schlichting, 1960)
2-6: Trayectoria de gotas de agua de distintos diámetros para la velocidad horizontal de viento promedio de 5m/s
2-7: Gotas cayendo detrás de la malla de un atrapanieblas plano de Carlos Espinoza (Glisher, 1991)
3-1: Tres mecanismos de intercepción de partículas (gotas). Impactos inerciales (), intercepción directa () y movimiento browniano ()
 3-2: Número de Stokes según el diámetro de la gota, para distinta velocidad del viento que las transporta y una fibra de 1mm de diámetro. La línea horizontal corresponde al valor crítico de Stokes, dada por Israel y Rosner (1986) que separa los impactos inerciales de la intercepción directa: por debajo de este valor crítico hay sólo intercepción directa (Véase sección 3.1.1). 25
3-3: Ilustración de la colisión de una gota por intercepción directa
3-4: Ilustración de la trayectoria de una gota () antes de la colisión por mecanismo de intercepción directa
3-5: Resultados experimentales para la eficiencia del impacto de partículas en cintas obtenidos por May y Clifford (1966) y Gregory (1953), en comparación con resultados teóricos obtenidos por Langmuir y Blodgett (1946) y otros autores. En el eje vertical se encuentra la eficiencia de impacto, denominada "E", y en el eje horizontal se encuentra el número de Stokes, donde " λ " representa la distancia de frenado y "L" el ancho del obstáculo, que en este gráfico es un cinta. (May y Clifford 1967)

 3-6: Correlación de la eficiencia de intercepción (línea puntada negra) versus número de Stokes efectivo junto con resultados experimentales del estudio de May y Clifford (1967) (puntos con distintas figuras geométricas). (Israel y Rosner, 1982)
 3-7: Ilustración de la trayectoria aleatoria () de la colisión de una gota por el mecanismo de difusión Browniana
3-8: Modelo de elementos finitos de una fibra cilíndrica para la validación del campo de velocidades y del modelo de rastreo de partículas
 3-9: Gráfico del modelo que muestra las trayectorias de 1.000 gotas de 10µm en un flujo de entrada a 5 m/s, enfrentando una fibra de 1mm de diámetro. Este gráfico es uno de los resultados de uno modelos de una fibra implementados en Comsol Multyphisics versión 3.5a
3-10: Gráfico de resultados de intercepción de gotas de agua en un cilindro infinito de 1mm de diámetro para una velocidad de 5m/s
4-1: Detalle de las trayectorias (líneas azules) de gotas de niebla, a través del borde de una malla de cilindros paralelos (circunferencias negras). Se aprecia las gotas desviadas fuera de la malla (parte superior), las que colisionan en ellas y las que pasan entre sus fibras
4-2: Eficiencia aerodinámica de mallas planas con distintas razones de aspecto y una malla cóncava. En el eje vertical se aprecia la eficiencia aerodinámica η_A y en el eje horizontal, el porcentaje de sombra <i>s</i> (Rivera, 2011)
4-3: Detalle de las fibras cilíndricas paralelas que forman la malla de atrapanieblas en el modelo de elementos finitos
4-4: Gráfico de eficiencia de impactos (η_i) (véase ecuación 3.9) versus ancho de una malla con s = 1 (pantalla impermeable al aire), para una velocidad promedio de 5 m/s y el diámetro promedio de gotas 15µm (definida en el capítulo II)

 4-5: Geometría del volumen de control del modelo de elementos finitos. El volumen de control está representado por el cuadrado rosado, en el centro se indica la malla de fibras y en cada borde se indica la condición de flujo respectiva. 44
4-6: Geometría del volumen de control del modelo de elementos finitos de la malla de cilindros paralelos con condición de simetría en el centro
4-7: Campo de velocidades para s= 40%, a la escala de la malla (puntos negros a la izquierda). La escala de grises de la derecha muestra la magnitud de la velocidad
4-8: Campo de velocidades para s= 40% (a) y 70% (b) a la escala de la malla (circunferencias negras). La escala de grises de la derecha, muestra la magnitud de la velocidad.47
 4-9: Gráfico de las trayectorias (líneas azules) de las gotas en el borde de una malla con s = 40% formada por cilindros (pequeñas circunferencias)
 4-10: Eficiencia global de atrapanieblas planos "η_{an}" (eje vertical) formados por una malla de cilindros paralelos de 1m de ancho a distintos porcentajes de sombra "s" (eje horizontal).
4-11: Eficiencia aerodinámica de un atrapanieblas formado por una malla de cilindros paralelos de 1m de ancho y distintos porcentajes de sombra
 4-12: Gráfico de las eficiencias aerodinámicas, de impacto y global resultantes de las mediciones de los modelos computacionales elaborados en Comsol Multiphysics
 4-13: Gráfico de las trayectorias de las gotas en una malla con s = 90%, donde las gotas se enfrentan a los cilindros con un ángulo no perpendicular al flujo de niebla. 53

4-14:	Modelo simétrico de malla de fibras cilíndricas anguladas en "V" respecto
	de la dirección inicial del viento54
1 15	Gráfico de eficiencia global y de impactos de una malla con $s = 30\%$
4-13	dispueste en forme de "V" con distintes éngules de incidencia respecte al
	dispuesta en forma de V con distintos angulos de incidencia respecto al
	flujo de niebla
4-16.	Malla Kimre para separar neblinas de gases y gotas de aceite en agua,

NOMENCLATURA

 A_d : Área proyectada por un obstáculo en el plano perpendicular a un fluido que le ejerce una fuerza

- C_d Coeficiente de arrastre de un obstáculo
- C_0 Coeficiente de pérdida de carga
- d_f : Diámetro de una fibra
- d_p : Diámetro de una partícula
- F_d : Fuerza del aire sobre una gota de niebla
- l_p: Distancia de relajación o frenado
- *LWC*: Contenido de agua líquida ("Liquid Water Content")
- *LWC_d*: Contenido de agua líquida de una gota de diámetro "d"
- m_w'' : Flujo másico de agua líquida por unidad de área
- N_d : Número de gotas de diámetro "d"
- Re: Número de Reynolds
- Re_p : Número de Reynolds de una partícula
- r_p : Radio de una partícula
- t part: Tiempo de relajación de una partícula inmersa en un fluido
- u_d : Velocidad de la gota respecto del aire

 u_0 : Velocidad del aire que transporta las gotas de niebla antes de la perturbación inducida por el atrapanieblas

 v_s : Velocidad de sedimentación

Letras griegas

- η_{an} : Eficiencia global del atrapanieblas
- η_a : Eficiencia aerodinámica
- η_i : Eficiencia de impactos
- η_c : Eficiencia de captura
- η_d : Eficiencia de drenado
- ρ_a : Densidad del aire
- ρ_d : Densidad de una gota de niebla
- ρ_w : Densidad del agua líquida
- μ_a : Viscosidad dinámica del aire

RESUMEN

Los atrapanieblas son dispositivos que pretenden proveer de agua potable en zonas áridas, a través de la captación de gotas de agua líquida de la niebla, generada a partir del impacto y drenaje de las gotas contra una malla dispuesta como obstáculo a la niebla. Si bien la tecnología data de 1957, hasta la fecha ha tenida poca evolución tecnológica en cuanto al diseño y manufactura de los dispositivos.

La tesis que se pretende demostrar es la existencia de porcentaje de sombra de una malla de atrapanieblas, que maximiza la tasa de impacto de gotas en sus fibras. La existencia de este óptimo será evaluada a partir de los resultados de modelos computacionales, los cuales simulan la física del impacto de gotas de manera simplificada, al evaluar una malla compuesta por cilindros paralelos infinitos, dispuestos perpendicularmente a un flujo de niebla. Además de demostrar la existencia de un óptimo, se explora la posibilidad de cambiar la geometría de la malla de atrapanieblas, obteniendo resultados muy interesantes que podrían cambiar las perspectivas de esta tecnología.

En el primer capítulo se realiza una descripción del estado del arte de la tecnología, para luego explicar el funcionamiento de la captación de niebla en atrapanieblas convencionales, para así definir los conceptos necesarios para plantear los objetivos de esta tesis expuestos en este capítulo. En el segundo capítulo se realiza una caracterización de las gotas de niebla y su transporte. En el tercer capítulo se describen los modelos de intercepción de gotas mediante impactos en una fibra aislada, de manera de estimar la precisión de los modelo computacionales. En el cuarto capítulo se describen los modelos computacionales del impacto de gotas en una malla perpendicular al flujo y en forma de "V", junto a los resultados respectivos. Finalmente, en el capítulo cinco se resumen las principales conclusiones de esta tesis

Palabras claves: Atrapanieblas, fog water, fog water collection, fog water collector, FWC, LFWC, droplet impaction , droplet interception, aerosol impaction, fluid mechanics, particle interception, particle tracing, CFD.

ABSTRACT

Fog Water Collectors (FWC) is a technology that provides a new fresh water supply for arid areas by collecting liquid water from fog, generated by the impact and draining of water droplets against the fibers of a mesh disposed as an obstacle to fog.

The thesis that is pretended to be proven is the existence of a shade coefficient of a FWC mesh that maximizes the rate of impact of droplet into its fibers. The existence of this optimum shade coefficient would be evaluated by the results, obtained by computational models that simulate the physics of the droplet impaction in a simplificated way, by evaluating the rate of impaction on a mesh made by an array of infinite parallel cinders, disposed perpendicularly to the fog principal flow. Besides proving the existence an optimum shade coefficient, a new way if disposing the mesh is discussed, in order to explore new geometrical configurations of the macro scale of the FWC, that result on very interesting results that may change the perspectives of this technology.

The first chapter of this thesis describes the state of the art of FWC technology, and explains concepts on fog water collection in order to define the objectives exposed on this chapter. The second chapter describes the characteristics of fog water droplets and its transportation on fog. The third chapter describes the impaction models of droplets on a single fiber, in order to describe droplet impaction prove the accuracy the computational model. The fourth chapter describes the computational models of a parallel cylinder mesh and a "v" shaped mesh, with its results and discussion. Finally, the fifth chapter describes the main conclusions of this thesis.

I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el estado del arte de los atrapanieblas para mostrar la necesidad de este estudio y la captación de una fuente de agua dulce para el planeta. Luego de la necesidad, se hará una descripción de los atrapanieblas, de manera que el lector se familiarice con el funcionamiento de estos dispositivos y así poder establecer los objetivos y alcances de esta tesis.

1.1. Estado del arte de los atrapanieblas

Actualmente más del 40% de la población mundial tiene alguna forma de escasez de agua dulce ("The millenium development goals report", United Nations, 2008) por lo que es un problema económico, social y político de vital importancia para el desarrollo de la humanidad, que será cada vez más importante en la medida que las fuentes de este vital recurso sean más escasas por contaminación o agotamiento (Rijsberman, 2006, Smakhtin et al., 2004, Schemenauer and Joe, 1989).

La captación de niebla es una posible solución para la creciente escasez de agua para el uso humano, animal y agrícola (Abdul-Wahab y Lea, 2008). En el mundo existen una gran cantidad de zonas áridas y semi-áridas donde el agua dulce terrestre es escasa o inexistente, pero la niebla atmosférica es abundante en ciertas épocas, por lo que el aprovechamiento de este recurso podría transformar parte de estas zonas de manera considerable. En la Figura 1-1 se muestra un mapa de las zonas donde se ha estudiado o se estudia actualmente la niebla para la captación.



Figura 1-1: Mapa cuyos puntos indican los lugares donde se han realizado estudios y aplicaciones de atrapanieblas (<u>http://www.fogquest.org/</u>).

La concepción de usar la niebla como recurso de agua dulce es tan antigua como los originarios de las Islas Canarias o pastores del sultanato de Omán, pero uno de los primeros estudios sobre la captación de agua surgió en Chile recién en año 1957. Tal estudio se realizó en la Universidad del Norte de Chile fue liderado por Carlos Espinoza, que trabajó junto a otros científicos chilenos y al israelí Dr. Samuel Duvdevani. En el estudio se desarrollan y analizan una serie de alternativas de distintos diseño de obstáculos verticales para la intercepción de agua de niebla, junto a las variables meteorológicas del fenómeno de la niebla camanchaca de la zona norte de Chile (Gishler 1991).

En el estudio liderado por Carlos Espinoza, se desarrollaron atrapanieblas planos (Figura 1-2) y tridimensionales (Figura 1-3) donde se midió el agua extraída por distintos modelos, en distintos sitios y con diversas variables geográficas y meteorológicas. Debido a la diversidad de variables físicas consideradas en los lugares escogidos por Espinoza y su equipo, no se pudo concluir el efecto de manera aislada, de cada una de las variables físicas involucradas en la captación de gotas de niebla, para así deducir de manera clara las variables de diseño que maximicen la captación de gotas (Gischler, 1991)



Figura 1-2: Prototipos de atrapanieblas planos de fibras de nylon elaborados por Carlos Espinoza (Gischler, 1991). En este diseño las gotas impactan las fibras de nylon, quedando en la superficie de ésta hasta bajar por gravedad hasta una canaleta ubicada en la parte inferior del dispositivo.



Figura 1-3: Prototipos de atrapanieblas tridimensionales de malla de polietileno de Carlos Espinoza (Gischler, 1991). En este diseño, al igual que el atrapanieblas plano, las gotas impactan las fibras de la malla para luego bajar a la canaleta.

Posterior a los prototipos del equipo de Carlos Espinoza, no existen estudios donde se propongan mejoras significativas a esta tecnología, siendo el atrapanieblas de malla plana (véase figuras 1-2 a 1-6) el que se ha sido aplicado en todos los proyectos de carácter social, por ejemplo en el cerro "El Tofo" en Chile (Figura 1-4 izquierda) y "Lomas de Atiquipa" en Perú (Figura 1-4derecha). El Centro del Desierto de Atacama (CDA) de la P.U.C., en conjunto con la organización Canadiense FogQuest y otras organizaciones, han realizado una serie de destacados proyectos sociales, que pretenden proveer de agua dulce

a pequeñas comunidades aplicando esta tecnología ya sea para el uso humano, animal o agrícola en países como Chile, Perú, Omán y otros que se muestran en el mapa de la Figura1-1.



Figura 1-4: Proyecto El Tofo (izquierda) y Lomas de Atiquipa (derecha)

El enfoque social que han tenido los proyectos de instalación de atrapanieblas en las últimas décadas, ha incidido en que el criterio principal de diseño sea la disponibilidad de materiales y la factibilidad de construcción del atrapanieblas de malla plana, similares a los de Carlos Espinoza, tal como se describe en el "Manual de colección de agua de niebla" de FogQuest (Schemenauer, Cereceda y Osses, 2005). Los criterios de diseño mencionados anteriormente han sido muy exitosos para instaurar esta tecnología en pequeñas comunidades, pero aún no existe estudio alguno que evalúe la introducción de un tipo diferente de malla, poste, cable u otra característica de diseño, de manera que se maximice la captura de las gotas de niebla, y por ende, reduzca el costo del agua obtenida con los atrapanieblas.

Para introducir al lector en la problemática de la captación de niebla, a continuación se hace una pequeña descripción de los atrapanieblas de malla plana que explica el funcionamiento de estos dispositivos y establece las eficiencias relacionadas a cada uno de los procesos físicos involucrados en la captación de niebla.

1.2. Funcionamiento de los atrapanieblas

Los atrapanieblas están formados por una malla (B, Figura 1-5) sostenidas verticalmente por una estructura sólida, que se dispone obstaculizando el paso de la niebla. Las gotas de agua de niebla (A, Figura1-5) son transportadas por el viento hacia el atrapanieblas. Al acercarse al atrapanieblas, una fracción de la niebla pasan alrededor de él y otra fracción pasa a través de la malla. Al pasar a través de la malla, algunas gotas colisionan con las fibras de la malla y otras pasan a través de los orificios entre éstas. Una vez que las gotas impactan en las fibras, éstas pueden rebotar o quedar en la superficie de la fibra. Cuando las gotas quedan en la superficie de la malla, éstas pueden quedarse estáticas, ser empujadas por el viento fuera de la malla o pueden bajar por la malla a causa del peso propio de ésta. Cuando las gotas bajan por la malla, existe una canaleta que las recibe (C, Figura 1-5) y al acumularse toda el agua que baja por la malla, ésta es conducida por la canaleta hacia un estanque de acumulación en la base del atrapanieblas (cercano a "D", Figura1-5).



Figura 1-5: Atrapanieblas plano creado por Carlos Espinoza (Gischler, 1991). En la zona donde se encuentra la letra A, las gotas de niebla son transportadas por el

viento; en B, se encuentra la malla con la que impactan; La letra C indica la canaleta que conduce el agua hacia el estanque, letra D.

En cada uno de los procesos físicos de la captación de niebla descrita anteriormente se ve involucrada una eficiencia, donde sólo una fracción de las gotas de niebla es llevada finalmente hacia a los estanques de acumulación.

Desde muy lejos (A, Figura1-5) hasta llegar al atrapanieblas (B, Figura1-6) sólo algunas gotas llegan a la malla de éste, ya que otras son desviadas por los costados del atrapanieblas a causa de la oposición al flujo de aire impuesta por el atrapanieblas. La cantidad de gotas que efectivamente pasan por la malla, dividida por la cantidad de gotas que pasan en el área de la malla en el flujo imperturbado "aguas arriba" del atrapanieblas la llamaremos fracción de paso (f_p). Una vez que las gotas pasan a través de la malla, sólo una fracción de éstas impactará con las fibras de la malla, lo que llamaremos "eficiencia de impacto" (η_i). La fracción de paso se puede relacionar con el estudio de Rivera (2011), donde para simplificar la multiplicación entre f_p y η_i , se denominó "eficiencia aerodinámica" (η_a) a la fracción de paso multiplicada por el coeficiente de sombra (s), ya que en tal estudio se supone que la eficiencia de impactos es 100%.



Figura 1-7: Trayectoria de gotas de la niebla (líneas azules) a través de una malla de fibras paralelas verticales (circunferencias negras). Esta figura muestra la malla en un plano horizontal en corte.

Al llegar a la malla (B, figura 1-6) sólo una fracción de las gotas impactan contra las fibras de ésta, ya que otras pasan por el espacio entre ellas (véase figura 1-7). Una vez que las gotas colisionan con las fibras de la malla, estas éstas pueden rebotar, quedarse en la fibra o bien, ser empujadas fuera de la superficie de la fibra por acción del viento. La fracción de gotas que quedan capturadas en la superficie, sin rebotar o reintegrarse al flujo, se denomina "eficiencia de captura" (η_c). Con el objetivo de aislar los procesos físicos del transporte de las gotas, con los procesos físicos que ocurren en la superficie de la fibra y las gotas que la colisionan, se supondrá $\eta_c = 1$.

Cuando las gotas efectivamente se quedan en la superficie, éstas pueden quedarse estáticas o bien pueden bajar por la malla a causa de su peso propio. El peso propio de las gotas puede ir aumentando al coalescer con otras gotas cercanas o provenientes de la niebla. La fracción de gotas que, una vez capturadas en las fibras de la malla, son drenadas hasta la canaleta, se denominará eficiencia de drenado " η_d ". ". Con el objetivo de aislar los procesos físicos del transporte de las gotas con los procesos físicos que ocurren en la superficie de la fibra y las gotas que colisionan y/o drenan por la malla, se supondrá $\eta_d = 1$.

Al tomar en cuenta todas las eficiencias de los procesos físicos involucrados en la captación de niebla, es decir eficiencia aerodinámica (η_a), de impacto (η_i), de captura (η_c) y drenado (η_d); se puede definir la eficiencia global del atrapanieblas que se denotará (η_{an}) como la multiplicación de cada una de las eficiencias mencionadas anteriormente.

$$\eta_{an} = \eta_a \eta_i \eta_c \eta_d \tag{1.1}$$

Las mallas comúnmente usadas en los atrapanieblas, se clasifican por su porcentaje o fracción de sombra (s), es decir, la fracción de área cubierta por las fibras dividido respecto del área total de la malla.

$$s = \frac{A_f}{A_T} \tag{1.2}$$

Alternativamente se puede definir la fracción de área libre como el complemento de *s*, o sea, el porcentaje de área libre de fibras.

$$f = 1 - s \tag{1.3}$$

La hipótesis que se plantea en este estudio es que existe una fracción de sombra (*s*) que maximiza la cantidad de impactos de gotas en las fibras de la malla. En el caso extremo en donde la malla está completamente cerrada, la mayoría de las gotas se desviarían por los costados de la malla, pero si se aumenta el fracción de área libre (*f*), más gotas impactarían en las fibras de la malla, pasando algunas por las áreas libres hasta el extremo en que casi no hay de fibras en la malla para que impacten las gotas de niebla.

A continuación se detallan los objetivos de esta tesis, que pretenden ser útiles para el desarrollo de la tecnología de los atrapanieblas.

1.3. Objetivos de la tesis

El objetivo principal es demostrar la existencia de un óptimo de la cantidad de gotas que impactan con las fibras de una malla, al variar la cantidad de fibras de la malla perpendicular al flujo. Tal objetivo pretende ser cumplido a partir de la modelación matemática de las gotas de niebla colisionando en una malla simple.

Los objetivos específicos para lograr el objetivo principal propuesto son:

- Caracterizar una niebla de diseño, en base a la bibliografía existente, de manera de establecer los parámetros de la modelación de las fibras y la malla del atrapanieblas. Este objetivo será abordado en el capítulo II.
- Modelar el impacto de gotas de niebla en una fibra cilíndrica aislada a partir de modelos teórico-experimentales que describen el impacto de partículas en fibras cilíndricas aisladas, para así desarrollar un modelo de elementos finitos que sea

validado a partir de la comparación con resultados experimentales. Tal objetivo será abordado en el capítulo III.

- Modelar el impacto de gotas de niebla en distintas mallas de fibras cilíndricas paralelas, a partir del modelo de elementos finitos validado en el capítulo III, para así encontrar el porcentaje de sombra que maximice el producto de la eficiencia aerodinámica (η_a) por la eficiencia de impacto (η_i). Este objetivo será abordado en el capítulo IV.
- Modelar preliminarmente el impacto de gotas de niebla, para una sola malla a distintos ángulos de incidencia respecto al flujo de niebla, para así explorar la existencia de un cambio en el producto entre la eficiencia aerodinámica (η_a) y de impactos (η_i). Este objetivo será abordado en el capítulo V.

En base a los resultados obtenidos se concluirán criterios y recomendaciones para el diseño de una malla de atrapanieblas, que mejore la tasa de impactos de gotas de niebla en sus fibras y haga la tecnología aún más competitiva en costos para proveer de agua a zonas áridas de manera sustentable.

II. CARACTERIZACIÓN DE LAS GOTAS DE NIEBLA

La niebla es un fenómeno meteorológico que consiste en pequeñas partículas de agua líquida (gotas) suspendidas en el aire, que pueden clasificarse en distintos tipos de acuerdo a su origen. Para la captación de agua se requiere de nieblas en movimiento, que suelen ser de origen advectivo u orográfico. La niebla advectiva, corresponde a nubes originadas en otros lugares (comúnmente el mar) que viajan a causa de corrientes de aire (véase Figura 2-1 izquierda). La niebla de origen orográfico, ocurre por la condensación de gotas debido al movimiento ascendente de masas de aire húmedo causada por la orografía del lugar (véase Figura 2-1 derecha).



Figura 2-1: Niebla camanchaca (advectiva) en Alto Patache, II región de Chile (Izquierda). Niebla de sombrero (orográfica) en Villarrica, IX región de Chile.

La "Camanchaca" es una niebla advectiva presente en la costa del norte de Chile y sur de Perú, que ha sido usada para la captación y su estudio hace décadas. Los estudios de Westbeld et al. (2009) y Schemenauer y Joe (1989), describen características físicas de la niebla camanchaca. En base a tales estudios se establecerán los parámetros básicos de la física de la niebla para modelar el impacto de gotas de niebla en fibras de una malla simple. Posterior al estudio de los parámetros físicos de la niebla, se estudian las características del transporte de las gotas en la niebla. De esta manera, se establecen los parámetros y supuestos necesarios para la modelación del impacto de gotas de niebla en las fibras de una malla simple.

2.1. Análisis de la niebla advectiva "Camanchaca"

Si bien el interés de los estudios de la niebla ha sido volcado principalmente a la predicción de ésta y sus efectos en la navegación aeronáutica, existen estudios como los de A Westbeld, O. Klemm, F. Grießbaum, E. Sträter, H. Larraín, P. Osses, y P. Cereceda3 (2009), junto al de Schemenauer y Joe (1989), los cuales describen las características físicas de la niebla camanchaca, en la que se basa esta tesis. El estudio de Westbeld (2009), cuantificó la cantidad de agua disponible para el ecosistema por la deposición de niebla en Alto Patache (Región de Atacama, Chile). En el estudio de Schemenauer y Joe (1989), se evaluó la eficiencia de un atrapanieblas plano estándar (véase figuras 1-2, 1-4 y 1-6) ubicado en la región de Coquimbo, Chile. En ambos estudios se analiza la niebla advectiva comúnmente llamada "Camanchaca" (palabra de origen aimara que significa "obscuridad") que se extiende desde el norte del Perú hasta la sexta región de Chile (Cereceda et al., 2008).

En ambos estudios se describe la niebla camanchaca en sus dos escalas: macroscópica y microscópica. La escala macroscópica, se refiere al rango de la velocidad del aire que transporta la niebla, el contenido líquido de ésta y el flujo másico de agua líquida transportado. A escala microscópica, se estudian características propias de las gotas de niebla tales como el diámetro de las gotas y la distribución de sus tamaños. A partir de la descripción de ambas escalas que se describen a continuación, se definen los parámetros de diseño para el modelo de los impactos de gotas en fibras de una malla de atrapanieblas.

2.1.1. Escala macroscópica

Las características macroscópicas de la niebla son aquellas que consideran a la niebla como una gran cantidad de gotas, sin distinguir las características propias de cada gota, evaluando así las características globales de ella. A continuación se describen cada una de tales características.

Contenido líquido de agua (LWC)

Corresponde a la masa de agua líquida por unidad de volumen de niebla (g/m³). Para referirnos a este término, usaremos el abreviado LWC del inglés "Liquid Water Content", donde los estudios de Westbeld (2009) y Shemenauer (1989) midieron en un rango que oscila entre $0.31 \text{ g/m}^3 \text{ y } 0.68 \text{ g/m}^3$.

Velocidad de las gotas (u_0)

Corresponde a la velocidad con que se mueve la niebla libremente, es decir, la velocidad a la cual se mueven el conjunto de gotas transportadas por el aire antes de la perturbación inducida al flujo de aire por el atrapanieblas. La velocidad de las gotas de niebla no perturbada por el atrapanieblas se supone igual a la velocidad del viento al estar en equilibrio de fuerzas, despreciando la componente gravitacional, tal como se demuestra en la próxima sección de cinemática de las gotas en la niebla. Denominaremos esta velocidad como (u_0) cuyo rango de magnitudes medido por Schemenauer (1989) y mencionado por Westbeld (2009) se encuentra entre 1,9 m/s y 6,5 m/s, con un promedio de 4,5 m/s. Por otro lado, Gischler (1991) menciona un rango de velocidad libre de hasta 16m/s con un promedio de alrededor de 5 m/s.

Debido a la concordancia de este valor promedio, y tomando en cuenta que los datos recopilados por Carlos Espinoza, publicados en el libro de Glisher (1991), consideran más días de niebla (alrededor de un año completo), se considerará que la velocidad media de la niebla es de 5m/s.

Flujo másico de agua líquida por unidad de área $(\dot{m_w}'')$

Al calcular el producto de las dos variables anteriores, se obtiene el flujo másico de agua líquida en forma de gotas, por unidad de área, antes de la perturbación provocada por el

atrapanieblas. Denominaremos al flujo másico de agua líquida por unidad de superficie en el flujo imperturbado por el atrapanieblas como $m_w''(g/m^2s)$.

$$\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{w}}^{''} = \mathbf{LWC} \cdot \mathbf{u}_0 \tag{2.1}$$

Cada velocidad u_0 tiene un respectivo contenido líquido *LWC*, dando origen a un rango de flujo másico libre por unidad de área entre 0,77 g/m²s y 2,31 g/m²s dado por Schemenauer (1989). Esta variable definirá el potencial de agua a capturar por parte del atrapanieblas, por lo que a partir de esta variable clave y la eficiencia del atrapanieblas (η_{an}) se podrá establecer la cantidad de área de malla necesaria para cumplir con un flujo másico que se requiera en una situación particular.

2.1.2. Escala Microscópica

A escala microscópica, la niebla se compone por un gran conjunto de pequeñas gotas, cuyas características definirán tanto su comportamiento frente a un obstáculo como la importancia relativa de cada tamaño de gota respecto de su aporte al contenido líquido de la niebla (LWC).

La niebla posee una distribución de diámetros de gotas, la cual define sus características aerodinámicas, su comportamiento en el impacto con las fibras de la malla y la masa que aporta cada gota en el flujo másico de agua de niebla. Se denominará esta variable como d_d , indicando con la letra "d" el diámetro y el subíndice índice "d" de la denominación de gota (en inglés "droplet"); además se denominará como N_d al número de gotas de diámetro "d". En la figura 2-2 se aprecia la distribución de diámetros de las gotas de la camanchaca estudiadas por Schemenauer (1989).



Figura 2-2: Distribución de diámetros de las gotas en la niebla (línea negra) junto a la distribución de LWC_d (línea gris) dado en mg/m^3 , para cada rango de diámetros de las gotas dado en μm (Schemenauer y Joe, 1989)



Figura 2-3: Distribución de diámetros de las gotas en la niebla con el contenido líquido (LWC_d) de cada uno de las gotas (Westbeld et al., 2009).

A partir de la cantidad de gotas de distintos diámetros, se calcula el contenido líquido que aporta cada tipo de gota de diámetro "d" (LWC_d) al contenido líquido total de la niebla, como se expresa en la siguiente ecuación.

$$LWC_d = N_d \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_d}{2}\right)^3 \rho_w \tag{2.1}$$

Donde ρ_w es la densidad del agua líquida a la temperatura de la niebla. En la figura 2-3, se aprecia el *LWC_d* calculado en el estudio de Westbeld (2009) y en la figura 2-2 se muestra el cálculo del *LWC_d* hecho por Schemenauer (1989).

El contenido líquido total de la niebla, se calcula como la suma (integral) de los aportes del contenido líquido de cada una de las gotas, desde la con menor diámetro (d_{min}) hasta la con mayor diámetro (d_{max}) , como se aprecia en la ecuación 2.2.

$$LWC = \int_{d_{min}}^{d_{max}} (\frac{1}{6}\pi\rho_w d_d^3) \frac{\partial N_d}{\partial d_d} * \partial d_d$$
(2.2)

En la figura 2-4 se puede notar que el aporte al contenido líquido total de las gotas con diámetros menores a 4 y mayores a **n** es despreciable, rango que se amplía a entre 1 μm y 37,5 μm para el estudio de Westbeld (2009).

2.1.3. Variables de diseño

A partir de la descripción de las variables microscópicas y macroscópicas de la niebla, en la tabla 2-1 se resumen los valores que usaremos para la modelación de los impactos de las gotas en las fibras.

Variable	Unidades	Mínimo	Promedio	Máximo
u_0	m/s	0,6	5	16
d_d	μm	5	15	50
LWC	$g/(m^3)$	0,31	0,50	0,68
$\dot{m_w''}$	$g/(m^2s)$	0,77	1,54	2,31

Tabla 2-1: Resumen de las variables microscópicas y macroscópicas de la niebla camanchaca en base a Schamenauer y Joe (1989).

A partir de los rangos de cada variable anteriormente mencionados, en la próxima sección se describen los fenómenos físicos que definen el comportamiento de las gotas de agua líquida transportada en el flujo de aire de la niebla.

2.2 Transporte de gotas de niebla

En esta sección se estudia el transporte de las gotas a partir las características de la niebla descritas en la sección anterior. Al estudiar el transporte de las gotas se podrán establecer los supuestos necesarios para la modelación de los impactos de ellas en fibras cilíndricas.

Según Holtermann (2003), debido al pequeño diámetro de las gotas de niebla (en este estudio se considera entre 4 y 50 μ m) éstas pueden modelarse como partículas esféricas de diámetro constante, despreciando evaporación y condensación (la gota está en equilibrio termodinámico con la atmósfera). La fuerza de arrastre que ejerce el aire sobre una gota bajo el supuesto que es una partícula esférica, depende del régimen del flujo del aire, definido por el número adimensional de Reynolds, que se muestra en la ecuación 2.3 a continuación.

$$\operatorname{Re}_{p} = \frac{\rho_{a} u_{d} d_{d}}{\mu_{a}} \tag{2.3}$$

Donde ρ_a y μ_a corresponden a la densidad y viscosidad dinámica del aire a la temperatura y presión de las condiciones de niebla, que según Schemenauer (1989) y Gishler (1991) coinciden en que son aproximadamente 10°C y 1*atm*. La variable d_d corresponde al diámetro de la gota en cuestión y u_d corresponde a la velocidad de la gota respecto del aire. La fuerza de arrastre que ejerce un fluido (aire) sobre un obstáculo (gota de niebla) es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa del aire respecto del obstáculo y está dada por la ecuación 2.4 que se muestra a continuación.

$$F_d = C_d \rho_a A_d \frac{1}{2} u_d^2 \tag{2.4}$$

Donde C_d corresponde al coeficiente de arrastre del obstáculo y A_d el área proyectada por el obstáculo perpendicular a la dirección del flujo imperturbado.

Cuando $Re_p < 0,3$ el régimen de flujo se considera laminar (Rhodes, 1984), donde la fuerza de arrastre de un fluido sobre un obstáculo se debe principalmente a las fuerzas viscosas de las capas de fluido muy cercanas a la gota, donde el coeficiente de arrastre sigue la ecuación 2.5 dada por Stokes, indicada con el (1) en la figura 2-5.

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \tag{2.5}$$



Figura 2-5: Coeficiente de arrastre de una esfera según su número de Reynolds. La recta (1) representa la aproximación de Stokes, la curva (2) la aproximación de Oseen y la curva (3) la aproximación de Van Dyke. (Schlichting, 1960)

Si 0,3 < Re < 500 el flujo se considera en régimen de transición (Rhodes, 1984) donde la fuerza de empuje se debe tanto a las fuerzas viscosas como a las fuerzas inducidas por la separación del fluido y la estela turbulenta provocada detrás del obstáculo. A causa de tales efectos, la curva de coeficiente de arrastre se aleja de la recta de Stokes indicada con (1) en la figura 2.4. Para determinar el valor del coeficiente de arrastre C_d bajo régimen de transición, existe una amplia variedad de correlaciones experimentales.

Para determinar el coeficiente de arrastre de las gotas de niebla, usaremos el Holterman (2003) que se basa en resultados empíricos de C_d para gotas en el medio aéreo, que tienen un error menor al 5% respecto a resultados experimentales de Eck (1961), válidos dentro del rango $Re = 0,3 \dots 10^4$, es decir todo el rango de transición y turbulento del flujo alrededor de las gotas. La ecuación dada por Holterman (2003) se muestra en la ecuación 2.7.

$$C_d = \left(\left(\frac{a}{Re}\right)^c + b^c\right)^{1/c} \tag{2.7}$$

Donde a, b y c son constantes experimentales y Re es el número de Reynolds de la gota en el flujo determinado según ecuación (2.3). Al considerar velocidad de la niebla de diseño en la tabla 2-1 (5m/s), los números de Reynolds para el rango de las gotas transportadas en la niebla oscilan entre $Re_p = 2,01$ ($d_d = 6 \mu m$) y $Re_p = 6,7$ ($d_d = 20\mu m$) por lo que el régimen de flujo de las gotas del rango en estudio, están dentro del rango de número de Reynolds establecido por Eck (1961), por lo que las constantes toman los valores a = 24, b = 0,32 y c = 0,52, correspondientes a un flujo de transición.

Al igual que Holterman (2003) y Eck (1961), la correlación de Kahn y Richardson calcula la fuerza de arrastre de un fluido sobre una partícula a partir de una correlación que

depende del número de Reynolds y la velocidad relativa entre la partícula y el fluido que la transporta.

$$F_d = F_{KR} = \pi r_p^2 \rho_a (u - u_p)^2 \left[1.84 \, \text{Re}_p^{-0.31} + 0.293 \, \text{Re}_p^{0.06} \right]^{3.45}$$
(2.8)

Donde r_p es el radio de la partícula, *u* la velocidad del fluido que transporta la partícula, u_p la velocidad de la partícula y Re_p corresponde al número de Reynolds de la partícula calculado por la ecuación 2.3. La ecuación 2.8 será usada en el cálculo computacional de las trayectorias de las gotas en el modelo computacional de la sección III, donde los resse comparará con

Si se considera una gota transportada a la misma velocidad que el aire en la niebla, tal gota se encuentra sometida a la fuerza de gravedad, a la que se opone la fuerza viscosa del aire. Al alcanzar el equilibrio de fuerzas en el eje vertical, se obtendrá una velocidad constante en tal eje, la cual comúnmente se denomina como "velocidad de sedimentación" (V_s), dada por la ecuación 2.8.

$$V_{\rm s} = \sqrt{\frac{4\rho_{\rm d} \, \mathrm{g} \, \mathrm{d}_{\rm d}}{3\rho_{\rm a} \mathrm{C}_{\rm d}}}$$
(2.9)

Al calcular la relación entre velocidad de sedimentación y la velocidad promedio de la niebla (dada en la tabla 2-1), se puede calcular las trayectorias que seguirán las gotas bajo escenarios dados, como se aprecia en la figura 2-2 a continuación.

Tabla 2-2: Velocidad de sedimentación de gotas de distintos diámetros.

$d_{d}(\mu m)$	<i>V_s</i> (m/s)
5	0,05
15	0,15
25	0,24
50	0,43
En la tabla 2-2, se puede notar que la velocidad de sedimentación de las gotas de interés para la captación (entre $5\mu m$ y $50\mu m$ de diámetro) es notablemente menor a los 5 m/s promedio de la velocidad que viajan las gotas en la niebla. En base a este hecho, se puede concluir que las gotas de la niebla seguirán prácticamente las mismas trayectorias que el aire que las transporta.

A pesar que las gotas de niebla siguen a gran escala las trayectorias del aire, es interesante explorar el comportamiento de gotas de mayor diámetro que las de la niebla. Las gotas de mayor diámetro interesan ya que en la malla de un atrapanieblas las gotas coalescen, formando gotas de mayor diámetro que la niebla, las cuales pueden eventualmente volver al flujo de viento o caer en la canaleta. Para calcular tales trayectorias, se puede calcular la relación entre el viento que las transporta y las velocidades de sedimentación de cada gota. En la figura 2-7 se aprecia la trayectoria de gotas más grandes que las de niebla.



Figura 2-6: Trayectoria de gotas de agua de distintos diámetros para la velocidad horizontal de viento promedio de 5m/s.

Con esto se puede notar que para las gotas de niebla (del orden de micrones), las trayectorias de éstas serán prácticamente las mismas que el viento que las transporta. Para gotas de diámetro mayor que el de la niebla, la velocidad de sedimentación comienza a ser importante, por lo que seguirán trayectorias más verticales que la niebla. En la figura 2-8 se aprecia como gotas formadas en una malla caen por detrás de ésta fuera de la canaleta.



Figura 2-7: Gotas cayendo detrás de la malla de un atrapanieblas plano de Carlos Espinoza (Glisher, 1991).

En base a los supuestos introducidos en este capítulo, en el próximo capítulo se estudiará el impacto de gotas en una fibra aislada, de manera de identificar las variables físicas involucradas en este proceso y validar el modelo de elementos finitos elaborado en este estudio.

III. IMPACTO DE GOTAS DE NIEBLA EN UNA FIBRA AISLADA

El objetivo de este capítulo es estudiar el impacto de gotas de niebla en una fibra cilíndrica aislada, a partir de modelos teóricos-experimentales y computacionales que describen el impacto contra un obstáculo de partículas arrastradas por un fluido en movimiento. Primero se revisa una serie de modelos teórico-experimentales, que predicen el comportamiento de los impactos de partículas sobre una fibra aislada. Luego se desarrollan modelos computacionales de elementos finitos, que calculan la tasa de impactos de gotas de niebla en una fibra aislada. Finalmente, los resultados de los modelos de elementos finitos serán validado a partir de la comparación de sus resultados con los modelos teórico-experimentales.

3.1 Modelos del impacto de partículas en una fibra cilíndrica

En esta sección se describen los modelos que predicen la tasa de impactos de gotas de niebla en fibras cilíndricas, a partir de correlaciones experimentales que predicen la cantidad de impactos en base a las características del fluido, la partícula y el obstáculo con que impacta. Debido a que el largo de las fibras de la malla de atrapanieblas es del orden de 40.000 veces su diámetro, en la modelación se asume flujo bi-dimensional, donde se desprecia el efecto de los bordes inferiores y superiores del atrapanieblas. También se desprecia el efecto del piso.

El impacto de partículas transportadas por un flujo al que se interponen distintos obstáculos, como una fibra cilíndrica, se puede producir por los siguientes cuatro mecanismos: intercepción directa, impactos inerciales, movimiento browniano y deposición gravitacional. Este último mecanismo es despreciable, como se demostró en la sección 2.2 cuando se calcula la velocidad de sedimentación de las gotas. En la Figura 3-1 se muestra una ilustración que muestra los tres mecanismos de impacto que no consideran la gravedad.



Figura 3-1: Tres mecanismos de intercepción de partículas (gotas). Impactos inerciales (- - -), intercepción directa (- - -) y movimiento browniano (.....).

La intercepción directa (-, -) corresponde al impacto de partículas que siguen la misma trayectoria que el fluido que las transporta, pero que su radio es mayor que la separación mínima entre la línea de flujo que sigue y el obstáculo. Los impactos inerciales (- - -) se producen porque las partículas siguen trayectorias más rectas que el fluido que las transporta, debido a la inercia y a su mayor densidad. Por último, los impactos por difusión browniana (.....) ocurren cuando el tamaño de las partículas tiene el mismo orden de magnitud que las moléculas del fluido que las transportan, por lo que siguen una trayectoria aleatoria debido a su impacto con moléculas del fluido. Estos tres mecanismos se ilustran en la Figura 3-1.

El comportamiento de las gotas al ser interceptadas por un obstáculo dependerá de la relación entre las fuerzas viscosas del aire que las transporta y las fuerzas inerciales provocadas por la curvatura de las líneas de flujo debido a la presencia del obstáculo. La relación entre estas fuerzas se puede expresar en términos del número adimensional de Stokes, que se calcula de la siguiente manera (Coulson y Richardson , 1999).

$$S_{tk} = \frac{t_{part}^* u_0}{d_f} = \frac{l_p}{d_f}$$
 (3.1)

Donde u_0 corresponde a la velocidad de las gotas relativa al obstáculo en el flujo libre y d_f el diámetro de la fibra (obstáculo). La variable t_{part} corresponde al "tiempo de relajación de una partícula" que es el tiempo que demora una partícula en alcanzar el 37% de su velocidad inicial la ser proyectada en el fluido (Rhodes, 1984). La variable l_p (m) corresponde a la "distancia de relajación", que es la distancia que recorre la partícula hasta alcanzar el 37% de su velocidad inicial la ser proyectada en el fluido (Rhodes, 1984). Nótese que aquí suponemos que la velocidad relativa de la gota al aire que la transporta es cero. Si la ley de Stokes es válida en el rango en que la partícula alcanza su velocidad de equilibrio (véase Ecuación 2.5 y Figura 2-5), su tiempo de relajación se calcula como se muestra en la ecuación 3.2 a continuación (Rhodes, 1984).

$$t_{part} = \frac{\rho_{w} \cdot d_{d}^{2}}{18 \cdot \mu_{a}} = \frac{l_{p}}{u_{0}}$$
(3.2)

Donde ρ_w (kg/m³) es la densidad de la gota, d_d (m) su diámetro, μ_a (kg/ms) la viscosidad dinámica del aire y, que es la distancia que cubriría la partícula hasta alcanzar el tiempo de relajación (bajo la ley de Stokes).

A partir del rango de las características de niebla analizadas en la sección 2.1, se pueden calcular los valores del número de Stokes para distintos diámetros de las fibras de una malla de atrapanieblas, tomando en cuenta la intercepción de una fibra aislada, es decir, donde el flujo de aire no es perturbado por las fibras vecinas. A continuación se muestra un gráfico que resume los distintos números de Stokes para los diámetros de gotas analizados en este estudio.



Figura 3-2: Número de Stokes según el diámetro de la gota, para distinta velocidad del viento que las transporta y una fibra de 1mm de diámetro. La línea horizontal corresponde al valor crítico de Stokes, dada por Israel y Rosner (1986) que separa los impactos inerciales de la intercepción directa: por debajo de este valor crítico hay sólo intercepción directa (Véase sección 3.1.1).

A continuación se describirán los mecanismos físicos del impacto de gotas de niebla en fibras cilíndricas, de manera de determinar cuál es el predominante en base al número adimensional de Stokes en conjunto con otras ecuaciones empíricas y teorías sobre intercepción de partículas.

3.1.1. Intercepción directa

Este mecanismo corresponde a la intercepción de gotas que siguen las trayectorias del flujo de aire que las transporta de manera que impactan con el obstáculo interceptor si la menor distancia entre la línea de flujo que siguen y la superficie del obstáculo es inferior al radio de la partícula. Luego, si se conocen las líneas de flujo del medio aéreo alrededor de un

objeto y el diámetro de las partículas se puede calcular la eficiencia de impacto del obstáculo.



Figura 3-3: Ilustración de la colisión de una gota por intercepción directa.

Este mecanismo de intercepción es relevante para las partículas con S_{tk} <1,25 (véase la línea horizontal de la figura 3-2) y su eficiencia de intercepción teórica viene dada por la siguiente ecuación propuesta por Israel y Rosner (1982)

Si Re_f < 1.000,

$$\eta_i = \frac{1}{(2 - \ln(Re_f))} \left[(1 - R) \ln(1 + R) - \frac{R(2 + R)}{2(1 + R)} \right]$$
(3.3)

 $Si Re_{f} > 1000$

$$\eta_i = 1 + R - \frac{1}{(1-R)}$$
(3.4)

Donde $R = \frac{d_d}{d_f}$ y Re_f corresponde al número de Reynolds de la fibra como interceptor.

Se aprecia en la figura 3-2 que las gotas sobre 9µm, que representan más del 99% del contenido líquido de la niebla, cumplen con que $S_{tk}>1,25$ (Israel y Rosner, 1986) para velocidades mayores a 5 m/s, por lo que este mecanismo puede considerarse despreciable debido a que el aporte al agua recolectada de las gotas de diámetro menor a 9µm es menor al 1%.

3.1.2. Impactos Inerciales

Este mecanismo es el que ocurre cuando las trayectorias que siguen las partículas que transporta un fluido tienden a ser más rectas que las líneas del flujo que las transporta. Esta tendencia se explica a que las densidades de tales partículas son órdenes de magnitud distintas a las del fluido que las transporta, provocando que las fuerzas inerciales de las partículas (en este caso, gotas) sean mucho mayores que las fuerzas viscosas del fluido que las transporta (en este caso, aire).



Figura 3-4: Ilustración de la trayectoria de una gota (--) antes de la colisión por mecanismo de intercepción directa.

Este mecanismo es el que predomina cuando se cumple que $S_{tk} > 1,25$ (Israel y Rosner, 1982) por lo que, dados los números de Stokes de la Figura 3-2, podemos concluir que esta condición se cumple para las gotas que representan el 99% del contenido líquido (entre

9μm y 22μm), es decir, este mecanismo es el predominante en el impacto de gotas de la niebla de interés para esta tesis.

Esta observación es consistente con la intuición que la densidad de las gotas es del orden de 1.000 veces la densidad del aire cuya viscosidad es muy baja (0,000018 m²/s) lo que implica que las fuerzas inerciales predominan por sobre las viscosas cuando las gotas se acercan a un obstáculo del orden de magnitud del tamaño de las fibras de un atrapanieblas (~ 1mm).

Schemenauer y Joe (1989) analizaron la eficiencia de intercepción bajo impactos inerciales, en cintas que forman la malla "Raschel". El cálculo de tal eficiencia se basó en el trabajo teórico sobre la intercepción de partículas bajo flujo potencial hecho por Langmuir y Blodgett (1946). Los valores obtenidos por Langmuir y Blodgett (1946), que corresponde a un estudio teórico de las trayectorias de las gotas en el medio aéreo, no se encontraban validados experimentalmente. A partir del trabajo experimental de May and Clifford (1967) se demostró que, para el caso particular de las cintas, los resultados teóricos de Langmuir y Blodgett (1946) tienden a sobreestimar el valor de la tasa de impacto hasta en valores cercanos al 400% (May y Clifford, 1966), tal como se puede apreciar en la siguiente figura.



Figura 3-5: Resultados experimentales para la eficiencia del impacto de partículas en cintas obtenidos por May y Clifford (1966) y Gregory (1953), en comparación con resultados teóricos obtenidos por Langmuir y Blodgett (1946) y otros autores. En el eje vertical se encuentra la eficiencia de impacto, denominada "E", y en el eje horizontal se encuentra el número de Stokes, donde " λ " representa la distancia de frenado y "L" el ancho del obstáculo, que en este gráfico es un cinta. (May y Clifford 1967).

Esta diferencia se puede explicar a partir de las observaciones hechas por Israel y Rosner (1982) donde se mejora la hipótesis que establece que la ley de Stokes es válida en todo instante desde que la partícula viaja libremente hasta que impacta con el obstáculo, donde va desde una cierta velocidad hasta cero, por lo que su coeficiente de arrastre no es constante (véase figura 2-4, "Coeficiente de arrastre de una esfera según su número de Reynolds") por lo que la fuerza de arrastre estaría subestimada respecto a la realidad y por ende el impacto de las gotas estaría sobrestimado.

Para calcular la distancia de frenado (l_p) más precisa, se debe considerar la verdadera fuerza de arrastre que el fluido ejerce sobre de la partícula en cada momento cuando ésta se aproxima al obstáculo. Desde antes del obstáculo hasta que las gotas impactan con él, el número de Reynolds de la gota cambia desde Re_p (valor inicial) hasta 0 (valor final), cuando se detiene al impactar con el obstáculo. Ya que el coeficiente de arrastre de la gota cambiará en función del número de Reynolds (véase figura 2-5) en cada instante, hasta que impacte con la fibra, cada instante debe ser tomado en cuenta. Para tomar esto en cuenta, Israel y Rosner (1982) construyeron una función (ecuación 3.5) que integra cada instante, desde que la partícula se aproxima al obstáculo hasta que impacta contra él, como se muestra a continuación.

$$l_{p} = \frac{4}{3} (\rho_{w} / \rho_{a}) d_{p} \int_{0}^{Re_{p}} \frac{dRe'}{C_{D}(Re')Re'}$$
(3.5)

Donde *Re*' corresponde a una variable auxiliar que representa el número del Reynolds en cada instante desde que viene viajando la partícula, hasta cuando impacta con el obstáculo.

A partir de la distancia de frenado efectiva, se puede calcular el número de Stokes efectivo de la partícula (ecuación 3.6), que toma en cuenta cada uno de los instantes desde que la partícula viaja en el fluido imperturbado, hasta que impacta con el obstáculo.

$$S_{tk_{eff}} = \frac{l_p}{d_f} = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_d}{\rho_a} \right) \left(\frac{d_d}{d_f} \right) \int_0^{Re_p} \frac{dRe'}{C_D(Re')Re'}$$
(3.6)

De donde la integral de dRe' se sustituye por la función que llamaremos Ψ , que se muestra en la ecuación 3.7 a continuación.

$$\Psi(\operatorname{Re}_{p}) = \frac{24}{\operatorname{Re}_{p}} \int_{0}^{\operatorname{Re}_{p}} \frac{\mathrm{dRe'}}{C_{D}(\operatorname{Re'})\operatorname{Re'}}$$
(3.7)

Por lo que el número de Stokes efectivo se puede escribir como la multiplicación entre la función $\Psi(Re_p)$ y el número de Stokes bajo el supuesto que la ley de Stokes es válida en todo instante (Ecuación 3.1 y 3.2) convirtiendo la función $\Psi(Re_p)$ en una corrección del número de Stokes original.

$$S_{tk_{eff}} = \Psi(Re_p) * S_{tk} \tag{3.8}$$

A partir de esta corrección, Israel y Rosner (1982) ajustaron una regresión polinómica (ecuación 3.9) que estima la eficiencia de impacto en función del número del Stokes efectivo. Ésta correlación fue validada con diversos experimentos citados en la publicación, dentro de los que se encuentra el estudio de May y Clifford (1967), como se muestra en la figura 3-6.

$$\eta_{\text{intercepción}} = \left[1 + 1.25 \left(S_{\text{tk}_{\text{eff}}} - \frac{1}{8} \right)^{-1} - 0.014 \left(S_{\text{tk}_{\text{eff}}} - \frac{1}{8} \right)^{-2} + 0.508 \left(S_{\text{tk}_{\text{eff}}} - \frac{1}{8} \right)^{-3} \right]^{-1} \quad (3.9)$$



Figura 3-6: Correlación de la eficiencia de intercepción (línea puntada negra) versus número de Stokes efectivo junto con resultados experimentales del estudio de May y Clifford (1967) (puntos con distintas figuras geométricas). (Israel y Rosner, 1982)

La regresión de la Ecuación 2.7 tiene un 10% de error medio cuadrático según el estudio de Israel y Rosner (1982) por lo que se puede considerar una buena aproximación para calcular la intercepción bajo el mecanismo de impactos inerciales.

3.1.3. Difusión Browniana

Este mecanismo es importante en gotas que poseen magnitudes similares a las moléculas del medio aéreo, que son transportadas en movimientos aleatorios provocados por el impacto de las partículas con las moléculas del aire (véase figura 3-7). Debido a que las gotas en el rango entre 9µm y 22µm representan más del 99% del contenido líquido de la niebla, considerando que las moléculas de aire tienen un diámetro del orden de los 100 picó-metros (10⁻¹² m), se tiene que las gotas de niebla son más de 10.000 veces mayor en diámetro y densidad que las moléculas del aire, por lo que el impacto entre ellas será insignificante. A causa de este motivo, para las gotas que representan más del 99% del

contenido líquido de la niebla este mecanismo se puede considerar razonablemente insignificante.



Figura 3-7: Ilustración de la trayectoria aleatoria (......) de la colisión de una gota por el mecanismo de difusión Browniana.

A continuación se describen los modelos computacionales de elementos finitos que se utilizaron para ser comparados con los resultados teórico-experimentales estudiados en la pasada sección 3.1.

3.2 Modelo computacional del impacto de gotas en una fibra cilíndrica

En esta sección se describen y validan los modelos computacionales del impacto de gotas de niebla en una fibra aislada. La geometría de los modelos de una fibra cilíndrica aislada, dada la geometría cilíndrica discutida en la sección 2.2, tendrá 2 dimensiones y una serie de condiciones de borde como se aprecia en la figura 3-8 a continuación.



Figura 3-8: Modelo de elementos finitos de una fibra cilíndrica para la validación del campo de velocidades y del modelo de rastreo de partículas.

A la entrada del volumen de control se estableció una condición de velocidad constante y uniforme del flujo, la fibra cilíndrica es representada por un borde de pared y a la salida sólo se impuso una presión de referencia igual a cero. Nótese que el volumen de control se construyó de tal manera que la condición de simetría simule las condiciones de flujo abierto.

A partir de estas condiciones de borde, se elaboró una serie de nodos en los que se plantean las ecuaciones "Reynolds-Averaged Navier-Stokes" abreviadas como RANS, que son las ecuaciones de Navier Stokes para flujos turbulentos, en conjunto con un modelo de cierre de la turbulencia que en este caso fue el k- ε . Tal modelo será validado a partir de la comparación con los resultados dados por White (1986), los que tienen respaldo experimental.

Luego de obtener los resultados del flujo de aire que transporta las gotas, se elaborará un modelo que simula una gran cantidad de gotas de niebla transportadas por el flujo de aire, las cuales impactan la fibra. Tal modelo será validado en las próximas sub-secciones a partir de la comparación de los resultados computacionales con los resultados experimentales obtenidos por May y Clifford (1967).

3.2.1 Modelo de elementos finitos del flujo alrededor de una fibra cilíndrica

En esta sección se validarán los resultados de las ecuaciones de RANS y el modelo de turbulencia K-E desarrollado en el módulo de ingeniería química de Comsol Multiphysics 3.5^a (para más detalles sobre las ecuaciones, véase la sección 1 del anexo). A partir de los resultados obtenidos de tales modelos computacionales, se calcula el coeficiente de arrastre que posee el cilindro de la geometría del modelo para los distintos regímenes de flujo impuestos por el aire a dos velocidades a través del cilindro. Estos valores del coeficiente de arrastre se compararán con correlaciones experimentales que se encuentran ampliamente validadas.

Los datos de entrada y parámetros de los modelos se resumen en la Tabla 3-9 a continuación.

Nombre de la Variable	Valor/Expresión	Unidades	Descripción
Rho	1,2	kg/m ³	Densidad del aire
Eta	1,8° 10⁻⁵	Pa⁼ s	Viscosidad dinámica del aire
u_{0}	2 – 20	m/s	Rango de velocidades de entrada
d_{c}	0,001	М	Diámetro de la fibra cilíndrica
Re	rho*u0*d_c/eta	1	Número adimensional de Reynolds
L	0,07*d_c	М	Escala de turbulencia (Pope, 2003)
Ι	0,16 Re ^{-1/8}	1	Intensidad de la turbulencia (Pope, 2003)
h_{vc}	30*d_c	М	Altura del volumen de control

Tabla 3–9: Datos de entrada del modelo RANS con k-ɛ.

<i>w</i> _ <i>vc</i> 60*d_c M	Ancho del volumen de control
-------------------------------	------------------------------

La caída de presión detrás de un obstáculo se calcula a partir de la ecuación 3.10 que se muestra a continuación.

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho_a C_d u_0^2 \tag{3.10}$$

Donde ρ_a corresponde a la densidad del aire, C_d al coeficiente de arrastre del cilindro inmóvil y u_0 es la velocidad del flujo de aire imperturbado.

A partir de los datos de entrada dados en la tabla 3-9, se realizaron simulaciones para distintas velocidades de entrada, donde se obtuvieron los resultados que se pueden apreciar en la Tabla 3-10 que se muestra a continuación.

Tabla 3 - 10: Resultados numéricos de la validación de las ecuaciones de Navier Stokes (RANS) con modelo de turbulencia k- ε . Los valores de la fuerza de arrastre son obtenidos al integrar los valores de las presiones en el borde del cilindro.

Co	ρ _a	Re	$\frac{1}{2}u_0^2$	$P_{2} - P_{1}$
1.063026	1.2	133,3	2	1.254629
1.072068	1.2	1.333,3	200	257.2962

A partir de este resultado se puede deducir que $C_0 \cong 1$, lo que corresponde con un error menor a 6,8% (en media cuadrática) con el resultado experimental expuesto en el libro de White (1986), figura 7.16, el cual para el rango 100<Re<10⁴ establece que para un cilindro infinito el coeficiente de arrastre es $C_0 \cong 1$. En base a esta comparación, se puede corroborar que bajo este modelo, el flujo medio calculado por Comsol Multiphysics obtiene resultados bastante confiables respecto a lo que ocurre en la realidad.

3.2.2 Modelo de transporte e impacto de gotas en una fibra cilíndrica

En el módulo de ingeniería química de Comsol Multiphysics 3.5a, tiene implementadas las ecuaciones que permiten rastreo de la trayectoria de partículas transportadas por un flujo ya resuelto. Para calcular la trayectoria de una partícula transportada por un fluido, bajo el supuesto de dos dimensiones establecido para esta tesis, se debe calcular la ecuación de movimiento de la partícula (2da ley de newton) que se muestra en la ecuación 3.11 (Rhodes, 1984).

$$m_d \frac{d \overrightarrow{u_d}}{d t} = \overrightarrow{F_d} \tag{3.11}$$

Donde m_d corresponde a la masa de la gota, $\overline{u_d}$ a la velocidad de la gota en un momento determinado respecto del tiempo y $\overrightarrow{F_d}$ a la fuerza de arrastre sobre la gota.

La masa de cada gota (m_d) se puede calcular como el volumen de cada una de ellas por su densidad, como se aprecia en la siguiente ecuación.

$$m_{\rm d} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_{\rm d}}{2}\right)^3 \rho_{\rm d} \tag{3.12}$$

En el modelo computacional, la magnitud de la fuerza de arrastre $(\vec{F_d})$ se obtiene a partir de la regresión obtenida por Kahn y Richardson (1987) discutida en la sección en el capítulo II.

Se realizaron una serie de modelos de elementos finitos con una velocidad de entrada de 5m/s para cada una de las gotas de entre 6 y 20 µm. En cada modelo, entran 1.000 gotas a la misma velocidad del viento que las transporta (5 m/s) en el tramo frente a la fibra. La trayectoria se define al resolver e integrar las ecuaciones de cinemática de la ecuación 3.12, 3.13 y 3.14. En la figura 3-9 se puede apreciar una imagen de las trayectorias de las gotas acercándose a la fibra en el modelo de 1.000 gotas de 10µm.



Figura 3-9: Gráfico del modelo que muestra las trayectorias de 1.000 gotas de $10\mu m$ en un flujo de entrada a 5 m/s, enfrentando una fibra de 1mm de diámetro. Este gráfico es uno de los resultados de uno modelos de una fibra implementados en Comsol Multyphisics versión 3.5a.

Para establecer la eficiencia de impactos de las gotas de distintos diámetros, se contabiliza la cantidad de gotas que impactan la superficie del cilindro y se dividen por las 1.000 gotas de entrada, estableciendo así la eficiencia de impactos. Los resultados de la eficiencias de impacto de los modelos se muestran en la figura 3-10 y se comparan con los resultados de Israel y Rosner (1986) que fueron discutidos en la sección 3.1.2.



Figura 3-10: Gráfico de resultados de intercepción de gotas de agua en un cilindro infinito de 1mm de diámetro para una velocidad de 5m/s.

De los resultados que muestran la figura anterior se puede deducir que la diferencia entre el modelo de elementos finitos y el modelo de Israel y Rosner (1986) para la gota promedio de $15\mu m$ es de 4,3%.

En base a este valor, se considera que el modelo de elementos finitos será bastante confiable para la modelación del impacto de tales gotas. Los resultados obtenidos de este modelo son similares a los resultados obtenidos por Divigalpitiya (2009). En tal modelo elaborado en Comsol, con condiciones muy similares, se establece que un modelo con cinta tiene un error menor al 1% para número de Stokes mayor a 10, que en este caso corresponde a 12,75µm. Nótese que el número de Stokes es independiente de la forma del obstáculo interceptor, ya sea cinta de 1mm de ancho o bien un cilindro de 1mm de diámetro, la longitud característica es la misma.

En este capítulo se confirmó la validez del modelo de elementos finitos para la modelación del impacto de gotas en una fibra con simetría cilíndrica, donde el campo de velocidades y presiones es consistente con resultados experimentales de otros investigadores, al igual que el modelo del transporte de gotas en el aire. A partir de ambos modelos validados, en el capítulo IV se modelará una serie de mallas de fibras cilíndricas paralelas, para estudiar el impacto de gotas de niebla.

IV. IMPACTO DE GOTAS DE NIEBLA EN MALLAS DE FIBRAS CILINDRICAS PARALELAS

El objetivo de este capítulo es demostrar numéricamente la existencia de un porcentaje de sombra óptimo de la malla, que maximiza la eficiencia global de un atrapanieblas. La existencia del óptimo se probará a partir de modelos computacionales de la colisión de gotas de niebla en mallas formadas por distintos arreglos de fibras cilíndricas paralelas, similares al modelo validado en el capítulo III.

La eficiencia global de un atrapanieblas (véase sección 1.2) depende del producto entre tres eficiencias, como se muestra en la ecuación 1.1 ($\eta_{an} = f_p \eta_i \eta_c \eta_d$) donde η_a corresponde a la eficiencia aerodinámica (véase figura 4-1), η_i la eficiencia de intercepción de las fibras de la malla (véase figura 4-1), η_c la eficiencia de captura y η_d la eficiencia de drenado de la malla. Tal como se planteó en la sección 1.2, las eficiencias de captura y drenado se asumen como 100%, con el objetivo de asilar los procesos físicos que ocurren en la superficie de las fibras, de los que afectan al transporte de las gotas a través de la malla.



Figura 4-1: Detalle de las trayectorias (líneas azules) de gotas de niebla, a través del borde de una malla de cilindros paralelos (circunferencias negras). Se aprecia las gotas desviadas fuera de la malla (parte superior), las que colisionan en ellas y las que pasan entre sus fibras.

En el trabajo de Rivera (2011) se plantea un modelo teórico que estima la eficiencia aerodinámica de una malla de atrapanieblas a partir de parámetros simples, los cuales permiten explicar la influencia de ciertas características de la malla que influyen en la captación de niebla. Rivera (2011) plantea un modelo basado en el principio de superposición de flujos (White, 1986), que a partir del supuesto que las gotas siguen perfectamente las líneas de flujo, calcula la eficiencia η_a a través de la ecuación 4.1 que se muestra a continuación.

$$\eta_a = \frac{s}{1 + \sqrt{C_0 / C_D}} \tag{4.1}$$

Donde *s* corresponde al porcentaje de sombra de la malla (véase ecuación 1.3) y por ende (1 - s) = f corresponde al porcentaje de área libre de fibras. La constante C₀ corresponde a la caída de presión a través de la malla en un flujo cerrado y C_D corresponde a la caída de presión de la malla como si fuese una pantalla impermeable (*s* = 1), en un flujo abierto.

La constante C_0 se calculó a partir de las correlaciones de Idel'cik (1960) para obstáculos en un flujo cerrado, que basado en el teorema de superposición (White, 1986), se pudo estimar su relación funcional respecto de C_D bajo ese supuesto. El valor del coeficiente de arrastre C_D se obtuvo de White (1986) para una superficie plana y otra cóncava de distintas razones de aspecto (cociente entre el ancho y alto de la malla). La figura 4-2 a continuación muestra la eficiencia aerodinámica estimada por Rivera (2010) para varias mallas de atrapanieblas, formada por fibras de alambre trenzadas perpendicularmente y con distintos coeficientes de sombra (*s*).



Figura 4-2: Eficiencia aerodinámica de mallas planas con distintas razones de aspecto y una malla cóncava. En el eje vertical se aprecia la eficiencia aerodinámica η_A y en el eje horizontal, el porcentaje de sombra *s* (Rivera, 2011).

Los resultados de Rivera (2011) demuestran la existencia de un óptimo, además de mostrar la influencia que tiene la forma y el coeficiente de arrastre de la malla del atrapanieblas en tal eficiencia máxima. Además, estos resultados suponen que las gotas siguen la misma trayectoria que el aire y no consideran la desviación de estas al acercarse a las fibras de la malla, lo cual se demostró que no es efectivo en la sección 3.1. Debido a esto, Rivera (2011) muestra la existencia de un valor óptimo en la cantidad de fibras de una malla, pero sólo calcula un orden de magnitud, destacando la necesidad de la implementación de modelos más complejos que puedan estimar un valor más exacto.

A causa de la necesidad de implementar modelos más complejos, se desarrollaron modelos de elementos finitos de mallas planas, basados en los modelos validados en el capítulo III y las condiciones de niebla expuestas en el capítulo II. A partir de estos modelos se pretende estimar la eficiencia aerodinámica y de impacto en conjunto, tomando en cuenta las características de las gotas así como características más complejas del flujo tales como la viscosidad y turbulencia.

4.1 Modelos de elementos finitos de mallas de fibras cilíndricas paralelas

En esta sección se elaboran distintos modelos de mallas de fibras cilíndricas paralelas (véase figura 4-3) con distintas separaciones entre sí para obtener distintos porcentajes de sombra. Estos modelos se basan en los modelos computacionales de Comsol Multiphysics 3.5a que modelan una fibra cilíndrica aislada con distintas gotas que impactan, elaborados y validados en el capítulo III.



Figura 4-3: Detalle de las fibras cilíndricas paralelas que forman la malla de atrapanieblas en el modelo de elementos finitos.

Al modelar los cilindros paralelos se pretende modelar la colisión de gotas de nieblas en la escala del atrapanieblas. Para reflejar la escala del atrapanieblas, el modelo computacional de la malla debe estar bajo un régimen de flujo similar al de una malla real. Dada la viscosidad dinámica del aire, a 5m/s de viento transportando las gotas, basta una malla sólida de 30cm de ancho para que Re> 10^4 , que es el valor crítico dado por White (1986) para que exista separación. A partir de tal valor crítico, el régimen de flujo es insensible a los cambios del número de Reynolds, por lo que será similar a un atrapanieblas de mayor tamaño (para mayor información sobre este criterio véase página 457 de White (1986)).

Además de la similitud de escala con la malla real, el modelo computacional debe aislar la influencia de su escala en el impacto de las gotas sobre sus fibras. Para que ello ocurra, la malla sólida no debe comportarse como un interceptor, es decir, la eficiencia de impactos de una malla sólida (i.e. s =1) debe ser nula. Para calcular un valor en donde la malla sólida no se comporte como interceptor, se calculó la eficiencia de intercepción de una malla sólida con distintos anchos a partir de la ecuación 3.9 (Israel y Rosner, 1986), cuyos resultados se aprecian en la figura 4-4 a continuación.



Figura 4-4: Gráfico de eficiencia de impactos (η_i) (véase ecuación 3.9) versus ancho de una malla con s = 1 (pantalla impermeable al aire), para una velocidad promedio de 5 m/s y el diámetro promedio de gotas 15µm (definida en el capítulo II).

A partir de este gráfico se aprecia que en una malla impermeable (s=1) de más de 1m de ancho, la eficiencia aerodinámica es nula, por lo que los modelos de fibras cilíndricas paralelas se construyeron de más de 1m de ancho, para que la escala de los atrapanieblas no afecte en los impactos de las gotas. En base a esta condición, se elaboró la geometría que se aprecia en la figura 4-5 a continuación, que es similar al elaborado en el capítulo III, con la diferencia que la escala del volumen de control es completamente distinta (véase



figura 4-6) de manera que se cumpla que la condición de simetría de los bordes del volumen de control, simulen un flujo abierto de aire.

Figura 4-5: Geometría del volumen de control del modelo de elementos finitos. El volumen de control está representado por el cuadrado rosado, en el centro se indica la malla de fibras y en cada borde se indica la condición de flujo respectiva.

Cada uno de los modelos se desarrollaron en base a la geometría de la figura 4-5, donde en cada uno de ellos cambia la distancia entre las fibras, manteniendo el ancho de 1m de la malla, para distintos porcentajes de sombra. Además, se agregó una condición de simetría de la parte inferior (véase figura 4-6) para disminuir la cantidad de nodos a la mitad y así disminuir el tiempo de procesamiento computacional.



Figura 4-6: Geometría del volumen de control del modelo de elementos finitos de la malla de cilindros paralelos con condición de simetría en el centro.

A partir de la geometría expuesta en la figura 4-6, se construyeron 9 modelos con distintos porcentajes de sombra, desde 10% hasta 100%, con las mismas condiciones de borde. En la Tabla 4– 1 a continuación, se resumen las condiciones de borde y datos de entrada de los modelos de mallas. Nótese que la condición de simetría del borde superior se incluye por razones de convergencia numérica y el ancho del volumen de control (4.000 mm) es tal que las líneas de flujo se mantienen absolutamente imperturbadas por la malla.

Tabla 4 - 1: Constantes y datos de entrada de los modelos de mallas de fibras cilíndricas paralelas de 1mm de diámetro.

Nombre de la Variable	Valor/Expresión	Unidades	Descripción
Rho	1.2	kg/m ³	Densidad del aire
Eta	1.8 [•] 10 ⁻⁵	Pa⁼ s	Viscosidad dinámica del aire
uО	5	m/s	Rango de velocidades de entrada
d_c	0.001	m	Diámetro de la fibra cilíndrica
Re	rho*u0*d_c/eta	1	Número adimensional de Reynolds
L	0,07*d_c	m	Escala de turbulencia (Pope, 2003)

1	0,16 Re ^{-1/8}	1	Intensidad de la turbulencia (Pope, 2003)
h_vc	8	m	Altura del volumen de control
w_vc	10	m	Ancho del volumen de control

Al resolver las ecuaciones de RANS con k- ε (véase sección 1 del anexo), se obtienen las presiones y velocidades del aire a través de la malla de atrapanieblas en cada uno de los nodos de la geometría. En la figura 4-7 se muestra un gráfico del campo de velocidades del aire a través de la malla en una escala de colores en blanco y negro, a la escala de la malla, mientras que en la figura 4-8, se muestra el campo de velocidades a la escala de las fibras (al aumentar el detalle de las fibras en la malla).



Figura 4-7: Campo de velocidades para s = 40%, a la escala de la malla (puntos negros a la izquierda). La escala de grises de la derecha muestra la magnitud de la velocidad.







(b)

Figura 4-8: Campo de velocidades para s = 40% (a) y 70% (b) a la escala de la malla (circunferencias negras). La escala de grises de la derecha, muestra la magnitud de la velocidad.

En la figura 4-8, se puede notar que a dos porcentajes de sombra distintos, las fibras influyen en el flujo de distinta forma. En la figura (a) se puede notar claramente una zona de baja velocidad tras las fibras, mientras que en la figura (b), tal baja velocidad es más marcada y el efecto de cada cilindro en particular es menor, ya que las velocidades tras ellos son más similares que en la figura a). Esta observación se puede deber a la superposición de las capas viscosas de ambas fibras. La velocidad máxima en (a) ocurre entre las fibras y es del orden de 7m/s, mientras que en (b) ocurre en el mismo lugar pero con una magnitud de 7,9 m/s. Además, la velocidad tras la malla en (a) se encuentra entre 3 y 4 m/s, mientras que en (b) se encuentra entre 1 y 2 m/s.

Un vez resuelto el campo de velocidades y presiones, al igual que en la sección 3.2.2, para cada una de las mallas de atrapanieblas, se modeló la trayectoria gotas de 500 gotas de diámetro 15µm que entran repartidas uniformemente por la frontera de entrada (véase figura 4-6) en la misma área de la malla, proyectada en la frontera de entrada. Las gotas de niebla entran por tal frontera a la misma velocidad del flujo imperturbado. En la figura 4-9 se muestra la visualización de las trayectorias de las gotas a través de una de las malla de fibras cilíndricas paralelas.



Figura 4-9: Gráfico de las trayectorias (líneas azules) de las gotas en el borde de una malla con s = 40% formada por cilindros (pequeñas circunferencias).

La eficiencia global de la malla del atrapanieblas se calculó a partir del conteo de la posición final de cada una de las gotas. En base a tal conteo, se calculó la fracción entre las gotas que terminan en las fibras versus las gotas que fueron liberadas en la frontera de entrada a la misma altura de la malla. Los resultados de la eficiencia global de cada una de las mallas modeladas en este estudio se resumen en la figura 4-8 a continuación.



Figura 4-10: Eficiencia global de atrapanieblas planos " η_{an} " (eje vertical) formados por una malla de cilindros paralelos de 1m de ancho a distintos porcentajes de sombra "s" (eje horizontal).

A partir de estos resultados, se deduce que existe un óptimo porcentaje de sombra donde se maximiza la tasa de intercepción al igual que en Rivera (2010). El valor de *s* donde se produce el máximo (alrededor de 60%) para la malla de cilindros es relativamente similar a la eficiencia aerodinámica obtenida por Rivera (2011) para una malla con cilindros entrelazados de seda con un porcentaje de sombra cercano al 56%. En la figura 4-10 se muestran los resultados de la eficiencia aerodinámica obtenida de los modelos computacionales.



Figura 4-11: Eficiencia aerodinámica de un atrapanieblas formado por una malla de cilindros paralelos de 1m de ancho y distintos porcentajes de sombra.

La eficiencia aerodinámica y global crecen de manera prácticamente lineal hasta el 20% de sombra, valor donde comienzan a perder la linealidad. Al perder la linealidad, la malla comienza a generar impactos de las gotas de una manera distinta a la suma de sus fibras aisladas, notándose así los efectos de la escala de la malla. Hasta el 50% de sombra, la eficiencia global es levemente menor a un 1% de la eficiencia aerodinámica. Sobre un 50% de sombra, la eficiencia global es consistentemente superior (del orden de un 2%) a la aerodinámica. Las diferencias entre ambas eficiencias podrían ser explicadas por cambios en la eficiencia de impactos, cuyos resultados se muestran en la figura 4-11 a continuación.



Figura 4-12: Gráfico de las eficiencias aerodinámicas, de impacto y global resultantes de las mediciones de los modelos computacionales elaborados en Comsol Multiphysics.

Las diferencias entre las eficiencias aerodinámica y global se deben a los cambios en la eficiencia de impactos, la cual es cada vez mayor a mayor porcentaje de sombra. Los valores de la eficiencia de impactos se pueden describir en dos tramos distintos:

- Para valores de s menores al 50%, la eficiencia de impactos es del orden de 93%, valor muy similar al obtenido en la sección III para los impactos de gotas de 15μm en una fibra aislada de 1mm de diámetro a 5 m/s de velocidad del aire. Por este motivo, se puede deducir para valores menores al 50% de sombra, la malla se comporta más o menos similar a un conjunto de cilindros, respecto de la eficiencia de intercepción. Al subir el porcentaje de sombra, la malla se comporta cada vez más distinto a un conjunto de cilindros aislados.
- Para valores mayores al 50% de sombra, la eficiencia de impactos es mayor al 100%, por lo que el impacto de gotas ocurre de manera distinta que un conjunto de

fibras cilíndricas aisladas. Este hecho se debe a que la escala de la malla comienza a influenciar el impacto de las gotas en las fibras de la malla.

Al analizar las trayectorias de las gotas para valores mayores al 50% de sombra, se puede observar que las gotas que efectivamente pasan por la malla, enfrentan la malla de manera oblicua (con un ángulo de ataque) y no perpendicular, tal como se muestra en la figura 4-12 a continuación.



Figura 4-13: Gráfico de las trayectorias de las gotas en una malla con s = 90%, donde las gotas se enfrentan a los cilindros con un ángulo no perpendicular al flujo de niebla.

Luego de notar el aumento de la eficiencia de impactos de la malla, causado por el impacto de las gotas con un ángulo de incidencia respecto a la malla (como se aprecia en la figura 4-12), nace la inquietud de cómo afectará la eficiencia global si se aumentar el ángulo incidencia de la malla respecto al viento. En la ecuación 4.1 dada por Rivera (2011), se puede notar que la eficiencia aerodinámica depende del coeficiente de arrastre de la forma de la malla. Si el coeficiente de la malla aumenta, la eficiencia aerodinámica también lo hará, y dada la observación de las trayectorias oblicuas de las gotas respecto de la malla, la eficiencia de impactos también aumentaría. A causa de esta inquietud sobre posibles mejoras, en la próxima sección se realiza un modelo exploratorio de una determinada malla

con un porcentaje de sombra fijo, a distintos ángulos de incidencia respecto del flujo de niebla.

4.2 Modelos de elementos finitos de una malla de fibras cilíndricas paralelas a distintos ángulos de incidencia respecto al flujo

En esta sección se elaboran siete modelos de una malla de cilindros paralelos con un 30% de sombra, a distintos ángulos de incidencia respecto al flujo de niebla, formando una figura de cuña (con condición de simetría en la mitad) como se aprecia en la figura 4-13.



Figura 4-14: Modelo simétrico de malla de fibras cilíndricas anguladas en "V" respecto de la dirección inicial del viento.

Al disponer la malla en forma de "V" y aumentar el ángulo de incidencia de la malla respecto a la dirección principal del flujo de niebla, se deberían producir un aumento en la eficiencia global por dos motivos:

1. Se modifica el ángulo de incidencia de las gotas de niebla y la malla, lo que debería aumentar la eficiencia de impactos de las gotas en las fibras.

 Se aumenta el coeficiente de arrastre de la forma en que se dispone la malla (C_D), que según la ecuación 4.1, aumentaría la eficiencia aerodinámica porque pasa más niebla a través de la malla , es decir, se desviarían menos gotas por fuera de la malla del atrapanieblas.

Las condiciones de borde de los siete modelos angulados son las mismas establecidas en la Tabla 4-1, que corresponde a las condiciones de borde de los casos de malla perpendicular a la dirección del viento ($\alpha = 90^{\circ}$) evaluada en la sección 4.1. Además, se construyó un modelo simétrico para disminuir la cantidad de nodos del modelo a la mitad, como se aprecia en la figura 4-13.

Los resultados de estos siete modelos se pueden grafican en la figura 4-13 a continuación. En tal figura 4-13 se grafican los resultados de la eficiencia de intercepción versus ángulo α de inclinación con $\alpha \in [20^\circ, 90^\circ]$.



Figura 4-15 Gráfico de eficiencia global y de impactos de una malla con s = 30% dispuesta en forma de "V" con distintos ángulos de incidencia respecto al flujo de niebla.
Debido a que el valor de la eficiencia de impactos para $\alpha = 20^{\circ}$ es similar al de $\alpha = 30^{\circ}$, no se procedió a calcular $\alpha = 10^{\circ}$, dado que el cambio en la cantidad de gotas que impacten en las fibras sería insignificante (menor a 3,3%) para tan notable cantidad de nodos que aumentaría. Con $\alpha = 10^{\circ}$ se superan los 500.000 nodos, provocando problemas de convergencia, por lo que se estimó que la ganancia de los datos sería muy baja en comparación con el tiempo invertido en resolver un problema que se plantea como exploratorio.

A partir de los resultados de las eficiencias de esta malla dispuesta en forma de cuña a distintos ángulos de incidencia, se puede concluir lo siguiente:

- El valor de la eficiencia global con s=30%, es mayor cuando ésta se dispone en forma de "V" que cuando se dispone perpendicular al flujo de niebla.
- El valor máximo de la eficiencia global de esta malla con s = 30% en forma "V", es mayor que el máximo obtenido por las malla planas con distintos porcentajes de sombra modeladas en esta tesis.
- La eficiencia de impactos llega a un valor muy alto, cercano al 70% para un ángulo de incidencia de 20°.

Es interesante destacar que este efecto es aprovechado por una malla patentada empleada en la industria de proceso para capturar neblinas (llamados "mist eliminators" en inglés) y gotitas de aceite en agua. En efecto, la marca Kimre patentó una malla con forma de pirámides adyacentes, como se muestra en la Figura 4-14, con una gran eficiencia de colección para ductos cerrados.



Figura 4.16. Malla Kimre para separar neblinas de gases y gotas de aceite en agua, aplicadas en ductos cerrados de plantas de procesos industriales.

Se debe notar que la escala de las pirámides de la malla Kimre no corresponde a la escala del atrapanieblas, por lo que de colocar esta malla en un atrapanieblas plano, ésta no tendrá el mismo efecto de escala en la eficiencia aerodinámica que los modelos discutidos en esta sección.

Finalmente se destaca que los resultados de esta malla en particular en forma de "V" son sólo exploratorios, ya que el objetivo principal de esta tesis es corroborar la existencia de un óptimo en la cantidad de fibras de una malla simple formada por fibras cilíndricas. A pesar que no es el objetivo de esta tesis, dados los interesantes resultados exploratorios obtenidos en el caso particular de esta malla en "V" a distintos ángulos, se destaca la importancia de estudiar otras cuñas para otros porcentajes de sombra. Además, para estudios futuros que evalúen las eficiencias de impactos de otras mallas en "V", se deberá tener en cuenta los costos adicionales de agregar más malla debido a la geometría de cuña,

V. CONCLUSIONES

A continuación se resumen las principales conclusiones de cada capítulo, en base a los objetivos propuestos y resultados de esta tesis.

Caracterización de las gotas de niebla

- 1. Para las gotas estudiadas por Schemenauer y Joe (1989), la fuerza de gravedad es despreciable frente al arrastre que genera el aire que transporta las gotas.
- Se requieren más estudios sobre las características físicas de distintas nieblas que sean posibles de captar, para así validar que los estudios de Westbeld (2009) y de Schemenauer y Joe (1989) son representativos de nieblas posibles de captar en el mundo.

Impacto de gotas de niebla en una fibra aislada

- El mecanismo de impactos inerciales es el más importante para la captación de la niebla estudiada por Schemenauer y Joe (1989). A su vez los mecanismos de intercepción directa, deposición gravitacional y movimiento browniano son despreciables.
- 2. A menor diámetro de las fibras y mayor velocidad, se incrementa la tasa de impactos de gotas de niebla sobre ella.
- Los experimentos de May y Clifford (1967) demuestran que modelos usados por Schemenauer y Joe (1989) para la predicción de impacto de gotas en cintas de malla de atrapanieblas (Langmuir, 1946) sobreestiman la tasa de impactos real.
- El modelo de elementos finitos del aire que transporta las gotas (RANS con k-ε) desarrollado en esta tesis difiere en menos de un 6,8% de los resultados expuestos por White (1986) para el coeficiente de arrastre.
- 5. El modelo de transporte de partículas desarrollado en esta tesis difiere en menos de un 1% de los resultados experimentales obtenidos por May y Clifford (1967) para el rango de velocidad y tamaño de gotas que nos interesa.

• Se debe minimizar la resistencia al flujo de aire de las fibras, de manera que la eficiencia aislada de cada fibra sea óptima. Esto puede ser mediante la mejora del coeficiente de arrastre de las fibras C₀ y la disminución del diámetro de éstas.

Impacto de gotas de niebla en mallas de fibras cilíndricas paralelas con distintos porcentajes de sombra.

- 1. Existe un porcentaje de sombra que optimiza la eficiencia de impactos de gotas de niebla con las fibras de una malla perpendicular al flujo de niebla.
- 2. El valor del porcentaje de sombra óptimo obtenido por los modelos de elementos finitos es similar al obtenido por Rivera (2011), pero un poco mayor.
- 3. El valor de la eficiencia de colección máxima obtenido por los modelos de elementos finitos es superior al de Rivera (2011), probablemente a causa del menor coeficiente de pérdida de carga de las fibras cilíndricas paralelas del modelo, respecto de la malla cuadriculada de alambre considerada por Rivera (2011).
- 4. Hasta el valor de 30% de sombra, la eficiencia de impactos crece de manera lineal, para luego decrecer su tasa a causa de la baja en la eficiencia aerodinámica, hasta que alcanza un valor óptimo cercano al 60% de sombra, donde tal eficiencia comienza a decrecer.

Impacto de gotas de niebla en una malla de fibras cilíndricas paralelas a distintos ángulos de incidencia respecto al flujo de niebla

- La eficiencia global de impactos aumenta al disminuir el ángulo de incidencia del viento. Para el caso analizado, con 30% de sombra, la eficiencia sube de 26%, para un ángulo de incidencia de 90°, a un 50% para un ángulo de incidencia de 20°.
- 2. Se propone un cambio en la manera de establecer la eficiencia aerodinámica, corrigiendo el porcentaje de sombra de la malla, por el porcentaje de sombra

proyectado de la malla, junto con algún modelo semi-cuantitativo que capture el efecto de este porcentaje de sombra de manera simple.

 Se propone el estudio de mallas con distintos porcentajes de sombra a distintos ángulos, de manera de explorar la eficiencia máxima que se puede lograr, modificando estas ambas variables.

A partir del análisis realizado en esta tesis, que propone recomendaciones simples para el diseño de la malla de los atrapanieblas y sus fibras, se pretende ayudar al mejor diseño de los atrapanieblas. Con un diseño de malla capaz de provocar más impactos de gotas de niebla en sus fibras, se podrá no sólo captar más agua, sino que reducir el costo de adquirirla a partir de la niebla. Las conclusiones que se obtienen en esta tesis, contribuyen al progreso de la tecnología de los atrapanieblas y así ayudará a convertir a la abundante y muy poco utilizada niebla, en una nueva fuente de agua dulce en para las zonas áridas del mundo en un futuro no muy lejano en la que el autor de esta tesis pretende ser parte.

BIBLIOGRAFIA

Abdul-Wahab, S. A., and Lea, V., 2008. Reviewing fog water collection worldwide and in Oman, International Journal of Environmental Studies, Vol. 65, No. 3, 485–498.

Coulson J.M. y Richardson J.F., 1999. Chemical Engineering Vol 2, 154. Elsevier.

Eck, B., 1961.Technische Strömungslehre. Springer Verlag; Berlin; 453 pp.; Sections 54, 78.

- Fox, R. W. and McDonald, A. T. (1985) "Introduction to fluid mechanics," John Wiley and Sons, New York.
- Gischler, C., 1991. The Missing Link in a Production Chain, Vertical obstacles to catch Camanchaca.ROSTLAC-UNESCO, Montevideo – Uruguay ISBN 92-9089-019-7.
- Langmuir I., Blodgett K., 1946. A mathematical investigation of water droplet trajectories. Army Air Forces Headquarters, Air Technical Service Command ; Washington, D.C. : Distributed by Office of the Publication Board, Dept. of Commerce.
- May, K.R., and Clifford, R., 1967. The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs, Annals of Occupational Hygiene, 10, 83-95

Holterman, H. 2003. Kinetics and evaporation of water drops in air. ISBN 90-5406-234-7 NUGI849/NUR 950 Wageningen UR-IMAG.

Israel, R. andRosner, D. E.,1982.'Use of a Generalized Stokes Number to Determine the Aerodynamic Capture Efficiency of Non-Stokesian Particles from a Compressible Gas Flow, Aerosol Science and Technology, 2: 1, 45-51.

Rijsberman, F. R., 2006. Water scarcity: Fact or fiction? Agricultural Water Management, 80, 5–22.

- Rhodes M.J., 1984. Introduction to Particle Technology. Segunda edición. Wiley. Obtenido de: <u>http://books.google.cl/books?id=P9Qgvh7kMP8C&pg=PA29&redir_esc=y#v=onep</u> <u>age&q&f=false</u>
- Schemenauer, R. S., Fuenzalida, H. and Cereceda, P., 1988. A Neglected Water Resource: The Camanchaca of South America. Bulletin American Meteorological Society, 69, 138—147.
- Schemenauer R. S. and Joe, P. I., 1989. The Collection Efficiency of a Massive Fog Collector. Atmos. Res. 24, 53–69.

- Schemenauer, R.S. and Cereceda, P., 1991. Fog-water collection in arid coastal locations. AMBIO, 20,303–308.
- Schemenauer, R.S. and Cereceda, P., 1994. A Proposed Standard Fog Collector for Use in High-Elevation Regions. Journal of Applied Meteorology, 33, 1313—1322.
- Schemenauer, R.S., Cereceda, P., Osses, P., 2005. Fog Water Collection Manual. FogQuest, Ontario, Canada. <u>www.fogquest.org</u> (2005)
- Schlichting, H. (1960). Boundary Layer Theory. New York: McGraw-Hill.
- Smakhtin, V., Revenga, C. and Döll, P., 2004. A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity. Water International, 29, 307–317.
- United Nations, 2008. "The millenium development goals report". Recuperado de: <u>http://www.un.org/millenniumgoals/pdf/The%20Millennium%20Development%2</u> <u>OGoals%20Report%202008.pdf</u>"
- Westbeld, O. Klemm, F. Grießbaum, E. Sträter, H. Larraín, P. Osses, y P. Cereceda3 (2009). "Fog deposition to a Tillandsia carpet in the Atacama Desert", Annales Geophysicae., 27, 3571–3576.
- White, F. M., 1986. Fluid Mechanics, second ed. McGraw-Hill Book Company, New York.

ANEXOS

1. Ecuaciones de Navier Stokes con modelo k-ε de turbulencia

Las ecuaciones de Navier-Stokes que se resuelven en este modelo corresponden a las llamadas en inglés "Reynolds-AveragedNavier-Stokes" abreviadas como RANS. Si bien estas ecuaciones describen el fenómeno básico de transporte de momento y masa, éstas pueden ser usadas en flujos turbulentos, pero requieren de una gran cantidad de elementos para efectivamente capturar la dinámica del flujo, por lo que se calcula el promedio del resultado de las ecuaciones, resultando así una jerarquía de ecuaciones con incógnitas estadísticas de cómo se comporta el flujo en la realidad. Estas incógnitas estadísticas son conocidas como ecuaciones de cierre de turbulencia, que para este modelo se usó el modelo k-ɛ. A continuación se detallan las ecuaciones involucradas en la resolución del modelo.

Ecuaciones de Navier-Stokes y número de Reynolds

Asumiendo flujo incompresible y que el fluido es newtoniano, las ecuaciones de Navier-Stokes, se pueden escribir como se aprecia en las ecuaciones 4.3 y 4.4.

$$\rho_a \frac{du}{dt} + \rho_a (\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\nabla}) \boldsymbol{u} = \boldsymbol{\nabla} \cdot \left[-p\boldsymbol{I} + \boldsymbol{\mu}_a (\boldsymbol{\nabla} \mathbf{u} + (\boldsymbol{\nabla} \mathbf{u})^{\mathsf{T}}) \right] + F$$
(1.1)
$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{u} = \boldsymbol{0}$$
(1.2)

Para determinar si el flujo es turbulento se requiere conocer el número de Reynolds del flujo, que se calcula como:

$$Re = \frac{\rho_a uL}{\mu_a} \tag{1.3}$$

Donde P_a corresponde a la densidad del aire, u a la velocidad del aire en una cierta dirección, *L* corresponde a la longitud característica de la perturbación del flujo y μ_a a la viscosidad dinámica del aire.

Ecuaciones de RANS

En un flujo turbulento todas las cantidades fluctúan en el tiempo y espacio. Puede ser ventajoso conocer sus características cuando se conoce una exacta y detallada "foto" de un cierto momento, pero una representación promedio del flujo provee suficiente información sobre el flujo en un determinado momento.

Las ecuaciones de RANS de un flujo turbulento dividen las cantidades de un flujo (Φ , por ejemplo) en un promedio de la cantidad ($\overline{\Phi}$) más una fluctuación, es decir:

$$\Phi = \overline{\Phi} + \Phi' \tag{1.4}$$

En el caso de las velocidades en cada dirección respectiva, la velocidad se puede dividir en un promedio más sus fluctuaciones, de la siguiente forma.

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{U} + \boldsymbol{u}' \quad (1.5)$$

Donde u es la velocidad en una cierta dirección, U es la velocidad promedio en el tiempo de esa velocidad en esa dirección y u' corresponde a las fluctuaciones de ella. En base a esta división, se calculan las ecuaciones de RANS, que se obtienen al combinar las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones 4.3 y 4.4) con la descomposición del promedio más las fluctuaciones de la velocidad de la ecuación 4.7, obteniendo así las siguientes ecuaciones:

$$\rho \frac{d\boldsymbol{U}}{dt} + \rho \boldsymbol{U} \cdot \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{U} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \overline{(\rho \boldsymbol{u}' \otimes \boldsymbol{u}')} = -\boldsymbol{\nabla} \mathbf{P} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \mu (\boldsymbol{\nabla} \mathbf{U} + (\boldsymbol{\nabla} \mathbf{U})^{\mathsf{T}}) + F$$
(1.6)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = \boldsymbol{0} \tag{1.7}$$

Donde U corresponde a la velocidad del flujo medio, u' a las fluctuaciones de la velocidad y \otimes al producto exterior vectorial. El término $\nabla \cdot \overline{(\rho u' \otimes u')}$ representa la interacción entre las fluctuaciones de las velocidades y es llamado "tensor de stress de Reynolds", que corresponde a la correlación entre las fluctuaciones en las distintas direcciones. En 2D, se introducen cuatro variables más además de las dos variables de la velocidad, por lo que se

requiere de un clausura del sistema de ecuaciones dada por el supuesto de la viscosidad turbulenta y un modelo de turbulencia, que en este caso es el modelo k-epsilon.

Supuesto de la viscosidad turbulenta

La manera más común para modelar la turbulencia es asumiendo que ésta es de naturaleza puramente difusiva, por lo que la producción de las turbulencias es igual a su disipación, que depende de la viscosidad turbulenta.

$$\rho \overline{(\boldsymbol{u}' \otimes \boldsymbol{u}')} - \frac{\rho}{3} traza \overline{(\boldsymbol{u}' \otimes \boldsymbol{u}')} \boldsymbol{I} = -\mu_T (\nabla \boldsymbol{U} + (\nabla \boldsymbol{U})^T)$$
(1.8)

Donde μ_T corresponde a la viscosidad turbulenta y además.

$$\frac{\rho}{3} traza \overline{(u' \otimes u')} \mathbf{I} = \frac{2}{3} \rho \mathbf{k}$$
(1.9)

Donde k corresponde a la energía cinética turbulenta. Para simulaciones de flujos incompresibles, el término de k viene incluido en la presión. A partir de estos supuestos se introducen dos ecuaciones pero dos incógnitas más que serán resueltas a partir de un modelo de turbulencia como el modelo k- ε que se describe a continuación.

Modelo de cierre de turbulencia k-ɛ

El modelo k- ε es el más usado en aplicaciones industriales debido a que es uno de los que requiere de menores recursos computacionales para obtener resultados razonables respecto a los resultados experimentales.

Este modelo introduce dos ecuaciones de transporte adicionales además de dos variables dependientes: La energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación de energía turbulenta (ε). Bajo este modelo, la viscosidad turbulenta se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1.10}$$

La ecuación de transporte para k puede derivarse al tomar la traza de estas ecuaciones para los estrés de Reynolds, como se muestra en la ecuación 4.12 a continuación.

$$\rho \,\partial k/\partial t - \nabla \cdot \left[(\eta + (\eta_{\downarrow}T/\sigma_{\downarrow}k)\nabla k \right] + \rho U \cdot \nabla k = 1/2 \,\eta_{\downarrow}T \, (\nabla U + \, \left[(\nabla U) \right]^{\dagger}T \,)^{\dagger}2 - \rho \varepsilon$$
(1.11)

Para ε se puede deducir una ecuación de transporte de manera muy similar a la anterior, como se puede apreciar en la ecuación 4.13 a continuación.

$$\rho \,\partial\varepsilon/\partial t - \nabla \cdot \left[(\eta + (\eta_1 T/\sigma_1 \varepsilon) \nabla\varepsilon \right] + \rho U \cdot \nabla\varepsilon = 1/2 \ (\varepsilon C_1 \varepsilon 1)/k \eta_1 T \ (\nabla U + \ \left[(\nabla U) \right]^{\dagger} T \)^{\dagger} 2 - \rho C_1 \varepsilon 2$$
(1.12)

Las constantes del modelo anterior se encuentran determinadas a partir de resultados experimentales de Gresho y Sani (2000) y se resumen en la Tabla IV-3 que se presenta a continuación.

Tabla 1-1: Constantes del modelo k- ε de las ecuaciones 1.10, 1.11 y 1.12 (Gresho y Sani 2000).

Constante	Valor
Cμ	0,09
Cs1	1,44
Cs2	1,92
σ_k	1,0
σ_{ε}	1,3

Este modelo de turbulencia hace una serie de supuestos que no necesariamente son correctos, de los cuáles el más importante es que asume que el número de Reynolds es lo suficientemente alto para que la producción y disipación de las turbulencias estén en equilibrio en la capa límite turbulenta, que ha provoca que la extensión espacial de la recirculación sea generalmente subestimada.

Notamos que a pesar que este modelo otorga una aproximación del promedio del flujo, al evaluar posteriormente distintas mallas de atrapanieblas (véase sección 4.2.2) bajo las mismas condiciones, los efectos en el diseño de éstas debiesen afectar al modelo de distinta

manera, por lo que los cambios serán incluidos sólo por diseño dado que el modelo es igual para todas.