



**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

# **ESTUDIOS AERODINÁMICOS DE MALLAS SINTÉTICAS PARA EL DISEÑO DE CAPTADORES DE AGUA DE NIEBLA**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**  
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

AUTOR:

**UNAI GALÁN AGUIRREBEITIA**

TUTORES:

**MARÍA TERESA ARENCIBIA PÉREZ (ULL)**

**CARLOS M. REGALADO REGALADO (ICIA)**

**La Laguna, MAYO DE 2023**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores, María Teresa Arencibia Pérez y Carlos M. Regalado Regalado, por haberme orientado, apoyado y brindado sus conocimientos a lo largo de todo el proceso de este trabajo. Me han sabido guiar en todo momento, resolviendo mis dudas y proporcionándome los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

También quiero expresar mi agradecimiento al personal del ICIA por su amabilidad y apoyo cada vez que surgía alguna dificultad. Aprecio enormemente el acceso que me han brindado a las instalaciones y al laboratorio de hidráulica en todo momento, lo cual ha sido fundamental para llevar a cabo la investigación de este trabajo.

Asimismo, quiero reconocer a la Universidad de La Laguna y a la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología por brindarme la oportunidad de cursar esta maravillosa carrera en la que además de adquirir conocimientos, he experimentado un crecimiento personal significativo.

Deseo expresar mi gratitud hacia mis amigos, quienes han sido una presencia invaluable a lo largo de mi carrera. Su apoyo moral en momentos de estrés ha hecho que el camino sea mucho más llevadero. Además, sus ideas y aportes han enriquecido mis conocimientos y han ampliado mi perspectiva en diversos aspectos. Estoy sinceramente agradecido por tenerlos a mi lado durante este trayecto académico.

Por último, quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, Federico Galán Lorenzo y Arantza Aguirrebeitia Arana, así como a mi hermana, Ane Galán Aguirrebeitia, y a mi pareja, Yoheimi Mencia Mercado. Su apoyo incondicional y comprensión han sido un pilar fundamental para mí, especialmente al enfrentar los obstáculos psicológicos que este proyecto conlleva. Sus palabras de aliento y motivación han sido mi impulso para superar los desafíos y alcanzar mis metas. Estoy enormemente agradecido por tenerlos a mi lado en este camino.

¡Muchas gracias a todos!

Unai Galán Aguirrebeitia.

**ÍNDICE**

<b>1. RESUMEN.....</b>	<b>19</b>
<b>2. ABSTRACT.....</b>	<b>21</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>4. ANTECEDENTES.....</b>	<b>23</b>
<b>5. OBJETIVOS.....</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>27</b>
<b>1. TEORÍAS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS.....</b>	<b>28</b>
1.1. PRINCIPIO DE BERNOULLI.....	28
1.2. PRINCIPIO DE CONTINUIDAD.....	29
1.3. FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO.....	30
1.4. NÚMERO DE MACH.....	31
1.5. NÚMERO DE REYNOLDS.....	32
1.6. CAPA LÍMITE.....	34
1.7. RESISTENCIA TOTAL O FUERZA DE ARRASTRE.....	37
<b>2. CAPTADORES DE AGUA DE NIEBLA.....</b>	<b>38</b>
2.1. CAPTADOR MACRODIAMANTE.....	38
2.2. CAPTADOR CILÍNDRICO.....	39
2.3. CAPTADOR RAA.....	40
2.4. CAPTADOR BIDIMENSIONAL O TIPO CHILENO.....	41
<b>3. MALLAS DE CAPTACIÓN.....</b>	<b>42</b>
3.1. MALLA TIPO ARPA.....	43
3.2. MALLA CUADRICULAR Y MOSQUITERA.....	44
3.3. MALLA RASCHEL.....	46
3.4. MALLA VOLUMÉTRICA.....	47
<b>4. PRINCIPALES PARÁMETROS AERODINÁMICOS EN MALLAS DE CAPTACIÓN.....</b>	<b>48</b>
4.1. COEFICIENTE DE CAÍDA DE PRESIÓN.....	50
4.2. FRACCIÓN FILTRADA.....	52
4.3. COEFICIENTE DE ARRASTRE.....	54
4.4. EFICIENCIA AERODINÁMICA.....	54
<b>5. TUNEL DE VIENTO.....</b>	<b>56</b>
5.1. ASPECTOS GENERALES.....	56
5.2. PARTES DE UN TÚNEL DE VIENTO.....	57
<b>CAPÍTULO 2. ESTUDIOS AERODINÁMICOS DE MALLAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE SIMULACIONES.....</b>	<b>59</b>

<b>1. INTRODUCCIÓN A LOS ESTUDIOS DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>60</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LAS SIMULACIONES.....</b>	<b>61</b>
2.1. SOFTWARE Y HARDWARE .....	61
2.2. PROCEDIMIENTO DE LA DISCRETIZACIÓN DE LAS CELDAS DE MALLA .....	63
2.3. MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DE LA FUERZA DE ARRASTRE .....	66
2.4. MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DEL LADO DEL FLUJO LIBRE .....	67
2.5. MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO QUE ATRAVIESA LA MALLA DE CAPTACIÓN .....	68
<b>3. VERIFICACIÓN DE LAS SIMULACIONES .....</b>	<b>70</b>
3.1. COEFICIENTE DE ARRASTRE DE UNA ESFERA LISA.....	70
<b>4. DISEÑO DEL MARCO DE LA MALLA DE CAPTACIÓN A PARTIR DE ESTUDIOS DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>73</b>
4.1. SECCIÓN EXTERIOR DEL MARCO .....	73
4.2. SECCIÓN INTERIOR Y ESPESOR DEL MARCO.....	76
<b>5. PARÁMETROS AERODINÁMICOS A PARTIR DE ESTUDIOS DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>77</b>
5.1. CASO 1. MALLA TIPO ARPA .....	78
5.1.1. Fuerza de arrastre .....	78
5.1.2. Lado del flujo libre .....	79
5.1.3. Líneas de flujo o de corriente .....	80
5.2. CASO 2. MALLA CUADRICULAR .....	81
5.2.1. Fuerza de arrastre .....	81
5.2.2. Lado del flujo libre .....	82
5.2.3. Líneas de flujo o de corriente .....	82
<b>6. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA AERODINÁMICA .....</b>	<b>84</b>
6.1. FRACCIÓN FILTRADA .....	84
6.1.1. Validación de los resultados de la fracción filtrada .....	85
6.2. COEFICIENTE DE ARRASTRE .....	88
6.2.1. Coeficiente de arrastre ajustado a la ecuación de Steiros .....	93
6.3. COEFICIENTE DE CAÍDA DE PRESIÓN .....	98
6.4. EFICIENCIA AERODINÁMICA.....	99
<b>7. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE EJES DE HILOS EN PARÁMETROS AERODINÁMICOS.....</b>	<b>101</b>
7.1. COEFICIENTE DE ARRASTRE .....	102
7.2. EFICIENCIA AERODINÁMICA.....	103
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>105</b>
<b>CAPÍTULO 3. ESTUDIOS AERODINÁMICOS DE MALLAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE ENSAYOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>108</b>

<b>1. INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>109</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>110</b>
2.1. TÚNEL DE VIENTO .....	110
2.2. MALLAS DE CAPTACIÓN .....	113
2.3. MÉTODO PARA LA MEDICIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN (MANÓMETRO DE PRESIÓN DIFERENCIAL) .....	116
2.4. MÉTODO PARA LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE (ANEMÓMETRO DE HILO CALIENTE).....	118
2.5. MÉTODO PARA LA MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (ESCÁNER DE ÁREA FOLIAR) .....	121
<b>3. ENSAYOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>122</b>
3.1. TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA .....	123
3.2. COEFICIENTE DE SOMBRA .....	124
3.2.1. <i>Mallas impresas en 3D</i> .....	124
3.2.2. <i>Mallas comerciales</i> .....	125
3.3. VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE .....	125
3.4. CAÍDA DE PRESIÓN.....	126
<b>4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE.....</b>	<b>130</b>
4.1. FUERZA DE ARRASTRE DE LA MALLA CON MARCO.....	130
4.2. FUERZA DE ARRASTRE DE LA MALLA SIN MARCO .....	131
4.3. COEFICIENTE DE ARRASTRE DE LA MALLA SIN MARCO .....	134
<b>5. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA AERODINÁMICA .....</b>	<b>137</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO 1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES.....</b>	<b>150</b>
1. TABLAS DE LA FUERZA DE ARRASTRE Y EL COEFICIENTE DE ARRASTRE .....	151
2. TABLAS DEL LADO DEL FLUJO LIBRE Y LA FRACCIÓN FILTRADA .....	153
3. TABLAS DEL COEFICIENTE DE CAÍDA DE PRESIÓN .....	155
4. TABLAS DE LA EFICIENCIA AERODINÁMICA.....	157
<b>ANEXO 2. FICHAS TÉCNICAS DE LOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>159</b>

**ÍNDICE: FIGURAS**

<b>FIGURA 1.</b> NÚMERO DE PUBLICACIONES QUE HABLAN DE CAPTADORES DE AGUA DE NIEBLA DIVIDIDO POR DÉCADAS. FUENTE: QADIR ET AL. (2021).....	23
<b>FIGURA 2.</b> ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PRINCIPIO DE BERNOULLI. EL SUBÍNDICE “1” SE REFIERE A LAS CONDICIONES DE ENTRADA DEL FLUIDO Y EL SUBÍNDICE “2” A LAS CONDICIONES DE SALIDA. FUENTE: INGENIERIAQUIMICAREVIEWS.COM/.....	28
<b>FIGURA 3.</b> (A) FLUJO LAMINAR; (B) FLUJO TURBULENTO. FUENTE: AERODINAMICAF1.COM .....	30
<b>FIGURA 4.</b> (A) DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA UN RÉGIMEN DE FLUJO LAMINAR; (B) DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA UN RÉGIMEN DE FLUJO TURBULENTO. FUENTE: MARTÍN (2014).....	31
<b>FIGURA 5.</b> EN UN PUNTO DETERMINADO A, SE OBSERVA QUE DENTRO DEL ESPESOR DE LA CAPA LÍMITE ( $\Delta$ ) HAY UNA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES (V) QUE AUMENTA DESDE 0 A 0.99Y. ADEMÁS, TAMBIÉN SE PUEDE OBSERVAR UNA DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE QUE DISMINUYE DESDE UN MÁXIMO ( $T_o$ ) HASTA $T=0$ . FUENTE: AGÜERA SORIANO (1996). .....	35
<b>FIGURA 6.</b> DESARROLLO DE LA CAPA LÍMITE SOBRE UNA PLACA LISA CON BORDE AFILADO. FUENTE: AGÜERA SORIANO (1996). .....	36
<b>FIGURA 7.</b> DESPRENDIMIENTO DE LA CAPA LÍMITE PRODUCIDO CUANDO EL FLUIDO SE DESACELERA AL DIVERGIR. SE OBSERVA UN PUNTO DE SEPARACIÓN, PUNTO C, DONDE EL ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO ES $T_o=0$ . FUENTE: AGÜERA SORIANO (1996). .....	36
<b>FIGURA 8.</b> CAPTADOR DE AGUA DE NIEBLA TRIDIMENSIONAL MACRODIAMANTE, DISEÑADO POR CARLOS ESPINOSA EN 1958 (CHILE). FUENTE: LIBRO AGUA DE NIEBLA (2014). .....	39
<b>FIGURA 9.</b> (A) FOTOGRAFÍA COMPLETA DEL CAPTADOR CILÍNDRICO; (B) HILOS VERTICALES DE UN CAPTADOR CILÍNDRICO TENSADOS POR DOS SUPERFICIES Y UNIDOS A UN EMBUDO. FUENTE: PORTALFRUTICOLA.COM .....	40
<b>FIGURA 10.</b> CAPTADOR DE AGUA DE NIEBLA TRIDIMENSIONAL RAA. FUENTE: NIEBLAGUA.COM .....	41

<b>FIGURA 11.</b> CAPTADOR DE AGUA DE NIEBLA BIDIMENSIONAL O TIPO CHILENO. FUENTE: PORTALFRUTICOLA.COM.....	42
<b>FIGURA 12.</b> FOTOGRAFÍA DE UNA MALLA TIPO ARPA DISPUESTA EN CAMPO. FUENTE: REGALADO Y RITTER (2016). .....	44
<b>FIGURA 13.</b> FOTOGRAFÍA DE UNA MALLA CUADRICULAR (MOSQUITERA). FUENTE: MOSQUITERAS24H.COM .....	45
<b>FIGURA 14.</b> FOTOGRAFÍA DE UNA MALLA RASCHEL SIMPLE (A) Y DOBLE (B). FUENTE PROPIA.....	47
<b>FIGURA 15.</b> FOTOGRAFÍA DE UNA MALLA VOLUMÉTRICA BONTMAT. FUENTE: CONTROLEROSION.ES .....	47
<b>FIGURA 16.</b> (A) CAPTURA POR INTERCEPCIÓN; (B) CAPTURA POR INERCIA. FUENTE: LIBRO AGUA DE NIEBLA (2014). .....	49
<b>FIGURA 17.</b> VISTA EN PLANTA DEL AIRE RODEANDO EL COLECTOR DE AGUA DE NIEBLA. FUENTE: AZEEM ET AL. (2020). .....	52
<b>FIGURA 18.</b> EFECTOS AERODINÁMICOS DE UNA MALLA DE CAPTACIÓN (CUADRADOS NEGROS) VISTOS EN PLANTA. SE DISTINGUEN DOS TIPOS DE LÍNEAS DE FLUJO: EL FLUJO DE AIRE DESVIÁNDOSE ALREDEDOR DE LA MALLA (LÍNEA DISCONTINUA GRIS) Y EL FLUJO QUE ATRAVIESA LA MALLA (LÍNEA CONTINUA GRIS). FUENTE: MONCUQUET ET AL. (2022). .....	55
<b>FIGURA 19.</b> TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DEL ICIA MODELADO EN SOLIDWORKS. (1) CONO DE CONTRACCIÓN; (2) CÁMARA DE ENSAYOS; (3) DIFUSOR; (4) VENTILADOR AXIAL.....	57
<b>FIGURA 20.</b> DISCRETIZACIÓN DEL ESPACIO QUE ENVUELVE AL SÓLIDO. LEJOS DEL LÍMITE DE GEOMETRÍA (CELDAS DE FLUIDO) LAS CELDAS SON PARALELEPÍPEDOS. CERCA DEL LÍMITE DE GEOMETRÍA (CELDAS DE FLUIDO EN CONTACTO CON EL SÓLIDO) SON POLIEDROS. FUENTE: SOLIDWORKS FLOW SIMULATION (2020).....	62
<b>FIGURA 21.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DOS TIPOS DE ANÁLISIS DEL FLUJO QUE NOS DA A ELEGIR SOLIDWORKS (A) ANÁLISIS DE TIPO INTERNO. (B) ANÁLISIS DE TIPO EXTERNO. FUENTE: SOLIDWORKS FLOW SIMULATION (2020).....	63



**FIGURA 22.** (A) CONFIGURACIÓN DE LA OPCIÓN PREDETERMINADA “GLOBAL MESH SETTINGS” ;(B) CONFIGURACIÓN DE LA OPCIÓN ESPECIFICA “LOCAL MESH”. FUENTE: SOLIDWORKS FLOW SIMULATION (2020). ..... 65

**FIGURA 23.** REFINAMIENTO DE LAS CELDAS DE UNA MALLA TIPO ARPA DE SC=55%. RANGO DE DISCRETIZACIÓN DE 0 HASTA 5 DEFINIDO POR LA OPCIÓN DE LOCAL MESH. FUENTE PROPIA..... 65

**FIGURA 24.** TIEMPO DE SIMULACIÓN. (A) SC=5%; (B) SC=95%. FUENTE PROPIA..... 66

**FIGURA 25.** PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA FUERZA DE ARRASTRE. (A) ELECCIÓN DE “INSERT GLOBAL GOALS”; (B) ELECCIÓN DE “FORCE (X)”. FUENTE PROPIA..... 67

**FIGURA 26.** VISTA EN PLANTA DE LAS LÍNEAS DEL FLUJO DEL AIRE ALREDEDOR DE UNA MALLA DE CAPTACIÓN CUADRICULAR DE SC=55% Y DE SECCIÓN 80 X 80 MM<sup>2</sup>. LADO DEL FLUJO LIBRE (L<sub>∞</sub>) Y LADO DEL FLUJO CERCANO A LA MALLA (L). FUENTE PROPIA. .... 68

**FIGURA 27.** TRAYECTORIAS DEL FLUJO CUANDO SE APROXIMA A UN CILINDRO. FUENTE: BRUN ET AL. (1955)..... 68

**FIGURA 28.** DOS CILINDROS VISTOS DESDE PLANTA CON DIFERENTES SEPARACIONES ENTRE EJES DE HILO. FUENTE: SUMNER (2010). ..... 69

**FIGURA 29.** DISTANCIAS DESDE LA CARA DEL CILINDRO DE LOS CUATRO PUNTOS A MEDIR PARA OBTENER Y. NÓTESE QUE LAS MEDICIONES DE Y ESTÁN JUSTO DELANTE DE LOS CILINDROS QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO DE LA MALLA DE CAPTACIÓN. FUENTE PROPIA..... 70

**FIGURA 30.** VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE (C<sub>D</sub>) DE UNA ESFERA LISA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS (Re). LA LÍNEA DE TRAZO CONTINUO CORRESPONDE A LAS ECUACIONES DE CLIFT ET AL. (2005) Y LA LÍNEA DE TRAZO DISCONTINUO A LA LEY DE STOKES. FUENTE: CLIFT ET AL. (2005). ..... 71

**FIGURA 31.** LÍNEAS DE FLUJO Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA UNA MALLA DE CAPTACIÓN DE DIFERENTE SECCIÓN Y CON UN COEFICIENTE DE SOMBRA SC=75%. SE MUESTRAN MALLAS DE CAPTACIÓN DESDE UNA PERSPECTIVA DE PLANTA DENTRO DE UN DOMINIO ACOTADO (CÁMARA DE ENSAYOS COMO LA DEL TÚNEL). LA DISTRIBUCIÓN ESTÁ COLOREADA SEGÚN UN RANGO DE PRESIÓN COMPRENDIDO

ENTRE 101325 Y 101270 PA. (A) 12.5 x 12.5 cm<sup>2</sup>; (B) 15 x 15 cm<sup>2</sup>; (C) 17.5 x 17.5 cm<sup>2</sup>; (D) 20 x 20 cm<sup>2</sup>. FUENTE PROPIA..... 75

**FIGURA 32.** MARCO DE UNA MALLA DE CAPTACIÓN DE SECCIÓN EXTERIOR 15 x 15 cm<sup>2</sup> CON ORIFICIOS EN LOS EXTREMOS DE DIÁMETRO  $\varnothing=3$  MM. (A) ALZADO DEL MARCO DONDE SE PUEDE OBSERVAR ACOTADO EL ANCHO ENTRE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EXTERIOR E INTERIOR; (B) VISTA LATERAL DEL MARCO DONDE SE PUEDE OBSERVAR ACOTADO EL ESPESOR DEL MARCO. FUENTE PROPIA. .... 76

**FIGURA 33.** (A) MALLA TIPO ARPA SIN MARCO DE SC=55 %. (B) MALLA CUADRICULAR SIN MARCO DE SC=55%. FUENTE PROPIA. .... 77

**FIGURA 34.** VARIACIÓN DE LA FUERZA DE ARRASTRE ( $F_D$ ) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (SC) OBTENIDA MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA UNA MALLA TIPO ARPA. PUNTOS EN NARANJA OSCURO ( $Y_\infty=8$  M S<sup>-1</sup>) Y PUNTOS EN NARANJA CLARO ( $Y_\infty=4$  M S<sup>-1</sup>). SE AÑADE UN PUNTO ADICIONAL PARA CADA FUNCIÓN, SC=100% (PLACA OPACA PLANA). FUENTE PROPIA. .... 78

**FIGURA 35.** VARIACIÓN DEL LADO DEL FLUJO LIBRE ( $L_\infty$ ) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (SC) OBTENIDO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA UNA MALLA TIPO ARPA. PUNTOS EN NARANJA OSCURO ( $Y_\infty=8$  M S<sup>-1</sup>) Y PUNTOS EN NARANJA CLARO ( $Y_\infty=4$  M S<sup>-1</sup>). FUENTE PROPIA..... 79

**FIGURA 36.** LÍNEAS DE FLUJO PARA MALLAS TIPO ARPA DE SECCIÓN A=80 x 80 mm<sup>2</sup> CON DIFERENTES COEFICIENTES DE SOMBRA Y CON UNA VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE  $Y_\infty=8$  M S<sup>-1</sup> (PERSPECTIVA DE PLANTA). EN LA COLUMNA DE LA IZQUIERDA SE ILUSTRAN LA DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD Y EN LA DERECHA LA DE LA PRESIÓN. (A)-(B) SC=15%; (C)-(D) SC=45%; (E)-(F) SC=75%. FUENTE PROPIA..... 80

**FIGURA 37.** VARIACIÓN DE LA FUERZA DE ARRASTRE ( $F_D$ ) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (SC) OBTENIDA MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA UNA MALLA CUADRICULAR. PUNTOS EN AZUL OSCURO ( $Y_\infty=8$  M S<sup>-1</sup>) Y PUNTOS EN AZUL CLARO ( $Y_\infty=4$  M S<sup>-1</sup>). SE AÑADE UN PUNTO ADICIONAL PARA CADA FUNCIÓN, SC=100% (PLACA OPACA PLANA). FUENTE PROPIA..... 82

**FIGURA 38.** VARIACIÓN DEL LADO DEL FLUJO LIBRE ( $L_\infty$ ) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (SC) OBTENIDO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA UNA MALLA

CUADRICULAR. PUNTOS EN AZUL OSCURO ( $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$ ) Y PUNTOS EN AZUL CLARO ( $Y_{\infty}=4 \text{ M S}^{-1}$ ). FUENTE PROPIA..... 82

**FIGURA 39.** LÍNEAS DE FLUJO PARA MALLAS CUADRICULARES DE SECCIÓN  $A=80 \times 80 \text{ MM}^2$  CON DIFERENTES COEFICIENTES DE SOMBRA Y CON UNA VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE  $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$  (PERSPECTIVA DE PLANTA). EN LA COLUMNA DE LA IZQUIERDA SE ILUSTRAN LA DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD Y EN LA DERECHA LA DE LA PRESIÓN. (A)-(B)  $SC=15\%$ ; (C)-(D)  $SC=45\%$ ; (E)-(F)  $SC=75\%$ . FUENTE PROPIA..... 83

**FIGURA 40.** VARIACIÓN DE LA FRACCIÓN FILTRADA CALCULADA CON LOS LADOS DEL FLUJO [ $\Phi=(L_{\infty}/L)^2$ ] EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (SC) OBTENIDA MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS. PUNTOS DE COLOR NARANJA (MALLA TIPO ARPA): OSCURO ( $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$ ) Y CLARO ( $Y_{\infty}=4 \text{ M S}^{-1}$ ). PUNTOS DE COLOR AZUL (MALLA CUADRICULAR): OSCURO ( $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$ ) Y CLARO ( $Y_{\infty}=4 \text{ M S}^{-1}$ ). FUENTE PROPIA. .... 85

**FIGURA 41.** VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO QUE ATRAVIESA LA MALLA (Y) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (SC) OBTENIDO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA UNA MALLA TIPO ARPA FORMADA POR FILAMENTOS DE DIÁMETRO D. DISTANCIAS RESPECTO A LA CARA DEL FILAMENTO: ROMBO (0.5D), TRIÁNGULO (D), CUADRADO (1.5D) Y CÍRCULO (2D). FUENTE PROPIA ..... 86

**FIGURA 42.** VARIACIÓN DE  $\Phi(Y/Y_{\infty})$  EN FUNCIÓN DE  $\Phi=(L_{\infty}/L)^2$  SIENDO EL CASO IDEAL LA LÍNEA CONTINUA DE COLOR NEGRO. ZONA SUPERIOR COEFICIENTES DE SOMBRA BAJOS Y ZONA INFERIOR COEFICIENTES DE SOMBRA ALTOS. DISTANCIAS RESPECTO A LA CARA DEL FILAMENTO: ROMBO (0.5D), TRIÁNGULO (D), CUADRADO (1.5D) Y CÍRCULO (2D). FUENTE PROPIA. .... 88

**FIGURA 43.** VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_D$ ) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (SC) OBTENIDO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS. PUNTOS NARANJA (MALLA TIPO ARPA): OSCURO ( $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$ ) Y CLARO ( $Y_{\infty}=4 \text{ M S}^{-1}$ ). PUNTOS AZULES (MALLA CUADRICULAR): OSCURO ( $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$ ) Y CLARO ( $Y_{\infty}=4 \text{ M S}^{-1}$ ). (A) MALLA TIPO ARPA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE; (B) MALLA CUADRICULAR PARA DIFERENTES VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE; (C) VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE  $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$  PARA DIFERENTES DISPOSICIONES DE FILAMENTOS; (D) VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE  $Y_{\infty}=4 \text{ M S}^{-1}$  PARA DIFERENTES DISPOSICIONES DE FILAMENTOS. FUENTE PROPIA. .... 90

- FIGURA 44.** INTERSECCIÓN PERPENDICULAR ENTRE DOS CILINDROS (A LA IZQUIERDA) Y SÓLIDO DE STEINMETZ, BICILINDRO (A LA DERECHA). FUENTE: MATHWORLD.WOLFRAM.COM/STEINMETZSOLID..... 91
- FIGURA 45.** LÍNEAS DE FLUJO PARA  $Y_{\infty}=4\text{ m s}^{-1}$  Y  $A=1\times 1\text{ mm}^2$ , QUE CORTAN POR EL MEDIO AL SÓLIDO (PROYECCIÓN ISOMÉTRICA). (A) CILINDRO, (B) BICILINDRO. FUENTE PROPIA..... 92
- FIGURA 46.** VARIACIÓN DE  $C_{D,STEIROS}$  EN FUNCIÓN DE  $C_{D,GENERAL}$  SIENDO EL CASO IDEAL LA LÍNEA CONTINUA DE COLOR NEGRO. ZONA INFERIOR COEFICIENTES DE SOMBRA BAJOS Y ZONA SUPERIOR COEFICIENTES DE SOMBRA ALTOS. FUENTE PROPIA..... 94
- FIGURA 47.** GRÁFICA DONDE SE EXPONEN LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LA ECUACIÓN GENERAL (PUNTOS EN AZUL) Y LA ECUACIÓN DE STEIROS AJUSTADA (CURVA AZUL) PARA UNA MALLA TIPO ARPA CON UNA  $Y_{\infty}=4\text{ m s}^{-1}$ . FUENTE PROPIA... 96
- FIGURA 48.** VARIACIÓN DE  $C_{D,STEIROS}$  EN FUNCIÓN DE  $C_{D,GENERAL}$  SIENDO EL CASO IDEAL ( $C_{D,STEIROS}/C_{D,GENERAL}=1$ ) LA LÍNEA CONTINUA DE COLOR NEGRO. FUENTE PROPIA. ... 97
- FIGURA 49.** VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE CAÍDA DE PRESIÓN ( $C_o$ ) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA ( $SC$ ) OBTENIDO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS (NÓTESE QUE EL EJE OY SE REPRESENTA EN ESCALA LOGARÍTMICA). PUNTOS NARANJA (MALLA TIPO ARPA): OSCURO ( $Y_{\infty}=8\text{ m s}^{-1}$ ) Y CLARO ( $Y_{\infty}=4\text{ m s}^{-1}$ ). PUNTOS AZULES (MALLA CUADRICULAR): OSCURO ( $Y_{\infty}=8\text{ m s}^{-1}$ ) Y CLARO ( $Y_{\infty}=4\text{ m s}^{-1}$ ). (A) MALLA TIPO ARPA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE; (B) MALLA CUADRICULAR PARA DIFERENTES VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE; (C) VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE  $Y_{\infty}=8\text{ m s}^{-1}$  PARA DIFERENTES DISPOSICIONES DE FILAMENTOS; (D) VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE  $Y_{\infty}=4\text{ m s}^{-1}$  PARA DIFERENTES DISPOSICIONES DE FILAMENTOS. FUENTE PROPIA. .... 99
- FIGURA 50.** VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA AERODINÁMICA ( $\eta_A$ ) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA. PUNTOS NARANJA (MALLA TIPO ARPA): OSCURO ( $Y_{\infty}=8\text{ m s}^{-1}$ ) Y CLARO ( $Y_{\infty}=4\text{ m s}^{-1}$ ). PUNTOS AZUL (MALLA CUADRICULAR): OSCURO ( $Y_{\infty}=8\text{ m s}^{-1}$ ) Y CLARO ( $Y_{\infty}=4\text{ m s}^{-1}$ ). FUENTE PROPIA. .... 100
- FIGURA 51.** VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_D$ ) EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE EJES DE HILOS ( $D'$ ) OBTENIDO MEDIANTE SIMULACIONES

NUMÉRICAS DE UN MALLA TIPO ARPA. PUNTOS EN NARANJA OSCURO ( $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$ ) Y PUNTOS EN NARANJA CLARO ( $Y_{\infty}=4 \text{ M S}^{-1}$ ). FUENTE PROPIA..... 102

**FIGURA 52.** VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA AERODINÁMICA ( $\eta_A$ ) Y DE LA FRACCIÓN FILTRADA ( $\phi$ ) EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE EJES DE HILOS ( $D'$ ) PARA MALLAS TIPO ARPA. PUNTOS EN NARANJA OSCURO ( $Y_{\infty}=8 \text{ M S}^{-1}$ ) Y PUNTOS EN NARANJA CLARO ( $Y_{\infty}=4 \text{ M S}^{-1}$ ). FUENTE PROPIA..... 104

**FIGURA 53.** (A) DESPRENDIMIENTO DE LA CAPA LÍMITE DE UN CILINDRO PARA UN NÚMERO DE REYNOLDS COMPRENDIDO ENTRE  $1 < Re < 1000$ ; (B) DESPRENDIMIENTO DE LA CAPA LÍMITE DE UN CILINDRO PARA UN NÚMERO DE REYNOLDS COMPRENDIDO ENTRE  $1000 < Re < 500000$ . FUENTE: AGÜERA SORIANO (1996). FUENTE PROPIA..... 105

**FIGURA 54.** COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_D$ ) EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS ( $Re$ ) PARA UN CILINDRO. FUENTE: AGÜERA SORIANO (1996). FUENTE PROPIA. .... 105

**FIGURA 55.** FOTOGRAFÍA DEL TÚNEL DE VIENTO SITUADO EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DEL ICIA. (1) CONO DE CONTRACCIÓN; (2) CÁMARA DE ENSAYOS; (3) DIFUSOR; (4) VENTILADOR. FUENTE PROPIA. .... 110

**FIGURA 56.** VENTILADOR AXIAL SODECA HBA-31-2T. FUETE PROPIA..... 111

**FIGURA 57.** CÁMARA DE ENSAYOS, DONDE SE PUEDE APRECIAR QUE LA CARA SUPERIOR ESTÁ ABIERTA (40 CM X 20 CM X 20 CM). FUENTE PROPIA..... 111

**FIGURA 58.** (A) FOTO DE LA TAPA, DONDE SE OBSERVAN LOS ORIFICIOS TALADRADOS; (B) ESQUEMA DE LA TAPA, DONDE SE REPRESENTAN LOS ORIFICIOS TALADRADOS (MEDIDAS EN CM) Y LA MALLA EN LA ZONA CENTRAL (VISTA EN PLANTA). LAS FLECHAS (COLOR AZUL) INDICAN LA DIRECCIÓN DEL FLUIDO (DE IZQUIERDA A DERECHA). FUENTE PROPIA..... 112

**FIGURA 59.** DIMENSIONES DEL MARCO (CUADRADO,  $B=H$ ) UTILIZADO EN LAS MALLAS DE CAPTACIÓN. FUENTE PROPIA. .... 113

**FIGURA 60.** MALLAS DE CAPTACIÓN TIPO ARPA ( $A=15 \times 15 \text{ CM}^2$ ) DE DIFERENTES COEFICIENTES DE SOMBRA, FABRICADAS CON UNA IMPRESORA 3D. (A)  $SC=25\%$ ; (B)  $SC=45\%$ ; (C)  $SC=65\%$ . ESCALA 1:3. FUENTE PROPIA. .... 114

**FIGURA 61.** MALLAS DE CAPTACIÓN CUADRICULAR ( $A=15 \times 15 \text{ CM}^2$ ) DE DIFERENTES COEFICIENTES DE SOMBRA UTILIZANDO DOS MALLAS TIPO ARPA IMPRESAS EN 3D. (A)  $65\%+25\%$ ; (B)  $65\%+45\%$ . ESCALA 1:3. FUENTE PROPIA. .... 114

<b>FIGURA 62.</b> MALLAS DE CAPTACIÓN COMERCIALES MONTADAS SOBRE EL MARCO FABRICADO MEDIANTE IMPRESIÓN 3D ( $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$ ) Y SUJETAS CON BRIDAS. (A) MOSQUITERA TRIPLE; (B) VOLUMÉTRICA DOBLE; (C) RASCHEL DOBLE; (D) RASCHEL TRIPLE. ESCALA 1:3. FUENTE PROPIA. ....	115
<b>FIGURA 63.</b> MALLA DE CAPTACIÓN FIJADA EN EL CENTRO DE LA CÁMARA DE ENSAYOS UTILIZANDO BRIDAS EN LA PARTE SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE PROPIA.....	116
<b>FIGURA 64.</b> MANÓMETRO DE PRESIÓN DIFERENCIAL (PCE-PDA 1L). EL BORNE DE LA DERECHA ES LA TOMA POSITIVA (MANGUERA ROJA) Y EL DE LA IZQUIERDA ES LA TOMA NEGATIVA (MANGUERA BLANCA). FUENTE PROPIA.....	117
<b>FIGURA 65.</b> MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN, DONDE SE INSERTAN LOS TUBOS DE SILICONA. EL TUBO ROJO (TOMA POSITIVA) SE INTRODUCE EN LA PARTE ANTERIOR DE LA MALLA Y EL TUBO BLANCO (TOMA NEGATIVA) SE INTRODUCE EN LA PARTE POSTERIOR. FUENTE PROPIA. ....	118
<b>FIGURA 66.</b> TUBOS DEL MANÓMETRO DIFERENCIAL RIGIDIZADOS CON UNA VARILLA DE METAL UNIDA CON CINTA AISLANTE. EL TUBO ROJO CORRESPONDE A LA TOMA POSITIVA COLOCADA A LA ENTRADA DE LA MALLA Y EL TUBO BLANCO A LA TOMA NEGATIVA COLOCADA EN LA SALIDA DE LA MALLA. FUENTE PROPIA .....	118
<b>FIGURA 67.</b> ANEMÓMETRO DE HILO CALIENTE (TMA-21 HW). FUENTE PROPIA.....	119
<b>FIGURA 68.</b> MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE, DONDE SE INSERTA EL ANEMÓMETRO DE HILO CALIENTE AL PRINCIPIO DE LA CÁMARA DE ENSAYOS Y SUFICIENTEMENTE ALEJADO DE LA MALLA DE CAPTACIÓN. FUENTE PROPIA.....	120
<b>FIGURA 69.</b> TUBO DE PITOT QUE VA CONECTADO EN EL MANOMETRO DIFERENCIAL PARA LA TOMA DE VELOCIDADES Y CAUDALES. FUENTE PROPIA. ....	121
<b>FIGURA 70.</b> ESCÁNER DE ÁREA FOLIAR (WD-E3 WINDIAS). FUENTE PROPIA.....	121
<b>FIGURA 71.</b> MALLA DE CAPTACIÓN RASCHEL DOBLE CENTRADA EN LA PLATAFORMA DE CRISTAL Y ALUMBRADA POR EL FOCO INFERIOR A UNA CIERTA INTENSIDAD. FUENTE PROPIA.....	122
<b>FIGURA 72.</b> DIAGRAMA PSICROMÉTRICO, DONDE SE OBSERVA EL PROCEDIMIENTO GRÁFICO QUE SE LLEVA A CABO PARA OBTENER EL VOLUMEN ESPECÍFICO ( $T_{AMB}=18 \text{ }^\circ\text{C}$ Y $HR=59\%$ ). FUENTE PROPIA. ....	124

**FIGURA 73.** COEFICIENTE DE SOMBRA DE MALLAS COMERCIALES OBTENIDO MEDIANTE EL ESCÁNER. ÁREA OCUPADA POR LOS HILOS (AZUL) Y ÁREA DE LOS HUECOS (ROJO). FUENTE PROPIA..... 125

**FIGURA 74.** CAÍDA DE PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA DE MALLAS CON DIFERENTES DISEÑOS, VELOCIDADES:  $Y_{\infty}=6.19 \text{ M S}^{-1}$  (AZUL CLARO);  $Y_{\infty}=8.79 \text{ M S}^{-1}$  (AZUL OSCURO). SE REPRESENTA EL ERROR EN LA MEDICIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES ( $E=\pm 5 \text{ PA}$ ) MEDIANTE BARRAS. FUENTE PROPIA. .... 130

**FIGURA 75.** (A) MARCO UTILIZADO EN EL ARTÍCULO MARCHAND ET AL. (2023); (B) MARCO CUADRADO UTILIZADO EN EL PRESENTE TRABAJO. FUENTE PROPIA. .... 132

**FIGURA 76.** (A) COEFICIENTE DE ARRASTRE EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA PARA DIFERENTES MALLAS DE CAPTACIÓN A UNA VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE DE  $Y_{\infty}=8.79 \text{ M S}^{-1}$ . (B) COEFICIENTE DE ARRASTRE EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA PARA DIFERENTES MALLAS DE CAPTACIÓN A UNA VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE DE  $Y_{\infty}=6.19 \text{ M S}^{-1}$  ..... 137

**FIGURA 77.** EFICIENCIA AERODINÁMICA ( $\eta_A$ ) EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE SOMBRA (SC) PARA DIFERENTES MALLAS DE CAPTACIÓN. PUNTOS EN AZUL CLARO ( $Y_{\infty}=6.19 \text{ M S}^{-1}$ ) Y PUNTOS EN AZUL OSCURO ( $Y_{\infty}=8.79 \text{ M S}^{-1}$ ). ..... 140

**ÍNDICE: TABLAS**

<b>TABLA 1.</b> FACTOR DE CORRECCIÓN ( $K_{RE}$ ) EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS ( $Re_D$ ). FUENTE: IDEL'CIK (1960). .....	51
<b>TABLA 2.</b> PROPIEDADES DEL AIRE A 1 ATM DE PRESIÓN. FUENTE: ÇENGEL ET AL. (2006). .....	72
<b>TABLA 3.</b> ERROR CUADRÁTICO MEDIO (ECM) DE LA RELACIÓN ENTRE $\Phi=(L_\infty/L)^2$ Y $\Phi=Y/Y_\infty$ PARA DIFERENTES DISTANCIAS RESPECTO A LA CARA DEL FILAMENTO (HILO) EN UN RANGO DE SC=5-95%. FUENTE PROPIA. ....	87
<b>TABLA 4.</b> ERROR CUADRÁTICO MEDIO (ECM) DE LA RELACIÓN ENTRE $\Phi=(L_\infty/L)^2$ Y $\Phi=Y/Y_\infty$ PARA DIFERENTES DISTANCIAS RESPECTO A LA CARA DEL FILAMENTO (HILO) EN UN RANGO DE SC=45-95%. FUENTE PROPIA .....	88
<b>TABLA 5.</b> RESULTADOS DE LA TEMPERATURA AMBIENTE Y LA HUMEDAD RELATIVA DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA. FUENTE PROPIA.....	123
<b>TABLA 6.</b> RESULTADOS DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO LIBRE A DIFERENTES ALTURAS Y FRECUENCIAS. FUENTE PROPIA. ....	126
<b>TABLA 7.</b> RESULTADOS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA MALLA CUADRICULAR DE SC=73.75% MEDIDOS EN TRES PUNTOS DE LA VERTICAL (SUPERIOR, CENTRO E INFERIOR) SITUADOS EN LA PARTE POSTERIOR Y ANTERIOR DE LA MALLA, Y SU CORRESPONDIENTE PROMEDIO. FUENTE PROPIA.....	127
<b>TABLA 8.</b> RESULTADOS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA MALLA CUADRICULAR DE SC=80.75% MEDIDOS EN TRES PUNTOS DE LA VERTICAL (SUPERIOR, CENTRO E INFERIOR) SITUADOS EN LA PARTE POSTERIOR Y ANTERIOR DE LA MALLA, Y SU CORRESPONDIENTE PROMEDIO. FUENTE PROPIA.....	127
<b>TABLA 9.</b> RESULTADOS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA MALLA MOSQUITERA TRIPLE DE SC=70.46% MEDIDOS EN TRES PUNTOS DE LA VERTICAL (SUPERIOR, CENTRO E INFERIOR) SITUADOS EN LA PARTE POSTERIOR Y ANTERIOR DE LA MALLA, Y SU CORRESPONDIENTE PROMEDIO. FUENTE PROPIA.....	128
<b>TABLA 10.</b> RESULTADOS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA MALLA VOLUMÉTRICA DOBLE DE SC=75.52% MEDIDOS EN TRES PUNTOS DE LA VERTICAL (SUPERIOR, CENTRO E INFERIOR) SITUADOS EN LA PARTE POSTERIOR Y ANTERIOR DE LA MALLA, Y SU CORRESPONDIENTE PROMEDIO. FUENTE PROPIA.....	128



**TABLA 11.** RESULTADOS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA MALLA RASCHEL DOBLE DE SC=80.11% MEDIDOS EN TRES PUNTOS DE LA VERTICAL (SUPERIOR, CENTRO E INFERIOR) SITUADOS EN LA PARTE POSTERIOR Y ANTERIOR DE LA MALLA, Y SU CORRESPONDIENTE PROMEDIO. FUENTE PROPIA..... 128

**TABLA 12.** RESULTADOS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA MALLA RASCHEL TRIPLE DE SC=89.54% MEDIDOS EN TRES PUNTOS DE LA VERTICAL (SUPERIOR, CENTRO E INFERIOR) SITUADOS EN LA PARTE POSTERIOR Y ANTERIOR DE LA MALLA, Y SU CORRESPONDIENTE PROMEDIO. FUENTE PROPIA..... 129

**TABLA 13.** RESULTADOS DE LA FUERZA DE ARRASTRE OBTENIDAS A PARTIR DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES DE LA CAÍDA DE PRESIÓN PARA DIFERENTES MALLAS DE CAPTACIÓN Y VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE. FUENTE PROPIA..... 131

**TABLA 14.** INTERPOLACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA FUERZA DE ARRASTRE CORRESPONDIENTE AL MARCO DE MARCHAND ET AL. (2023) DE SECCIÓN FRONTAL A=11x11 cm<sup>2</sup>. EN NEGRITA SE MARCAN LAS VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE Y LA FUERZA DE ARRASTRE OBTENIDAS MEDIANTE LA INTERPOLACIÓN DE LOS RESULTADOS DE MARCHAND ET AL. (2023). FUENTE PROPIA CON BASE EN MARCHAND ET AL. (2023). ..... 133

**TABLA 15.** RESULTADOS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN CORRESPONDIENTES AL MARCO DE MARCHAND ET AL. (2023) PARA LAS VELOCIDADES DE TRABAJO UTILIZADAS EN ESTE CAPÍTULO. FUENTE PROPIA. .... 133

**TABLA 16.** RESULTADOS DE LA FUERZA DE ARRASTRE CORRESPONDIENTES AL MARCO DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES PARA LAS VELOCIDADES DE TRABAJO UTILIZADAS EN ESTE CAPÍTULO. FUENTE PROPIA..... 133

**TABLA 17.** FUERZA DE ARRASTRE Y CAÍDA DE PRESIÓN DE LA MALLA SIN MARCO PARA DIFERENTES MALLAS DE CAPTACIÓN Y VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE. FUENTE PROPIA..... 134

**TABLA 18.** LÍMITES DE ERROR ABSOLUTO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN PARA LA MALLA CUADRICULAR DE SC=80.75% A DIFERENTES VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE ( $Y_{\infty}$ ). FUENTE PROPIA..... 135

<b>TABLA 19.</b> ERROR ABSOLUTO EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE ARRASTRE OBTENIDOS PARA LA MALLA CUADRICULAR DE $SC=80.75\%$ A DIFERENTES VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE ( $Y_\infty$ ). FUENTE PROPIA.....	135
<b>TABLA 20.</b> COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_D$ ) OBTENIDO PARA DIFERENTES MALLAS DE CAPTACIÓN CON DIFERENTES $SC$ Y VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE ( $Y_\infty$ ). .....	137
<b>TABLA 21.</b> COEFICIENTES DE CAÍDA DE PRESIÓN ( $C_o$ ) OBTENIDO PARA DIFERENTES MALLAS DE CAPTACIÓN CON DIFERENTES $SC$ . .....	138
<b>TABLA 22.</b> EFICIENCIA AERODINÁMICA ( $\eta_A$ ) OBTENIDA PARA DIFERENTES MALLAS DE CAPTACIÓN CON DIFERENTES $SC$ Y VELOCIDADES DEL FLUJO LIBRE ( $Y_\infty$ ). .....	140

## 1. RESUMEN

Los captadores de agua de niebla son dispositivos que tienen la capacidad de recolectar el agua presente en la niebla. Básicamente consisten en una malla sostenida por un marco que se sitúa perpendicularmente a la dirección del viento que transporta la niebla. El estudio de estos captadores es de suma importancia, ya que son dispositivos de gran utilidad en zonas áridas o semiáridas. En este trabajo se llevan a cabo estudios aerodinámicos mediante simulaciones numéricas y ensayos experimentales, en los que se analizan mallas de captación de agua de niebla y su relación con algunos parámetros de relevancia.

Las simulaciones numéricas se llevaron a cabo utilizando el SolidWorks, un software de diseño asistido por ordenador (CAD) que incluye un módulo de mecánica de fluidos computacional (CFD), el cual concede una alta libertad de diseño y estudio. Estas simulaciones están comprendidas en un capítulo propio, en donde se obtienen parámetros como la fuerza de arrastre ( $F_D$ ), el lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) o incluso ilustraciones de las líneas de flujo, que nos permiten entender cómo se comporta el flujo a medida que atraviesan la malla de captación. Estos resultados se obtienen en base a un rango de coeficientes de sombra ( $SC=5-95\%$ ) y para dos mallas de captación distintas con una determinada sección frontal. Gracias a este método de estudio es posible realizar un análisis detallado y proporcionar información relevante acerca de la aerodinámica de las mallas de captación de agua de niebla, dando así una aproximación de su comportamiento real.

Por otro lado, los ensayos experimentales se llevaron a cabo en el laboratorio de hidráulica del Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), en un túnel de viento de ciclo abierto con una cámara de ensayos cerrada (fabricado ex profeso de obtener parámetros aerodinámicos). Al igual que las simulaciones numéricas, los ensayos experimentales abarcan un capítulo propio, donde se toman datos experimentales utilizando un manómetro diferencial (caída de presión,  $\Delta P$ ) y un anemómetro de hilo caliente (velocidad del aire,  $u_\infty$ ). En estos ensayos se emplean

seis mallas de captación diferentes, de las cuales dos son impresas mediante una impresora 3D y las demás son mallas comerciales sujetas a un marco previamente impreso en 3D.

## 2. ABSTRACT

Water fog collectors are devices that could collect water present in fog. They essentially consist of a mesh supported by a frame that is positioned perpendicular to the direction of the fog-carrying wind. The study of these collectors is of utmost importance, as they are highly useful devices in arid or semi-arid areas. In this work, aerodynamic studies are conducted through numerical simulations and experimental tests, focusing on the analysis of fog water collection meshes and their relationship with relevant parameters.

Numerical simulations were carried out using SolidWorks, a computer-aided design (CAD) software that includes a computational fluid dynamics (CFD) module, offering a high degree of design and analysis flexibility. These simulations are presented in a dedicated chapter, where parameters such as drag force ( $F_D$ ), free stream side ( $l_\infty$ ), and even flow line illustrations are obtained, providing insights into the behaviour of the flow as it passes through the collection mesh. These results are obtained based on a range of shadow coefficients ( $SC=5-95\%$ ) and for two different collection meshes with a specific frontal section. This study method allows for a detailed analysis and provides relevant information about the aerodynamics of fog water collection meshes, offering an approximation of their real-world behaviour.

On the other hand, experimental tests were conducted at the hydraulic laboratory of the Canarias Institute of Agricultural Research (ICIA), in an open-cycle wind tunnel with a closed test chamber (specifically designed to obtain aerodynamic parameters). Like the numerical simulations, the experimental tests are presented in a dedicated chapter, where experimental data is collected using a differential manometer (pressure drop,  $\Delta P$ ) and a hot-wire anemometer (air velocity,  $u_\infty$ ). These tests involve six different collection meshes, two of which are 3D-printed, while the others are commercially available meshes attached to a 3D-printed frame.

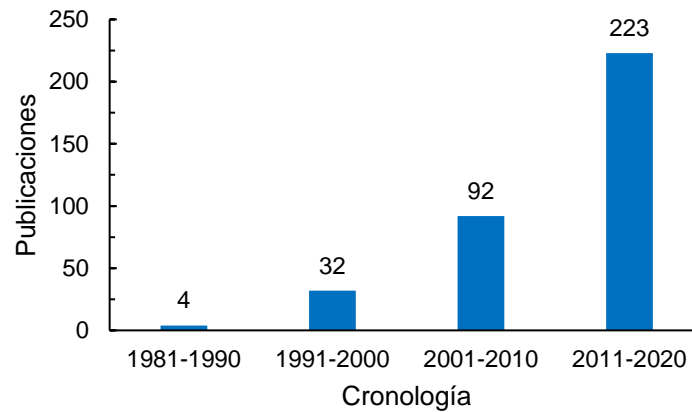
### 3. INTRODUCCIÓN

Según la ONU, más de dos mil millones de personas en todo el mundo carecen de acceso a agua potable. Esta escasez no solo afecta directamente a la salud de la población, sino que también tiene graves consecuencias económicas, sociales y políticas. Para abordar esta problemática, se están investigando nuevas tecnologías para aprovechar fuentes de agua alternativas, como la niebla. Este potencial recurso hídrico consiste en nubes bajas compuestas por microgotas de agua de un tamaño aproximado entre 5 y 50 micras. La niebla se define como una suspensión de gotas muy pequeñas en el aire que reducen la visibilidad horizontal a menos de 1 km (Organización Meteorológica Mundial).

En zonas áridas o semiáridas con climas tropicales o subtropicales, es posible recolectar cantidades significativas de agua de niebla (Jeremy et al., 2014) gracias al uso de captadores de agua de niebla, comúnmente conocidos como atrapanieblas. Estos aprovechan las condiciones favorables de exposición y viento para recolectar las microgotas de agua presentes en la niebla, obteniendo un recurso valioso de forma sostenible. Mediante esta tecnología es posible crear nuevos puntos de recursos de agua potable, que se pueden utilizar para el consumo humano, la ganadería y el riego. Además, la recolección de agua de niebla se trata de un sistema pasivo de bajo costo y escaso mantenimiento, lo que la convierte en una opción limpia y sostenible que no requiere de ningún aporte de energía externo.

Uno de los principales desafíos que enfrentan los captadores de agua de niebla es mejorar la eficiencia de recolección de su malla de captación (parte del captador donde se recolecta las gotitas de agua), centrándose en aumentar lo máximo posible la eficiencia aerodinámica (relacionada implícitamente con la eficiencia de recolección). Maximizar la eficiencia aerodinámica es de gran importancia, ya que depende únicamente de parámetros geométricos, los cuales se pueden variar hasta obtener una malla de captación con una geometría óptima. Para abordar este problema, se han llevado a cabo numerosos estudios de investigación

enfocados en evaluar y mejorar la eficiencia aerodinámica. En los últimos años, el estudio de los captadores de agua de niebla ha experimentado un crecimiento exponencial desde la década de los 80 hasta la actualidad, como se muestra en la *Figura 1*. Este aumento demuestra que el tema de los captadores de agua de niebla está en auge y, por lo tanto, sigue siendo relevante y digno de estudio en la actualidad.



**Figura 1.** Número de publicaciones que hablan de captadores de agua de niebla dividido por décadas. Fuente: Qadir et al. (2021).

## 4. ANTECEDENTES

Chile ha sido uno de los primeros países en estudiar esta forma de recolección de agua. Esto es debido a las numerosas sequías que ha enfrentado a lo largo de los últimos años. Además, el país cuenta con condiciones óptimas para la generación de niebla, como una altitud adecuada, lo cual explica por qué los primeros estudios y muchos de los que se publican en la actualidad provienen de allí.

El físico Carlos Espinosa fue uno de los pioneros en el estudio y diseño de captadores de agua de niebla en 1958. Él fue el creador del captador tipo “macrodiamante”, un captador tridimensional que es capaz de recolectar el agua de la niebla en diferentes direcciones de viento. Sin embargo, no fue hasta finales de los años 80, donde el interés científico a cerca de los captadores de agua de niebla aumentó. Una de las primeras publicaciones que abordó estos dispositivos es la de Schemenauer et al. (1988). En esta se exploró la posibilidad de

recolección de agua de niebla considerando aspectos meteorológicos y geográficos en la costa norte de Chile. Posteriormente, Schemenauer publicó varios artículos científicos, los cuales comenzaron a sentar las bases de la captación de agua de niebla: Schemenauer y Joe (1989), Schemenauer y Cereceda (1991), Schemenauer y Cereceda (1994) y Schemenauer et al. (2005). En estas publicaciones se lleva a cabo el estudio de captadores de agua de niebla bidimensionales que llaman: standard fog collector (SFC). También se comienza a estudiar la eficiencia de recolección, en particular, de captadores de agua de niebla con superficies de hasta 48 m<sup>2</sup> (captadores tipo chileno).

Hasta ese momento, la mayoría de los estudios publicados se basaban en la evidencia empírica, se diseñaba una malla y se medía la cantidad de agua de niebla que era capaz de recolectar. Sin embargo, a principios del siglo XXI, la cantidad de estudios publicados comenzó a aumentar y se inició un enfoque más teórico-matemático, centrándose en el problema de la aerodinámica del captador. Fue entonces cuando el ingeniero Juan de Dios Rivera publicó “Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors” en 2011. En este artículo se aborda desde un punto de vista teórico la eficiencia aerodinámica y los parámetros que la definen para una malla de captación sólida, como una placa plana. Rivera logra obtener una expresión teórica de la eficiencia aerodinámica, haciendo uso del principio de superposición (dos casos teóricos solapados entre sí)

Pocos años más tarde, se publicaron numerosos estudios relacionados con la captación de agua de niebla. Algunos de ellos se enfocaron en el estudio de los captadores de agua de niebla utilizando simulaciones numéricas (De la Jara et al., 2012 y Carvajal et al., 2020). Otros investigaron, utilizando un túnel de viento, la eficiencia de recolección de mallas Raschel (Echevarría, 2015) o de mallas formadas por filamentos verticales (Moncuquet et al., 2022). Por otro lado, existen artículos que analizan la eficiencia de recolección de agua de diversos tipos de captadores (Regalado y Ritter, 2016) y de diversas mallas de captación (Fernández et al., 2018).



El estudio teórico con mayor relevancia en el cálculo de la eficiencia aerodinámica ha sido realizado por Azeem (2020). En este artículo, se obtiene una expresión teórica de la eficiencia aerodinámica utilizando cálculo integral (integrales definidas). Además, se emplea la definición del coeficiente de arrastre propuesta por Steiros y Hultmark (2018), un artículo dedicado únicamente a la obtención de una definición del coeficiente de arrastre aplicada específicamente para las mallas de captación de agua de niebla. En él se discute que al utilizar un número determinado de mallas en paralelo, se logra aumentar considerablemente la eficiencia aerodinámica. El objetivo general de este artículo es validar la expresión matemática de la eficiencia aerodinámica propuesta, comparando resultados teóricos con los resultados experimentales (realizados con un túnel de viento), algo parecido a lo que se realiza en este trabajo, siento el análisis teórico sustituido por un análisis con simulaciones numéricas.

Todos estos estudios comparten el objetivo común de mejorar esta tecnología para que en un futuro cercano se convierta en una alternativa económica y eficiente, permitiendo obtener agua sin depender de ninguna fuente de energía externa.

## **5. OBJETIVOS**

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar la eficiencia aerodinámica de diferentes mallas de captación de agua de niebla, con el propósito de identificar y seleccionar una malla de captación que exhiba la máxima eficiencia aerodinámica.

- Obtener una malla de captación de agua de niebla con la mayor eficiencia aerodinámica entre las estudiadas, utilizando por un lado simulaciones numéricas y por otro ensayos experimentales.
- Obtener un coeficiente de sombra óptimo con el que se obtenga la máxima eficiencia aerodinámica para las mallas estudiadas.
- Estudiar y analizar como influye el coeficiente de sombra, la velocidad del flujo y la disposición de filamentos sobre la eficiencia aerodinámica.

Además del objetivo principal, se propondrán objetivos específicos al principio de los capítulos 2 y 3, en los que se estudiarán los diferentes parámetros aerodinámicos de las mallas de captación definidos previamente en el capítulo 1. Entre los objetivos específicos se encuentran:

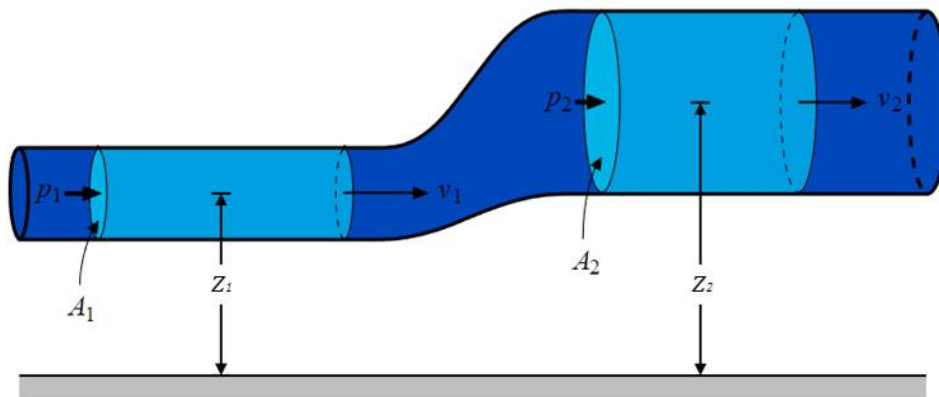
- Obtener mediante simulaciones numéricas parámetros como la fuerza de arrastre y el lado del flujo libre.
- Obtener mediante ensayos experimentales parámetros como la caída de presión y la velocidad del flujo lejos de la malla haciendo uso de instrumentos de medidas como el manómetro diferencial y el anemómetro de hilo caliente.
- Elaborar una expresión del coeficiente de arrastre, en base a una ecuación existente, que se ajuste a los resultados obtenidos.
- Identificar un criterio válido para el cálculo de la fracción filtrada (parámetros relacionado con la eficiencia aerodinámica) que nos permita medir la velocidad a través de la malla.

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

# 1. TEORÍAS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

## 1.1. Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli es un teorema que permite describir el comportamiento de un fluido que se mueve a lo largo de una línea de flujo a partir de la aplicación directa de la ley de conservación de la energía. Este establece que para un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) incompresible ( $\rho=\text{cte}$ ) que circula por un conducto cerrado, la energía cinética (velocidad), potencial (cota) y de presión en un punto es igual a la suma de estas en otro punto de la conducción (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema representativo del Principio de Bernoulli. El subíndice “1” se refiere a las condiciones de entrada del fluido y el subíndice “2” a las condiciones de salida. Fuente: [ingenieriaquimicareviews.com/](http://ingenieriaquimicareviews.com/)

La ecuación de Bernoulli iguala la energía cinética, potencial y de presión de dos puntos 1 y 2 (expresada en términos de energía por unidad de masa, J/kg).

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + g z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + g z_2 \quad \left( \frac{J}{kg} \right) \quad (1.1)$$

donde:

- $u$ = Velocidad del fluido ( $\text{m s}^{-1}$ )
- $P$ = Presión del fluido (Pa)
- $z$ = Cota a la que se encuentra el fluido (m)

- $g$ = Aceleración de la gravedad ( $m\ s^{-2}$ )

Si la ecuación (1.1) se divide entre la aceleración de la gravedad ( $g$ ), se obtiene la ecuación de Bernoulli en términos de carga ( $m$ ):

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 \quad (m) \quad (1.2)$$

donde:

- $\gamma$ = Peso específico ( $kg/m^2\ s^{-2}$ ).

Cuando los puntos a medir (1 y 2) se encuentran a la misma cota ( $z_1=z_2$ ) la ecuación (1.2) se reduce a:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (m) \quad (1.3)$$

Esta última ecuación establece que la presión ( $P$ ) en un punto de la conducción será menor donde la velocidad del fluido ( $u$ ) es mayor. En otras palabras, cuando  $u_1 < u_2$  entonces  $P_1 > P_2$ .

## 1.2. Principio de continuidad.

El principio de continuidad o ecuación de continuidad aplicada a la mecánica de fluidos es una expresión matemática derivada del principio de conservación de masa. Este, aplicado a una conducción, establece que para un flujo estacionario e incomprensible, el caudal volumétrico,  $Q$  ( $m^3\ s^{-1}$ ), ha de permanecer constante a lo largo de la misma ( $Q=cte$ ). Esto significa que si dentro de la conducción se identifica una entrada (1) y una salida (2), el caudal a lo largo de esos dos puntos se expresaría de la siguiente forma:

$$Q_1 = Q_2 = cte \quad (1.4)$$

donde:

- $Q_1$ = Caudal en el punto de entrada ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
- $Q_2$ = Caudal en el punto de salida ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )

Por otra parte,  $Q$  se expresa como el producto entre la velocidad del fluido,  $v$  ( $\text{m s}^{-1}$ ), y la sección transversal del conducto,  $A$  ( $\text{m}^2$ ), en un punto determinado:

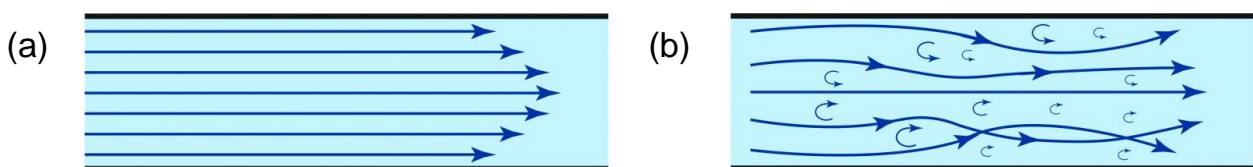
$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (1.5)$$

Esta ecuación indica que cuando la sección de un conducto se estrecha, la velocidad aumenta proporcionalmente con el estrechamiento.

### 1.3. Flujo laminar y turbulento

El flujo laminar es un tipo de movimiento de fluido donde las partículas se mueven en capas paralelas bien definidas y sin mezclarse entre sí (Figura 3a). Este se caracteriza por tener un patrón de movimiento ordenado y predecible, y se da con mayor facilidad en fluidos con una viscosidad alta (aceite).

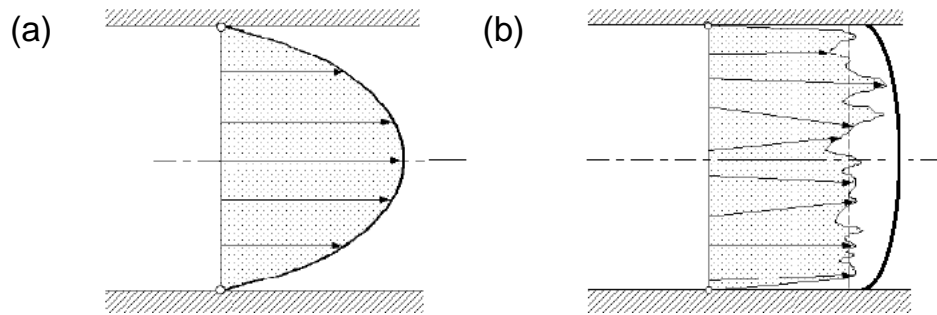
Por otro lado, el flujo turbulento se refiere a un tipo de movimiento de fluido en el que las partículas se mezclan y se mueven de manera errática en todas las direcciones (Figura 3b). Esto da como resultado una distribución compleja de la velocidad, que provoca que se formen remolinos y vórtices. Por lo tanto, su patrón de movimiento es difícil de predecir. Además, se suele observar este tipo de flujo en fluidos con una viscosidad baja (aire).



**Figura 3.** (a) Flujo laminar; (b) Flujo turbulento. Fuente: [aerodinamicaf1.com](http://aerodinamicaf1.com)

El tipo de flujo está directamente relacionado con el número de Reynolds (apartado 1.5). Para conductos cerrados, los límites de  $Re$  están bien definidos: laminar ( $Re \leq 2300$ ) y turbulento ( $Re \geq 4000$ ). En un régimen laminar (Figura 4a), las

partículas cercanas a las paredes se mueven más lentamente que las partículas que se encuentran en el centro, lo que resulta en una velocidad gradualmente creciente desde la pared hacia el centro de la conducción. Mientras que en un régimen turbulento (Figura 4b), tanto las partículas más cercanas a la pared como las que se encuentran en el centro se mueven a velocidades similares, lo que resulta en una distribución más uniforme de la velocidad.



**Figura 4.** (a) Distribución de la velocidad para un régimen de flujo laminar; (b) distribución de la velocidad para un régimen de flujo turbulento. Fuente: Martín (2014).

#### 1.4. Número de Mach

El número de Mach ( $Ma$ ) es un número adimensional que expresa el cociente entre la velocidad de un fluido,  $v$  ( $\text{m s}^{-1}$ ), y la velocidad del sonido en el medio en el que se mueve dicho fluido,  $c$  ( $\text{m s}^{-1}$ ):

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (1.6)$$

Este número adimensional está relacionado con la compresibilidad de un fluido. Cuando  $Ma < 0.3$  se considera que el fluido se comporta como incompresible. Esto nos permite utilizar la teoría de la mecánica de fluidos previamente comentada, ya que la compresibilidad de un fluido forma parte de la hipótesis de que este sea ideal.

La velocidad del viento que mueve la niebla suele encontrarse en rangos entre 1.2-8.8  $\text{m s}^{-1}$ , siendo la velocidad promedio 3.2  $\text{m s}^{-1}$  (Montecinos et al., 2018). Por otra parte en este trabajo se estudiarán velocidades en un rango entre 4-8  $\text{m s}^{-1}$  (velocidades con las que se puede obtener mayores caídas de presión entre la

cara anterior y posterior de la malla). A modo de ejemplo, se utiliza una velocidad del sonido de  $c=343,2 \text{ m s}^{-1}$  (aire a  $20^\circ\text{C}$ , 50% de humedad relativa y a nivel del mar). En este caso el número de Mach está muy por debajo de 0.3 (0.012-0.023) y por lo tanto el aire en estas condiciones se puede considerar como un fluido incompresible.

## 1.5. Número de Reynolds

El número de Reynolds ( $Re$ ) es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y viscosas de un flujo determinado, indicando si este es laminar o turbulento.

Como se introdujo en el *apartado 1.3*, en el caso de conducciones cerradas, cuando las fuerzas viscosas son dominantes ( $Re \leq 2300$ ), el régimen es laminar. En cambio, cuando las fuerzas inerciales son dominantes ( $Re \geq 4000$ ), el régimen es turbulento. Por otro lado, Regalado y Ritter (2016) definieron un rango de  $Re$  para diferenciar el tipo de régimen aplicado a los hilos de las mallas de captación (cilindros). Para  $Re < 10^2$  el flujo es laminar y para  $Re > 10^3$  el flujo es turbulento, siendo el tramo de  $10^2 > Re > 10^3$  una transición del régimen laminar al turbulento.

El número de Reynolds se define en su expresión general de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \cdot l \cdot v}{\mu} = \frac{l \cdot v}{\nu} \quad (1.7)$$

donde:

- $u$ = Velocidad del fluido ( $\text{m s}^{-1}$ )
- $l$ = Longitud característica (m)
- $\nu$ = Viscosidad cinemática del fluido ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )
- $\mu$ = Viscosidad dinámica ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )
- $\rho$ = Densidad del fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ )



El número de Reynolds permite estudiar el régimen del flujo (laminar o turbulento) tanto en análisis internos (tuberías, canales...) como externos (esferas, cilindros...). En el caso aplicado a flujos en conductos (análisis interno), la longitud característica pasa a ser el diámetro hidráulico ( $D_h$ ):

$$Re = \frac{D_h \cdot v}{\nu} \quad (1.8)$$

El diámetro hidráulico es un parámetro importante en el dimensionado de canales o tubos, principalmente porque permite calcular  $Re$  de conductos que tienen una sección diferente a la circular. Este está relacionado con el radio hidráulico ( $R_h$ ), el cual se expresa de la siguiente forma:

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (1.9)$$

donde:

- $A$ = Sección transversal ocupada por el fluido ( $m^2$ )
- $P$ = Perímetro mojado (m), que es el perímetro total de todas las paredes de la tubería o canal que están en contacto con el flujo

El diámetro hidráulico es cuatro veces el radio hidráulico. Esta relación se obtiene sustituyendo en la ecuación (1.9) el área y el perímetro de una sección circular totalmente mojada:  $R_h = \pi r^2 / 2\pi r = r/2 = D/4$ . Como  $D=D_h$  para una sección circular, se llega a la conclusión de que:

$$D_h = 4R_h \quad (1.10)$$

Esta relación se utiliza para conocer la longitud característica de tuberías con diferente sección a la circular. Por ejemplo, para una sección cuadrada completamente mojada se obtiene la siguiente expresión del diámetro hidráulico:

$$D_h = 4 \frac{l^2}{4l} = l \quad (1.11)$$

donde:

- $l$  = Lado de la sección cuadrada (m)

Por otro lado, a la hora de estudiar flujos externos alrededor de diferentes formas tales como: esferas, cilindros, placas planas..., la longitud característica cambia en función de la geometría a estudiar:

- Número de Reynolds para una esfera o un cilindro (hilos de una malla de captación, por ejemplo):

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (1.12)$$

donde:

- $D$  = Diámetro de la esfera o el cilindro (m)

- Número de Reynolds para una placa plana (malla de captación, por ejemplo):

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (1.13)$$

donde:

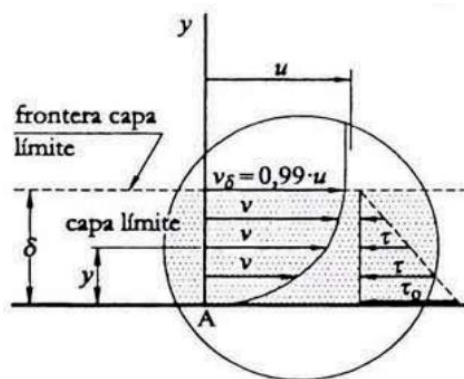
- $l$  = Lado de la placa (m)

## 1.6. Capa límite

La capa límite se define como la región en la cual la presencia de un sólido perturba el movimiento de un fluido. Para entender esto, se debe considerar que el fluido se compone de láminas de flujo que deslizan entre sí. Cuando el fluido está en contacto con un sólido, la lámina más cercana a la superficie del sólido se encuentra a una velocidad  $v=0$  (condición de no deslizamiento), debido a las fuerzas de adhesión. Esto genera un esfuerzo cortante ( $\tau$ ) que frena la lámina adyacente y que disminuye a medida que se aleja de la superficie del sólido hasta

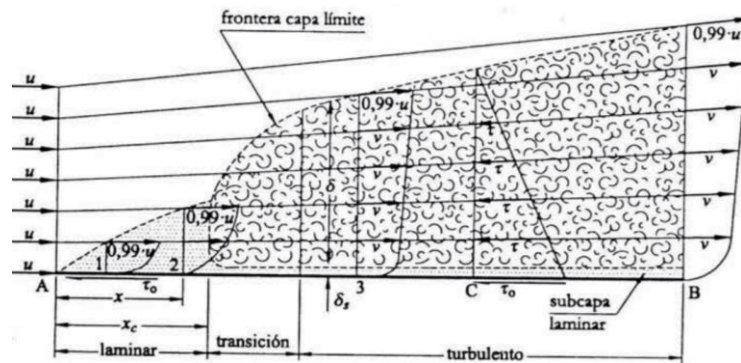
alcanzar  $\tau=0$ . En ese instante, el fluido se considera no perturbado por el sólido y, por lo tanto  $v \approx u$  (donde  $v/u \approx 1$ ).

El espesor de la capa límite ( $\delta$ ) se extiende desde la superficie del sólido, donde la velocidad es  $v=0$ , hasta que  $v$  iguale la velocidad del régimen, es decir  $u$ . Generalmente, se considera que el espesor de la capa límite acaba cuando  $v \approx u$ , tomándose un valor cercano a la unidad  $v/u=0.99$  (Figura 5). Este valor define hasta qué punto la componente  $\tau$  influye significativamente en el fluido, siendo  $\tau_0$  el esfuerzo cortante máximo. Fuera de este rango, el fluido se comporta como no viscoso, ya que no hay deslizamiento entre las capas del fluido.



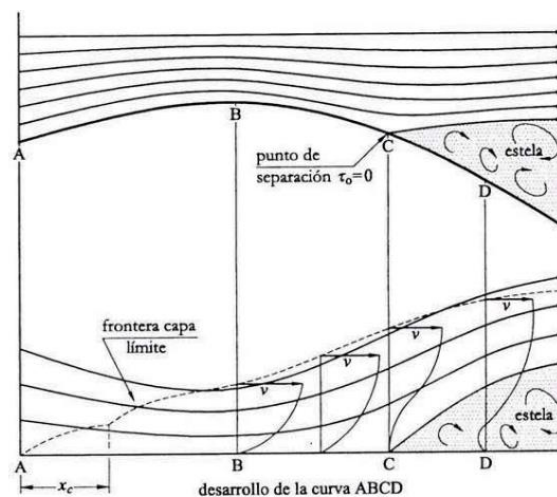
**Figura 5.** En un punto determinado A, se observa que dentro del espesor de la capa límite ( $\delta$ ) hay una distribución de velocidades ( $v$ ) que aumenta desde 0 a  $0.99u$ . Además, también se puede observar una distribución del esfuerzo cortante que disminuye desde un máximo ( $\tau_0$ ) hasta  $\tau=0$ . Fuente: Agüera Soriano (1996).

Al analizar el desarrollo de la capa límite, se puede tomar como ejemplo una placa plana lisa, con un borde de ataque A muy afilado para que el corte sea limpio (Figura 6). Al principio, el espesor de la capa límite es muy pequeño (nulo en el punto A), comportándose en régimen laminar (capa límite laminar). A lo largo de la placa, el espesor va aumentando hasta llegar a una distancia crítica ( $x_c$ ), donde se produce una transición al régimen turbulento (capa límite turbulenta). En el caso donde el borde de ataque de la placa no sea afilado, la capa límite puede llegar a ser turbulenta desde su inicio, sin pasar por una capa límite laminar. Esto se debe a que se genera una perturbación en la entrada de la placa.



**Figura 6.** Desarrollo de la capa límite sobre una placa lisa con borde afilado. Fuente: Agüera Soriano (1996).

Cuando un flujo es subsónico convergente (tramo AB de la zona superior, Figura 7), el fluido se acelera, lo que contrarresta la desaceleración en la capa límite y provoca que esta se adhiera más a la pared. En cambio, si el flujo es subsónico divergente (tramo BC de la zona superior, Figura 7), el fluido se desacelera, lo que se suma al efecto decelerador de la capa límite. Esto puede provocar, en ciertas circunstancias, que el fluido se separe de la pared antes del final del sólido ( $\tau_0=0$ , punto de separación), generando lo que se conoce como una estela de remolinos. Este fenómeno se conoce como desprendimiento de la capa límite, y cuanto más pronunciada sea la divergencia (esferas o cilindros), mayor será la posibilidad de que ocurra.



**Figura 7.** Desprendimiento de la capa límite producido cuando el fluido se desacelera al divergir. Se observa un punto de separación, punto C, donde el esfuerzo cortante máximo es  $\tau_0=0$ . Fuente: Agüera Soriano (1996).

## 1.7. Resistencia total o fuerza de arrastre

La resistencia total, mejor conocida como la fuerza de arrastre ( $F_D$ ), es la suma de la resistencia de superficie y la resistencia de forma. Por un lado, la resistencia de superficie es la fuerza resultante de la integración de la distribución de esfuerzo cortante ( $\tau_o$ ) a lo largo de toda la superficie del cuerpo expuesto al flujo. Y por otro lado, la resistencia de forma es producida por la estela generada debido al desprendimiento de la capa límite. Esta resistencia está directamente relacionada con el tamaño de la estela.

La fuerza de arrastre se define mediante su expresión general:

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.14)$$

donde:

- $C_D$ = Coeficiente de arrastre (adimensional)
- $A$ = Área frontal (resistencia de forma) o proyección en planta (resistencia de superficie) ( $m^2$ )
- $\rho$ = Densidad del fluido ( $kg\ m^{-3}$ )
- $v$ = Velocidad del flujo ( $m\ s^{-1}$ )

El coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) es un número adimensional que tiene en cuenta la resistencia de superficie y la resistencia de forma. Es importante destacar que el área que se toma para cuerpos en los que la resistencia de forma es predominante como por ejemplo esferas, cilindros, placas planas..., es el área frontal (superficie del plano proyectado perpendicular al flujo).

Este coeficiente se puede obtener experimentalmente, y generalmente se encuentra representado en gráficas y tablas para las geometrías más habituales (esferas, cilindros, placas planas...). Además, la ecuación (1.14) se puede expresar en función de la caída de presión ( $\Delta P$ ):

$$\Delta P = \frac{F_D}{A} = C_D \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.15)$$

Esta expresión es de gran utilidad sobre todo en estudios experimentales, donde la caída de presión (diferencia entre la presión anterior al sólido y la presión posterior a este) se puede medir con mayor facilidad que la fuerza de arrastre, utilizando un manómetro diferencial por ejemplo.

## **2. CAPTADORES DE AGUA DE NIEBLA**

Un captador de agua de niebla, también conocido como atrapanieblas, es un dispositivo que es capaz de capturar las pequeñas gotas contenidas en la niebla. Los captadores de agua de niebla constan de una malla de captación con una determinada sombra (superficie ocupada por los hilos), que llamaremos coeficiente de sombra ( $SC$ ), la cual es la responsable de capturar las gotas de la niebla. La malla de captación está tensada por soportes variables según el tipo de captador utilizado (Schemenauer y Cereceda, 1992). Esta malla se fabrica generalmente con hilos de polipropileno, aunque también pueden estar hechas de otros materiales como el polietileno de alta densidad, también conocido como Raschel. Las microgotas de agua contenidas en la nube son interceptadas por la malla de captación y se acumulan hasta alcanzar un tamaño crítico en el que la fuerza de la gravedad supera las fuerzas de adhesión del agua. En ese momento, las gotas se deslizan por la superficie de la malla hasta llegar a una canaleta y de ahí a un depósito (Azeem et al., 2020).

Los captadores de agua de niebla se pueden clasificar en dos categorías: los atrapanieblas bidimensionales (captadores planos o tipo chileno) y los tridimensionales (macrodiamante, cilíndrico, RAA...).

### **2.1. Captador macrodiamante**

El captador macrodiamante (Figura 8) diseñado por el científico chileno Carlos Espinosa en 1958 en Antofagasta (Chile) fue el primer sistema de atrapanieblas del mundo. Este captador consiste en una estructura poliédrica compuesta por

tubos revestidos con malla tipo Raschel que tiene varias caras dispuestas en distintas direcciones, lo que le permite capturar niebla multidireccional y así aumentar la eficiencia de recolección. Además, es un sistema que soporta muy bien los fuertes vientos debido a su estructura resistente.

La patente de invención del captador macrodiamante fue cedida por Carlos Espinosa a la UNESCO con el objetivo de fomentar investigaciones posteriores en diferentes países.



**Figura 8.** Captador de agua de niebla tridimensional macrodiamante, diseñado por Carlos Espinosa en 1958 (Chile). Fuente: Libro Agua de Niebla (2014).

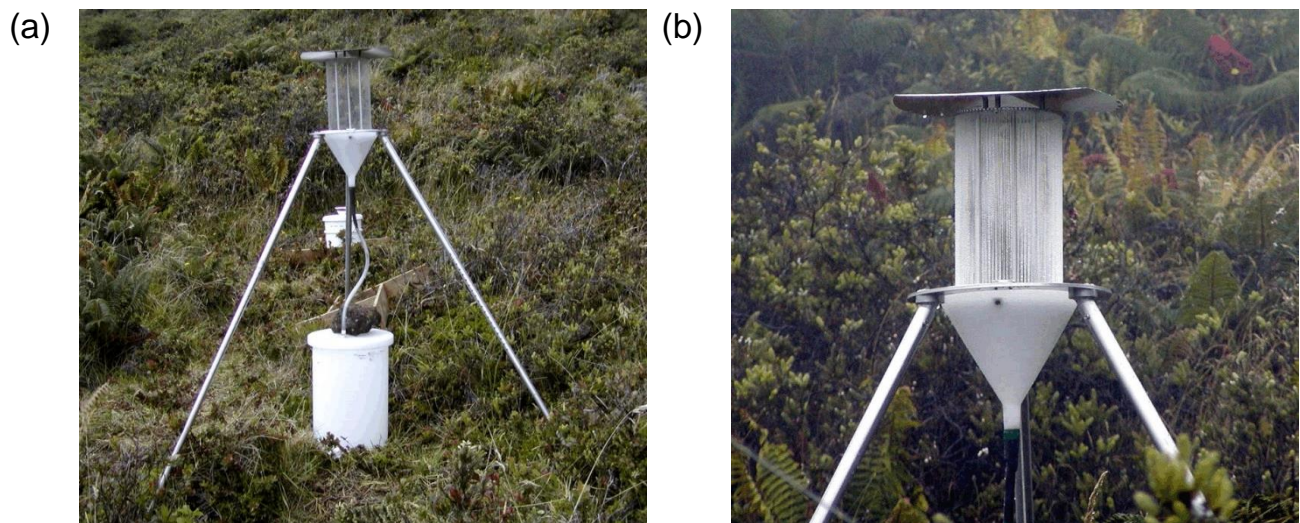
## 2.2. Captador cilíndrico

El captador cilíndrico (Figura 9), desarrollado en 1980, está compuesto por hilos verticales de polietileno, que son tensados entre dos superficies planas, las cuales se unen mediante 3 barras (Figura 9a). Las gotas de la niebla capturadas por los hilos son recogidas por un embudo y distribuidas mediante un tubo de PVC flexible hasta un depósito. Estos captadores son capaces de recolectar el agua de niebla en cualquier dirección y, por lo tanto no es necesario realizar estudios previos para establecer su posición más eficiente. Esto sumado a su pequeño tamaño (menor capacidad de recolección), los hace idóneos para cuantificar el potencial de recolección de una zona determinada, siendo utilizado como un paso previo a la



implementación de captadores más eficientes. Además, gracias a su soporte en forma de trípode, este captador es capaz de resistir fuertes vientos.

Este tipo de captador ha sido objeto de estudio recientemente en el artículo Regalado y Ritter (2016), donde se obtuvo un rendimiento medio de agua de  $1.27 \text{ l m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , que en comparación con rendimientos obtenidos de otros tipos de captadores que se comentaran más adelante, presentan rendimientos bajos.



**Figura 9.** (a) Fotografía completa del captador cilíndrico; (b) hilos verticales de un captador cilíndrico tensados por dos superficies y unidos a un embudo. Fuente: [portalfruticola.com](http://portalfruticola.com)

### 2.3. Captador RAA

A diferencia de los dos captadores anteriores, el captador RAA (Recogedor de Agua Atmosférica, Figura 10) es más reciente y se encuentra en proceso de comercialización. Estos captadores están principalmente presentes en las Islas Canarias a través de Nieblagua, una empresa local dedicada al desarrollo e implantación de sistemas para la producción de agua a partir de niebla. Estos captadores tridimensionales están compuestos por varias capas, lo que les permite recolectar una cantidad considerablemente mayor de agua en comparación con otros captadores volumétricos. Además, poseen la ventaja de ocupar un espacio mínimo, tan solo  $1.6 \text{ m}^2$ . Aguaniebla proporciona datos de producción anual que oscilan entre 11000 y 20000 litros, lo que equivale a un rendimiento medio de agua



de entre 18.83 y 34.25 l m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Si comparamos estos valores con los del captador cilíndrico, podemos observar que los RAA logran rendimientos muy altos.



**Figura 10.** Captador de agua de niebla tridimensional RAA. Fuente: [nieblagua.com](http://nieblagua.com)

## 2.4. Captador bidimensional o tipo chileno

Los captadores bidimensionales (1980-1984), también conocidos como captadores tipo chilenos (Figura 11), son los más comunes entre los atrapanieblas y pueden llegar a ocupar hasta 120 m<sup>2</sup> de superficie de recolección. Estos captadores consisten en un par de postes que sujetan una gran malla de captación, generalmente de tipo Raschel, mediante unos tensores de sustentación. Dado que son captadores planos, deben colocarse de forma perpendicular a la dirección del viento predominante y por ello, es de gran importancia realizar estudios meteorológicos previos antes de emplazar estos captadores. Como inconveniente, presentan problemas de rotura tanto en la malla como en las fijaciones, así como problemas de estabilidad estructural frente a fuertes vientos, que suelen estar presentes en los lugares donde se emplazan estos captadores (Libro Agua de Niebla, 2014).

En el ámbito de la investigación, los captadores bidimensionales han sido ampliamente estudiados, principalmente debido a su sencillez y bajo costo de producción. A modo de ejemplo, este tipo de captadores son capaces de recolectar

$3 \text{ l m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Aránguiz et al., 2009). Esto puede parecer poco, pero hay que recordar que las superficies de estos captadores son muy grandes ( $40\text{-}120 \text{ m}^2$ ).



**Figura 11.** Captador de agua de niebla bidimensional o tipo chileno. Fuente: [portalfruticola.com](http://portalfruticola.com)

### 3. MALLAS DE CAPTACIÓN

La malla de captación es la parte más importante de un captador de agua de niebla, ya que es la encargada de recoger las gotas de agua de la niebla. Existen diversos tipos de mallas con configuraciones desde simples hasta muy complejas. En particularidad, en este trabajo se explorarán cinco tipos: cuadrícula, mosquitera, tipo arpa, Raschel y volumétrica.

Un parámetro de gran relevancia en el estudio de las mallas de captación es el coeficiente de sombra (SC). Este coeficiente es una magnitud adimensional que varía entre 0 y 1, y representa la fracción de área de la malla capaz de capturar gotas. Se calcula dividiendo el área ocupada por los hilos de la malla entre el área total de la malla (excluyendo el marco que la sostiene):

$$SC = \frac{A_h}{A_T} \quad (1.16)$$

donde:

- $A_h$ = Área ocupada por los hilos ( $m^2$ ).
- $A_T$ = Área total de la malla ( $m^2$ ).

Además, el SC puede definirse en términos de la porosidad ( $\beta$ ):

$$SC = 1 - \beta \quad (1.17)$$

Tomando la ecuación (1.16) y la ecuación (1.17) se obtiene la siguiente expresión de la porosidad ( $\beta$ ):

$$\beta = \frac{A_T - A_h}{A_T} \quad (1.18)$$

El SC es de suma importancia en los estudios de la aerodinámica de las mallas, y en especial para determinar sus eficiencias aerodinámicas. Además, esta variable se relacionará en función de los parámetros aerodinámicos que se obtendrán en los capítulos posteriores, ya que es la única variable geométrica que se puede controlar. Por lo tanto, resulta crucial contar con una ecuación que permita calcular el SC y que este definida en función de parámetros conocidos, como el diámetro de hilo ( $d$ ) o la distancia entre ejes de hilo ( $d'$ ). Este enfoque puede aplicarse de manera sencilla en mallas como las de tipo arpa o cuadrangular. Sin embargo, obtener una expresión simplificada para la Raschel o la malla volumétrica resulta muy complicado, por lo que se obtendrá el valor de su coeficiente de sombra mediante otras vías, como por ejemplo usando un escáner.

### 3.1. Malla tipo arpa

Una malla de captación con disposición de filamentos en forma de arpa, también conocida como malla tipo arpa, está compuesta por hilos dispuestos verticalmente. Estos hilos son equidistantes y paralelos entre sí (Figura 12).



**Figura 12.** Fotografía de una malla tipo arpa dispuesta en campo. Fuente: Regalado y Ritter (2016).

La expresión específica del coeficiente de sombra para una malla tipo arpa se define de la siguiente manera:

$$SC = \frac{d}{d'} \quad (1.19)$$

donde:

- $d$  = Diámetro del hilo (m)
- $d'$  = Distancia entre ejes de hilo (m)

Esta ecuación nos permite fijar un  $d$  e ir despejando  $d'$  para conseguir el coeficiente de sombra deseado.

### **3.2. Malla cuadrangular y mosquitera**

Una malla de captación cuadrangular está formada por hilos verticales cruzados en perpendicular con hilos horizontales (Figura 13). Aunque la mosquitera también se puede clasificar como una malla cuadrangular, en este trabajo distinguimos entre ambas. La malla cuadrangular será diseñada según nuestras necesidades, mientras que la mosquitera será un modelo comercial previamente fabricado (malla utilizada para impedir el paso de los mosquitos).



**Figura 13.** Fotografía de una malla cuadrícula (mosquitera). Fuente: [mosquiteras24h.com](http://mosquiteras24h.com)

Esta malla puede ser considerada como una combinación entre dos mallas tipo arpa y, por lo tanto, se puede estimar la expresión específica del coeficiente de sombra como el doble de la ecuación (1.19).

$$SC \approx 2 \frac{d}{d'} \quad (1.20)$$

Sin embargo, aunque esta expresión puede ser utilizada para coeficientes de sombra bajos, no es precisa para coeficientes de sombra alto. Cuando los hilos se intersecan, comparten cierta área. Por otro lado, a medida que el coeficiente de sombra aumenta, el número de intersecciones también aumenta y lo hace exponencialmente en función de  $SC$ . Esto provoca que la ecuación (1.20) no sea válida para coeficientes de sombra altos, ya que el margen de error es demasiado elevado.

Teniendo en cuenta el área compartida por los hilos al interceptarse, se puede obtener la expresión específica del coeficiente de sombra para la malla cuadrícula:

$$SC = \frac{2d}{d'} - \frac{d^2(n_{h,h}^{\circ} \cdot n_{h,v}^{\circ})}{d'^2(n_{h,h}^{\circ} \cdot n_{h,v}^{\circ})} \quad (1.21)$$

donde:

- $n_{h,h}^{\circ}$  = Número de hilos horizontales
- $n_{h,v}^{\circ}$  = Número de hilos verticales

- $d^2(n_{h,h}^0 \cdot n_{h,v}^0)$ = Área ocupada por las intersecciones entre los hilos verticales y horizontales ( $m^2$ )
- $d'^2(n_{h,h}^0 \cdot n_{h,v}^0)$ = Área total de la malla ( $m^2$ )

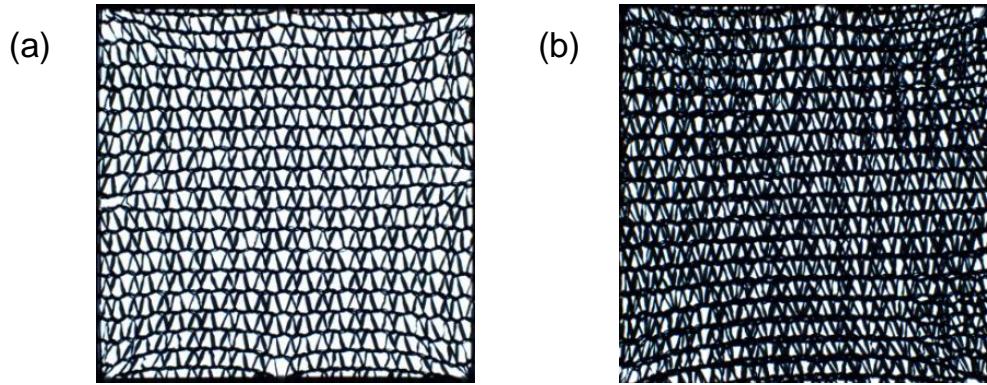
Simplificando la ecuación (1.21) se obtiene:

$$SC = \frac{d(2d' - d)}{d'^2} \quad (1.22)$$

### 3.3. Malla Raschel

La malla Raschel es un tipo de malla comercial ampliamente utilizada en la recolección de agua de niebla. Está compuesta por cintas de polietileno de alta densidad (HDPE), que han recibido un tratamiento especial para resistir los rayos ultravioleta, y se tejen a diferentes densidades. Estas mallas presentan una disposición de filamentos bastante compleja (Figura 14a y 14b), lo que dificulta la definición de una ecuación simplificada para el coeficiente de sombra (SC). En estos casos se utiliza un escáner que mide la cantidad de área sólida respecto a la total, para determinar el SC de la malla.

Las mallas Raschel más comunes tienen coeficientes de sombra aproximados de SC=35%. Además, es común que los autores doblen la malla Raschel para lograr un coeficiente de sombra más alto (SC=65%), ya que la malla Raschel simple es demasiado porosa para la recolección de agua de niebla (Figura 14a). Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos valores de coeficiente de sombra no son aplicables a todos los tipos de mallas Raschel, ya que existen diferentes variantes con coeficientes de sombra distintos. Por lo tanto, en este estudio se utilizará un escáner para obtener mediciones precisas del coeficiente de sombra específico de cada tipo de malla Raschel.



**Figura 14.** Fotografía de una malla raschel simple (a) y doble (b). Fuente propia.

### 3.4. Malla volumétrica

La malla volumétrica (Figura 15), también conocida como Geosteras, se utiliza principalmente en el ámbito de la geotecnia para el control de la erosión. Recientemente, se ha prestado especial atención al estudio de captación de agua de niebla de este tipo de mallas debido a su estructura tridimensional (Fernández et al., 2018). Existen diversos tipos de mallas volumétricas, pero en este trabajo nos centraremos en una en particular llamada BonTmat. Estas mallas son fabricadas por la empresa Objetivo Erosionzero S.L., especializada en este tipo de productos. La malla volumétrica BonTmat está formada mediante la extrusión de monofilamentos sintéticos (polipropileno), los cuales son enredados y soldados en sus puntos de contacto. Además, al tratarse de una malla con una disposición de filamentos compleja debido a su tercera dimensión, se utiliza un escáner para determinar el SC de esta malla.



**Figura 15.** Fotografía de una malla volumétrica BonTmat. Fuente: [controlerosion.es](http://controlerosion.es)



## 4. PRINCIPALES PARÁMETROS AERODINÁMICOS EN MALLAS DE CAPTACIÓN

Las mallas de captación son sistemas de recolección de agua de baja eficiencia, puesto que únicamente son capaces de recolectar una pequeña parte del agua contenida en la niebla. Esto se debe a que existen diferentes pérdidas en el proceso de recolección. Por ello, es de gran importancia obtener una expresión que nos permita calcular dicha eficiencia y de esta forma, estudiar y optimizar las variables que la definen para conseguir valores tan altos como sea posible.

Rivera (2011) define una expresión de la eficiencia de recolección de agua total ( $\eta_{tot}$ ) para las mallas de captación, que años más tarde Azeem et al. (2020) vuelve a utilizar. Esta expresión de la  $\eta_{tot}$  se define como:

$$\eta_{tot} = \frac{J}{LWC \cdot v_{\infty}} \quad (1.23)$$

donde:

- $J$ = Flujo que se recoge de la canaleta del captador por unidad de área de recolección ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )
- $LWC$  (Liquid Water Content)= Agua contenida en la niebla ( $\text{kg m}^{-3}$ )
- $v_{\infty}$ = Velocidad del flujo de niebla sin perturbar por la existencia de la malla ( $\text{m s}^{-1}$ )

Tomando como referencia el estudio de Montecinos et al. (2018), se conoce un rango aproximado de la cantidad de agua contenida en la niebla ( $LWC=0.02-0.5 \text{ g m}^{-3}$ ) y a qué velocidad esta se desplaza ( $v_{\infty}=2-5 \text{ m s}^{-1}$ ). Sin embargo, no se puede optimizar la eficiencia de la malla de captación respecto a estas variables, ya que  $LWC$  y  $v_{\infty}$  son parámetros que no se pueden controlar. Por lo tanto, es conveniente que  $\eta_{tot}$  se defina en términos geométricos (Rivera, 2011):

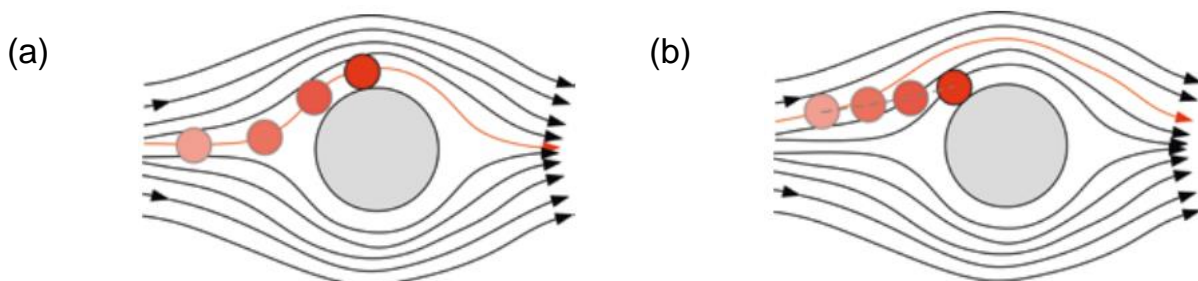
$$\eta_{tot} = \eta_a \cdot \eta_{capt} \cdot \eta_{dr} \quad (1.24)$$



donde:

- $\eta_a$ = Eficiencia aerodinámica
- $\eta_{\text{capt}}$ = Eficiencia de captura
- $\eta_{\text{dr}}$ = Eficiencia de drenaje

La eficiencia de captura ( $\eta_{\text{capt}}$ ) mide la cantidad de gotas de agua de niebla que son capturadas por los hilos de la malla de captación respecto a la cantidad de niebla que la atraviesa. Las gotas pueden ser capturadas por los hilos en dos situaciones: por intercepción (Figura 16a) o por inercia (Figura 16b). Cuando una gota sigue las líneas de flujo y su radio es mayor que la distancia entre su línea de flujo y la superficie del hilo, la gota es interceptada por el hilo. Por otro lado, una gota que sigue las líneas de flujo, pero que tiene una velocidad elevada o un tamaño considerable, se sale de la línea de flujo e impacta frente al hilo. Esto principalmente se debe a que la densidad del agua es aproximadamente mil veces mayor que la del aire.



**Figura 16.** (a) Captura por intercepción; (b) captura por inercia. Fuente: Libro Agua de Niebla (2014).

Por otro lado, la eficiencia de drenaje ( $\eta_{\text{dr}}$ ) mide la cantidad de agua que llega hasta el depósito respecto al total que se captura en la malla. Las gotas capturadas por los hilos pueden ser arrastradas debido a fuertes rachas de vientos. Además, pueden caer fuera de la canaleta o filtrarse por el sistema que une la canaleta y el depósito. Esta eficiencia se puede maximizar utilizando, por ejemplo, varias capas de mallas, así si las gotas son arrastradas por el viento serán capturadas por la siguiente malla.

Antes de entrar en detalle con la eficiencia aerodinámica (objetivo principal del trabajo), se cree oportuno explicar los parámetros que la definen, comenzando por el coeficiente de caída de presión.

#### 4.1. Coeficiente de caída de presión

El coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ) es un parámetro adimensional que cuantifica la caída de presión a una escala microscópica de los hilos. Su definición es similar a la del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), pero expresada desde un punto de vista diferente con una pequeña variación en la velocidad que se toma de referencia. Por un lado la expresión de  $C_D$  utiliza la velocidad del flujo sin perturbar (lejos de la malla), mientras que  $C_o$  se define como:

$$C_o = \frac{2\Delta P}{\rho \cdot v^2} \quad (1.25)$$

donde:

- $u$  = Velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $\text{m s}^{-1}$ )

Debido a que  $u$  es un parámetro complicado de medir, tanto en simulaciones como en experimentación, existen artículos que estudian el coeficiente de caída de presión desde un punto de vista más específico (expresiones aplicadas a cada caso de estudio). Una de estas expresiones (aplicada exclusivamente a mallas cuadradales) fue descrita por Idel'cik (1960) y posteriormente citada en Rivera (2011):

$$C_o = 1.3SC + \left( \frac{SC}{1 - SC} \right)^2 \quad (1.26)$$

Como se puede observar, la ecuación (1.26) esta expresada únicamente en función del coeficiente de sombra, sin tener en cuenta ningún otro parámetro como podría ser la velocidad del flujo libre (estudio que se comprobará si es cierto en el capítulo 2). Además, es importante recalcar que la ecuación (1.26) se utiliza para mallas hechas de alambre (metálicas). En caso de que se precise otro material

(para ser más precisos en el cálculo de  $C_o$ ), se debe multiplicar dicha ecuación por una constante.

Idel'cik define otra ecuación del coeficiente de caída de presión para mallas cuadradales hechas de seda, material que se asemeja al plástico del que habitualmente están hechas las mallas de captación (polipropileno y polietileno). La ecuación de  $C_o$  para mallas hechas de seda se expresa como:

$$C_o = 1.62 \left[ 1.3SC + \left( \frac{SC}{1-SC} \right)^2 \right] \quad (1.27)$$

Por último, debido al número de Reynolds el coeficiente de caída de presión puede variar considerablemente, ya que a escalas tan pequeñas (longitudes características de mm o incluso micras) el flujo puede llegar a números de Reynolds cercanos a 0. Por ello se debe tener en cuenta un factor de corrección ( $k_{Re}$ ) que depende del número de Reynolds referido al diámetro de los hilos ( $Re_d$ ):

$$C_o = 1.62k_{Re} \left[ 1.3SC + \left( \frac{SC}{1-SC} \right)^2 \right] \quad (1.28)$$

A la hora de obtener  $k_{Re}$  se tiene que calcular  $Re_d$  mediante la siguiente expresión:

$$Re_d = \frac{v_\infty d}{\nu} \quad (1.29)$$

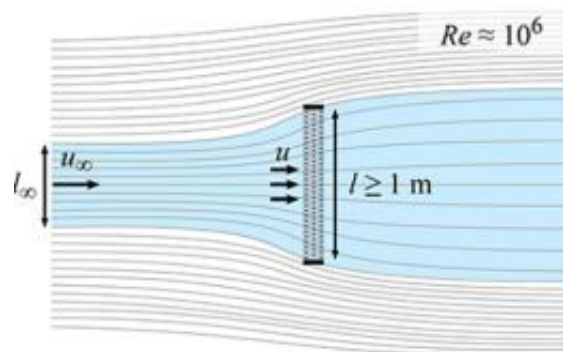
En el caso de que  $Re_d < 400$ , se utiliza la *Tabla 1*:

**Tabla 1.** Factor de corrección ( $k_{Re}$ ) en función del número de Reynolds ( $Re_d$ ). Fuente: Idel'cik (1960).

Número de Reynolds ( $Re_d$ )	Factor de corrección ( $k_{Re}$ )
40	1.16
80	1.05
120	1.01
300	1.00
350	1.01
400	1.01

## 4.2. Fracción filtrada

La fracción filtrada ( $\varphi$ ) cuantifica la cantidad de niebla que atravesara la malla en relación con el total que podría hacerlo si el flujo no pasara alrededor de ella. Esto se puede comprender mejor al analizar la *Figura 17*, donde se observa una cantidad de niebla lejos de la malla que, al encontrarse con esta, se desvía y no la atraviesa.



**Figura 17.** Vista en planta del aire rodeando el colector de agua de niebla. Fuente: Azeem et al. (2020).

Este parámetro es el indicador más importante de la eficiencia aerodinámica. Una mayor fracción filtrada implicaría que la malla está captando más niebla, que posteriormente podría ser capturada por los hilos (aumentando la eficiencia de recolección). La fracción filtrada, ya observada la *Figura 17*, se puede definir de diferentes maneras, siendo la más habitual:

$$\varphi = \frac{A_\infty}{A} \quad (1.30)$$

donde:

- $A$ = Área frontal de la malla ( $\text{m}^2$ )
- $A_\infty$ = Área del flujo de niebla que se filtrará a través del área frontal de la malla ( $\text{m}^2$ )

En el caso en el que la malla sea cuadrada, la fracción filtrada se puede expresar como:

$$\varphi = \frac{l_{\infty}^2}{l^2} \quad (1.31)$$

donde:

- $l$  = Longitud del lado del área frontal de la malla (m)
- $l_{\infty}$  = Longitud del lado del área del flujo de niebla que se filtrará a través del área frontal de la malla, al cual nos referiremos a lo largo del trabajo como: lado del flujo libre (m)

Por otro lado, utilizando el principio de continuidad  $Au=A_{\infty}u_{\infty}$  y, por lo tanto:

$$\varphi = \frac{u}{u_{\infty}} \quad (1.32)$$

donde:

- $u$  = Velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $\text{m s}^{-1}$ )
- $u_{\infty}$  = Velocidad del flujo sin perturbación de la malla, al cual nos referiremos a lo largo del trabajo como: velocidad del flujo libre ( $\text{m s}^{-1}$ )

Estas dos velocidades ( $u$  y  $u_{\infty}$ ) son parte de la definición del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) y el coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ). Por lo tanto, si se iguala la caída de presión de la ecuación (1.15) y la ecuación (1.25) se obtiene:

$$C_D \cdot \rho \cdot \frac{u_{\infty}^2}{2} = C_o \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} \quad (1.33)$$

Despejamos dejando la relación de velocidades ( $u/u_{\infty}$ ) en función del coeficiente de arrastre y de caída de presión:

$$\frac{u^2}{u_{\infty}^2} = \frac{C_D}{C_o} \quad (1.34)$$

Con esta relación se puede obtener la expresión de la fracción filtrada en función de estos coeficientes:

$$\varphi = \sqrt{\frac{C_D}{C_o}} \quad (1.35)$$

### 4.3. Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), como ya se ha definido en el apartado 1.7 en la ecuación (1.15), representa las dos resistencias que todo sólido experimenta cuando se encuentra rodeado por un fluido (resistencia de superficie y resistencia de forma). En este caso, donde se estudian mallas de captación, es la resistencia de forma la que prevalece sobre la de superficie.

Este coeficiente, al contrario que  $C_o$ , se aplica a escala de la malla de captación y por ello en su expresión general se utiliza la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ):

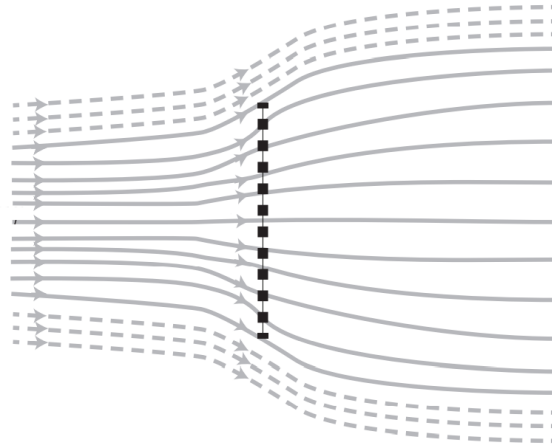
$$C_D = \frac{2F_D}{\rho \cdot u_\infty^2} \quad (1.36)$$

Además, estudios recientes (Steiros, 2018) han obtenido una expresión de  $C_D$  aplicada a placas porosas (caso similar a una malla de captación) en función de la fracción filtrada:

$$C_D = \frac{4(1-\varphi)(2+\varphi)}{3(2-\varphi)} \quad (1.37)$$

### 4.4. Eficiencia aerodinámica

Por último, la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) cuantifica la cantidad de flujo de niebla que no es desviado por la malla de captación y que por tanto la atraviesa. Como la malla de captación es un obstáculo para el flujo de niebla, parte de este pasa alrededor de la malla (Figura 18).



**Figura 18.** Efectos aerodinámicos de una malla de captación (cuadrados negros) vistos en planta. Se distinguen dos tipos de líneas de flujo: el flujo de aire desviándose alrededor de la malla (línea discontinua gris) y el flujo que atraviesa la malla (línea continua gris). Fuente: Moncuquet et al. (2022).

Esta porción de flujo de niebla que se desvía se mide mediante la fracción filtrada ( $\varphi$ ), la cual decrece gradualmente cuanto menos porosa es la malla ( $\beta$ ), o lo que es lo mismo, cuanto mayor es el coeficiente de sombra ( $SC$ , inversa de la porosidad). Por otro lado, cuanto mayor es  $SC$  (relación entre filamentos sólidos de la malla y el área de los huecos) más hilos tiene la malla de captación y por ende, en principio, más gotas de agua de niebla son recogidas. Por lo tanto, nos interesa que la malla de captación sea lo más tupida posible ( $SC$  lo más alto posible) y que al mismo tiempo el flujo de niebla no se desvíe alrededor de esta, ya que de lo contrario la niebla no atravesaría la malla y no se recolectaría agua. Al final se trata de obtener un balance óptimo entre estos dos parámetros

La expresión de la eficiencia aerodinámica descrita por Azeem et al. (2020) tiene en cuenta el número de capas ( $N$ , número de mallas en paralelo una tras otra), definiéndose de la siguiente forma:

$$\eta_a = \varphi [1 - (1 - SC)^N] \quad (1.38)$$

En el caso de una sola capa ( $N=1$ ), la expresión anterior se simplifica obteniéndose:

$$\eta_a = \varphi SC \quad (1.39)$$

## 5. TUNEL DE VIENTO

### 5.1. Aspectos generales

Un túnel de viento es una herramienta experimental utilizada para estudiar y analizar el comportamiento de un fluido, como el aire, alrededor de un sólido en diferentes condiciones y velocidades. En su interior, el túnel de viento cuenta con una sección de prueba (cámara de ensayos) donde se colocan modelos a escala reducida, como maquetas de aviones, automóviles, edificios, o en este caso, mallas de captación de agua de niebla. El aire se hace circular a través del túnel y se ajusta la velocidad y las condiciones del flujo para simular situaciones específicas.

El túnel de viento permite estudiar fenómenos aerodinámicos, evaluar la resistencia al flujo de diferentes objetos, analizar la eficiencia de diferentes diseños y configuraciones, y recolectar datos experimentales para validar y mejorar modelos teóricos o simulaciones numéricas. En nuestro caso, se utiliza un túnel de viento para medir y evaluar diversos parámetros aerodinámicos de las mallas de captación en condiciones controladas de flujo de aire. .

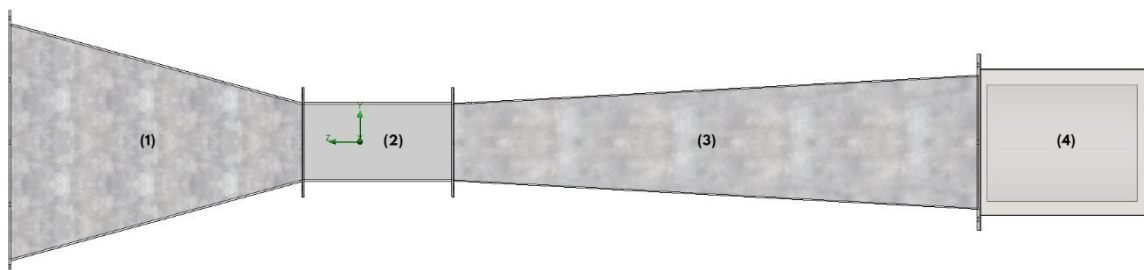
Estos se pueden clasificar según el tipo de circulación del aire en su interior: abierto o cerrado. En este trabajo se utiliza un túnel de viento abierto, lo que implica que el aire se extrae directamente de la atmósfera y se devuelve a ella después de pasar por la cámara de ensayos. Esta variante de túnel presenta dos ventajas significativas en comparación con el cerrado. Por un lado, los costos de producción son inferiores. Por otro lado, el túnel abierto ofrece la posibilidad de utilizar técnicas de visualización de flujo con humo, lo cual resulta muy útil para estudiar la eficiencia aerodinámica de los modelos. Además, es importante destacar que el túnel de viento opera a velocidades subsónicas, específicamente en un rango de 4 a 10 m/s, con el propósito de simular las condiciones habituales del viento.



## 5.2. Partes de un túnel de viento

Generalmente un túnel de viento se compone de cuatro partes: cono de contracción, cámara de ensayos, difusor y ventilador (Figura 19).

- Cono de contracción (Figura 19.1): Es la sección inicial del túnel de viento donde el área de la sección transversal se reduce gradualmente. Esto ayuda a acelerar y dirigir el flujo de aire de manera uniforme hacia la cámara de ensayos.
- Cámara de ensayos (Figura 19.2): Es la sección central del túnel de viento donde se coloca el modelo o el objeto que se va a estudiar. Aquí se simulan las condiciones de flujo de aire para analizar su comportamiento y rendimiento aerodinámico.
- Difusor (Figura 19.3): Es la sección final del túnel de viento y presenta una forma divergente. Su propósito es reducir gradualmente la velocidad del fluido que sale de la cámara de ensayos, preparándolo para ser liberado en el entorno circundante. En un túnel de viento abierto de baja velocidad, donde el fluido se considera incompresible, la presión en el difusor es la misma que la atmosférica. En otros tipos de túneles de viento, donde se trabaja con velocidades más altas o donde el sistema es cerrado, la presión varía constantemente.
- Ventilador (Figura 19.4): Es el componente clave que impulsa el flujo de aire a través del túnel. Puede ser un ventilador axial o centrífugo, y genera la corriente de aire necesaria para las pruebas.



**Figura 19.** Túnel de viento del laboratorio de hidráulica del ICIA modelado en SolidWorks. (1) Cono de contracción; (2) cámara de ensayos; (3) difusor; (4) ventilador axial.

Habitualmente, se utilizan estabilizadores de corriente después del ventilador con el fin de proporcionar uniformidad a las líneas de flujo. No obstante, como se muestra en la *Figura 19*, el ventilador se encuentra ubicado al final del túnel de viento. Esto evita la necesidad de colocar estabilizadores de corriente, ya que el aire se aspira, eliminando así las turbulencias que se generan durante el flujo.

Finalmente, en el *capítulo 3*, se continuará con la explicación del túnel de viento, ya que será utilizado para realizar los ensayos experimentales posteriores. Se abordarán los modelos y dimensiones de las partes más relevantes del túnel, y se complementarán con ilustraciones que facilitarán la visualización de dicha estructura.

## **CAPÍTULO 2. ESTUDIOS AERODINÁMICOS DE MALLAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE SIMULACIONES**

## 1. INTRODUCCIÓN A LOS ESTUDIOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se estudia, mediante simulaciones numéricas, los principales parámetros aerodinámicos de las mallas de captación, de entre los que cabe destacar el estudio de la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ). El principal objetivo es determinar la  $\eta_a$  de mallas constituidas por filamentos verticales paralelos (geometría tipo “arpa”) así como por filamentos cruzados en forma de cuadrícula (y que referiremos como “cuadricular” en lo que sigue) y su dependencia con el coeficiente de sombra ( $SC$ ).

Hay que destacar que se ha decidido comenzar con los estudios de simulación antes que con los ensayos experimentales. Esto nos permitirá estudiar el comportamiento del flujo y las diferentes tendencias en los resultados obtenidos (sin limitaciones de diseño), además de poder estudiar aspectos de gran interés como son la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) que soporta la malla y las líneas de flujo o la distribución de velocidades y presiones alrededor de la malla. Por otra parte, también nos apoyaremos en estos estudios de simulación para determinar el dimensionado más adecuado del marco que deberán llevar las mallas, con el fin de poder realizar los ensayos experimentales posteriores en el túnel de viento.

Tal y como se explicó en el *capítulo 1*, la eficiencia aerodinámica se define mediante la relación de la fracción filtrada ( $\varphi$ ) y  $SC$ . Además,  $\eta_a$  se puede calcular en función de dos coeficientes adimensionales: coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ) y coeficiente de arrastre ( $C_D$ ). Estos dos coeficientes se consideran relevantes para explicar el comportamiento del flujo alrededor de la malla de captación y por ello se estudiarán al igual que  $\varphi$ .

Teniendo todo esto en cuenta, los objetivos específicos que se plantean en este capítulo son:

- Verificar la validez de las simulaciones utilizando un ejemplo tipo como es el de una esfera lisa.

- Diseñar el marco más adecuado para las mallas de captación, que se utilizará en los ensayos experimentales.
- Estudiar las líneas de flujo y la distribución de velocidades y presiones alrededor de las mallas de estudio.
- Obtener la fuerza de arrastre ( $F_D$ ), el lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) y posteriormente velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $u$ ) para los tipos de malla estudiados (tipo arpa y cuadrangular).
- Calcular la fracción filtrada ( $\phi$ ), el coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ) y el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), y estudiar la influencia de la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ), el coeficiente de sombra (SC) y la disposición de filamentos (tipo de malla) sobre estos parámetros.
- Calcular la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) y estudiar cómo influye la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ), el coeficiente de sombra (SC) y la disposición de filamentos sobre ella.
- Realizar un estudio/análisis de la influencia de la distancia entre ejes de hilos ( $d'$ ) y el diámetro de hilo ( $d$ ) en la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) para un SC dado.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LAS SIMULACIONES

### 2.1. Software y hardware

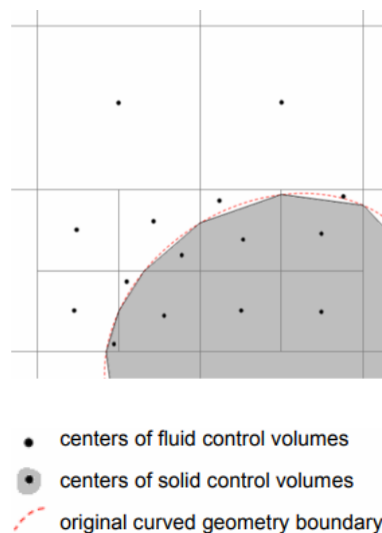
Para llevar a cabo las simulaciones numéricas se utilizó el programa SolidWorks, que cuenta con un módulo de Dinámica de Fluidos Computacional, CFD (Computational Fluid Dynamics) llamado Flow Simulation. Este módulo permite obtener, entre otros parámetros, la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) de un sólido 3D, como por ejemplo una esfera, una placa plana o, en nuestro caso, una malla de captación, dentro de un volumen de control definido por el usuario.

Flow Simulation utiliza una técnica numérica discreta, que se basa en el método de volúmenes finitos, FVM (Finite Volume Method), para resolver las ecuaciones de

Navier-Stokes con distintas condiciones de frontera. Para discretizar el espacio que envuelve al sólido se utiliza un sistema de coordenadas rectangulares cartesianas. Lejos del límite de geometría del sólido, los volúmenes de control (es decir, las celdas de malla) son paralelepípedos. En cambio, cerca del límite de geometría las celdas son poliedros con caras planas orientadas a dicho límite, como se puede observar en la *Figura 20*.

Este tipo de discretización cerca de los límites de geometría del sólido nos permite obtener resultados altamente precisos. Además, en caso de necesitar mayor discretización, se puede usar un refinamiento local, que tiene en cuenta la geometría específica del sólido a simular, por ejemplo, de las mallas, ya que la geometría de los hilos es cilíndrica.

En nuestro caso se utilizó una discretización más enfocada en las celdas que están cerca de los límites de geometría del sólido (interacción sólido/fluido) que en las celdas donde únicamente existe fluido. Esto nos permite obtener resultados precisos de la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y del comportamiento fluido/sólido, para obtener distribuciones de velocidad y presión altamente refinadas.



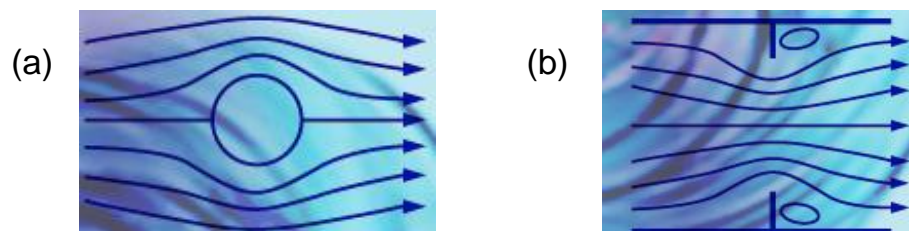
**Figura 20.** Discretización del espacio que envuelve al sólido. Lejos del límite de geometría (celdas de fluido) las celdas son paralelepípedos. Cerca del límite de geometría (celdas de fluido en contacto con el sólido) son poliedros. Fuente: Solidworks Flow Simulation (2020).

A continuación, se detallan los componentes del *hardware* que se utilizó para realizar las simulaciones. Estos componentes ayudarán a entender los tiempos de simulación que serán comentados posteriormente, ya que será una limitante a la hora de obtener resultados lo suficientemente precisos.

- Placa base: Z370M DS3H.
- Procesador: Intel(R) Core(TM) i5-8400 CPU, 2.80 GHz. 6 núcleos.
- Tarjeta gráfica: NVIDIA GeForce RTX 2060.
- Tarjeta RAM: 16 GB DDR4.
- Disco duro: SSD 256 GB.

## 2.2. Procedimiento de la discretización de las celdas de malla

En este apartado no se entrará en detalle a definir variables como el tipo de fluido, la velocidad sin perturbar, el diámetro de hilo, la sección de la malla, etc. que serán dependientes del tipo de estudio que se quiera realizar y se indicarán posteriormente para cada caso. Sin embargo, sí se explicará el procedimiento de cómo se han discretizado las celdas. Se utilizará el mismo refinamiento para todas las simulaciones aplicándose siempre un análisis de tipo externo (Figura 21a), a excepción de cuando se estudie el diseño del marco de la malla de captación, en el que se utilizará un análisis tipo interno (Figura 21b).



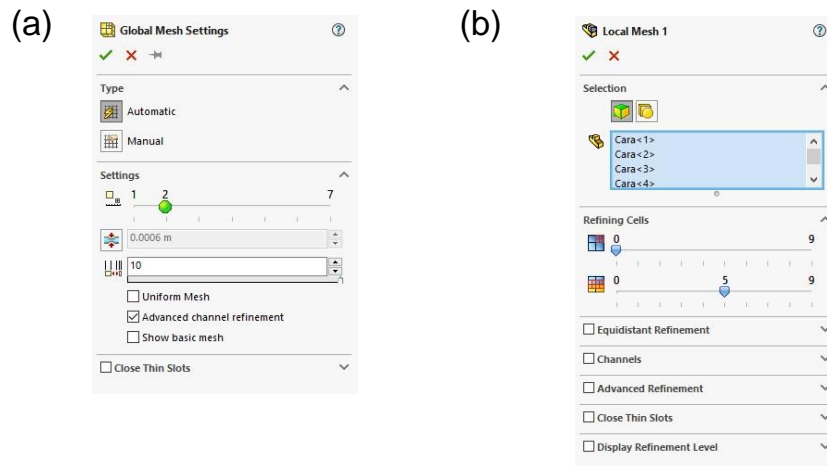
**Figura 21.** Representación gráfica de los dos tipos de análisis del flujo que nos da a elegir SolidWorks (a) Análisis de tipo interno. (b) Análisis de tipo externo. Fuente: Solidworks Flow Simulation (2020).

Flow Simulation permite utilizar dos formas de refinar la discretización del sólido: mediante la opción predeterminada *Global Mesh Settings* (Figura 22a) y la opción específica *Local Mesh* (Figura 22b).

En el caso de la opción predeterminada *Global Mesh Settings* (Figura 22a), se utiliza la configuración automática y se opta por un bajo refinamiento (2/7). Aunque este refinamiento sea bajo, se aumenta la relación de celdas hasta el máximo (configuración que está por encima de *Uniform Mesh*). En otras palabras, dentro del espacio a discretizar, los paralelepípedos más alejados del sólido son más grandes que los que están más cerca del límite de geometría. Esto nos permite conseguir un alto refinamiento en las celdas de fluido cercano al sólido y un bajo refinamiento en las celdas de fluido lejano a este. Además, se marca la opción *Advanced channel refinement* que asegura que los canales estrechos (como los espacios entre filamentos de las mallas de captación con coeficientes de sombra elevados) se resuelvan con un número suficiente de celdas como para predecir el comportamiento del flujo.

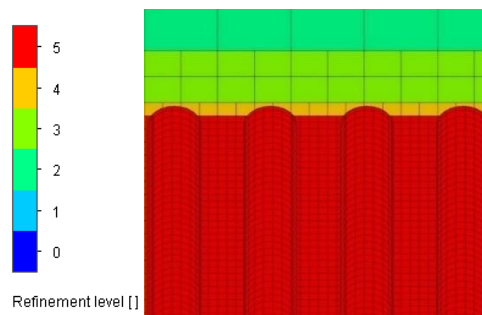
La otra opción, *Local Mesh* (Figura 22b) tiene un alto nivel de configuración. Sin embargo, solo se usará la parte de *Refining Cells*. Esto se ha decidido así puesto que el resto son configuraciones que, a no ser que se utilicen al máximo, no se va a conseguir un gran refinamiento de las celdas. Además, los requerimientos de potencia de cálculo aumentan considerablemente y, por lo tanto, no resulta óptimo. Dentro de la configuración de *Refining Cells* tenemos 2 opciones de refinamiento: la primera discretiza las celdas de fluido y la segunda discretiza las celdas de fluido que están en contacto con el sólido. Como nuestro objetivo es enfocarnos en el refinamiento de las celdas que están cerca del límite de geometría del sólido, se opta por dejar en 0/9 el refinamiento de la primera opción y aumentar todo lo que nos permite el ordenador el refinamiento de la segunda opción, hasta 5/9.





**Figura 22.** (a) Configuración de la opción predeterminada “Global Mesh Settings” ;(b) Configuración de la opción específica “Local Mesh”. Fuente: Solidworks Flow Simulation (2020).

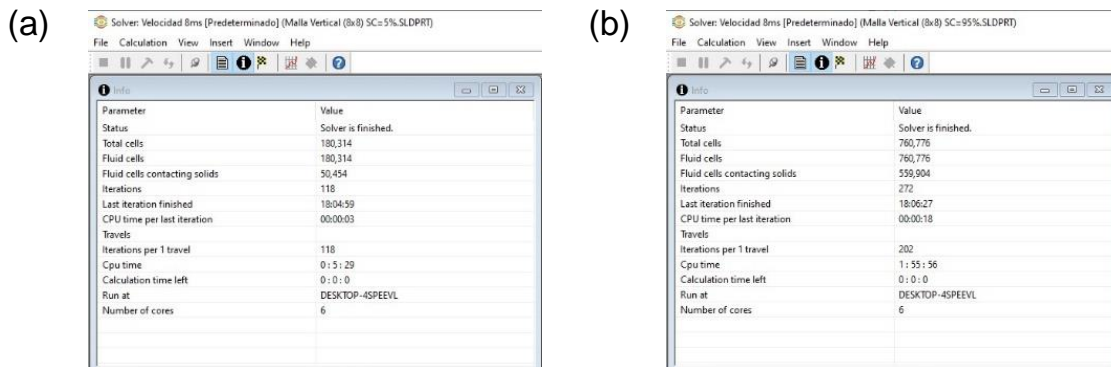
Con esta configuración de refinamiento se consigue una discretización suficientemente precisa como para que las celdas definan correctamente el sólido. Como ejemplo se presenta el refinamiento de una malla tipo arpa de  $SC=55\%$  (Figura 23). En esta se observa un alto refinamiento en las zonas donde están los hilos y entre los espacios que estos dejan. En cambio, cuanto más nos alejamos del sólido menor es el refinamiento.



**Figura 23.** Refinamiento de las celdas de una malla tipo arpa de  $SC=55\%$ . Rango de discretización de 0 hasta 5 definido por la opción de *Local Mesh*. Fuente propia.

Por último, se comenta acerca de los tiempos de simulación. Estos varían dependiendo del número de celdas a calcular. Si la malla tiene un alto  $SC$ , significará que el software tendrá que aplicar el refinamiento a muchos filamentos aumentando el número de celdas y en consecuencia, el tiempo de cálculo.

Como se puede observar en la *Figura 24*, los tiempos de cálculo (CPU time) varían considerablemente dependiendo del número de filamentos. Mientras que para una malla de captación de alta porosidad ( $SC=5\%$ ) los tiempos de cálculo rondan los 5 minutos, para una malla de captación de baja porosidad ( $SC=95\%$ ), al tener un mayor número de filamentos, los tiempos son de aproximadamente 2 horas.



**Figura 24.** Tiempo de simulación. (a)  $SC=5\%$ ; (b)  $SC=95\%$ . Fuente propia.

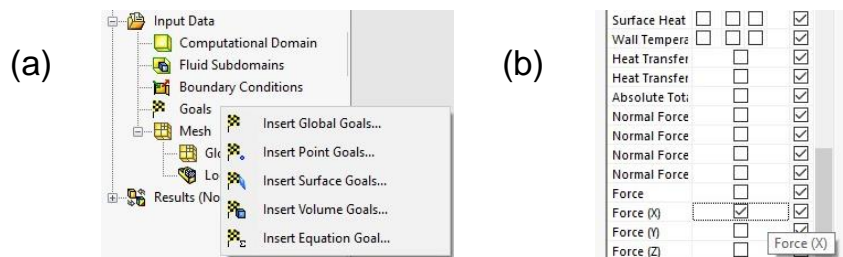
### 2.3. Método para la obtención de la fuerza de arrastre

Para obtener la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) de las mallas de captación mediante Flow Simulation hay que establecer una meta específica antes de resolver el cálculo. Entre las diferentes opciones de Flow Simulation existe una llamada *Goals*, que te da la opción de insertar diferentes tipos de metas. En nuestro caso se escoge *Global Goal* (Figura 25a), puesto que la malla de captación a medir no tiene marco.

Dentro de *Global Goal* el programa nos da a elegir entre diferentes variables, una de ellas, la fuerza (Figura 25b). Esta fuerza se puede obtener para cualquiera de los 3 ejes del sistema. Como el objetivo es  $F_D$ , se elige determinar la fuerza para el eje paralelo al flujo (perpendicular a la sección de la malla de captación).

El valor que se escoge al finalizar la simulación es el que se obtiene en la última iteración del cálculo *value* y no el *averaged value*. Esa elección se basa en que el *averaged value* es el promedio de cada resultado obtenido en las iteraciones. En otras palabras, si la simulación necesita 180 iteraciones, el *averaged value* será el promedio de 180 resultados de  $F_D$ . Esto significa que tiene en cuenta los

resultados obtenidos en las primeras iteraciones, que están muy alejados del valor real.



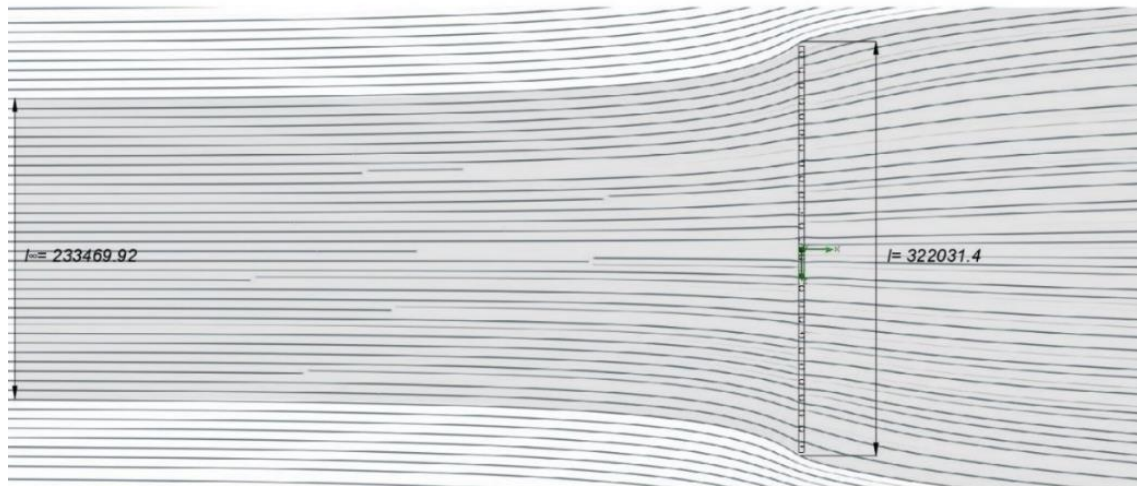
**Figura 25.** Procedimiento para obtener la Fuerza de arrastre. (a) Elección de “Insert Global Goals”; (b) Elección de “Force (X)”. Fuente propia.

## 2.4. Método para la obtención del lado del flujo libre

El caso de la obtención del lado del flujo libre ( $l_{\infty}$ ) es totalmente diferente, principalmente porque se mide después de resolver los cálculos y no antes, como en el caso de  $F_D$ . El criterio para medir este parámetro viene explicado en el artículo de Azeem et al. (2020). Se trata de medir la longitud de las líneas de flujo de  $l_{\infty}$  (región donde el flujo no está perturbado por la influencia de la malla de captación) tomando como referencia las líneas del flujo más cercanas al exterior de la sección de la malla de captación ( $l$ ) (Figura 26).

En nuestro caso primero se obtuvo las líneas de flujo y se tomó una captura de pantalla, ya que el SolidWorks no nos permite medir sobre un plano de resultados (plano visual, no “sólido”). Posteriormente se utilizó AutoCAD (software de diseño asistido por computadora para dibujo 2D y modelado 3D) para medir sobre la captura las distancias entre las líneas de flujo. Por último, como las distancias medidas mediante AutoCAD son “ficticias”, se calcula mediante una regla de tres con los datos de la *Figura 26* para obtener el valor real de  $l_{\infty}$ .

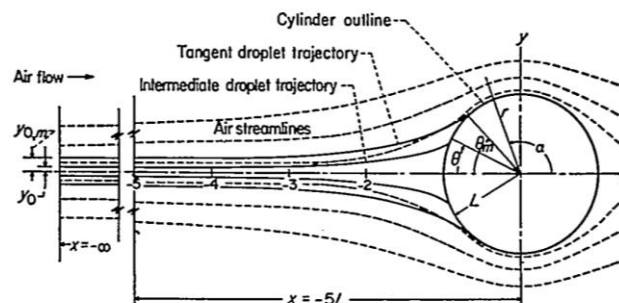
$$l_{\infty} = 80 \text{ mm} \cdot \frac{233469.92}{322031.40} = 58 \text{ mm}$$



**Figura 26.** Vista en planta de las líneas del flujo del aire alrededor de una malla de captación cuadrícula de  $SC=55\%$  y de sección  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ . Lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) y lado del flujo cercano a la malla ( $l$ ). Fuente propia.

## 2.5. Método para la obtención de la velocidad del flujo que atraviesa la malla de captación

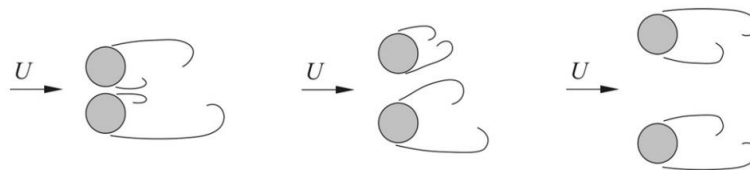
Para el caso de la obtención de la velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $u$ ) no existe un criterio fijo de cómo se debe medir. Por ello se ha tomado medidas a diferentes distancias respecto a la cara del filamento, tomando como referencia el informe de Brun et al. (1955), que detalla las trayectorias que sigue el flujo cuando se aproxima a un cilindro. Como se observa en la *Figura 27*, se diferencian 4 puntos separados desde el centro del cilindro a  $2L$ ,  $3L$ ,  $4L$  y  $5L$  (siendo  $2L=d$ , el diámetro del cilindro).



**Figura 27.** Trayectorias del flujo cuando se aproxima a un cilindro. Fuente: Brun et al. (1955).

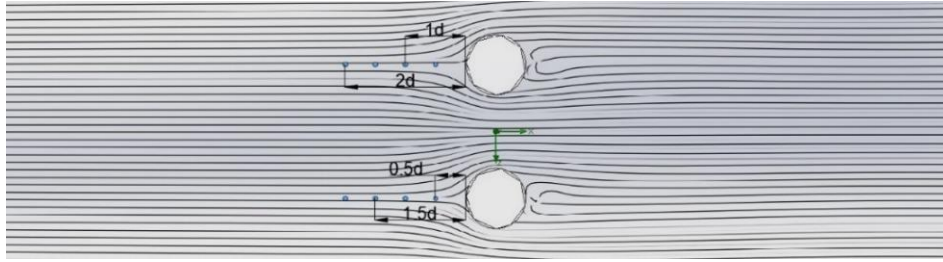
Si se observa detalladamente la *Figura 27* se puede notar que a partir de la distancia  $3L$  hacia la derecha ( $-2L$  y  $-L$ ), las líneas de flujo comienzan a abrirse rodeando el cilindro. Esto debería implicar que se obtengan resultados de  $u$  menores en  $-2L$  y  $-L$  respecto a los otros puntos ( $-3L$ ,  $-4L$  y  $-5L$ ), lo cual se comprobará en los resultados posteriores. Además, debemos tener en cuenta que medir  $u$  en una malla de captación es diferente a medir  $u$  en un cilindro independiente, ya que la malla está compuesta por más de 1 filamento cilíndrico y por lo tanto,  $u$  varía dependiendo en qué hilo se mida. Por lo tanto, en estos casos, habría que tener en cuenta la influencia de los distintos filamentos y la distancia entre ellos en la velocidad.

Finalmente, para abordar estos estudios se escoge como punto de medida los cilindros que están más cerca del centro de la malla. Esto se decide así apoyándose en el estudio de Sumner (2010), que estudia la relación que existe entre la distancia entre ejes de cilindros con la curvatura de las líneas de flujo. Cuando la distancia entre ejes de cilindros es menor, la velocidad de las líneas de flujo que se encuentra entre los hilos disminuye, mientras que la velocidad en los extremos se mantiene constante (*Figura 28*). Por lo tanto, si se toma un promedio de la velocidad detrás de los hilos de la malla midiendo la velocidad para cada cilindro, se obtendrían resultados falseados por la  $u$  en los hilos más cercanos a los extremos de la malla.



**Figura 28.** Dos cilindros vistos desde planta con diferentes separaciones entre ejes de hilo. Fuente: Sumner (2010).

A modo de ejemplo de cómo se mide  $u$ , se representan las líneas de flujo para que sea más visual. Los valores de velocidad se miden en los puntos que se indican (tomando como longitud de referencia el diámetro de hilo de la malla) en la *Figura 29*.



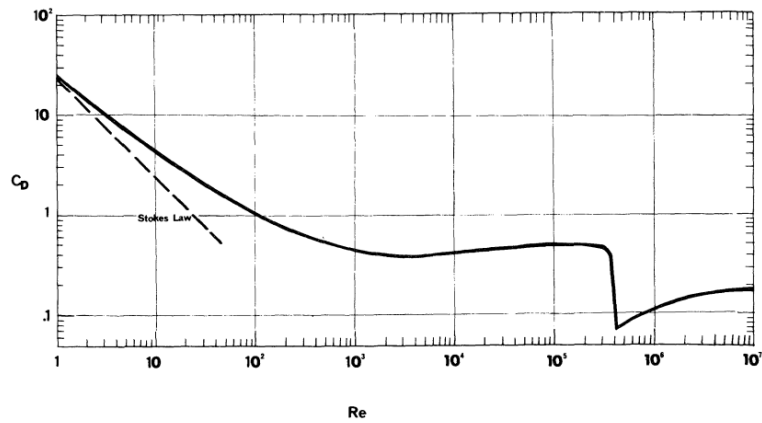
**Figura 29.** Distancias desde la cara del cilindro de los cuatro puntos a medir para obtener  $u$ . Nótese que las mediciones de  $u$  están justo delante de los cilindros que se encuentran en el centro de la malla de captación. Fuente propia.

### 3. VERIFICACIÓN DE LAS SIMULACIONES

El objetivo de este apartado es verificar los estudios de simulación que se realizan. Para ello se reproduce el estudio de una esfera lisa de Clift et al. (2005) y de esta forma observar si el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), que se obtiene mediante las simulaciones, coincide. En otras palabras, se comparará el coeficiente de arrastre teórico ( $C_{D,teórico}$ ), que se obtiene de la gráfica de la *Figura 30* con el coeficiente de arrastre de las simulaciones ( $C_{D,simulación}$ ), que se obtiene simulando una esfera lisa a un determinado número de Reynolds ( $Re$ ). Si los resultados coinciden, se entenderá que el procedimiento y el refinamiento descrito en el anterior apartado es el adecuado. Por lo tanto, los diversos resultados que se obtendrán para las distintas mallas de captación de niebla deberían estar en un rango de valores aceptables.

#### 3.1. Coeficiente de arrastre de una esfera lisa

El  $C_D$  de una esfera varía en función de  $Re$ . En la *Figura 30* se representan dos líneas: la línea de trazo continuo describe  $C_D$  para una esfera lisa mediante las ecuaciones de Clift et al. (2005) y la línea de trazo discontinuo mediante la ley de Stokes. Se tendrá en cuenta la línea continua ya que, además de ser más precisa, permite conocer el valor de  $C_D$  para un rango de  $Re=10^2-10^7$ .



**Figura 30.** Variación del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) de una esfera lisa en función del número de Reynolds ( $Re$ ). La línea de trazo continuo corresponde a las ecuaciones de Clift et al. (2005) y la línea de trazo discontinuo a la ley de Stokes. Fuente: Clift et al. (2005).

Se comienza por la obtención de  $C_{D,teórico}$ . Para ello se calcula  $Re$  de la esfera para las siguientes condiciones de trabajo (valores de ejemplo para realizar la comparación):

- Diámetro de la esfera:  $D_{esfera}=5$  cm.
- Velocidad del flujo libre (flujo no perturbado por la influencia de la esfera):  $u_{\infty}=8$  m s<sup>-1</sup>.
- Temperatura y presión:  $T=20$  °C y  $P=1$  atm.

El número de Reynolds para una esfera se define mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot D_{esfera}}{\nu} \quad (2.1)$$

Se usa la tabla de Propiedades del aire a 1 atm de presión (Tabla 2) para hallar la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) y la densidad del aire ( $\rho$ ):



**Tabla 2.** Propiedades del aire a 1 atm de presión. Fuente: ÇENGEL et al. (2006).

Propiedades del aire a 1 atm de presión							
Temp. <i>T</i> , °C	Densidad $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Calor específico $c_p$ J/kg · K	Conductividad térmica $k$ , W/m · K	Difusividad térmica $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s	Viscosidad dinámica $\mu$ , kg/m · s	Viscosidad cinemática $\nu$ , m <sup>2</sup> /s	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177

$$\nu(20^\circ\text{C}) = 1.516 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\rho(20^\circ\text{C}) = 1.204 \text{ kg m}^{-3}$$

y se procede a calcular  $Re$ :

$$Re = \frac{8 \text{ m s}^{-1} \cdot 0.05 \text{ m}}{1.516 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}} = 26385.22$$

Conocido el número de Reynolds, se puede obtener  $C_{D,teórico}$  de una esfera lisa a partir de la *Figura 30*. Para una esfera lisa con un  $Re=2.64 \cdot 10^4$ , el coeficiente de arrastre teórico es  $C_{D,teórico}=0.45$ .

Por último, se simula la esfera con las mismas condiciones de trabajo descritas anteriormente, obteniéndose así la fuerza de arrastre  $F_D=0.0358 \text{ N}$ . Utilizando la definición general del coeficiente de arrastre, obtenida a partir de la *ecuación 1.14* descrita en el *capítulo 1* se calcula  $C_{D,simulación}$ :

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho v_\infty^2} \tag{2.2}$$

Como el área frontal de una esfera es  $A=\pi \cdot (D_{esfera}/2)^2$ :

$$C_D = \frac{2 \cdot 0.0358 \text{ N}}{\pi \cdot (0.025 \text{ m})^2 \cdot 1.204 \text{ kg m}^{-3} \cdot (8 \text{ m s}^{-1})^2} = 0.47$$



Mediante las simulaciones se obtiene  $C_{D,simulación}=0.47$ , próximo al valor teórico ( $C_{D,teórico}=0.45$ ), lo que confirmaría que las simulaciones proporcionan valores adecuados y que, por lo tanto, el procedimiento seguido se puede suponer como válido.

## **4. DISEÑO DEL MARCO DE LA MALLA DE CAPTACIÓN A PARTIR DE ESTUDIOS DE SIMULACIÓN**

En los estudios con simulaciones numéricas no se necesita un marco para las mallas de captación. Esto, además, nos permite obtener la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) que está impactando sobre los filamentos, obteniendo resultados del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) más precisos en estudios donde se relaciona, por ejemplo, con el coeficiente de sombra ( $SC$ ). Sin embargo, las mallas de captación de los ensayos experimentales requieren de un marco para que los hilos de la malla estén en tensión y para que, al utilizar un túnel de viento, se facilite que la malla de captación esté centrada respecto a la cámara de ensayos.

Dado que el software de Dinámica de Fluidos Computacional permite mayor libertad a la hora de diseñar (más allá de las limitaciones técnicas en el proceso de cálculo), se deben de tener en cuenta las restricciones experimentales. Una de estas restricciones viene determinada por la sección de la cámara de ensayos, siendo esta  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Esto significa que el marco debe tener una sección menor a  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ , ya que el flujo de aire debe pasar alrededor de la malla de captación. Por último, se requiere que exista la misma holgura en todas las caras, por lo tanto, se asume que el marco será de geometría cuadrada.

### **4.1. Sección exterior del marco**

El objetivo de este subapartado es elegir una sección exterior adecuada del marco de la malla de captación. Esta sección exterior debe ser lo mayor posible, teniendo en cuenta que la perturbación del flujo debido a las paredes interiores de la cámara de ensayos no debe afectar de forma significativa a la malla. Esta interacción

debería ser lo menor posible para que las líneas de flujo se comporten lo más parecido a como lo harían en la realidad.

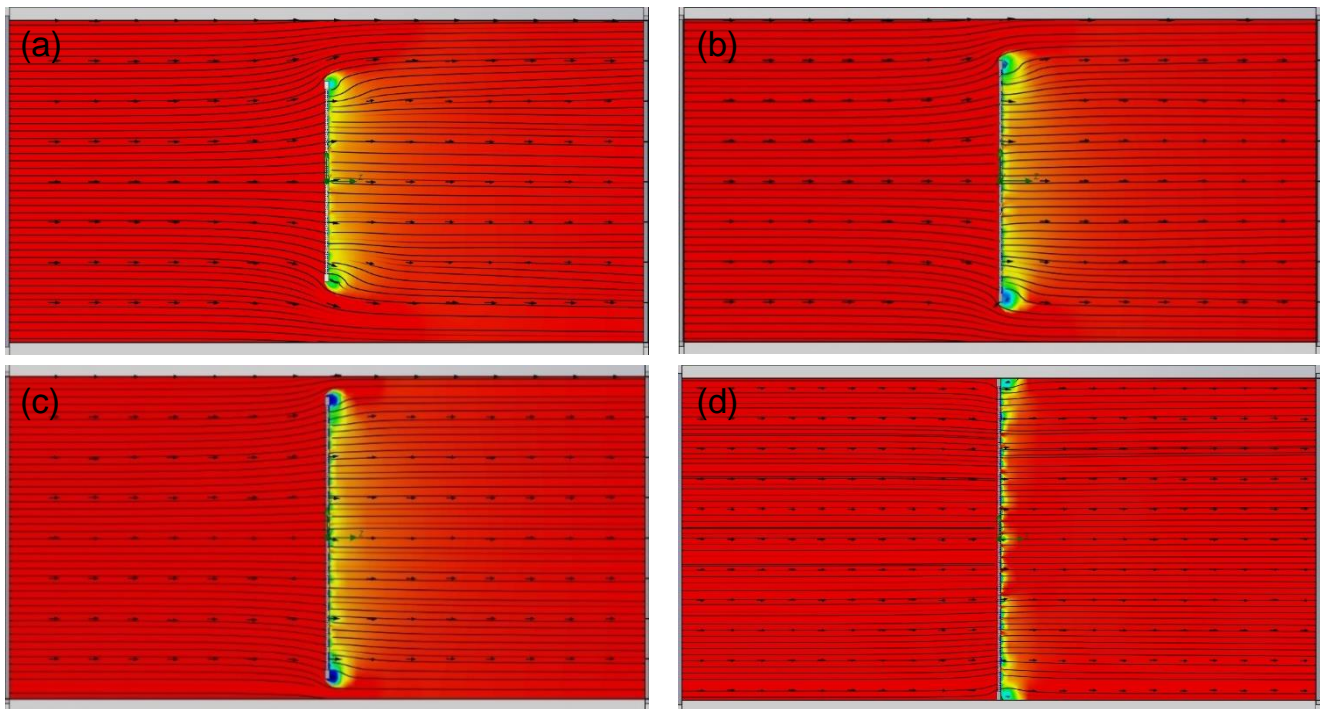
Para escoger esta sección exterior se debe estudiar cómo se comportan las líneas de flujo alrededor de una malla de captación en el interior de una cámara de ensayos (con las mismas dimensiones que la que se encuentra en el ICIA). Para ello se simularán distintas secciones de marco y se representará líneas de flujo sobre una distribución de presiones (en color), ya que la variable fundamental que se medirá en los ensayos experimentales será la caída de presión ( $\Delta P$ ).

La sección interior de la cámara de ensayos mide  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ , por lo tanto, este será el límite para la sección exterior del marco. Se realizarán estudios de simulación para las siguientes secciones cuadradas:  $12.5 \times 12.5 \text{ cm}^2$ ,  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ,  $17.5 \times 17.5 \text{ cm}^2$  y como caso límite  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . En este caso se tuvo en cuenta las siguientes condiciones de trabajo:

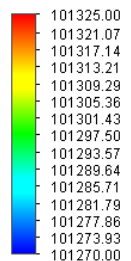
- Velocidad del flujo libre (aire):  $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$ . Valor que se encuentra entorno a la velocidad máxima de viento que se va a utilizar.
- Coeficiente de sombra:  $SC=75\%$ . Coeficiente de sombra tipo que se utilizará en los estudios experimentales.
- Temperatura y presión:  $T=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $P=1 \text{ atm}$ . Valores similares a las condiciones ambientales del laboratorio de hidráulica del ICIA, donde se encuentra el túnel de viento.
- Diámetro del hilo:  $d=1 \text{ mm}$ . Dimensión común para mallas de este tamaño. Se escogerán hilos cilíndricos.

A la hora de elegir la sección del marco se analiza las líneas de flujo alrededor de la malla de captación ya que, exceptuando el caso límite, la caída de presión es muy parecida en los otros tres casos estudiados. Cuanto mayor es la sección exterior del captador, menos holgura existe respecto a la sección de la cámara de ensayos y, por lo tanto, muchas de las líneas de flujo exteriores que rodean la

mailla de captación se ven cada vez más afectadas por las paredes interiores de la cámara de ensayos. Esta influencia se puede observar en la *Figura 31*, a excepción del caso límite, donde todas las líneas de flujo son forzadas a pasar a través de los filamentos de la mailla al no existir holgura.



**Figura 31.** Líneas de flujo y distribución de presiones para una mailla de captación de diferente sección y con un coeficiente de sombra  $SC=75\%$ . Se muestran mallas de captación desde una perspectiva de planta dentro de un dominio acotado (cámara de ensayos como la del túnel). La distribución está coloreada según un rango de presión comprendido entre 101325 y 101270 Pa. (a) 12.5 x 12.5 cm<sup>2</sup>; (b) 15 x 15 cm<sup>2</sup>; (c) 17.5 x 17.5 cm<sup>2</sup>; (d) 20 x 20 cm<sup>2</sup>. Fuente propia.



Para conseguir una sección del marco ideal se tiene que obtener una holgura de la cámara de ensayos suficiente, como para que las líneas de flujo que rodean el captador no estén afectadas por el contorno de la cámara de ensayos. Esta holgura ideal no es posible de obtener dentro de un dominio acotado como es el de la cámara de ensayos, pero sí que se puede obtener una sección donde esta influencia sea despreciable.

En el caso de la *Figura 31c* (marco de sección 17.5 x 17.5 cm<sup>2</sup>) donde hay una holgura de 1.25 cm en cada lado, las líneas de flujo exterior llegan a impactar con la pared de la cámara de ensayos. En cambio, en la *Figura 31a y 31b*, donde la

holgura es mayor, la influencia es casi despreciable. Como se precisa una sección del marco lo mayor posible, se escoge la sección de  $A_{\text{ext}}= 15 \times 15 \text{ cm}^2$ , la cual se utilizará para las mallas de captación en los ensayos experimentales del *capítulo 3*.

#### 4.2. Sección interior y espesor del marco

El marco debe de ser lo suficientemente rígido como para que sea capaz de mantener en tensión los hilos de la malla. Además, es importante asegurarse de que no interfiera con el flujo del viento y no obstaculice la medición. Por ello el marco no debe ser muy grande respecto al área que ocupa la malla y al mismo tiempo debe ser capaz de resistir velocidades de viento de hasta  $8 \text{ m s}^{-1}$ .

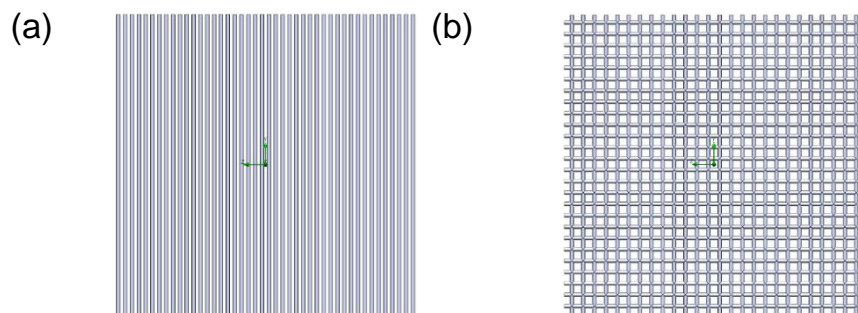
La sección exterior del marco de la malla de captación es de  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ . Para una sección exterior de estas dimensiones, se toma un ancho entre la sección exterior e interior del marco de  $(A_{\text{ext}} - A_{\text{int}})=5 \text{ mm}$  (Figura 32a), dando como resultado una sección interior de  $14 \times 14 \text{ cm}^2$ . Por otro lado, se toma un espesor de  $2.5 \text{ mm}$  (Figura 32b). Con estas medidas se asegura que el marco va a ser lo suficientemente rígido como para que los hilos de la malla permanezcan tensionados y, además, que el marco no interfiera con el flujo del viento excesivamente. Por último, es muy importante destacar que para que la malla quede centrada en la cámara de ensayos se necesita sujetarla por los 4 extremos. Para ello se le diseñan cuatro orificios de diámetro  $\varnothing=3 \text{ mm}$ , ya que estará sujeta por bridas de  $2,5 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ .



**Figura 32.** Marco de una malla de captación de sección exterior  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  con orificios en los extremos de diámetro  $\varnothing=3 \text{ mm}$ . (a) Alzado del marco donde se puede observar acotado el ancho entre la sección transversal exterior e interior; (b) vista lateral del marco donde se puede observar acotado el espesor del marco. Fuente propia.

## 5. PARÁMETROS AERODINÁMICOS A PARTIR DE ESTUDIOS DE SIMULACIÓN

Una vez explicado el procedimiento que se utiliza para obtener los resultados, se procederá a obtener la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y el lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) mediante simulaciones. Se distinguirá entre dos tipos de disposición de los filamentos. Caso 1: malla tipo arpa (formada por hilos paralelos verticales, Figura 33a); Caso 2: malla cuadrícula (hilos cruzados verticales y horizontales, Figura 33b), con coeficientes de sombra que varían desde  $SC=5\%$  a  $SC=95\%$  en intervalos de  $10\%$ .



**Figura 33.** (a) Malla tipo arpa sin marco de  $SC=55\%$ . (b) Malla cuadrícula sin marco de  $SC=55\%$ . Fuente propia.

Para este estudio, las hipótesis de trabajo son las siguientes:

- Área frontal de la malla de captación (sin marco):  $A=80 \times 80 \text{ mm}^2$  (área frontal que nos permite simular con un mayor refinamiento).
- Velocidad del flujo libre:  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  (velocidad del viento alta) y  $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$  (velocidad del viento frecuente en campo).
- Diámetro de hilo:  $d=1 \text{ mm}$  (cilíndrico). Diámetro habitual en estudios aerodinámicos.
- Temperatura y presión (aire):  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $P=1 \text{ atm}$ . Condiciones ambientales similares al laboratorio de hidráulica del ICIA.

Para mayor resolución y como apoyo a la hora de entender los resultados, se reproducen las líneas de flujo alrededor de la malla con su respectiva distribución

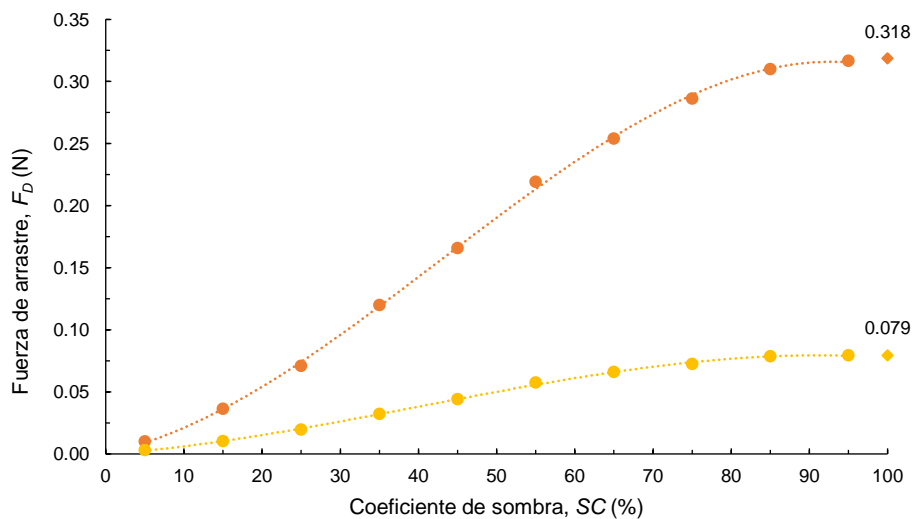
de velocidades y presiones definida por contornos de distintos colores (vista en planta). Estos estudios solo se realizarán para el caso de  $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$  a modo de simplificar las ilustraciones.

## 5.1. Caso 1. Malla tipo arpa

### 5.1.1. Fuerza de arrastre

Se observa en la *Figura 34* que la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) en los dos casos de la velocidad del flujo libre ( $u_{\infty}$ ) aumenta en función del coeficiente de sombra (SC), tal y como indican las dos líneas de tendencia. Además, parece que este aumento es menos significativo a partir de  $SC=85\%$ , aplanándose hasta el valor máximo ( $SC=100\%$ ).

Por otro lado, estos resultados respetan la definición de la fuerza de arrastre (ecuación 1.14), ya que para un  $SC=100\%$  la  $F_D$  crece el cuádruple, mientras que  $u_{\infty}$  es el doble. Esto es así porque la velocidad está al cuadrado.

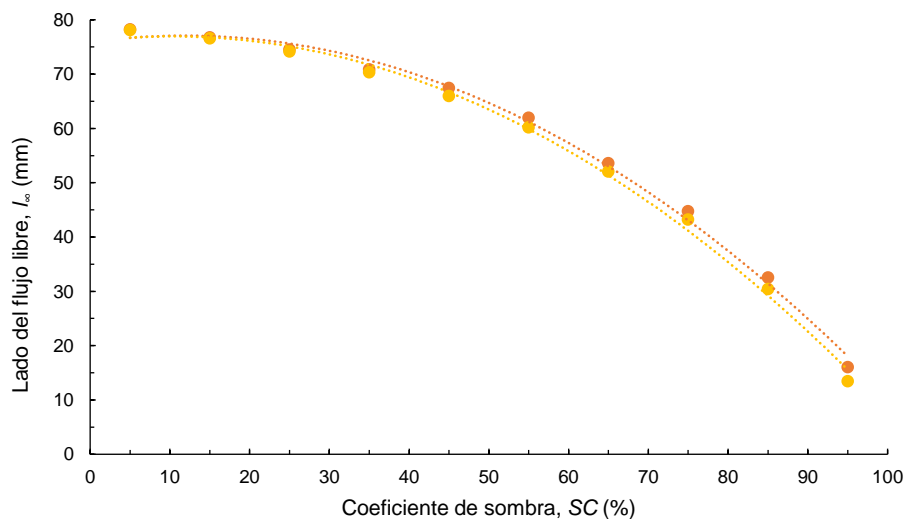


**Figura 34.** Variación de la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) en función del coeficiente de sombra (SC) obtenida mediante simulaciones numéricas para una malla tipo arpa. Puntos en naranja oscuro ( $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y puntos en naranja claro ( $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Se añade un punto adicional para cada función,  $SC=100\%$  (placa opaca plana). Fuente propia.

### 5.1.2. Lado del flujo libre

En este caso (Figura 35), se observa que el lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) en los dos casos de la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) disminuye en función del coeficiente de sombra (SC), siguiendo la tendencia que se representa en la *Figura 35*. El  $l_\infty$  disminuye principalmente debido a que la distancia entre ejes de hilo ( $d$ ) es cada vez menor cuanto mayor es SC, ya que el diámetro de hilo ( $d$ ) para este caso es constante ( $d=1$  mm). Esto provoca que las líneas de flujo tiendan cada vez más a rodear la malla y que, por lo tanto, la curvatura de estas sea cada vez mayor dando como consecuencia valores de  $l_\infty$  más bajos.

Por otra parte, se observan pequeñas diferencias entre los resultados de  $l_\infty$  obtenidos para  $u_\infty=8$  m s<sup>-1</sup> (puntos de color naranja oscuro) y  $u_\infty=4$  m s<sup>-1</sup> (puntos de color naranja claro), que va creciendo en función de SC hasta llegar a una diferencia máxima en SC=95%. Esto nos da a entender que  $l_\infty$  tiene cierta dependencia de  $u_\infty$  y, por lo tanto, apunta a que las líneas de flujo tienden más a bordear la malla a bajas velocidades que a altas velocidades.

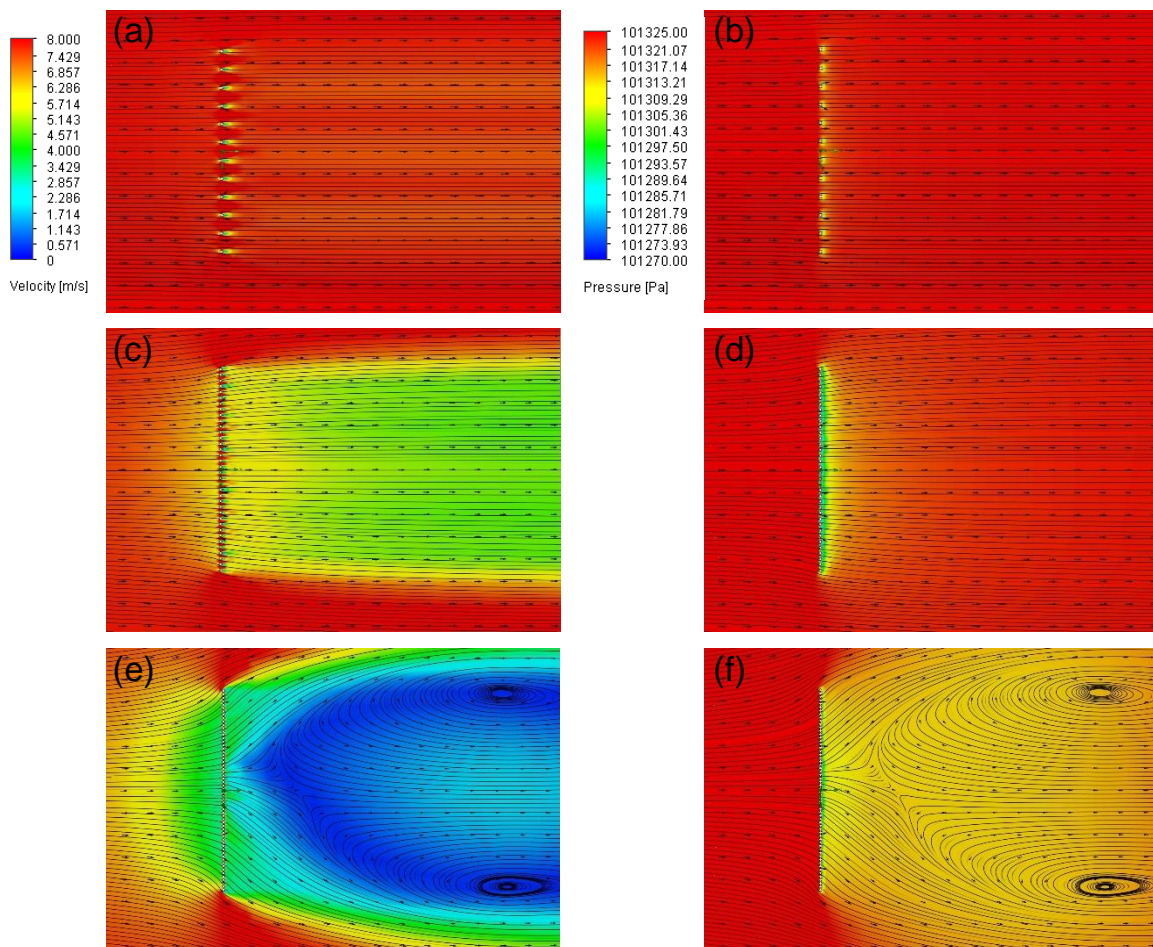


**Figura 35.** Variación del lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) en función del coeficiente de sombra (SC) obtenido mediante simulaciones numéricas para una malla tipo arpa. Puntos en naranja oscuro ( $u_\infty=8$  m s<sup>-1</sup>) y puntos en naranja claro ( $u_\infty=4$  m s<sup>-1</sup>). Fuente propia.



### 5.1.3. Líneas de flujo o de corriente

Según los estudios de simulación realizados se observa un aumento de la turbulencia de las líneas de flujo posteriores a la malla cuanto mayor es el coeficiente de sombra,  $SC$  (Figura 36). Esto se debe a un mayor desprendimiento de la capa límite a medida que aumenta  $SC$ , lo que provoca la aparición de una estela de turbulencia en la parte posterior a la malla.



**Figura 36.** Líneas de flujo para mallas tipo arpa de sección  $A=80 \times 80 \text{ mm}^2$  con diferentes coeficientes de sombra y con una velocidad del flujo libre  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  (perspectiva de planta). En la columna de la izquierda se ilustra la distribución de la velocidad y en la derecha la de la presión. (a)-(b)  $SC=15\%$ ; (c)-(d)  $SC=45\%$ ; (e)-(f)  $SC=75\%$ . Fuente propia.

La disminución de la distancia entre ejes de hilo ( $d'$ ) provoca que un mayor número de líneas de flujo no atraviesen la malla, sino la bordeen. Se observa cómo las líneas de flujo se curvan cada vez más desde el centro hasta el exterior de la malla, donde se aprecia el desprendimiento de la capa límite. Esto provoca una

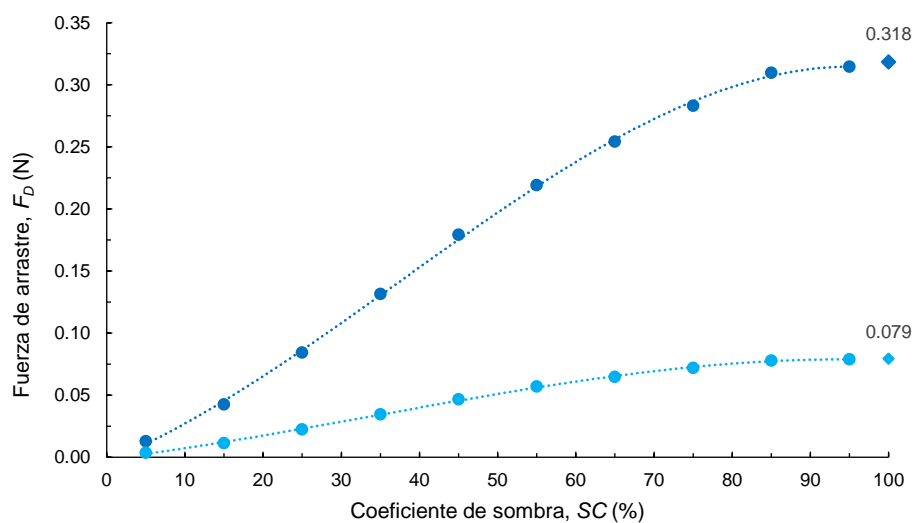


zona de bajas velocidades en la parte central a la salida de la malla que es mayor cuanto mayor es  $SC$ , dando lugar a vórtices (Figura 36e y f). Se puede apreciar, además de una mayor caída de presión ( $\Delta P$ ), debido a que la presión a la salida de la malla ( $P_s$ ) decrece (Figura 36f), una mayor disminución de la velocidad a la salida de la malla ( $u \approx 0 \text{ m s}^{-1}$ ) en casos de  $SC$  mayores (Figura 36e). Además, el aumento de  $\Delta P$  se puede explicar matemáticamente, puesto que  $\Delta P = F_D/A$ . Al aumentar el  $SC$ , la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) aumenta y el área frontal de la malla de captación ( $A$ ) se mantiene constante (como se observa en el apartado 5.1.1), dando como resultado que la  $\Delta P$  aumente proporcionalmente a  $F_D$ .

## 5.2. Caso 2. Malla cuadrangular

### 5.2.1. Fuerza de arrastre

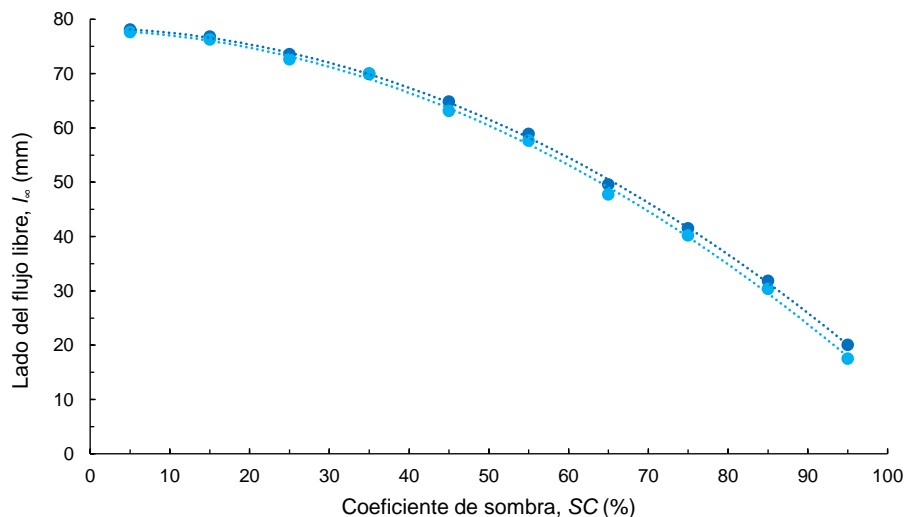
En este caso, donde la disposición de filamentos de la malla es cuadrangular, se observa en la *Figura 37*, al igual que en el *Caso 1*, que la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) aumenta en función del coeficiente de sombra ( $SC$ ) y que, efectivamente, la  $F_D$  que se obtiene para  $u_\infty = 4 \text{ m s}^{-1}$  es aproximadamente el cuádruple que la que se obtiene para  $u_\infty = 8 \text{ m s}^{-1}$ . Además, aunque a simple vista es difícil observar diferencias entre la *Figura 34* y la *Figura 37*, según resultados expuestos en el *Anexo 1*, la malla cuadrangular presenta una  $F_D$  mayor que la malla tipo arpa.



**Figura 37.** Variación de la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) en función del coeficiente de sombra ( $SC$ ) obtenida mediante simulaciones numéricas para una malla cuadrangular. Puntos en azul oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y puntos en azul claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Se añade un punto adicional para cada función,  $SC=100\%$  (placa opaca plana). Fuente propia.

### 5.2.2. Lado del flujo libre

Las tendencias del lado del flujo ( $l_\infty$ ) de una malla cuadrangular a diferentes velocidades del flujo libre ( $u_\infty$ ) son similares a las que se obtienen en el Caso 1 (Figura 35). En general, las líneas de flujo tienden a curvarse más cuando la disposición de filamentos de la malla es cuadrangular, excepto en  $SC=95\%$  donde es la disposición de filamentos de la malla tipo arpa en la que mayor curvatura se obtiene.



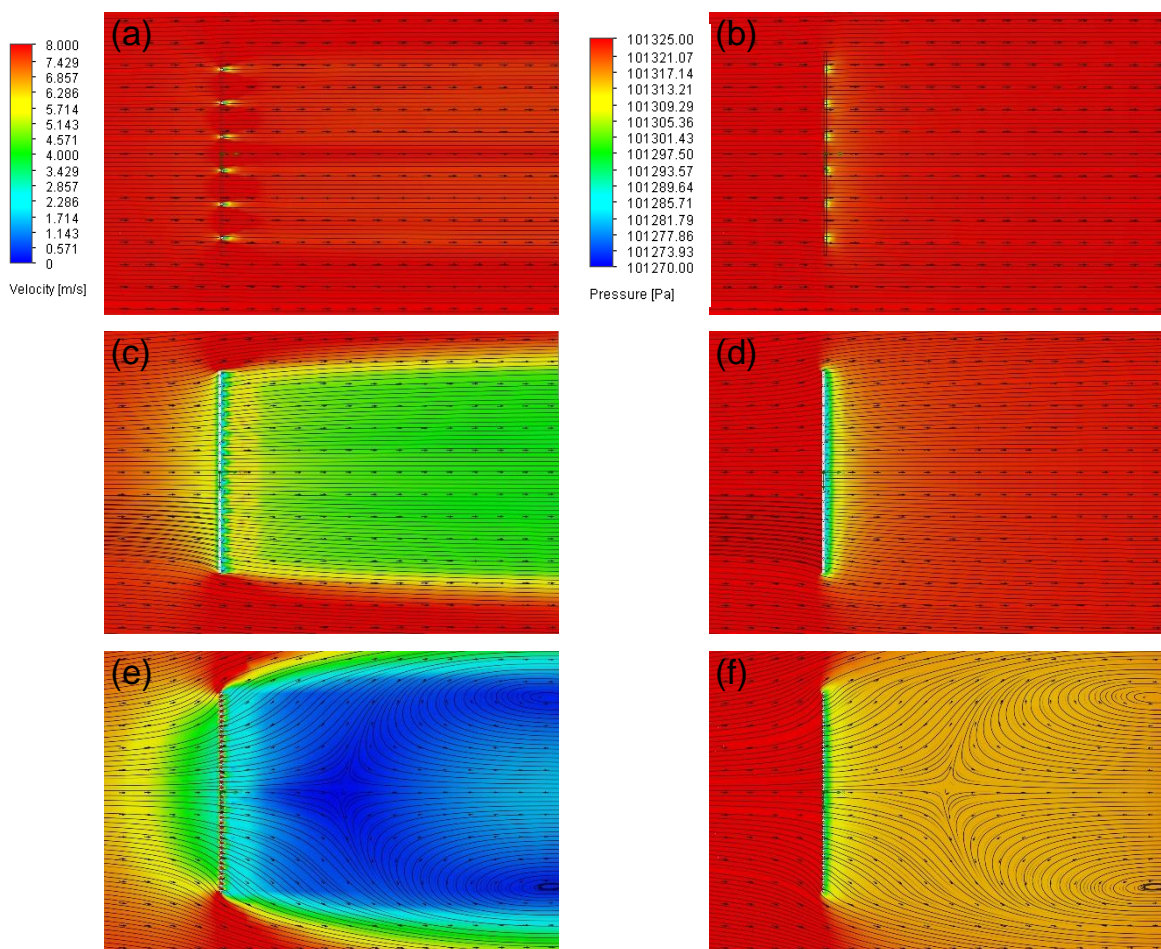
**Figura 38.** Variación del lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) en función del coeficiente de sombra ( $SC$ ) obtenido mediante simulaciones numéricas para una malla cuadrangular. Puntos en azul oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y puntos en azul claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Fuente propia.

### 5.2.3. Líneas de flujo o de corriente

En la *Figura 39* se observa la misma correlación con el aumento del coeficiente de sombra ( $SC$ ) que se observaba en el caso de la malla tipo arpa. No obstante, las líneas de flujo en altos  $SC$  de la malla cuadrangular son diferentes a las de la malla tipo arpa, siendo en el caso de la malla cuadrangular simétricas y más uniformes.

Esta mayor uniformidad se podría deber a la disposición de cuadrícula que presenta este tipo de mallas.

Por otra parte, se observa una mayor zona de bajas velocidades en las mallas cuadrículas para  $SC=75\%$ . La zona de bajas velocidades que se forma en las mallas tipo arpa comienza desde la zona central y se va propagando con una cierta curvatura hacia el exterior. En cambio, la producida por la malla cuadrícula se propaga de forma rectangular produciendo unos vórtices más alejados de la malla de captación.



**Figura 39.** Líneas de flujo para mallas cuadrículas de sección  $A=80 \times 80 \text{ mm}^2$  con diferentes coeficientes de sombra y con una velocidad del flujo libre  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  (perspectiva de planta). En la columna de la izquierda se ilustra la distribución de la velocidad y en la derecha la de la presión. (a)-(b)  $SC=15\%$ ; (c)-(d)  $SC=45\%$ ; (e)-(f)  $SC=75\%$ . Fuente propia.

## 6. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA AERODINÁMICA

Una vez obtenida la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y el lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) para los dos tipos de disposición de filamentos (tipo arpa y cuadrícula) a diferentes velocidades del flujo libre ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$ ), se calcula la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ). Para ello se determina previamente la fracción filtrada ( $\varphi$ ) y los coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) y de caída de presión ( $C_o$ ). Por último, este apartado se apoyará en las ecuaciones definidas en el *capítulo 1*.

### 6.1. Fracción filtrada

La fracción filtrada ( $\varphi$ ) se calcula utilizando los resultados obtenidos del lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) mediante la definición expuesta en el *capítulo 1*. Además, se puede calcular  $\varphi$  obteniendo la velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $v$ ).

$$\varphi = \frac{A_\infty}{A} = \frac{v}{v_\infty} \quad (2.3)$$

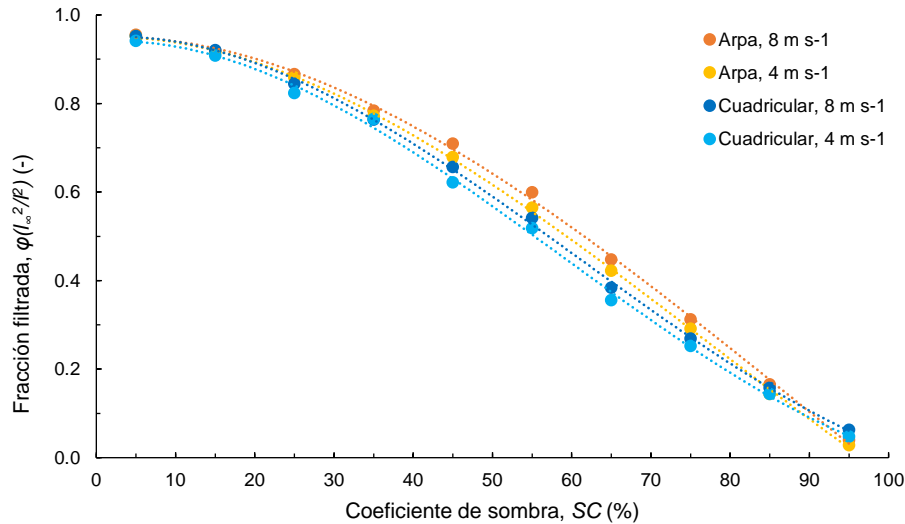
Como la malla es cuadrada el área es equivalente a:

$$\frac{A_\infty}{A} = \left(\frac{l_\infty}{l}\right)^2 \quad (2.4)$$

Los resultados de la *Figura 40* muestran que la fracción filtrada calculada con el lado del flujo [ $\varphi=(l_\infty/l)^2$ ] nos indica ciertas tendencias en los extremos (límites de  $\varphi$ ). En el límite de  $SC=100\%$  se observa que la fracción filtrada tiende a  $\varphi=0$  y en el límite de  $SC=0\%$  se tiende aproximadamente a  $\varphi=1$ . Esto nos da a entender que los resultados están definiendo correctamente el comportamiento que debe tener la fracción filtrada y que, por lo tanto, se pueden considerar válidos.

Analizando la disposición de los filamentos, se observa que la malla tipo arpa respecto a la malla cuadrícula permite que más flujo atraviese el captador. Además cuando la velocidad del flujo libre es mayor, más líneas de flujo atraviesan la malla. Esto se debe a que parte de las líneas de flujo al ir a mayores velocidades atraviesan la malla por inercia.

Por otra parte, la fracción filtrada nos indica como se comportará la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ). El caso de estudio que nos proporcione mayores resultados de  $\varphi=(I_\infty/l)^2$  para un mismo SC, será el que corresponda con una  $\eta_a$  mayor.



**Figura 40.** Variación de la fracción filtrada calculada con los lados del flujo [ $\varphi=(I_\infty/l)^2$ ] en función del coeficiente de sombra (SC) obtenida mediante simulaciones numéricas. Puntos de color naranja (malla tipo arpa): oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Puntos de color azul (malla cuadrada): oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Fuente propia.

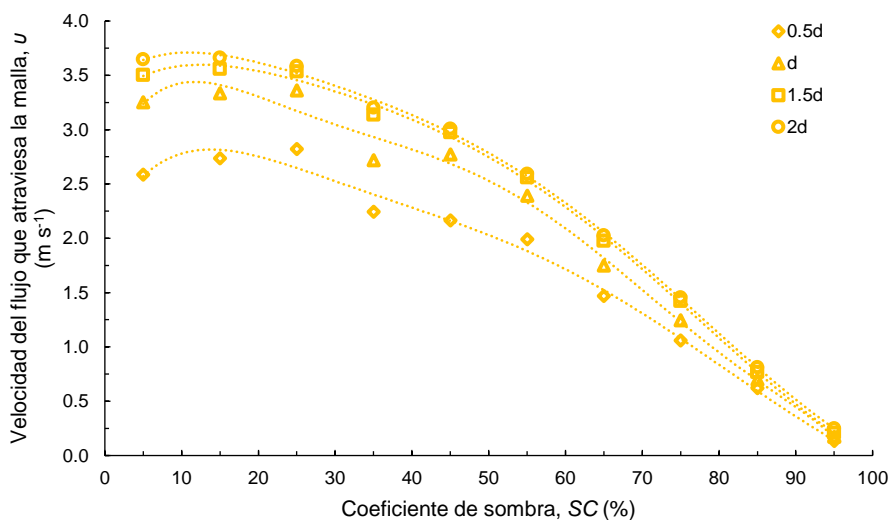
### 6.1.1. Validación de los resultados de la fracción filtrada

Como se explicó en el apartado 2.5, no existe un criterio fijo para obtener la velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $u$ ) y, por lo tanto, se deben tomar mediciones a diferentes distancias respecto a la cara del filamento. Con el objetivo de validar las medidas de  $u$ , se debe comparar la fracción filtrada calculada con las velocidades ( $\varphi=u/u_\infty$ ) respecto a  $\varphi=(I_\infty/l)^2$ . Con este propósito, se determinarán las distintas velocidades detrás de los hilos para el caso de una malla tipo arpa ( $A=80 \times 80 \text{ mm}^2$  y  $d=1 \text{ mm}$ ) para  $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ .

En la *Figura 41* se aprecian grandes diferencias entre los resultados obtenidos a diferentes  $u$ , que se van haciendo cada vez más pequeñas en cuanto aumenta el coeficiente de sombra (SC). Además, se aprecia lo que se explicó en la *Figura 27* (apartado 2.5), ya que las diferencias de  $u$  disminuyen considerablemente cuando

la distancia respecto a la cara del hilo es mayor a un diámetro de hilo ( $d$ ), al igual que explicaba Brun et al. (1955).

Estos resultados nos sugieren que la medida que más se va a acercar a los valores de  $\varphi=(l_\infty/l)^2$  es la que se mide a una distancia de  $2d$ , puesto que en  $SC=5\%$  se obtiene un valor de velocidad que se acerca más al límite de  $SC=0\%$  ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Además, desde  $SC=0\%$  hasta  $SC=25\%$  se observa en todos los casos excepto en el de  $2d$ , que  $u$  aumenta, cuando el comportamiento real de  $\varphi$  implica que  $u$  disminuya progresivamente en función de  $SC$ .



**Figura 41.** Variación de la velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $u$ ) en función del coeficiente de sombra ( $SC$ ) obtenido mediante simulaciones numéricas para una malla tipo arpa formada por filamentos de diámetro  $d$ . Distancias respecto a la cara del filamento: rombo ( $0.5d$ ), triángulo ( $d$ ), cuadrado ( $1.5d$ ) y círculo ( $2d$ ). Fuente propia

Para saber cómo de próximos están los valores de  $\varphi=u/u_\infty$  respecto a  $\varphi=(l_\infty/l)^2$  y obtener una valoración estadística de que distancia respecto a la cara del filamento es más compatible con los resultados de  $\varphi=(l_\infty/l)^2$ , se calcula el error cuadrático medio (ECM). Este parámetro estadístico es considerado una función de riesgo, que sirve para estimar la diferencia entre el estimador ( $\varphi=u/u_\infty$ ) y lo que se estima [ $\varphi=(l_\infty/l)^2$ ], lo cual es muy útil a la hora de valorar diferencias entre resultados, ya que en contadas ocasiones se cae en el sesgo de analizar los resultados a conveniencia. El ECM se define según la siguiente expresión:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (2.5)$$

donde:

- $n$ = Número de datos que se utilizan (en nuestro caso 10,  $SC=5-95\%$ )
- $\hat{Y}$ = Vector de predicción ( $\varphi=u/u_\infty$ )
- $Y$ = Vector de los verdaderos valores [ $\varphi=(l_\infty/l)^2$ ]

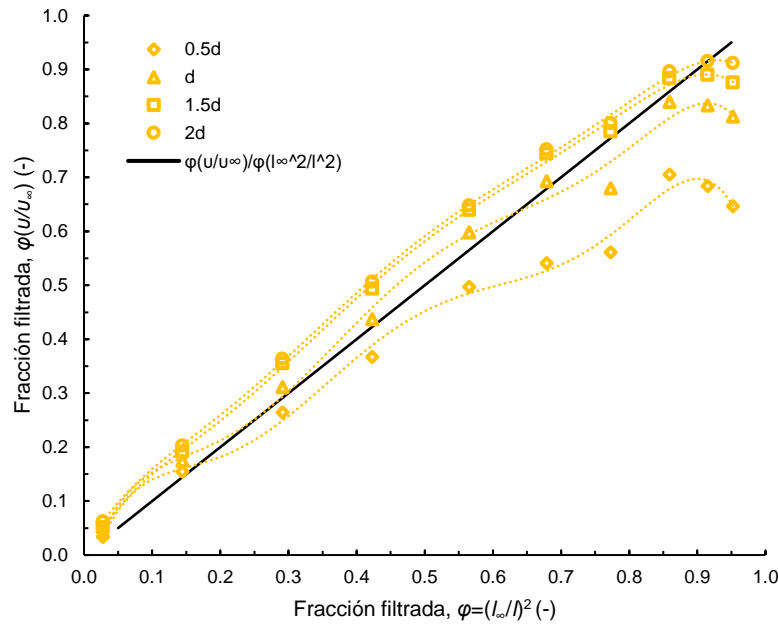
De los resultados de la *Tabla 3*, se puede observar que a distancias de  $1.5d$  y  $2d$  los resultados en términos globales (para todos los  $SC$ ) de  $u$  son los que más se aproximan a  $\varphi=(l_\infty/l)^2$ , siendo  $1.5d$  el que menor ECM presenta ( $ECM=0.0029$ ).

**Tabla 3.** Error cuadrático medio (ECM) de la relación entre  $\varphi=(l_\infty/l)^2$  y  $\varphi=u/u_\infty$  para diferentes distancias respecto a la cara del filamento (hilo) en un rango de  $SC=5-95\%$ . Fuente propia.

Distancia respecto a la cara del filamento	Error cuadrático medio (ECM)
$0.5d$	0.0243
$d$	0.0038
$1.5d$	0.0029
$2d$	0.0033

Sin embargo, según las gráficas representadas en la *Figura 42* los resultados medidos a una distancia respecto a la cara del filamento de  $d$  en  $SC$  medio-altos son los que mejor se ajustan a la recta de  $(\varphi=u/u_\infty)/[\varphi=(l_\infty/l)^2]=1$ , la cual nos indica gráficamente que tan próximos están los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos.

Tomando como correctos los resultados de  $\varphi=(l_\infty/l)^2$ , se podría afirmar que los resultados obtenidos de  $\varphi=u/u_\infty$  pueden ser válidos para un rango de  $SC=45-95\%$  cuando se mide a una distancia desde la cara del hilo de  $1d$ . Esto se debe confirmar calculando de nuevo el ECM (por si existiera cualquier tipo de sesgo en el análisis de los resultados) para un rango de coeficientes de sombra determinado ( $SC=45-95\%$ , *Tabla 4*).



**Figura 42.** Variación de  $\varphi(u/u_\infty)$  en función de  $\varphi=(l_\infty/l)^2$  siendo el caso ideal la línea continua de color negro. Zona superior coeficientes de sombra bajos y zona inferior coeficientes de sombra altos. Distancias respecto a la cara del filamento: rombo ( $0.5d$ ), triángulo ( $d$ ), cuadrado ( $1.5d$ ) y círculo ( $2d$ ). Fuente propia.

Como se puede observar, el análisis mediante la *Figura 42* es correcto, ya que la distancia respecto a la cara del filamento que menor ECM presenta es la que se mide a  $1d$ . Al fin y al cabo no se suele utilizar mallas de SC tan bajas ( $SC=5-35\%$ ), por lo tanto, este criterio para medir  $u$  se puede utilizar para calcular eficiencias aerodinámicas fiables en mallas de captación reales.

Tabla 4. Error cuadrático medio (ECM) de la relación entre  $\varphi=(l_\infty/l)^2$  y  $\varphi=u/u_\infty$  para diferentes distancias respecto a la cara del filamento (hilo) en un rango de  $SC=45-95\%$ . Fuente propia

Distancia respecto a la cara del filamento	Error cuadrático medio
$0.5d$	0.0046
$d$	0.0005
$1.5d$	0.0036
$2d$	0.0048

## 6.2. Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) se calcula mediante su definición general al igual que en el apartado 3, ecuación (2.2).



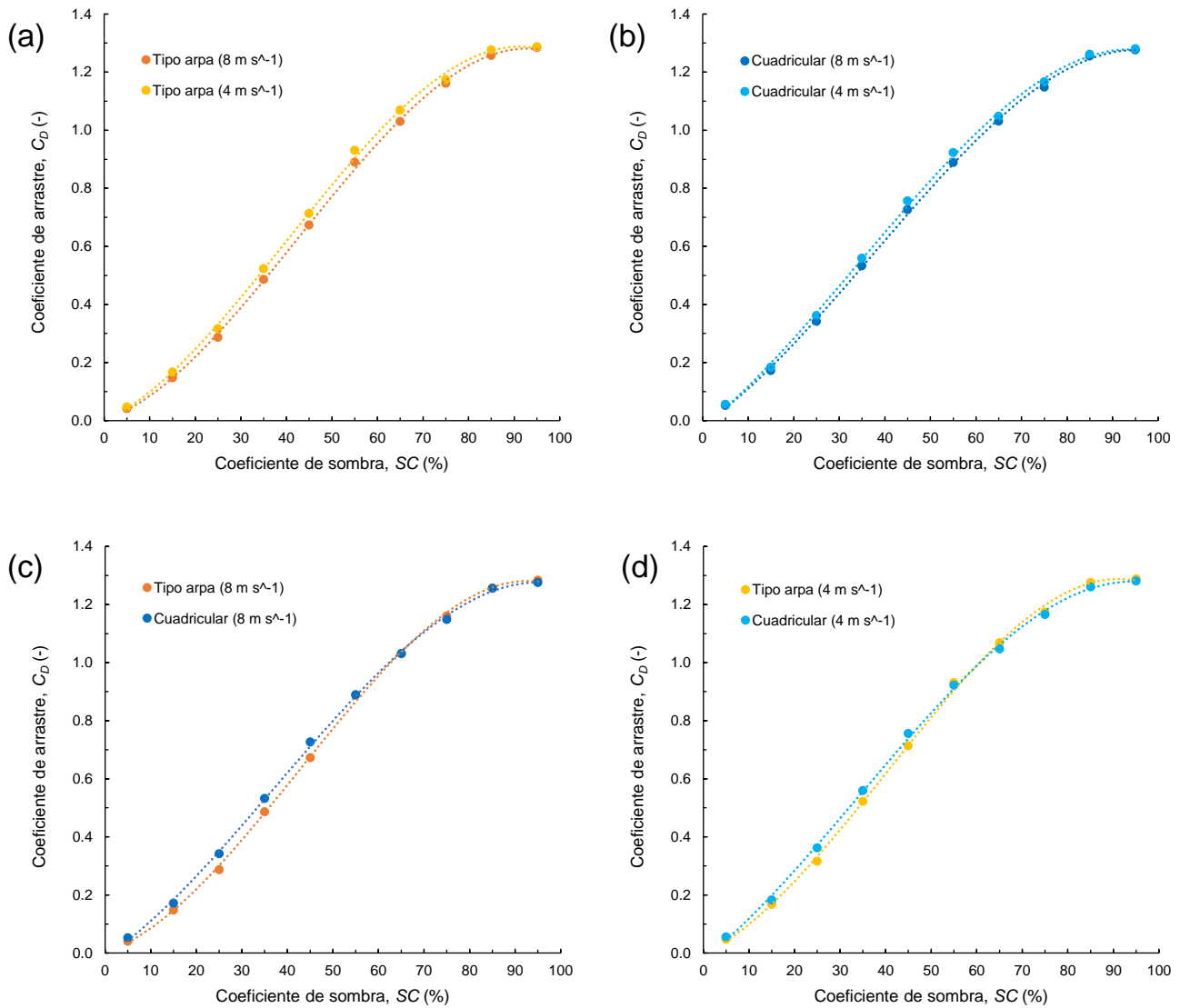
$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{A \cdot \rho \cdot u_\infty^2} \quad (2.6)$$

Se conoce el área de la malla de captación  $A=80 \times 80 \text{ mm}^2$  y las velocidades del flujo libre  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$  escogidas para realizar las simulaciones numéricas. Además, se conoce el valor de la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) obtenida en los apartados 5.1.1 y 5.2.1 y por último las condiciones atmosféricas, temperatura  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$  y presión  $P=1 \text{ atm}$ . Conociendo estos dos parámetros para el caso de nuestro fluido (aire), se determina su densidad ( $\rho$ ) utilizando la Tabla de Propiedades del aire a 1 atm de presión (Tabla 2), obteniéndose:

$$\rho(20 \text{ }^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}) = 1,204 \text{ kg m}^{-3}$$

Las *Figura 43a y b* muestran que, para un SC dado,  $C_D$  es mayor cuando  $u_\infty$  es menor. Sin embargo, cuando SC tiende a 0% o a 100% el coeficiente de arrastre se mantiene constante para las  $u_\infty$  escogidas. Para un  $SC \approx 100\%$  la malla de captación se aproxima a una placa sólida, la cual tiende a un valor constante de  $C_D=1.29$  para el rango del número de Reynolds  $Re=10^4-10^5$ .

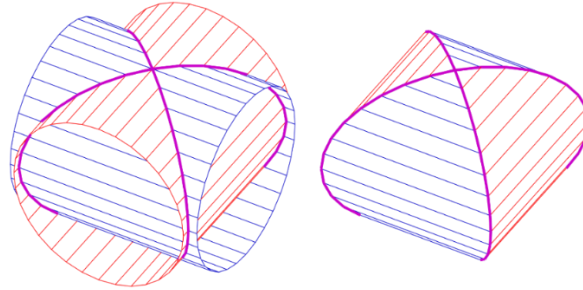
Por otro lado, se puede observar en la *Figura 43c y d*, que las variaciones más significativas de  $C_D$  para ambas mallas se dan para coeficientes de sombra comprendidos desde  $SC=15\%$  a  $SC=45\%$ , apreciándose un aumento significativo de  $C_D$  de la malla cuadrícula respecto a la malla tipo arpa en estos casos. Esta variación de  $C_D$  de la malla cuadrícula respecto a la malla tipo arpa es causada principalmente por tres factores: la cantidad de intersecciones entre los hilos cilíndricos verticales y horizontales de la malla cuadrícula, la distancia entre ejes de hilo ( $d'$ ) y el número de hilos.



**Figura 43.** Variación del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) en función del coeficiente de sombra (SC) obtenido mediante simulaciones numéricas. Puntos naranja (malla tipo arpa): oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Puntos azules (malla cuadricular): oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). (a) Malla tipo arpa para diferentes velocidades del flujo libre; (b) Malla cuadricular para diferentes velocidades del flujo libre; (c) Velocidad del flujo libre  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  para diferentes disposiciones de filamentos; (d) Velocidad del flujo libre  $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$  para diferentes disposiciones de filamentos. Fuente propia.

En cuanto al primer factor (las intersecciones entre hilos) debemos destacar que la malla cuadricular está compuesta por hilos verticales y horizontales que se intersecan perpendicularmente formando una geometría conocida como sólido de Steinmetz (Figura 44). El sólido de Steinmetz contiene en su definición dos posibles casos: el primero, cuando dos cilindros se intersecan de forma perpendicular, llamado bicilindro y el segundo, cuando son tres cilindros los que se

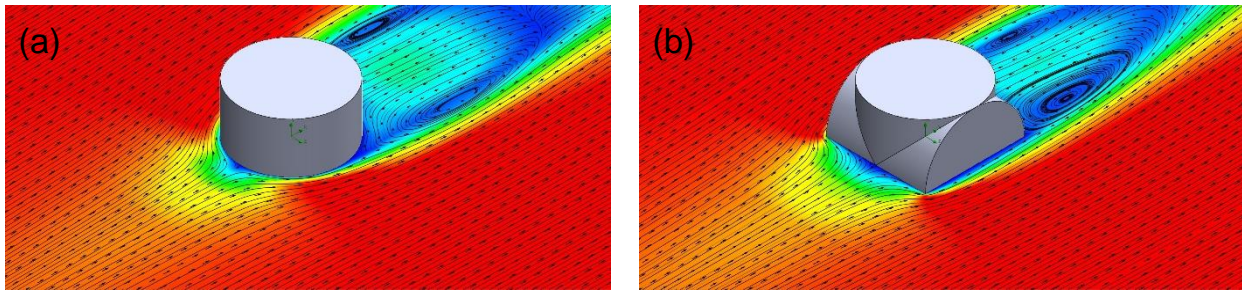
intersecan, llamado tricilindro. Como en este caso son dos cilindros los que se intersecan (hilos verticales e hilos horizontales), el sólido que se obtiene es un bicilindro.



**Figura 44.** Intersección perpendicular entre dos cilindros (a la izquierda) y sólido de Steinmetz, bicilindro (a la derecha). Fuente: [mathworld.wolfram.com/SteinmetzSolid](http://mathworld.wolfram.com/SteinmetzSolid)

La formación de estos sólidos es una de las causas que provocan ligeras diferencias en los resultados de  $C_D$ . Esta afirmación se puede justificar obteniendo mediante simulaciones, el  $C_D$  de un cilindro de  $h=1$  mm y  $d=1$  mm y compararlo con el  $C_D$  de un bicilindro de mismas dimensiones. De esta forma se puede observar si existe alguna diferencia significativa entre los resultados.

Como se puede observar en la *Figura 45* las líneas de flujo son diferentes para cada sólido, tanto el cilindro como el bicilindro ocupan el mismo área frontal (utilizada para calcular el coeficiente de arrastre,  $A=1 \times 1$  mm<sup>2</sup>). La diferencia existe al obtener el  $C_D$ , para el cilindro  $C_{D,cilindro}=0.86$  y para el bicilindro  $C_{D,bicilindro}=0.92$ . En otras palabras, el  $C_{D,bicilindro}$  es un 7% mayor que el  $C_{D,cilindro}$ . Esta diferencia del coeficiente de arrastre es poco significativa, aunque hay que tener en cuenta que existen bicilindros (en la malla cuadrícula) en función del número de intersecciones entre los hilos. Además, la malla cuadrícula al compartir la misma área en las intersecciones donde se producen estos bicilindros, debe de tener un mayor número de hilos que la malla tipo arpa para obtener el mismo SC. Esto nos da a entender que cuantos más hilos tiene la malla cuadrícula (esto es más SC) más bicilindros se forman y, por lo tanto, el  $C_D$  debe ser mayor.



**Figura 45.** Líneas de flujo para  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$  y  $A=1 \times 1 \text{ mm}^2$ , que cortan por el medio al sólido (proyección isométrica). (a) Cilindro, (b) bicilindro. Fuente propia.

Se estima que para una malla cuadrangular de  $SC=95\%$ , el área ocupada por los bicilindros alcanza el 60% del área total. Aun así, debido a que las mallas muy tupidas deben tender a valores cercanos a  $C_D=1.29$ , no se aprecian diferencias respecto a la malla tipo arpa. Por otro lado para una malla cuadrangular de  $SC=5\%$ , el área ocupada por los bicilindros alcanza el 0.06% del área total, obteniéndose un  $C_D$  similar a la malla tipo arpa. Esto nos indica que el área ocupada por los bicilindros evoluciona exponencialmente, específicamente en función del cuadrado de una potencia ( $n^{\circ}_{\text{intersecciones}}=n^{\circ}_{\text{hilos}^2}$ ).

Otros parámetros como la distancia entre ejes de hilos ( $d'$ ) y el número de hilos, también influyen directamente sobre el  $C_D$  y están relacionados entre sí (caso de malla cuadrangular):

$$n^{\circ}_{\text{hilos}} = \frac{b + h}{d'} \quad (d' > d) \quad (2.7)$$

donde:

- $b$ = Base de la malla de captación (mm)
- $h$ = Altura de la malla de captación (mm)

Esto significa que cuanto menor sea  $d'$  más hilos tendrá la malla, ya que  $b=80 \text{ mm}$  y  $h=80 \text{ mm}$ , medidas geométricas de la malla. La malla cuadrangular tiende a tener  $d'$  más altos que la malla tipo arpa debido a que contiene hilos en vertical y en horizontal (no solo hilos en vertical como la tipo arpa). Cuando  $d'$  es

suficientemente grande (SC más bajos), los hilos se comportan como cilindros independientes, lo cual también afecta al coeficiente de arrastre (estudio más a fondo en el apartado 7).

Como podemos observar, estos tres parámetros están relacionados entre sí y variar uno de ellos conlleva variaciones en los demás. Más adelante (apartado 7) se estudiará detalladamente el comportamiento de  $d'$  respecto a  $C_D$  y como puede llegar a afectar a partir de una cierta distancia (comportamiento de los hilos como cilindros independientes), provocando que el  $C_D$  de la malla cuadrangular se aproxime a la malla tipo arpa a partir de  $SC=55\%$ .

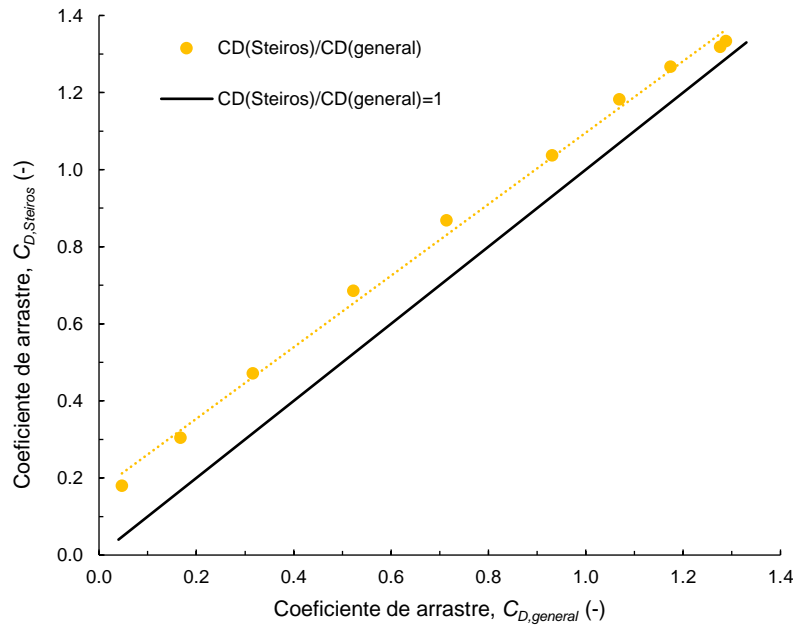
### 6.2.1. Coeficiente de arrastre ajustado a la ecuación de Steiros

Este apartado tiene el objetivo de comparar diferentes métodos de cálculo del coeficiente de arrastre para, posteriormente, ajustar los resultados obtenidos mediante la ecuación general ( $C_{D,general}$ ) con el coeficiente de arrastre obtenido de la ecuación propuesta por Steiros (2018) ( $C_{D,Steiros}$ ). Esta ecuación específica del coeficiente de arrastre (aplicada exclusivamente para placas porosas) está expresada en función de la fracción filtrada ( $\varphi$ ), la cual ya se calculó previamente:

$$C_{D,Steiros} = \frac{4(1-\varphi)(2+\varphi)}{3(2-\varphi)} \quad (2.8)$$

Utilizando los resultados obtenidos de  $\varphi$  para el caso de una malla tipo arpa de  $U_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$  se calcula el  $C_{D,Steiros}$  y se representa respecto a  $C_{D,general}$ .

Se observa en la *Figura 46* una notable diferencia entre los resultados (puntos naranja claro) y la línea  $C_{D,Steiros}/C_{D,general}=1$ , que se va reduciendo a medida que el  $C_D$  crece, es decir, cuando el coeficiente de sombra aumenta. A pesar de esto se observa un cierto paralelismo (con algo de inclinación hacia SC altos) entre la línea de tendencia y la línea  $C_{D,Steiros}/C_{D,general}=1$ . Esto nos indica, que  $C_{D,general}$  difiere cuantitativamente de los resultados de  $C_{D,Steiros}$ , pero no cualitativamente, puesto que la tendencia es similar.



**Figura 46.** Variación de  $C_{D,Steiros}$  en función de  $C_{D,general}$  siendo el caso ideal la línea continua de color negro. Zona inferior coeficientes de sombra bajos y zona superior coeficientes de sombra altos. Fuente propia.

Esta diferencia entre los  $C_D$  calculados nos lleva a tomar la decisión de definir una ecuación propia para los resultados obtenidos mediante las simulaciones. La definición propuesta por Steiros (2018) estudia el comportamiento de una placa porosa, caso parecido al nuestro. Por lo tanto, tomando como base la estructura de la ecuación de Steiros y mediante una regresión paramétrica, se obtienen las ecuaciones empíricas para cada caso de estudio.

La regresión paramétrica o ajuste de modelos se realiza con la ayuda de una calculadora científica online llamada Desmos. Esta tiene la capacidad de representar ecuaciones complicadas gráficamente, pudiendo variar los parámetros hasta encontrar un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) más próximo a la unidad (mayor predicción de futuros resultados).

Si analizamos la ecuación (2.8), el coeficiente de arrastre es dependiente de 4 términos:

### Término 1:

El primer término que se analiza de la ecuación de Steiros es la constante  $4/3$ . Esta indica el coeficiente de arrastre máximo de la malla ( $SC=100\%$  o  $\varphi=0$ ), ya que según el artículo de Steiros (2018) una placa plana presenta un  $C_D=4/3$ . En nuestro caso, el coeficiente de arrastre que se ha obtenido para un  $SC=100\%$  es  $C_D=1.29$  (Anexo 1) y por tanto, se deberá cambiar.

### Término 2:

El segundo término  $(1-\varphi)$  define el valor que toman los extremos ( $SC=0\%$  y  $SC=100\%$ ). Por un lado, cuando  $SC=100\%$  ( $\varphi=0$ ), el  $1-\varphi$  devuelve 1 y  $C_D$  depende solo del término 1. Por otro lado, cuando  $SC=0\%$  ( $\varphi=1$ ), el  $1-\varphi$  devuelve 0 y toda la expresión acaba dando  $C_D=0$ . Por ello, es importante no cambiar este término.

Sin embargo, sí que se puede elevar el término 2 a una determinada potencia, ya que esto no afectaría a los resultados de los extremos ( $SC=0\%$  y  $SC=100\%$ ). Además, esto ayudaría a aproximar la función de Steiros con la función general en las zonas próximas a los extremos.

### Término 3 y 4:

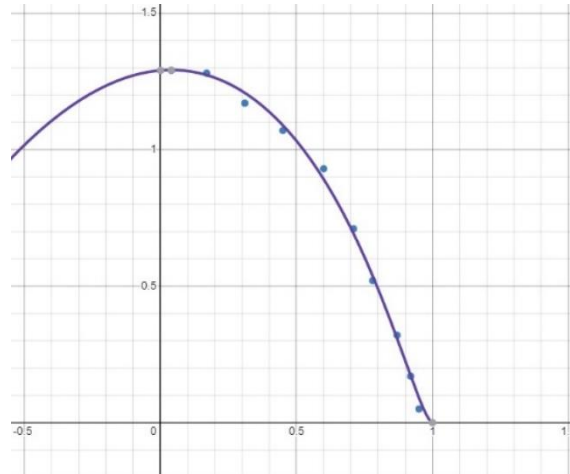
Por último, el término 3  $(2+\varphi)$  y 4  $(2-\varphi)$  son dependientes entre sí y el valor de la constante (2, en ambos casos) debe de ser igual ( $2=2$ ). Esta regla de igualdad permite con ayuda del término 2 que cuando el  $SC=100\%$  ( $\varphi=0$ ) el valor de  $C_D$  sea igual al término 1. Además, estos dos bloques permiten variar los resultados que están en el intermedio de la gráfica y, por lo tanto, su ajuste será de gran importancia.

Explicado cada término del que se compone la ecuación de Steiros, se llega a la siguiente expresión:

$$C_D \sim 1.29 \frac{(1-\varphi)^a (b+\varphi)}{(b-\varphi)} \quad (2.9)$$

donde:

- a y b= Variables que se deben ajustar para aproximar la función descrita por la ecuación de Steiros con la función descrita por la ecuación general



**Figura 47.** Gráfica donde se exponen los resultados obtenidos mediante la ecuación general (puntos en azul) y la ecuación de Steiros ajustada (curva azul) para una malla tipo arpa con una  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$ . Fuente propia.

#### Expresión empírica de la malla tipo arpa para diferentes velocidades del flujo:

- $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$  ( $R^2=0.9986$ )

$$C_D = 1.29 \frac{(1 - \varphi)^{1.60} (1.25 + \varphi)}{(1.25 - \varphi)} \quad (2.10)$$

- $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$  ( $R^2=0.9991$ )

$$C_D = 1.29 \frac{(1 - \varphi)^{1.56} (1.28 + \varphi)}{(1.28 - \varphi)} \quad (2.11)$$

#### Expresión empírica de la malla cuadrangular a diferentes velocidades del flujo:

- $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$  ( $R^2=0.9983$ )

$$C_D = 1.29 \frac{(1 - \varphi)^{1.205} (1.97 + \varphi)}{(1.97 - \varphi)} \quad (2.12)$$

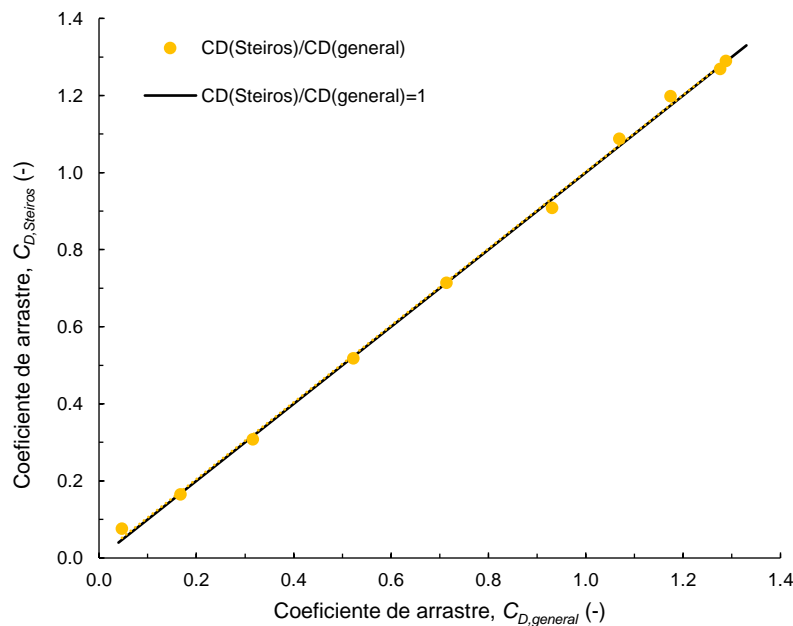


- $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$  ( $R^2=0.9964$ )

$$C_D = 1.29 \frac{(1 - \varphi)^{1.27} (1.83 + \varphi)}{(1.83 - \varphi)} \quad (2.13)$$

Con la ecuación de Steiros ajustada para cada caso, se vuelve a realizar la validación (con el objeto de analizar que estas ecuaciones se ajustan bien a los resultados de la ecuación general) para el caso de una malla tipo arpa de  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$ , donde se calcula el  $C_{D,Steiros}$  y se representa respecto a  $C_{D,general}$ .

Como se puede observar en la *Figura 48* el modelo se ajusta perfectamente a los resultados obtenidos.



**Figura 48.** Variación de  $C_{D,Steiros}$  en función de  $C_{D,general}$  siendo el caso ideal ( $C_{D,Steiros}/C_{D,general}=1$ ) la línea continua de color negro. Fuente propia.

### 6.3. Coeficiente de caída de presión

Como se comentó en el *capítulo 1*, el coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ) se puede calcular de diferentes formas. Una de estas formas es utilizando la fracción filtrada. Por ello, se ha optado por calcular  $C_o$  mediante la relación de la fracción filtrada ( $\varphi$ ), descrita por Azeem et al. (2020):

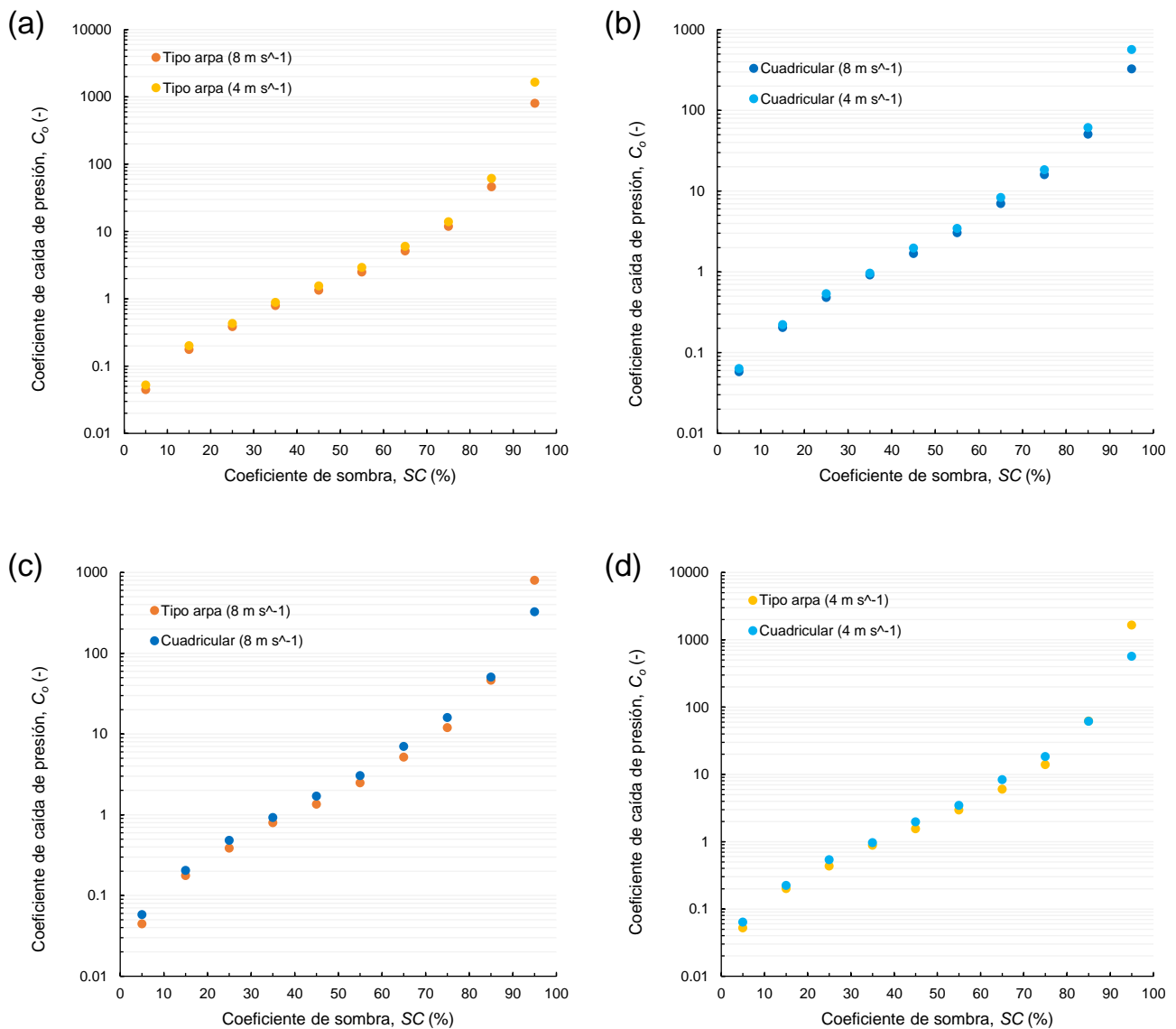
$$\varphi = \sqrt{\frac{C_D}{C_o}} \quad (2.14)$$

Mediante la obtención de la fracción filtrada ( $\varphi$ ) y el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), se puede despejar y calcular  $C_o$ ,

$$C_o = \frac{C_D}{\varphi^2} \quad (2.15)$$

Obtenidos los resultados de  $C_o$  con  $\varphi$  (apartado 6.1) y  $C_D$  (apartado 6.2), se observa en la *Figura 49a y b*, que para velocidades del flujo libre ( $u_\infty$ ) bajas el  $C_o$  es mayor, diferencia que aumenta a medida que el SC crece. Esto se debe a que hay un menor número de líneas de flujo que atraviesan la malla en velocidades bajas, como se observó en los resultados obtenidos del lado del flujo libre (*Figura 35 y 38*).

En cuanto a la comparación entre las diferentes disposiciones de filamentos (malla tipo arpa y cuadrangular), se observa en la *Figura 49c y d*, que la malla tipo cuadrangular presenta valores de  $C_o$  mayores que los de la malla tipo arpa, excepto en un punto (SC=95%). Además, este cambio de tendencia no se produce bruscamente, ya que el  $C_o$  para un SC=85% es igual para las dos disposiciones de filamentos, generando en ese mismo punto el cambio de tendencia que se observa en SC=95%.



**Figura 49.** Variación del coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ) en función del coeficiente de sombra (SC) obtenido mediante simulaciones numéricas (Nótese que el eje OY se representa en escala logarítmica). Puntos naranja (malla tipo arpa): oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Puntos azules (malla cuadricular): oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). (a) Malla tipo arpa para diferentes velocidades del flujo libre; (b) Malla cuadricular para diferentes velocidades del flujo libre; (c) Velocidad del flujo libre  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  para diferentes disposiciones de filamentos; (d) Velocidad del flujo libre  $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$  para diferentes disposiciones de filamentos. Fuente propia.

## 6.4. Eficiencia aerodinámica

Después de que se ha obtenido la fracción filtrada, el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) y el coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ) para el rango de coeficientes de sombra

(SC) escogido, calculamos la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) de una malla de  $N$  capas paralelas (Azeem et al., 2020):

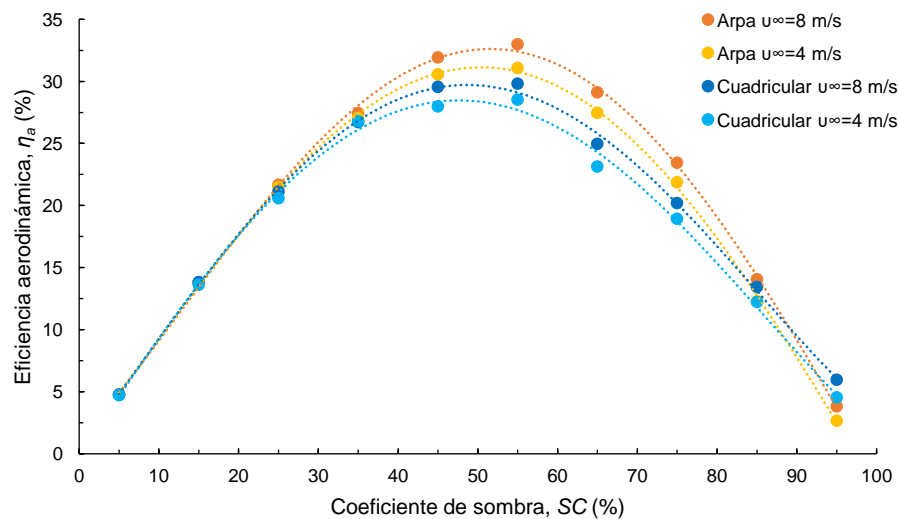
$$\eta_a = \varphi \cdot [(1 - (1 - SC)^N)] \quad (2.16)$$

Sin embargo, en nuestro caso solo se estudia una capa ( $N=1$ ), por lo tanto, la ecuación (2.16) se reduce a:

$$\eta_a = \varphi \cdot SC \quad (2.17)$$

Se representa gráficamente la  $\eta_a$  frente a SC para dos disposiciones de filamentos (tipo arpa y cuadrangular) y dos velocidades distintas ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$  y  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ).

Se observa en la *Figura 50*, que la  $\eta_a$  para coeficientes de sombra bajos ( $SC=5-25\%$ ) no varía ni con la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) ni con el tipo de disposición de los filamentos. Es a partir de  $SC=35\%$  que se comienza a distinguir diferencias en los resultados, observándose que las mallas tipo arpa presentan mayores  $\eta_a$  que las cuadrangulares. Además, para una misma disposición de filamentos,  $u_\infty$  mayores dan como resultado  $\eta_a$  mayores.



**Figura 50.** Variación de la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) en función del coeficiente de sombra. Puntos naranja (malla tipo arpa): oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Puntos azul (malla cuadrangular): oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Fuente propia.

Por otra parte, existe un máximo de  $\eta_a$  en torno a  $SC=55\%$  para todos los casos. Este  $SC$  es de gran importancia, ya que, en base a nuestros estudios, parece indicar el valor óptimo del  $SC$  de una malla de captación de agua de niebla.

El punto máximo de la  $\eta_a$  ( $SC=55\%$ ) de la malla tipo arpa para  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  ( $\eta_a=32.97\%$ ) es un 11% mayor que el de la malla cuadrangular ( $\eta_a=29.80\%$ ). Por otro lado, la eficiencia máxima de la malla tipo arpa para  $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$  ( $\eta_a=31.07\%$ ) es un 9% mayor que el de la malla cuadrangular ( $\eta_a=28.52\%$ ).

## 7. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE EJES DE HILOS EN PARÁMETROS AERODINÁMICOS

En la discusión del *apartado 6.1* se explicaba que la diferencia que existe entre el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) obtenido para una malla tipo arpa y una cuadrangular se debe a tres parámetros. Uno de estos parámetros es la distancia entre ejes de hilo ( $d'$ ). Dicha variable es muy importante en los resultados de  $C_D$  a pesar de que en la ecuación general de  $C_D$  (ecuación 2.6) no se vea reflejado, ya que se encuentra implícita dentro de la fuerza de arrastre ( $F_D$ ).

Para corroborar estas afirmaciones, mediante simulaciones numéricas, se ha decidido obtener la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y el lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) para mallas tipo arpa. De esta forma, además de calcular  $C_D$  se puede calcular la fracción filtrada ( $\varphi$ ) y, por lo tanto, la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ). Estas mallas tendrán un  $SC$  constante, y para cada caso se variará la distancia entre ejes de hilo ( $d'$ ) y por lo tanto también el diámetro de hilo ( $d$ )

$$SC = \frac{d}{d'} \quad (2.14)$$

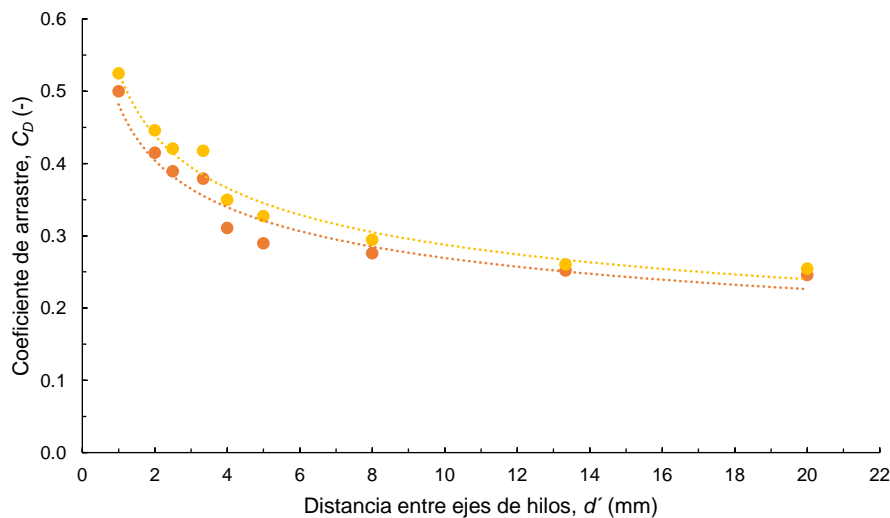
Se ha decidido tomar un  $SC=30\%$  (coeficiente de sombra habitual en mallas comerciales) para un rango de  $d'$ : 1 mm, 2 mm, 2.5 mm, 3.33 mm, 4 mm, 5 mm, 8 mm, 13.33 mm y 20 mm que corresponde, según (2.14), a diámetros de hilo de 0.3 mm, 0.6 mm, 0.75 mm, 1 mm, 1.2 mm, 1.5 mm, 2.4 mm, 4 mm y 6 mm,

respectivamente. De la misma forma que en el apartado 5 se obtiene  $F_D$  y  $l_\infty$  para las mismas hipótesis de trabajo.

### 7.1. Coeficiente de arrastre

Indicadas las  $d'$  con las que se va a trabajar, se obtiene  $F_D$  y se calcula el coeficiente de arrastre (ecuación general) para mallas tipo arpa con las velocidades del flujo libre usadas hasta el momento.

Como se puede observar en la *Figura 51* no se aprecia una gran diferencia de  $C_D$  para los resultados de  $d'$  comprendidos entre  $d'=8$  mm hasta  $d'=20$  mm. En cambio, al disminuir el valor de  $d'$  el  $C_D$  aumenta exponencialmente. Este comportamiento de  $C_D$  en función de  $d'$  corrobora la explicación dada en el apartado 6.1, que trataba de discutir acerca de la diferencia de  $C_D$  para mallas de captación de distinta disposición de filamentos (tipo arpa y cuadrangular)



**Figura 51.** Variación del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) en función de la distancia entre ejes de hilos ( $d'$ ) obtenido mediante simulaciones numéricas de un malla tipo arpa. Puntos en naranja oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y puntos en naranja claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Fuente propia.

Esta tendencia podría indicar que existe un valor máximo de  $C_D$  cuando  $d'$  tiende a 0 (equivalente a  $SC=100\%$ ), ya que existirían infinitos números de hilos. Sin embargo, esto no se puede llegar a comprobar mediante las simulaciones, puesto que en cuanto  $d'$  es menor de 1 mm el número de hilos crece exponencialmente.

Esto provoca que los tiempos de cálculo sean muy largos y nos imposibilita tomar resultados a partir de  $d'=1$  mm. De todas formas, este estudio se podría comprobar con la ayuda de ordenadores más potentes, que permitan reducir las horas de cálculo o mejorar el procesamiento de los datos.

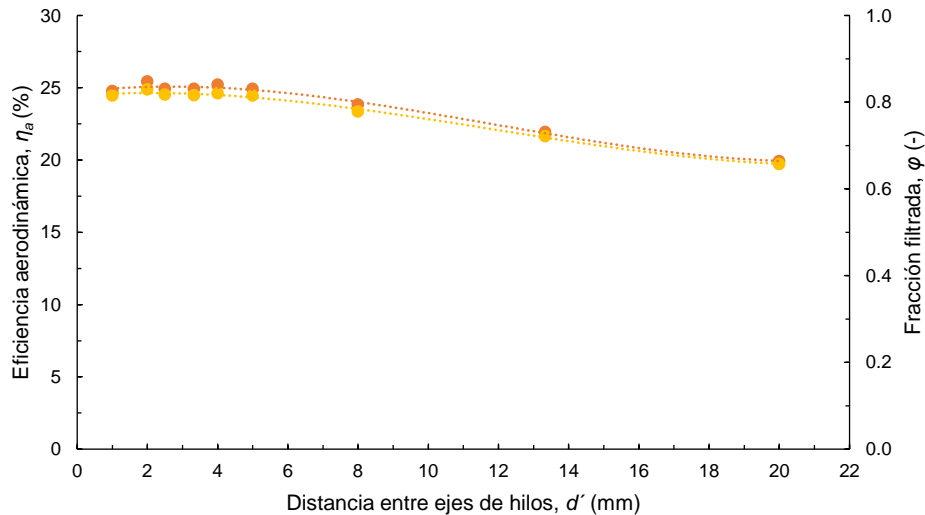
## 7.2. Eficiencia aerodinámica

La eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) para una sola capa ( $N$ ) viene definida por la relación entre la fracción filtrada ( $\varphi$ ) y el coeficiente de sombra ( $SC$ ). En este estudio, el coeficiente de sombra es constante ( $SC=30\%$ ), por lo tanto según la ecuación (2.17),  $\eta_a$  es proporcional a  $\varphi$ .

En la *Figura 52* se observa como varia la eficiencia aerodinámica y la fracción filtrada en función de la distancia entre ejes de hilos. La eficiencia aerodinámica es constante entre  $d'=1$  mm y  $d'=5$  mm, tomando valores máximos de  $\eta_a \approx 25\%$ , y en cuanto  $d'$  aumenta, esta eficiencia disminuye hasta  $\eta_a \approx 20\%$ .

Según los valores de  $d'$  obtenidos en nuestro estudio, cuando  $d'$  toma valores entre  $d'=1$  mm y  $d'=5$  mm, el conjunto de hilos que componen la malla se comporta como uno. Sin embargo, a partir de una cierta  $d'$  (siendo en este caso  $d'=8$  mm), los hilos comienzan a alejarse reduciéndose la cantidad de hilos en la malla y, en consecuencia, esta comienza a comportarse como si se tratara de un conjunto de cilindros independientes, ya que el fluido no se ve perturbado debido a el espacio que se deja entre hilos.

Esto nos lleva a pensar en el límite cuando el diámetro del hilo ( $d$ ) sea lo suficientemente grande como para que un único hilo ocupe la sección de la malla. En este caso límite la fracción filtrada tiende a 0 y “la malla” se comportaría como un cilindro, lo que significaría que la eficiencia aerodinámica sería 0.

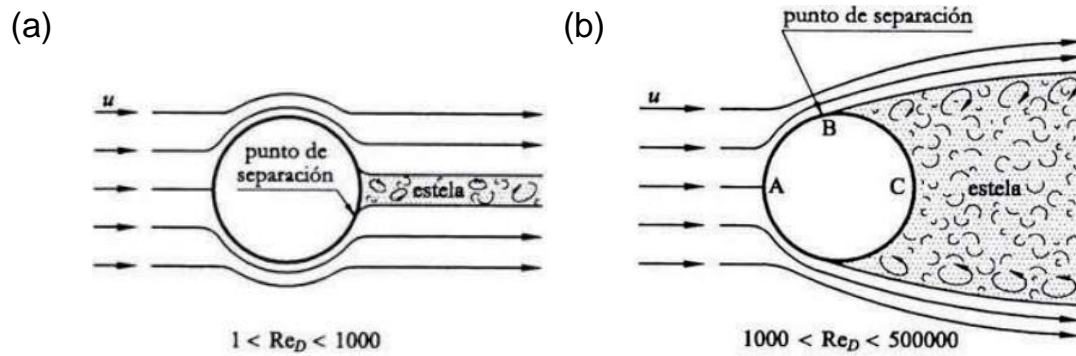


**Figura 52.** Variación de la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) y de la fracción filtrada ( $\phi$ ) en función de la distancia entre ejes de hilos ( $d'$ ) para mallas tipo arpa. Puntos en naranja oscuro ( $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y puntos en naranja claro ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ ). Fuente propia.

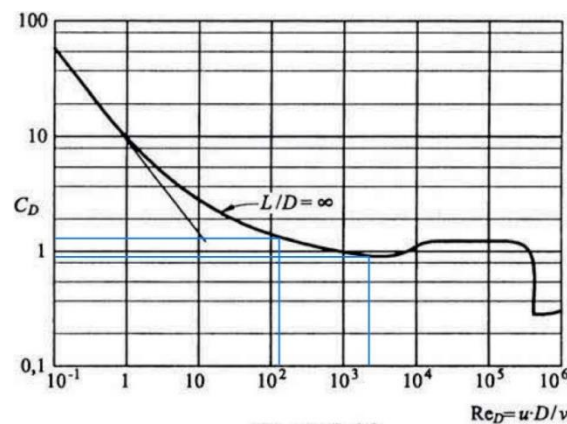
Además, el diámetro del hilo también está influyendo en los resultados, ya que a escala de los hilos cilíndricos el número de Reynolds varía en función de  $d$ . A modo de ejemplo, para un  $d=0.3 \text{ mm}$  (caso de  $d'=1 \text{ mm}$ ) el número de Reynolds es:  $Re=158.31$  y para un  $d=6 \text{ mm}$  (caso de  $d'=20 \text{ mm}$ ):  $Re=3166.22$ . Esto significa que el flujo está experimentando dos situaciones diferentes en relación con el punto de inicio del desprendimiento de la capa límite. Por un lado, cuando el número de Reynolds está comprendido entre  $1 < Re < 1000$ , la capa límite se desprende (punto de separación) casi al final del cilindro formando una pequeña estela (Figura 53a) y en el otro caso cuando  $1000 < Re < 500000$  el punto de separación de la capa límite se atrasa formando una gran estela (Figura 53b).

Como se puede observar en la *Figura 54* el punto de separación de la capa límite (formación de turbulencia) está relacionada con  $C_D$ . Según el  $Re$  calculado se obtienen los siguientes coeficientes de arrastre:  $C_D(Re=158) \approx 1.3$  y  $C_D(Re=3166) \approx 0.9$ . Esta tendencia de  $C_D$  en función de  $Re$  corresponde a los valores obtenidos de  $C_D$  en la *Figura 51*, lo cual indicaría que el diámetro de hilo es un parámetro que también está influyendo sobre el  $C_D$ .





**Figura 53.** (a) Desprendimiento de la capa límite de un cilindro para un número de Reynolds comprendido entre  $1 < Re < 1000$ ; (b) Desprendimiento de la capa límite de un cilindro para un número de Reynolds comprendido entre  $1000 < Re < 500000$ . Fuente: Agüera Soriano (1996). Fuente propia.



**Figura 54.** Coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) en función del número de Reynolds ( $Re$ ) para un cilindro. Fuente: Agüera Soriano (1996). Fuente propia.

## 8. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha obtenido, mediante simulaciones numéricas, diversos parámetros aerodinámicos para un rango determinado de coeficiente de sombra ( $SC=5-95\%$ ), dos velocidades de flujo libre diferentes ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$  y  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ) y dos tipos de disposición de filamentos (tipo arpa y cuadrangular). Además, se ha realizado un análisis de flujo, con vistas al capítulo 3, para obtener el tamaño óptimo del marco que sujetará las mallas de captación en los ensayos experimentales.

En primer lugar, se ha comenzado con una verificación de las simulaciones en donde se ha logrado obtener resultados del coeficiente de arrastre de una esfera

lisa ( $C_{D,simulación}=0.47$ ) muy próximos a los de la bibliografía de referencia ( $C_{D,teórico}=0.45$ ), Clift et al. (2005).

Como consecuencia, se han obtenido (mediante simulaciones) parámetros como la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) y el lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) para dos tipos de disposición de filamentos (tipo arpa y cuadrangular) y dos velocidades del flujo diferentes ( $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$  y  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ ). Además, también se ha representado las líneas de flujo alrededor de la malla y su distribución de velocidad y presión para  $SC=15\%$ ,  $SC=45\%$  y  $SC=75\%$ , observándose diferencias notables en el comportamiento del flujo entre la malla tipo arpa y cuadrangular en el caso de  $SC=75\%$ .

De estos resultados, se ha concluido que la  $F_D$  a una  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$  es cuatro veces mayor que la  $F_D$  a una  $u_\infty=4 \text{ m s}^{-1}$ , concorde a la ecuación general de  $F_D$ . También se ha observado que la malla cuadrangular presenta mayor  $F_D$  en comparación con la malla tipo arpa, en ambos casos de  $u_\infty$  (Anexo 1). Por otro lado, se han obtenido  $l_\infty$  para la malla tipo arpa mayores que para la malla cuadrangular. Además, el lado del flujo libre es mayor a  $u_\infty$  mayores para ambos casos de disposición de filamentos. Estas tendencias se repiten en los posteriores parámetros aerodinámicos como el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) o la fracción filtrada ( $\varphi$ ).

A la hora de obtener  $\varphi$ , se han realizado dos métodos de cálculo diferentes, en uno se utilizó  $l_\infty$  y en el otro la velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $u$ ). Al ser el método de  $l_\infty$  más válido que el de  $u$  debido a la falta de criterio de medición de este último, se propuso validar una distancia en la que  $u$  se pudiera considerar aceptable. En general, la distancia que mejores resultados dio respecto a  $\varphi=(l_\infty/l)^2$  es la de  $1.5d$ . Sin embargo, si se toma un rango de coeficientes de sombra específico ( $SC=45-95\%$ ) la distancia de  $1d$  es la que mejor se aproximó a los resultados de  $\varphi=(l_\infty/l)^2$ .

Otro de los parámetros que se estudió al detalle fue el  $C_D$ , el cual presenta las mismas tendencias que las comentadas en  $F_D$  debido a que las demás variables son constantes (en este caso de estudio en particular). Se ha conseguido explicar porque las mallas cuadrangulares presentan  $C_D$  mayores en comparación con los de

la malla tipo arpa, siendo esto debido principalmente a la formación de bicilindros por las intersecciones que se producen en las mallas cuadrículas. También se ha demostrado en un apartado posterior, que la distancia entre ejes de hilo ( $d'$ ) influye en  $C_D$ , repercutiendo directamente sobre los resultados de la eficiencia aerodinámica. Además, se ha obtenido una ecuación específica, basada en la expresión de Steiros, para los resultados obtenidos de  $\phi$  en las simulaciones, ajustándolos con los resultados obtenidos mediante la ecuación general del coeficiente de arrastre (usando  $F_D$ ).

Por último, se ha logrado calcular (mediante la expresión definida por Azeem et al., 2020) la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ), cumpliendo así con uno de los objetivos principales del trabajo. De estos resultados se ha obtenido una eficiencia aerodinámica máxima para un coeficiente de sombra de  $SC=55\%$ , que se cumple en todos los casos (tanto a diferentes  $u_\infty$  como a disposiciones de filamento). Se ha obtenido que la malla tipo arpa presenta una mayor eficiencia aerodinámica que la malla cuadrícula, siendo su eficiencia aerodinámica ( $\eta_a=32.97\%$ ) un 11% mayor que la de la malla cuadrícula ( $\eta_a=29.80\%$ ) para el caso de  $u_\infty=8 \text{ m s}^{-1}$ . Además, al aumentar la  $u_\infty$ , se ha obtenido eficiencias aerodinámicas mayores en ambos casos de disposición de filamento.

Como conclusión, las simulaciones nos han permitido tener una idea de los resultados esperados, lo que nos será de gran utilidad para seguir el camino correcto durante los ensayos experimentales posteriores. De esta manera, podemos utilizar las simulaciones como una herramienta complementaria para asegurarnos de que estamos avanzando en la dirección correcta y obtener resultados confiables en nuestros ensayos experimentales.

**CAPÍTULO 3. ESTUDIOS AERODINÁMICOS DE MALLAS DE  
CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE ENSAYOS  
EXPERIMENTALES**

## 1. INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

Este último capítulo se centra en el estudio, mediante ensayos experimentales, de parámetros aerodinámicos de diferentes tipos de mallas de captación (con  $SC$  diferentes). Por un lado, formados por mallas impresas en 3D (cuadriculares) y, por otro lado, diferentes mallas comerciales (mosquitera, volumétrica y Raschel).

Cabe destacar que el único parámetro aerodinámico medible será el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), ya que la fracción filtrada ( $\varphi$ ) no se podrá obtener. Esto es debido a que, actualmente, en el laboratorio de hidráulica del ICIA no se dispone de las técnicas de visualización de flujo necesarias para poder llevar a cabo la medición experimental del lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) en el túnel de viento. Además, tampoco se podrá medir la velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $u$ ) debido a la complejidad de tomar esta medida a una distancia  $1d$  de los filamentos. Sin embargo, sí que se puede calcular la eficiencia aerodinámica desde un punto de vista teórico, utilizando una parte medida en los ensayos experimentales ( $C_D$  y  $SC$ ) y otra calculada teóricamente ( $C_o$ , expresión de Idel'cik).

El coeficiente de arrastre se define principalmente en función de dos variables, que son medidas en los ensayos experimentales: la caída de presión existente entre la entrada y salida de la malla ( $\Delta P$ ) y la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) (capítulo 1). La  $\Delta P$  se medirá mediante un manómetro diferencial, mientras que  $u_\infty$  se determinará con un anemómetro de hilo caliente. Los resultados obtenidos en las simulaciones nos muestran unos valores máximos de caída de presión de  $\Delta P(u_\infty=8 \text{ m s}^{-1})=49.69 \text{ Pa}$ , para una placa plana ( $\Delta P=F_D/A$ ). Esto nos indica que las caídas de presión esperables, a determinar durante los ensayos experimentales, son pequeñas, lo cual nos obliga a ensayar con mallas que tengan un coeficiente de sombra alto ( $SC=70-95\%$ ).

Los objetivos específicos que se plantean en este capítulo son:

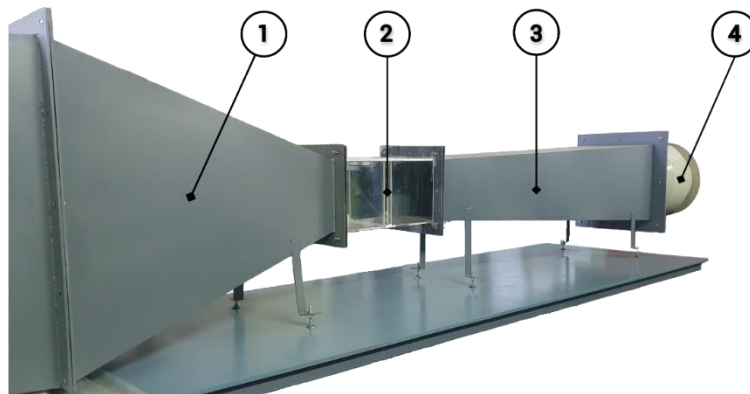
- Obtener la caída de presión ( $\Delta P$ ) y la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) de distintas mallas de captación.

- Calcular el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) con datos experimentales y el coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ) con la ecuación de Idel'cik para las distintas mallas seleccionadas.
- Calcular la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) para cada malla de captación.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

### 2.1. Túnel de viento

Los ensayos experimentales se realizan en el túnel de viento de baja velocidad situado en el laboratorio de hidráulica del ICIA, que fue diseñado y construido con intención de poder llevar a cabo estudios relacionados con la captación de agua de niebla. El túnel de viento está compuesto por diferentes partes: cono de contracción, cámara de ensayos, difusor y ventilador (Figura 55).



**Figura 55.** Fotografía del túnel de viento situado en el laboratorio de hidráulica del ICIA. (1) Cono de contracción; (2) cámara de ensayos; (3) difusor; (4) ventilador. Fuente propia.

Una parte importante del túnel es el ventilador (SODECA HBA-31-2T), el cual es de tipo axial (Figura 56). Este ventilador está ubicado al final del túnel, con el objetivo de aspirar el flujo y así disminuir las turbulencias del aire que se generarían en la cámara de ensayos. Para controlar la velocidad del flujo de aire que genera el ventilador en la cámara de ensayos al aspirar, se utiliza un variador de frecuencia (SODECA VSD3/A-RFT-1). Este variador de frecuencia nos permite

elegir a qué frecuencia queremos que trabaje el ventilador, comenzando en un mínimo de 20 Hz. Además, el ventilador al estar sobredimensionado nos permite obtener velocidades de flujo altas a frecuencias bajas (mayor control del ruido en el túnel).



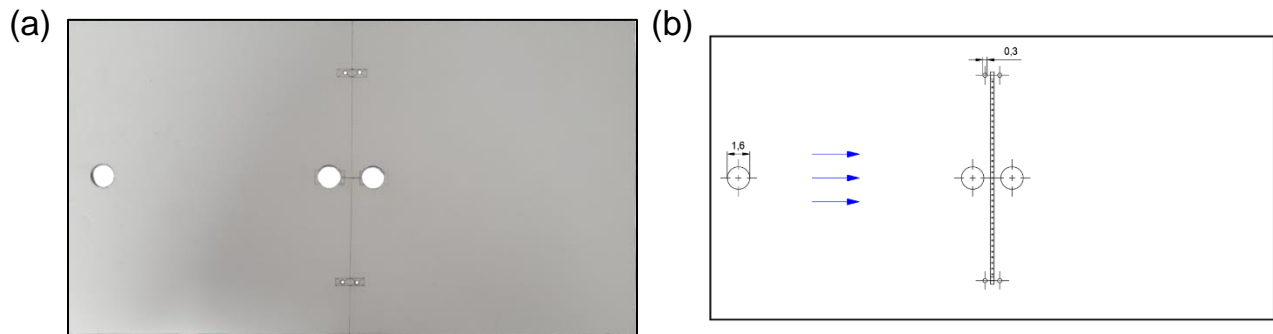
**Figura 56.** Ventilador axial SODECA HBA-31-2T. Fuente propia.

La parte más importante del túnel de viento es la cámara de ensayos, ya que es donde se colocarán las mallas de captación y donde se tomarán las mediciones correspondientes. La cámara de ensayos está fabricada de metacrilato (PMMA) y de dimensiones 40 cm x 20 cm x 20 cm. Esta está abierta por la cara superior (Figura 57), donde se le colocará una tapa que facilitará la colocación de las mallas. Hay que tener en cuenta que la cámara de ensayos debe estar completamente cerrada para impedir que el aire se escape y por ello todos los orificios estarán tapados con cinta aislante.



**Figura 57.** Cámara de ensayos, donde se puede apreciar que la cara superior está abierta (40 cm x 20 cm x 20 cm). Fuente propia.

La tapa de dimensiones: base,  $b=40$  cm y altura,  $h=20$  cm (Figura 58) se taladró, obteniéndose diferentes orificios que serán utilizados posteriormente para introducir los instrumentos de medición (anemómetro de hilo caliente y manómetro diferencial) y para sujetar la malla desde la parte superior. Los orificios de medición tienen un diámetro de  $\varnothing=16$  mm (diámetro del anemómetro caliente) y los orificios de sujeción de  $\varnothing=3$  mm (diámetro de la brida).



**Figura 58.** (a) Foto de la tapa, donde se observan los orificios taladrados; (b) Esquema de la tapa, donde se representan los orificios taladrados (medidas en cm) y la malla en la zona central (vista en planta). Las flechas (color azul) indican la dirección del fluido (de izquierda a derecha). Fuente propia.

En último lugar, cabe mencionar que tanto el cono de contracción (ubicado en la entrada del túnel de viento) como el difusor (situado entre la cámara de ensayos y el ventilador) están fabricados de acero galvanizado.

El cono de contracción presenta una sección de entrada de 62 cm x 62 cm y una sección de salida de 20 cm x 20 cm, con una longitud de 77.5 cm. Esto resulta en un ángulo de contracción de  $15.16^\circ$ .

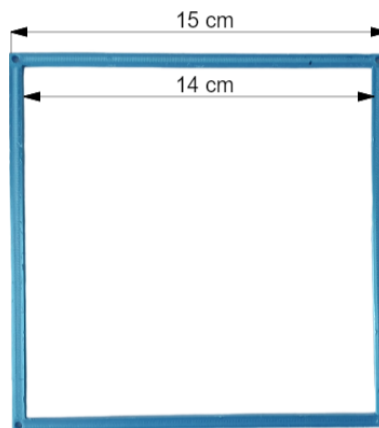
Por otro lado, el difusor posee una sección de entrada de 20 cm x 20 cm y una sección de salida de 35 cm x 35 cm, con una longitud de 139 cm. En consecuencia, se obtiene un ángulo de expansión de  $3.09^\circ$ .

Hay que destacar que el ángulo de expansión del difusor es significativamente menor en comparación con el ángulo de contracción del cono de contracción. Esto se debe a que el difusor es una sección crítica del túnel, donde pueden ocurrir desprendimientos de la capa límite. Por esta razón, se ha diseñado con mayor longitud y un ángulo de incidencia reducido.



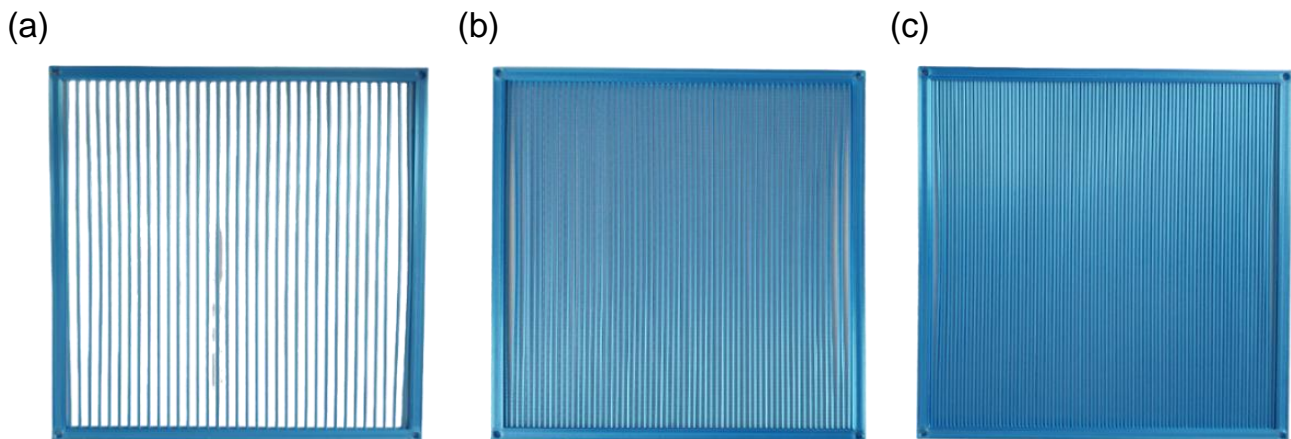
## 2.2. Mallas de captación

En los ensayos experimentales se utilizan diferentes tipos de mallas. Por un lado, las fabricadas mediante impresión 3D y, por otro lado, las comerciales, que son montadas sobre un marco (también impreso en 3D). Las dimensiones del marco son las que se escogieron en el *apartado 4 del capítulo 2*, siendo su sección exterior  $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$  (Figura 59). Este marco estará presente en todas las mallas a ensayar (tanto impresas en 3D como comerciales).



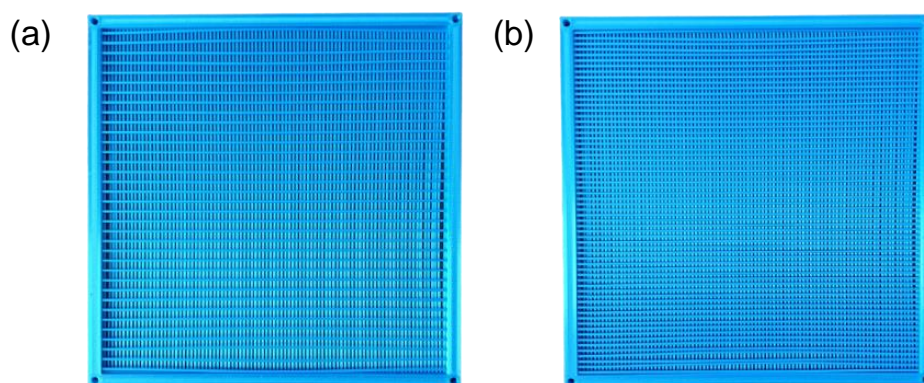
**Figura 59.** Dimensiones del marco (cuadrado,  $b=h$ ) utilizado en las mallas de captación. Fuente propia.

Las mallas fabricadas mediante impresión 3D son modelos que han sido diseñados previamente en SolidWorks y que posteriormente se han fabricado mediante una impresora 3D (Creality Ender-3). Estas mallas están impresas con filamentos de PLA, material resistente y flexible, que además soporta los rayos ultravioletas (característica interesante para la puesta en marcha en campo). El diseño consiste en añadirle el marco de  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  a las mallas tipo arpa que se utilizaron en el *capítulo 2* (aumentando su sección de  $8 \times 8 \text{ cm}^2$  a  $14 \times 14 \text{ cm}^2$ ). Con el objetivo de estudiar mallas con diferentes coeficientes de sombra, se diseñan e imprimen tres mallas tipo arpa:  $SC=25\%$  (Figura 60a);  $SC=45\%$  (Figura 60b);  $SC=65\%$  (Figura 60c).



**Figura 60.** Mallas de captación tipo arpa ( $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$ ) de diferentes coeficientes de sombra, fabricadas con una impresora 3D. (a)  $SC=25\%$ ; (b)  $SC=45\%$ ; (c)  $SC=65\%$ . Escala 1:3. Fuente propia.

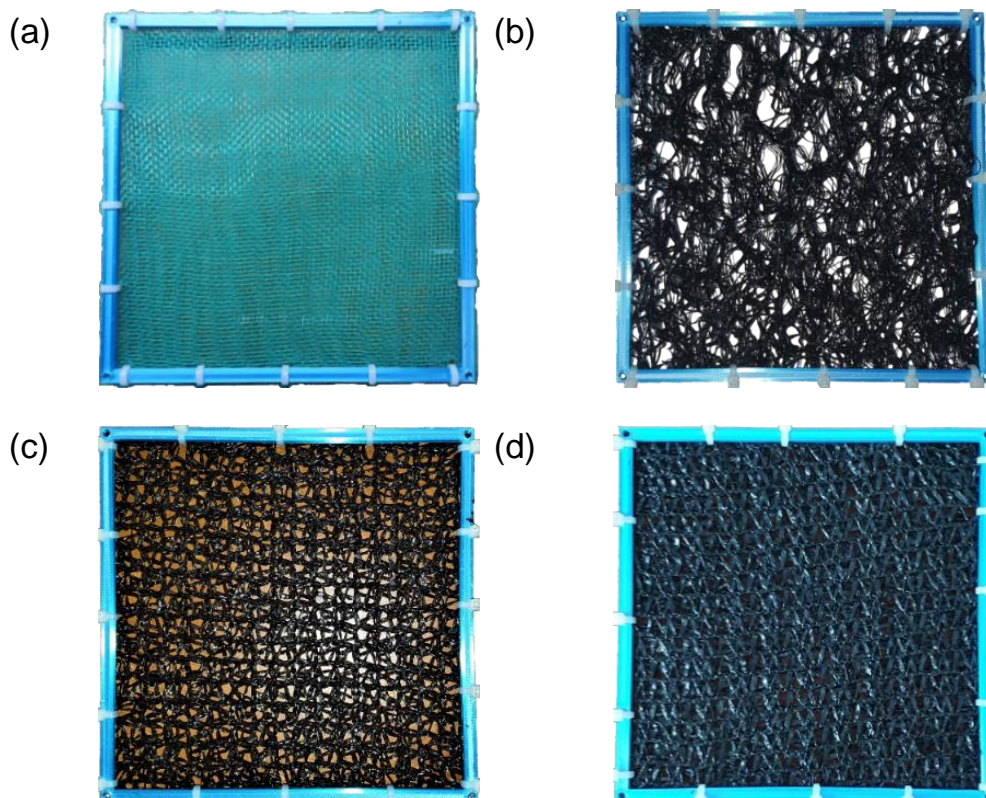
El coeficiente de sombra máximo que se puede obtener para una malla tipo arpa mediante la impresora 3D es de  $SC=65\%$ . Esto se debe a que la impresora 3D tiene una precisión de 0.4 mm. Las mallas que se van a fabricar tienen un diámetro de hilo de  $d=1 \text{ mm}$ , por lo tanto para coeficientes de sombra mayores de  $SC=65\%$  la distancia entre ejes de hilos es de  $d'=1.33 \text{ mm}$  (según  $SC=d/d'$ , ecuación del  $SC$  para una malla tipo arpa *capítulo 1*). Esto significa que el espaciado entre los hilos es de 0.33 mm (distancia menor a la precisión de la impresora 3D). Esto ocasiona que a la hora de imprimir las mallas algunos hilos estén pegados, no consiguiendo una buena resolución de la malla.



**Figura 61.** Mallas de captación cuadricular ( $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$ ) de diferentes coeficientes de sombra utilizando dos mallas tipo arpa impresas en 3D. (a)  $65\%+25\%$ ; (b)  $65\%+45\%$ . Escala 1:3. Fuente propia.

Para obtener mallas tupidas (alto  $SC=70-95\%$ ) se acopla la malla tipo arpa de  $SC=65\%$  con la de  $SC=45\%$  (Figura 61a) y se hace lo mismo con la de  $SC=25\%$  (Figura 61b). De esta forma y girando una sobre la otra  $90^\circ$ , se obtiene dos mallas cuadriculares. Estas dos mallas cuadriculares son las que se ensayan en el tunel, con el objetivo de obtener caídas de presión significativas ( $\Delta P > 20$  Pa).

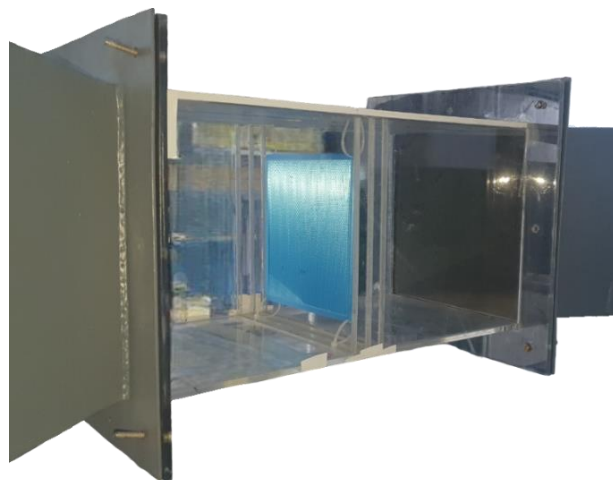
Con respecto a las mallas comerciales montadas sobre el marco, se pueden diferenciar tres tipos: mosquiteras, volumétricas y Raschel (Figura 62). Estas mallas tienen coeficientes de sombra bajos ( $SC=30-50\%$ ) cuando son simples (una lámina de malla) y por ello se utilizará varias láminas para aumentar su  $SC$ . La malla volumétrica será doble (dos láminas), la mosquitera será triple (tres láminas) y la Raschel se ensayará tanto doble como triple. De este modo, al igual que con las mallas fabricadas mediante impresión 3D, se asegura que el  $SC$  sea lo suficientemente alto como para obtener caídas de presión significativas.



**Figura 62.** Mallas de captación comerciales montadas sobre el marco fabricado mediante impresión 3D ( $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$ ) y sujetas con bridas. (a) Mosquitera triple; (b) volumétrica doble; (c) Raschel doble; (d) Raschel triple. Escala 1:3. Fuente propia.

A la hora de sujetar las mallas comerciales al marco (impreso en 3D) se ha optado por utilizar pequeñas bridas, que interfieran lo mínimo posible en la dirección de las líneas de flujo. La malla queda fijada por delante de la cara del marco que recibe la fuerza de arrastre ejercida por el viento (cara anterior al flujo). Esto permite que el aire no se filtre a través de los huecos que se forman entre las bridas.

El marco de la malla tiene un orificio de  $\varnothing=3$  mm en cada extremo, que nos posibilita fijar la malla dentro de la cámara de ensayos. Los orificios situados en los extremos superiores nos permiten sujetar la malla a la tapa superior mediante bridas (Figura 63). También se colocan bridas en los dos orificios inferiores y se pasan por las aberturas de la cara inferior de la cámara de ensayos. Estas se sujetan mediante cinta aislante, lo cual equilibra y fija la malla en el centro impidiendo que no sea arrastrada por el viento.



**Figura 63.** Malla de captación fijada en el centro de la cámara de ensayos utilizando bridas en la parte superior e inferior. Fuente propia.

### **2.3. Método para la medición de la caída de presión (manómetro de presión diferencial)**

La variable fundamental de este capítulo es la caída de presión ( $\Delta P$ ). Esta se obtiene midiendo, simultáneamente, la presión absoluta justo en la parte anterior a la malla (antes de la malla,  $P_e$ ) y en la parte posterior a la malla (después de la malla,  $P_s$ ). Estas presiones se miden utilizando un manómetro de presión

diferencial PCE-PDA 1L (Figura 64), al cual se le conectan dos tubos (PVC) de igual sección en sus bornes (toma positiva y negativa). Este dispositivo de medición entrega directamente el valor de  $\Delta P$ . Además cuenta con una opción para mejorar la resolución de la medida  $\times 10$ , obteniendo valores de caída de presión más precisos (con un decimal).

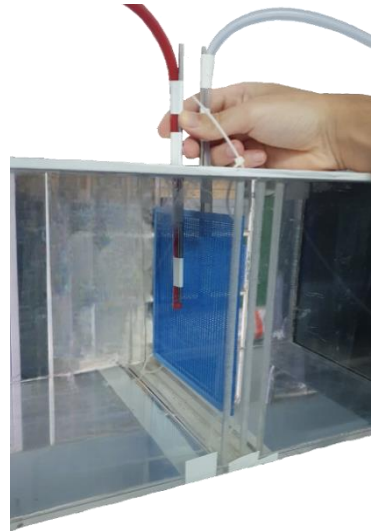


**Figura 64.** Manómetro de presión diferencial (PCE-PDA 1L). El borne de la derecha es la toma positiva (manguera roja) y el de la izquierda es la toma negativa (manguera blanca). Fuente propia.

Este modelo posee una exactitud de 0.5% FS (Full Scale, fondo de escala) al medir presiones (Anexo 2). El fondo de escala está referido a la presión nominal del manómetro, la cual es 2 kPa, por tanto según el fabricante el error en la medida de presión es de  $\pm 10$  Pa. Por otro lado, las certificaciones de calibración realizadas a este tipo de manómetro indican incertidumbres de la mitad de 0.5% FS (según PCE Instruments). Esto significa que el error en la medida es de  $\pm 5$  Pa. Este error nos exige utilizar mallas tupidas ( $SC=70\%-95\%$ ) y velocidades altas, y de esta forma obtener caídas de presión lo más elevadas posibles.

La caída de presión se mide conectando dos tubos de silicona al manómetro, uno de color rojo y el otro de color blanco (Figura 65). El tubo rojo se conecta en la toma positiva y el blanco en la toma negativa. Así mismo, el rojo se introduce en el orificio ubicado en la parte anterior de la malla o delante de la malla (mayor presión) y el blanco en la parte posterior (menor presión). Al igual que en la medición de la velocidad, se toman medidas de la caída de presión que experimenta el aire a su paso por la malla a diferentes alturas, en las secciones transversales implicadas en los estudios.





**Figura 65.** Método de medición de la caída de presión, donde se insertan los tubos de silicona. El tubo rojo (toma positiva) se introduce en la parte anterior de la malla y el tubo blanco (toma negativa) se introduce en la parte posterior. Fuente propia.

Es importante que a la hora de realizar las medidas ambos tubos se ubiquen a la misma altura y que sus terminaciones estén completamente paralelas a la dirección del flujo, para evitar errores de medida. Sin embargo, cuando los tubos se ubican en el centro o en la parte inferior de la vertical, estos se flexionan debido a la fuerza ejercida por el aire. Para solucionar esto, los tubos se rigidizaron mediante una varilla de metal, la cual se unirá al extremo del tubo que se introducirá en el orificio de medición (Figura 66).



**Figura 66.** Tubos del manómetro diferencial rigidizados con una varilla de metal unida con cinta aislante. El tubo rojo corresponde a la toma positiva colocada a la entrada de la malla y el tubo blanco a la toma negativa colocada en la salida de la malla. Fuente propia

## **2.4. Método para la medición de la velocidad del flujo libre (anemómetro de hilo caliente)**

La velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) es una variable de suma importancia a la hora de obtener parámetros aerodinámicos. Esta se mide con un anemómetro de hilo

caliente TMA-21 HW (Figura 67). El anemómetro de hilo caliente es un instrumento de gran precisión, muy utilizado en los laboratorios para estudios aerodinámicos principalmente con gases. Su pequeño tamaño permite medir velocidades muy cercanas al contorno en el que se mueve el fluido. Este dispositivo se compone principalmente de un sensor (alambre delgado de un metal inerte) que es calentado por una corriente eléctrica y enfriado proporcionalmente, de acuerdo con la componente de la velocidad del flujo que incide en el perpendicularmente. La corriente eléctrica del sensor sufre variaciones en función de la velocidad del flujo, con el objetivo de mantener su resistencia a temperatura constante.

Además, el anemómetro de hilo caliente escogido nos permite medir la temperatura (T) y la humedad relativa (HR), datos que servirán para obtener la densidad del aire,  $\rho$  (diagrama psicrométrico) del laboratorio de hidráulica.



**Figura 67.** Anemómetro de hilo caliente (TMA-21 HW). Fuente propia.

Este anemómetro tiene una exactitud en la medida de  $\pm 3\%$  cuando mide velocidades, lo que significa que este instrumento de medición tiene un error relativo ( $\epsilon$ ) de un 3% sobre la medición real de la velocidad. En cuanto a la temperatura, el error es de  $\pm 0.5$  °C y la humedad relativa es de  $\pm 3\%$  (Anexo 2).

La medición de  $u_{\infty}$  se toma introduciendo el anemómetro de hilo caliente en el orificio situado en la entrada de la cámara de ensayos (Figura 68). De esta forma se asegura que la medición de la velocidad no está perturbada por la malla de

captación. Además, esta velocidad se toma en varios puntos del eje vertical: superior (6 cm del centro), centro e inferior (-6 cm del centro). Para ello el anemómetro debe de estar perfectamente orientado en dirección y sentido del flujo. Este tiene un marca en rojo al lado del sensor que indica el sentido en el que se debe colocar, además la dirección debe ser lo más perpendicular posible al flujo.



**Figura 68.** Método de medición de la velocidad del flujo libre, donde se inserta el anemómetro de hilo caliente al principio de la cámara de ensayos y suficientemente alejado de la malla de captación. Fuente propia.

Con el objetivo de que las medidas sean lo más precisas posibles, hay una opción en el menú de selección del anemómetro, que permite registrar las medidas de velocidad que toma el sensor. Esta opción nos permite seleccionar el valor medio de todas las medidas que han sido almacenadas en un periodo de tiempo determinado (30 segundos). De esta forma, se puede estimar de forma más representativa el valor real de la velocidad en ese punto.

Por otra parte, utilizando como accesorio un tubo de Pitot (Figura 69) en el manómetro diferencial, es posible medir velocidades y caudales. Sin embargo, las mediciones de velocidad con este accesorio son menos fiables en estos casos, pues se usan para medir en rangos de velocidad superiores. Por ello se utiliza el anemómetro de hilo caliente el cual trabaja con velocidades bajas y aire como



fluido de trabajo. El tubo de Pitot está pensado para realizar estudios con niebla, ya que este es capaz de medir líquidos (a diferencia del anemómetro de hilo caliente).



**Figura 69.** Tubo de Pitot que va conectado en el manómetro diferencial para la toma de velocidades y caudales. Fuente propia.

## **2.5. Método para la medición del coeficiente de sombra (escáner de área foliar)**

El coeficiente de sombra (SC) de las mallas impresas en 3D es un parámetro conocido, ya que se han diseñado previamente en el software SolidWorks. En cambio, las mallas comerciales montadas sobre un marco tienen un coeficiente de sombra incierto, principalmente porque se utilizan varias láminas que se montan entre sí para obtener coeficientes de sombra elevados. Por lo tanto, se hace uso de un escáner (Figura 70). Mediante el Software WinDIAS 3 (programa incluido con el escáner) se puede obtener la relación de áreas (área ocupada por los hilos dividida entre el área total) expresada en un tanto por ciento, obteniendo así el coeficiente de sombra.



**Figura 70.** Escáner de área foliar (WD-E3 WinDIAS). Fuente propia.

Este escáner se compone de: una plataforma de cristal con un foco inferior regulable, donde se coloca la malla; una cámara de alta resolución, que se emplea para tomar una foto de la malla; y el software (WinDIAS), que controla la cámara y que además permite calcular el porcentaje de área sólida y vacía (coeficiente de sombra y porosidad respectivamente) respecto al área total.

Para medir  $SC$ , lo primero es colocar la malla en la plataforma de cristal de manera que quede centrada respecto a la cámara y ajustar la intensidad del foco inferior hasta que la malla se distinga del fondo (Figura 71). Lo siguiente será ajustar la altura de la cámara de alta resolución y posteriormente enfocar la lente para obtener mayor nitidez. Cuando la cámara está enfocando la malla, se realiza una foto desde el programa y se escoge la zona que se va a estudiar de la foto, que en este caso será la malla sin el marco. Por último, el programa detecta el área que ocupan los hilos y el área de los huecos mediante colores.



**Figura 71.** Malla de captación Raschel doble centrada en la plataforma de cristal y alumbrada por el foco inferior a una cierta intensidad. Fuente propia.

### 3. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Después de explicar el procedimiento que se va a llevar a cabo mediante los ensayos experimentales, se procede a obtener para las diferentes mallas (3D y comerciales) el coeficiente de sombra ( $SC$ ), la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ), la caída

de presión que experimenta el flujo a su paso por la malla ( $\Delta P$ ) y la densidad del aire en el laboratorio de hidráulica del ICIA ( $\rho$ ).

Las mallas a estudiar son seis. Por un lado, las fabricadas mediante impresión 3D: malla cuadrangular de  $SC=65\%+45\%$  y de  $SC=65\%+25\%$  y, por otro lado, las mallas comerciales montadas sobre un marco: malla mosquitera triple, volumétrica doble, Raschel doble y Raschel triple. Estas mallas deben ser suficientemente tupidas ( $SC=70-95\%$ ) para poder así obtener caídas de presión significativas ( $\Delta P > 20$  Pa). Además, sabemos que  $u_\infty$  está relacionada con  $\Delta P$ , ya que como se estudió en el capítulo 2, la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) aumenta en función de  $u_\infty$ . Al ser  $\Delta P$  proporcional a  $F_D$  nos interesa trabajar con  $u_\infty$  altas ( $6-10$  m s<sup>-1</sup>).

Por último, para reducir los diferentes errores, tanto de medición como humanos, se llevaron a cabo cuatro lecturas sucesivas de  $\Delta P$  en cada ensayo y se trabaja posteriormente con sus valores promedio, para conseguir así una mayor precisión en las medidas.

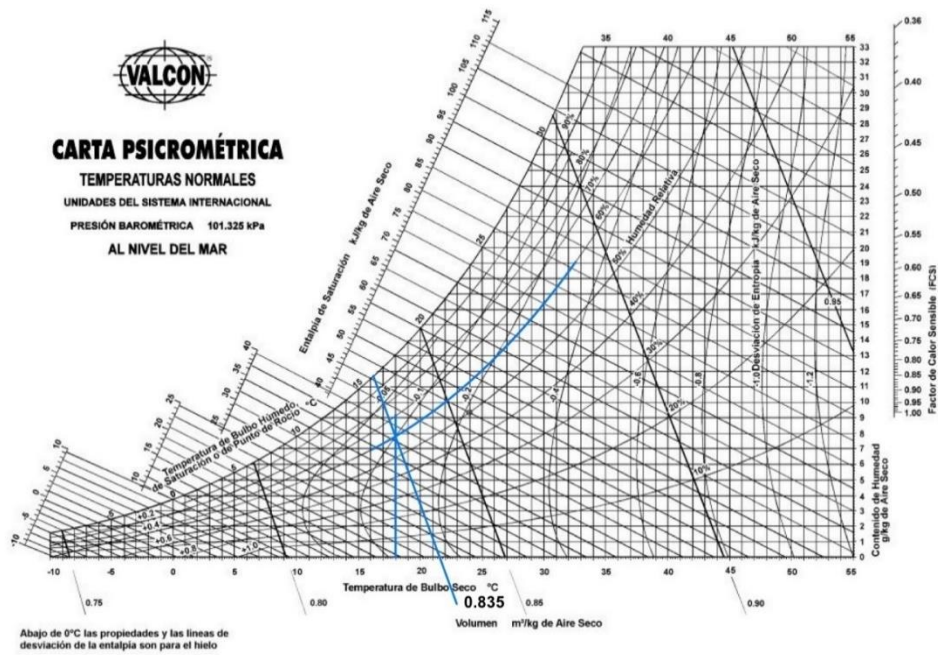
### 3.1. Temperatura y humedad relativa

Los valores medidos de temperatura ambiente y humedad relativa son necesarios para obtener la densidad del aire en el laboratorio de hidráulica del ICIA ( $\rho$ ). Utilizando el anemómetro de hilo caliente se midió la temperatura ambiente y la humedad relativa (Tabla 5). Se tomaron medidas de estos dos parámetros en diferentes días obteniendo los siguientes resultados promedios:

**Tabla 5.** Resultados de la temperatura ambiente y la humedad relativa del laboratorio de hidráulica. Fuente propia.

Temperatura ambiental, $T_{amb}$ (°C)	Humedad relativa, HR (%)
18	59

Utilizando el diagrama psicrométrico (Figura 72) se obtiene el volumen específico,  $v$  (m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>), el cual es la inversa de la densidad:



**Figura 72.** Diagrama psicrométrico, donde se observa el procedimiento gráfico que se lleva a cabo para obtener el volumen específico ( $T_{amb}=18\text{ °C}$  y  $HR=59\%$ ). Fuente propia.

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0.835\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}} = 1.198\text{ kg m}^{-3}$$

## 3.2. Coeficiente de sombra

### 3.2.1. Mallas impresas en 3D

El coeficiente de sombra ( $SC$ ) de una malla cuadrícula compuesta por dos mallas tipo arpa se puede calcular de forma directa utilizando la definición de  $SC$  para diferentes capas (Azeem et al., 2020).

$$SC_T = [1 - (1 - SC_1)(1 - SC_2)] \quad (3.1)$$

Esta relación para obtener el  $SC_T$  para las mallas impresas en 3D se ha comprobado que es cierta, obteniendo la ecuación geometría resultante de dos mallas tipo arpa que se intersecan.

- Malla cuadrícula ( $SC_1=65\%$  y  $SC_2=45\%$ ):

$$SC_T = [1 - (1 - 0.65)(1 - 0.45)] = 0.8075 = 80.75\%$$

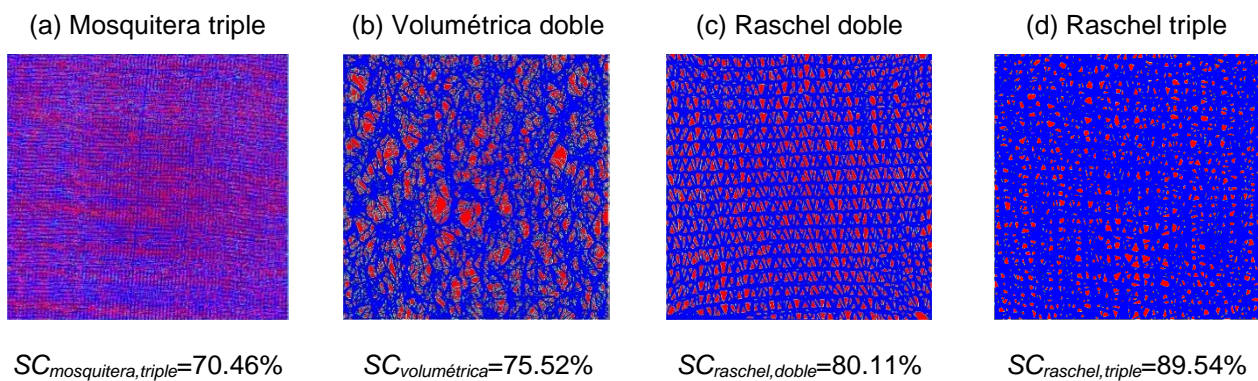
- Malla cuadrícula ( $SC_1=65\%$  y  $SC_2=25\%$ ):

$$SC_T = [1 - (1 - 0.65)(1 - 0.25)] = 0.7375 = 73.75\%$$

### 3.2.2. Mallas comerciales

El coeficiente de sombra de las mallas comerciales se obtiene utilizando el escáner, ya que presentan disposiciones de filamentos difíciles de representar mediante una ecuación analítica.

El escáner nos proporciona la porosidad de la malla ( $\beta$ ) con la cual se calcula  $SC$  ( $SC=1-\beta$ ). El programa colorea de azul los contornos del área ocupada por los hilos y de rojo el área ocupada por los huecos. En la *Figura 73* se muestran los  $SC$  obtenidos para las mallas objeto de estudio.



**Figura 73.** Coeficiente de sombra de mallas comerciales obtenido mediante el escáner. Área ocupada por los hilos (azul) y área de los huecos (rojo). Fuente propia.

### 3.3. Velocidad del flujo libre

La velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) es una medida que no varía en función de la malla que se mida. Por ello, los resultados son “globales” y serán utilizados para calcular el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) de todas las mallas. Se realizaron hasta veinticuatro mediciones de la velocidad del flujo libre, ya que se tomaron cuatro series de medidas por malla (seis mallas diferentes) en los tres puntos de la vertical. El ventilador se utilizará a dos frecuencias ( $f$ ): 20 y 30 Hz, que nos proporcionarán dos velocidades diferentes de trabajo (velocidad del flujo libre).

Se puede observar en la *Tabla 6* las velocidades obtenidas para las dos frecuencias de trabajo del ventilador, observándose pequeñas variaciones de  $u_{\infty}$  en función de la altura en la vertical del punto de medición (superior, centro e inferior).

**Tabla 6.** Resultados de la velocidad del flujo libre a diferentes alturas y frecuencias. Fuente propia.

	Velocidad del flujo libre, $u_{\infty}$ (m s <sup>-1</sup> )	
	Frecuencia, f (20 Hz)	Frecuencia, f (30 Hz)
Superior	6.08	8.58
Centro	6.18	8.81
Inferior	6.31	8.97
Promedio	6.19	8.79

Estos resultados corresponden con un perfil de velocidades propio de un régimen de corriente turbulento. Se obtienen valores de  $Re \approx 8 \cdot 10^4 - 12 \cdot 10^4$  para las velocidades obtenidas al principio de la malla (ecuación de  $Re$  descrita en el *capítulo 1* para una placa plana):

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot l}{\nu} = \frac{6.19 \text{ m s}^{-1} \cdot 0.2 \text{ m}}{1.516 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}} \approx 8 \cdot 10^4$$

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot l}{\nu} = \frac{8.79 \text{ m s}^{-1} \cdot 0.2 \text{ m}}{1.516 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}} \approx 12 \cdot 10^4$$

Esto nos indica que el flujo en la cámara de ensayos se comporta en régimen turbulento y por ende que la variación de la velocidad en los puntos de la vertical debe ser de pequeña magnitud.

Por otra parte los resultados obtenidos en los extremos, al ser tomados a 6 cm del centro de la malla, están situados a 4 cm de la pared, por lo que los efectos debidos a la capa límite no deben ser significativos. También debemos tener en cuenta posibles errores experimentales, ya que existe un error experimental en la medida del anemómetro de  $\varepsilon = \pm 3\%$ .

### 3.4. Caída de presión

Como se observa en la *Figura 73* y en el *apartado 3.2.1*, todas las mallas a estudiar presentan coeficientes de sombra altos ( $SC > 70\%$ ). Estos altos

coeficientes de sombra nos permiten trabajar en un rango de caídas de presión mayores, lo que nos permitirá obtener una mayor precisión en las medidas experimentales. Por otra parte, como se comentó en el *apartado 2.4*, los resultados de la caída de presión obtenidos mediante el manómetro diferencial presentan un error de  $\pm 5$  Pa. Además, se han tomado medidas de la caída de presión a tres alturas diferentes (superior, centro e inferior) y se han repetido cuatro veces para cada malla. Esto significa que los valores de la caída de presión obtenidos para cada altura son un promedio de cuatro tomas diferentes. Ya obtenido la caída de presión en cada punto de la vertical, se realiza nuevamente un promedio de estas tres alturas, obteniendo el valor con el que se va a trabajar. Con este procedimiento se logra una mayor representatividad y precisión de los datos obtenidos. A continuación se lista, por medio de tablas, los resultados obtenidos de la caída de presión para cada malla:

- Malla cuadrangular,  $SC=73.75\%$ :

**Tabla 7.** Resultados de la caída de presión de la malla cuadrangular de  $SC=73.75\%$  medidos en tres puntos de la vertical (superior, centro e inferior) situados en la parte posterior y anterior de la malla, y su correspondiente promedio. Fuente propia.

	Caída de presión, $\Delta P$ (Pa)	
	Velocidad, $u_{\infty}= 6.19 \text{ m s}^{-1}$	Velocidad, $u_{\infty}= 8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Superior</b>	20.33	45.16
<b>Centro</b>	20.41	42.97
<b>Inferior</b>	19.36	44.07
<b>Promedio</b>	20.03	44.07

- Malla cuadrangular,  $SC=80.75\%$ :

**Tabla 8.** Resultados de la caída de presión de la malla cuadrangular de  $SC=80.75\%$  medidos en tres puntos de la vertical (superior, centro e inferior) situados en la parte posterior y anterior de la malla, y su correspondiente promedio. Fuente propia.

	Caída de presión, $\Delta P$ (Pa)	
	Velocidad, $u_{\infty}= 6.19 \text{ m s}^{-1}$	Velocidad, $u_{\infty}= 8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Superior</b>	27.13	54.61
<b>Centro</b>	25.74	56.10
<b>Inferior</b>	26.99	56.13
<b>Promedio</b>	26.62	55.61

- Malla mosquitera triple,  $SC=70.46\%$ :

**Tabla 9.** Resultados de la caída de presión de la malla mosquitera triple de  $SC=70.46\%$  medidos en tres puntos de la vertical (superior, centro e inferior) situados en la parte posterior y anterior de la malla, y su correspondiente promedio. Fuente propia.

	Caída de presión, $\Delta P$ (Pa)	
	Velocidad, $u_{\infty}= 6.19 \text{ m s}^{-1}$	Velocidad, $u_{\infty}= 8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Superior</b>	14.56	32.09
<b>Centro</b>	15.24	34.90
<b>Inferior</b>	16.65	40.50
<b>Promedio</b>	15.48	35.83

- Malla volumétrica doble,  $SC=75.52\%$ :

**Tabla 10.** Resultados de la caída de presión de la malla volumétrica doble de  $SC=75.52\%$  medidos en tres puntos de la vertical (superior, centro e inferior) situados en la parte posterior y anterior de la malla, y su correspondiente promedio. Fuente propia.

	Caída de presión, $\Delta P$ (Pa)	
	Velocidad, $u_{\infty}= 6.19 \text{ m s}^{-1}$	Velocidad, $u_{\infty}= 8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Superior</b>	20.70	36.32
<b>Centro</b>	16.61	32.36
<b>Inferior</b>	19.23	41.06
<b>Promedio</b>	18.85	36.58

- Malla Raschel doble,  $SC=80.11\%$ :

**Tabla 11.** Resultados de la caída de presión de la malla Raschel doble de  $SC=80.11\%$  medidos en tres puntos de la vertical (superior, centro e inferior) situados en la parte posterior y anterior de la malla, y su correspondiente promedio. Fuente propia.

	Caída de presión, $\Delta P$ (Pa)	
	Velocidad, $u_{\infty}= 6.19 \text{ m s}^{-1}$	Velocidad, $u_{\infty}= 8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Superior</b>	30.71	67.39
<b>Centro</b>	32.34	68.24
<b>Inferior</b>	30.29	69.28
<b>Promedio</b>	31.11	68.30



- Malla Raschel triple,  $SC=89.54\%$

**Tabla 12.** Resultados de la caída de presión de la malla Raschel triple de  $SC=89.54\%$  medidos en tres puntos de la vertical (superior, centro e inferior) situados en la parte posterior y anterior de la malla, y su correspondiente promedio. Fuente propia.

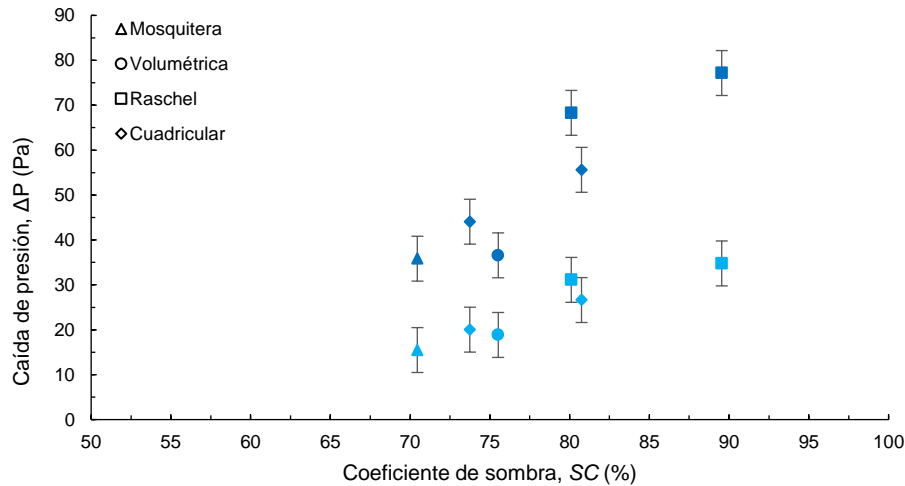
	Caída de presión, $\Delta P$ (Pa)	
	Velocidad, $u_\infty= 6.19 \text{ m s}^{-1}$	Velocidad, $u_\infty= 8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Superior</b>	34.85	78.56
<b>Centro</b>	34.46	77.64
<b>Inferior</b>	35.03	75.31
<b>Promedio</b>	34.78	77.17

Los resultados de la caída de presión promedio se encuentran en un rango entre 15-78 Pa. Por otro lado, la distribución de presiones a diferentes alturas es similar y no se aprecia una tendencia de los resultados en función de la altura a la que se toma la caída de presión.

Se observa en la *Figura 74* que los resultados siguen un comportamiento similar para ambos casos de  $u_\infty$ , siendo los resultados de  $\Delta P$  mayores en función del aumento de  $u_\infty$ . Por un lado, es esperable que aumentar  $u_\infty$  implica caídas de presión mayores ( $u_\infty$  está relacionado con el aumento de  $F_D$  y este con  $\Delta P$ ) y, por otro, las variaciones que existen entre los diferentes diseños se repiten independientemente de  $u_\infty$ . Esto último es de gran importancia, ya que nos indica cierta tendencia en los resultados. Por ejemplo, las mallas Raschel presentan una  $\Delta P$  muy superior a los otros tipos de mallas, observándose que la malla Raschel de  $SC=80.11\%$  (doble) presenta una mayor  $\Delta P$  que la malla cuadrangular de  $SC=80.75\%$ . También se puede observar cómo la malla cuadrangular de  $SC=73.75\%$  presenta una mayor  $\Delta P$  que la malla volumétrica de mayor  $SC$ . Por otro lado la volumétrica y la mosquitera presentan  $\Delta P$  similares, aun existiendo una diferencia de  $SC=5\%$  entre ellas.

Todas estas discrepancias que se observan entre los diferentes modelos respecto al  $SC$  nos indican que hay otros factores que están interviniendo en los valores obtenidos de la caída de presión. Según Marchand et al. (2023) las principales características físicas que están involucradas en la resistencia al flujo (entendida

como toda variable dependiente de esta:  $F_D$ ,  $\Delta P$ ,  $C_D$ ...) son la porosidad (nuestro caso) y la permeabilidad. La permeabilidad de la malla se define como un parámetro que relaciona el gradiente de presión con la velocidad local del flujo y está directamente relacionada con la geometría de los filamentos. Este parámetro podría explicar por qué los resultados de la caída de presión obtenidos para diferentes modelos no dependen únicamente del SC.



**Figura 74.** Caída de presión en función del coeficiente de sombra de mallas con diferentes diseños, velocidades:  $u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$  (azul claro);  $u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$  (azul oscuro). Se representa el error en la medición de los resultados experimentales ( $\varepsilon=\pm 5 \text{ Pa}$ ) mediante barras. Fuente propia.

## 4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE

### 4.1. Fuerza de arrastre de la malla con marco

La fuerza de arrastre ( $F_D$ ) es un parámetro aerodinámico de gran importancia en este capítulo, ya que se pretende obtener valores del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) únicamente relacionados con la malla de captación (restando la componente del marco). A partir de los resultados obtenidos de la caída de presión ( $\Delta P$ ) se calcula  $F_D$  siendo la sección frontal de la malla,  $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$  (ecuación 3.2).

$$F_D = A \cdot \Delta P \quad (3.2)$$

Como se puede observar en la *Tabla 13*, al igual que como observamos en el *capítulo 2*, la  $F_D$  varía en función de la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ).

**Tabla 13.** Resultados de la fuerza de arrastre obtenidas a partir de las medidas experimentales de la caída de presión para diferentes mallas de captación y velocidades del flujo libre. Fuente propia.

	Fuerza de arrastre, $F_D$ (N)	
	$u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$	$u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$
Cuadrangular (SC=73.75%)	0.45	0.99
Cuadrangular (SC=80.75%)	0.60	1.25
Mosquitera triple (SC=70.46%)	0.35	0.81
Volumétrica doble (SC=75.52%)	0.42	0.82
Raschel doble (SC=80.11%)	0.70	1.54
Raschel triple (SC=89.54%)	0.78	1.74

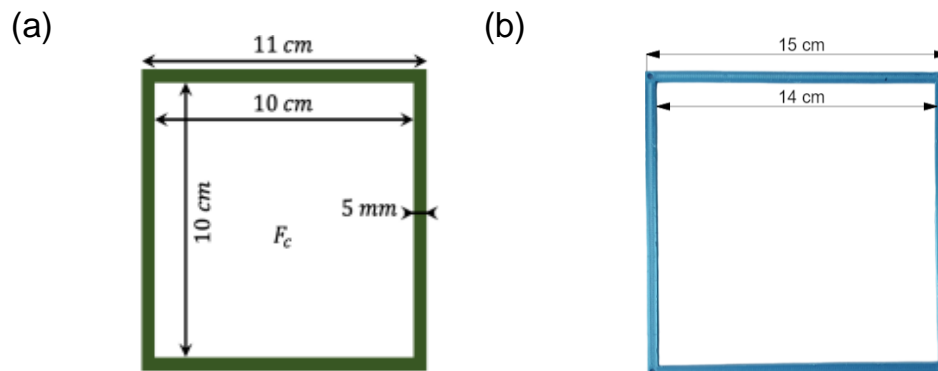
## 4.2. Fuerza de arrastre de la malla sin marco

Con el objetivo de obtener un resultado de la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) centrado únicamente en la malla,  $F_{D,malla}$  (sin marco), se debe conocer la fuerza de arrastre que ejerce el flujo sobre el marco ( $F_{D,marco}$ ) y restársela a la que se ejerce sobre la malla ensayada,  $F_{D,mm}$  (con marco).

Para ello nos apoyamos en los valores de  $F_D$  que Marchand et al. (2023) obtienen para un marco de sección  $A=11 \times 11 \text{ cm}^2$  (Figura 75). Este marco se diferencia del que se ha utilizado en los ensayos experimentales por su área frontal, que en nuestro caso es de  $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$ . Al ser un marco más pequeño que el utilizado, se debe realizar una extrapolación de los resultados suponiendo que  $F_D$  aumenta proporcionalmente con el área frontal ( $A$ ) y que la caída de presión ( $\Delta P$ ) se mantiene constante.

En principio, la hipótesis de que la  $\Delta P$  sea constante en ambas mallas se basa en que el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) también lo sea. Según la ecuación 3.2, si la densidad ( $\rho$ ) y la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) son las mismas en ambos casos, el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) debe ser igual o extremadamente similar en las dos mallas. El coeficiente de arrastre depende del número de Reynolds ( $Re$ , estudio realizado en el capítulo 2) y  $Re$  depende de la longitud característica, que en el

caso de una malla es el lado. El lado de la malla en este caso de estudio no es igual, sin embargo, para placas planas el  $C_D$  es constante para valores de  $Re$  entre  $10^3$  y  $10^6$ . En nuestro caso el número de Reynolds está en torno a  $Re=4.5 \cdot 10^4$ - $8.7 \cdot 10^4$  y, por lo tanto, estaríamos dentro del rango, lo que permite darse una situación donde la caída de presión sea la misma en ambas mallas.



**Figura 75.** (a) Marco utilizado en el artículo Marchand et al. (2023); (b) Marco cuadrado utilizado en el presente trabajo. Fuente propia.

Marchand et al. (2023) obtienen resultados de  $F_{D,marco}$  para diferentes  $u_\infty$ . Mediante una interpolación de los resultados, se puede obtener el valor de la fuerza de arrastre para las velocidades ensayadas en este capítulo (ecuación 3.3).

$$F_D = \frac{F_{D,2} - F_{D,1}}{u_{\infty,2} - u_{\infty,1}} \cdot (u_\infty - u_{\infty,1}) + F_{D,1} \quad (3.3)$$

donde:

- El subíndice 1 está referido al valor por debajo del resultado a obtener y el subíndice 2 al valor por encima.

Como podemos observar en la *Tabla 14*, se obtienen las siguientes fuerzas de arrastre:  $F_{D,marco}(u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1})=0.039 \text{ N}$  y  $F_{D,marco}(u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1})=0.091 \text{ N}$ .

**Tabla 14.** Interpolación de los resultados de la fuerza de arrastre correspondiente al marco de Marchand et al. (2023) de sección frontal  $A=11 \times 11 \text{ cm}^2$ . En negrita se marcan las velocidades del flujo libre y la fuerza de arrastre obtenidas mediante la interpolación de los resultados de Marchand et al. (2023). Fuente propia con base en Marchand et al. (2023).

Velocidad del flujo libre, $u_\infty$ (m s <sup>-1</sup> )	Fuerza de arrastre, $F_{D,marco}$ (N)
5.98	0.036
<b>6.19</b>	<b>0.039</b>
7.00	0.052
8.02	0.072
<b>8.79</b>	<b>0.091</b>
8.97	0.095

A fin de obtener  $F_{D,marco}$  de los ensayos experimentales se calcula la caída de presión, utilizando la ecuación 3.2, con los resultados de Marchand et al. (2023) para las velocidades de trabajo de este capítulo y la sección frontal de su marco ( $A=11 \times 11 \text{ cm}^2$ ). La caída de presión obtenida (Tabla 15) corresponde al marco, independientemente de su sección.

**Tabla 15.** Resultados de la caída de presión correspondientes al marco de Marchand et al. (2023) para las velocidades de trabajo utilizadas en este capítulo. Fuente propia.

Marco de Marchand et al. (2023), $A=11 \times 11 \text{ cm}^2$		
Velocidad del flujo libre, $u_\infty$ (m s <sup>-1</sup> )	Fuerza de arrastre, $F_{D,marco}$ (N)	Caída de presión, $\Delta P_{marco}$ (Pa)
6.19	0.039	18.71
8.79	0.091	43.16

Mediante esta caída de presión y multiplicando por el área del marco utilizado en los ensayos experimentales ( $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$ ), se obtiene la fuerza de arrastre correspondiente al marco de los ensayos experimentales (Tabla 16).

**Tabla 16.** Resultados de la fuerza de arrastre correspondientes al marco de los ensayos experimentales para las velocidades de trabajo utilizadas en este capítulo. Fuente propia.

Marco de los ensayos experimentales, $A=15 \times 15 \text{ cm}^2$		
Velocidad del flujo libre, $u_\infty$ (m s <sup>-1</sup> )	Caída de presión, $\Delta P_{marco}$ (Pa)	Fuerza de arrastre, $F_{D,marco}$ (N)
6.19	18.71	0.054
8.79	43.16	0.125

Ya obtenida  $F_{D,marco}$  de los ensayos experimentales, la cual es mayor que la del marco de Marchand et al. (2023), se puede obtener la fuerza de arrastre correspondiente a la malla ( $F_{D,malla}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$F_{D,mm} = F_{D,malla} + F_{D,marco} \quad (3.4)$$

donde:

- $F_{D,mm}$ = Fuerza de arrastre de la malla con marco (N)
- $F_{D,malla}$ = Fuerza de arrastre de la malla sin marco (N)
- $F_{D,marco}$ = Fuerza de arrastre del marco (N)

Como se observa en la *Tabla 17*, se obtiene tanto la fuerza de arrastre ( $F_{D,malla}$ ) como la caída de presión ( $\Delta P_{malla}$ ) de la malla sin marco. Hay que resaltar que la caída de presión de la malla sin marco se calcula con la sección frontal de la malla, que sería  $A=14 \times 14 \text{ cm}^2$  (a partir de ahora  $F_D=F_{D,malla}$  y  $\Delta P=\Delta P_{malla}$ )

**Tabla 17.** Fuerza de arrastre y caída de presión de la malla sin marco para diferentes mallas de captación y velocidades del flujo libre. Fuente propia.

	Fuerza de arrastre, $F_{D,malla}$ (N)		Caída de presión, $\Delta P_{malla}$ (Pa)	
	$u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$	$u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$	$u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$	$u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Cuadrangular (SC=73.75%)</b>	0.34	0.74	17.26	37.68
<b>Cuadrangular (SC=80.75%)</b>	0.47	0.96	23.85	49.22
<b>Mosquitera triple (SC=70.46%)</b>	0.25	0.58	12.71	29.44
<b>Volumétrica doble (SC=75.52%)</b>	0.32	0.59	16.08	30.19
<b>Raschel doble (SC=80.11%)</b>	0.56	1.21	28.34	61.91
<b>Raschel triple (SC=89.54%)</b>	0.63	1.39	32.01	70.78

### 4.3. Coeficiente de arrastre de la malla sin marco

Una vez obtenido la caída de presión ( $\Delta P$ ), la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) y la densidad ( $\rho$ ) se procede a calcular el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) de las mallas de captación mediante la siguiente expresión:

$$C_D = \frac{2\Delta P}{\rho u_\infty^2} \quad (3.5)$$

Por otro lado, como también se ha calculado la fuerza de arrastre ( $F_D$ ) se puede calcular el coeficiente de arrastre mediante (ver capítulo 2):

$$C_D = \frac{2F_D}{A\rho v_\infty^2} \quad (3.6)$$

La barra de error que se representará en las gráficas del  $C_D$  es únicamente debida al manómetro diferencial ( $\varepsilon=\pm 5$  Pa). Sin embargo hay que entender que esta debería ser mayor debido a los errores experimentales que existen en el proceso. A modo de ejemplo, se explica cómo se ha realizado el cálculo del error del coeficiente de arrastre para la malla cuadrangular de  $SC=80.75\%$ . Primero se obtienen los valores límite de la caída de presión, considerando el error absoluto del manómetro diferencial,  $\varepsilon=\pm 5$  Pa (Tabla 18).

**Tabla 18.** Límites de error absoluto de la caída de presión para la malla cuadrangular de  $SC=80.75\%$  a diferentes velocidades del flujo libre ( $u_\infty$ ). Fuente propia.

Velocidad, $u_\infty$ (m s <sup>-1</sup> )	Caída de presión, $\Delta P$ (Pa)	Valores límite de $\Delta P$ ( $\Delta P \pm 5$ Pa)
6.19	23.85	28.85 – 18.85
8.79	49.22	54.22 – 44.22

A continuación se calcula mediante la ecuación (3.5) el  $C_D$  correspondiente a las caídas de presión y su respectivas velocidades del flujo libre. Además, se calcula el  $C_D$  de los límites de error absoluto de la caída de presión, obteniéndose el límite superior e inferior del coeficiente de arrastre. Por último, restando el valor de  $C_D$  obtenido experimentalmente con los límites de error absoluto del coeficiente de arrastre, se obtiene el error absoluto correspondiente a  $C_D$  (Tabla 19). Se observa para este caso concreto que el error absoluto obtenido a una  $u_\infty=6.19$  m s<sup>-1</sup> es el doble a una  $u_\infty=8.79$  m s<sup>-1</sup>.

**Tabla 19.** Error absoluto experimental de los coeficientes de arrastre obtenidos para la malla cuadrangular de  $SC=80.75\%$  a diferentes velocidades del flujo libre ( $u_\infty$ ). Fuente propia.

$u_\infty$ (m s <sup>-1</sup> )	Coeficiente de arrastre, $C_D$	Valores límite de $C_D$ ( $C_D \pm \varepsilon$ )	Error absoluto, $\varepsilon$ ( $C_D$ )
6.19	1.04	1.26 – 0.82	$\pm 0.22$
8.79	1.06	1.17 - 0.96	$\pm 0.11$

Los resultados del coeficiente de arrastre se han representado numéricamente (Tabla 20) y gráficamente (Figura 76), lo cual nos permite abordar su análisis de forma más completa y detallada. Principalmente se observa un aumento del coeficiente de arrastre para velocidades del flujo libre mayores, exceptuando el caso de la malla volumétrica. Esta singularidad podría deberse a la variabilidad que presentan los filamentos de la malla volumétrica, lo cual supone que dependiendo de donde se tome las medidas (agujero o filamento) se obtendrá resultados diferentes. Este fenómeno ocurre en todas las mallas cuando se toman medidas puntuales, sin embargo debido a la disposición de los filamentos de la malla volumétrica esta influencia es más pronunciada.

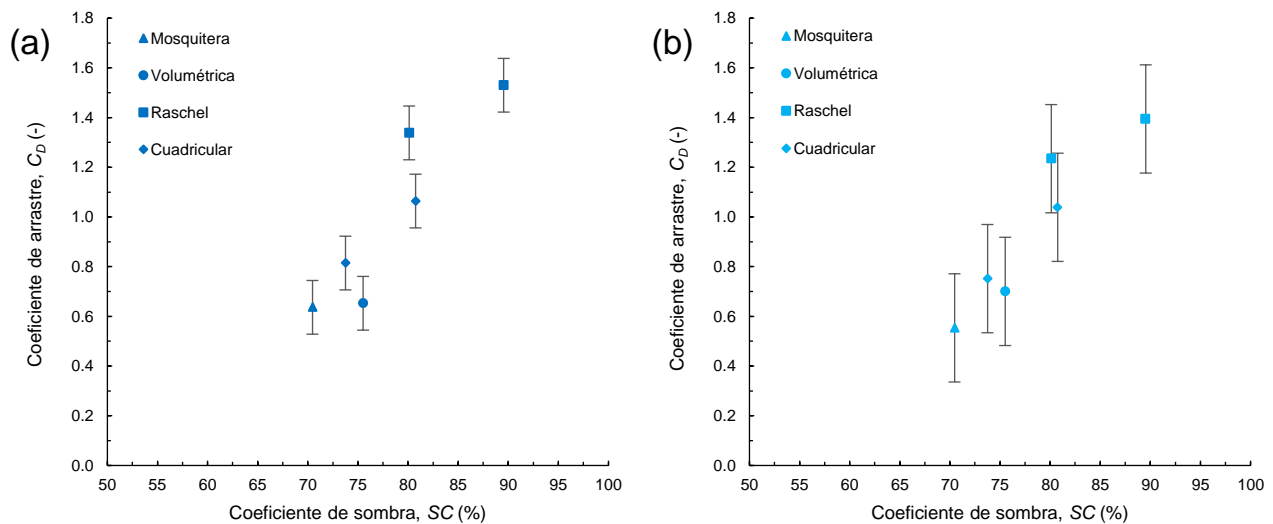
Las mallas Raschel, al igual que con la caída de presión, presentan los coeficientes de arrastre más altos entre las diferentes disposiciones de filamentos. Esto se puede apreciar cuando se compara el  $C_D$  de la malla Raschel doble ( $SC=80.11\%$ ) con el  $C_D$  de la malla cuadrangular ( $SC=80.75\%$ ). Por otra parte, el coeficiente de arrastre obtenido de las mallas Raschel (especialmente la que presenta un  $SC$  mayor) se encuentra por encima del coeficiente de arrastre de una placa plana  $C_D \approx 1.29$ . El caso contrario es la malla volumétrica doble ( $SC=75.52\%$ ), que presenta un  $C_D$  menor que el de la malla cuadrangular ( $SC=73.75\%$ ). Esta disposición parece ser la que presenta un menor  $C_D$  entre las ensayadas, ya que si se compara con la mosquitera ( $SC=70.46\%$ ) en velocidades del flujo libre altas ( $u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$ ) se obtiene el mismo  $C_D$  con un 5% menos de  $SC$ .

De acuerdo con la explicación dada en el apartado 3.4. las discrepancias del coeficiente de arrastre entre las diferentes mallas ensayadas se deben principalmente a dos factores: porosidad y permeabilidad. El primer factor (porosidad) se puede observar cuando se comparan mallas de misma disposición de filamento, pero con un  $SC$  diferente: cuadrangular o Raschel. Por otro lado, el segundo factor (permeabilidad) se observa cuando se comparan mallas de diferente disposición de filamentos y mismo  $SC$ : cuadrangular vs. volumétrica o cuadrangular vs. Raschel.



**Tabla 20.** Coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) obtenido para diferentes mallas de captación con diferentes SC y velocidades del flujo libre ( $u_\infty$ ).

	Coeficiente de arrastre, $C_D$ (-)	
	$u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$	$u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Cuadrangular (SC=73.75%)</b>	0.75	0.81
<b>Cuadrangular (SC=80.75%)</b>	1.04	1.06
<b>Mosquitera triple (SC=70.46%)</b>	0.55	0.64
<b>Volumétrica doble (SC=75.52%)</b>	0.70	0.65
<b>Raschel doble (SC=80.11%)</b>	1.23	1.34
<b>Raschel triple (SC=89.54%)</b>	1.39	1.53

**Figura 76.** (a) Coeficiente de arrastre en función del coeficiente de sombra para diferentes mallas de captación a una velocidad del flujo libre de  $u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$ . (b) Coeficiente de arrastre en función del coeficiente de sombra para diferentes mallas de captación a una velocidad del flujo libre de  $u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$ .

## 5. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA AERODINÁMICA

El cálculo de la eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) en este capítulo no se realiza de la misma manera que en el *capítulo 2*. Esto es debido a que no se cuenta con un método experimental que permita medir el lado del flujo libre ( $l_\infty$ ) o la velocidad del flujo que atraviesa la malla ( $u$ ). Por lo tanto, es necesario obtener el coeficiente de caída de presión ( $C_o$ ) mediante la definición propuesta por Idel'cik aplicada a mallas de seda, la cual fue explicada en el *capítulo 1*:

$$C_o = 1.62k_{Re} \left[ 1.3SC + \left( \frac{SC}{1-SC} \right)^2 \right] \quad (3.7)$$

Como podemos observar, según la expresión de Idel'cik, el coeficiente de caída de presión varía únicamente en función del coeficiente de sombra (SC) y no tiene en cuenta la velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) o la disposición de filamentos de la malla (estudio realizado en el capítulo 2). Esto se debe a que Idel'cik define esta expresión para una malla cuadrangular, siendo esta válida para este tipo de mallas. Aun así según los resultados obtenidos en las simulaciones, la variación de la eficiencia aerodinámica observada debido a la disposición de filamentos varía entre un 2 y 5% en el punto de máxima eficiencia ( $SC=55\%$ ), mientras que cuanto mayor es SC más se iguala  $\eta_a$ . Asumiendo esto, se calculan las eficiencias aerodinámicas correspondientes a las mallas ensayadas, con el objetivo de encontrar una malla que presente una tendencia a una eficiencia aerodinámica mayor.

El factor de corrección de Reynolds varía en función de  $Re_d$  (número de Reynolds del diámetro del hilo) según la Tabla 21 (capítulo 1). A las velocidades que se trabaja ( $u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$  y  $u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$ ) y el diámetro de los hilos de las mallas ( $d_{Raschel}=2 \text{ mm}$ - $d_{mosquitera}=0,3 \text{ mm}$ ), el número de Reynolds es siempre  $Re_d > 150$  y, por lo tanto, se puede aproximar a  $k_{Re} \approx 1$ . Además, es importante utilizar el coeficiente de sombra sin porcentajes ( $SC=0-1$ ). Sabiendo esto calculamos  $C_o$  con la ecuación (3.1):

**Tabla 21.** Coeficientes de caída de presión ( $C_o$ ) obtenido para diferentes mallas de captación con diferentes SC.

	Coeficiente de sombra, SC (%)	Coeficiente de caída de presión, $C_o$ (-)
<b>Cuadrangular</b>	73.75	14.34
<b>Cuadrangular</b>	80.75	30.21
<b>Mosquitera triple</b>	70.46	10.70
<b>Volumétrica doble</b>	75.52	17.01
<b>Raschel doble</b>	80.11	27.97
<b>Raschel triple</b>	89.54	120.60

Obtenido  $C_o$  en la *Tabla 21* y  $C_D$  en la *Tabla 20* se puede obtener la fracción filtrada (*capítulo 1*):

$$\varphi = \sqrt{\frac{C_D}{C_o}} \quad (3.8)$$

Conociendo la fracción filtrada ( $\varphi$ ) y  $SC$  se obtiene  $\eta_a$  (al igual que en el *capítulo 2*). Es importante tener en cuenta que nos encontramos en un rango de  $SC$  que, según los resultados obtenidos mediante simulación, cuanto mayor es  $SC$  menor es  $\eta_a$ . Esto es debido a que cuanto mayor sea  $SC$  más cerca se está de que la malla se comporte como una placa plana ( $SC=100\%$ ). En ese escenario, el aire rodearía completamente la malla, lo que resultaría en un valor de  $\eta_a=0$ .

Como se puede observar en la *Tabla 22* y en la *Figura 77*, de entre las distintas configuraciones estudiadas, la malla cuadrangular de  $SC=73.75\%$  presenta la eficiencia aerodinámica más alta ( $\eta_a=17.58\%$ ). La sigue muy de cerca la malla Raschel doble ( $SC=80.11\%$ ) con una eficiencia aerodinámica de  $\eta_a=17.52\%$ . Esto nos indica que la malla Raschel es, en general, más eficiente aerodinámicamente, ya que para un coeficiente de sombra mayor se obtienen  $\eta_a$  similares. Por ejemplo, cuando la Raschel doble ( $SC=80.11\%$ ) se compara con la cuadrangular de  $SC=80.75\%$ , se puede observar la diferencia real que hay entre estas dos mallas (en ese punto concreto de  $SC$ ).

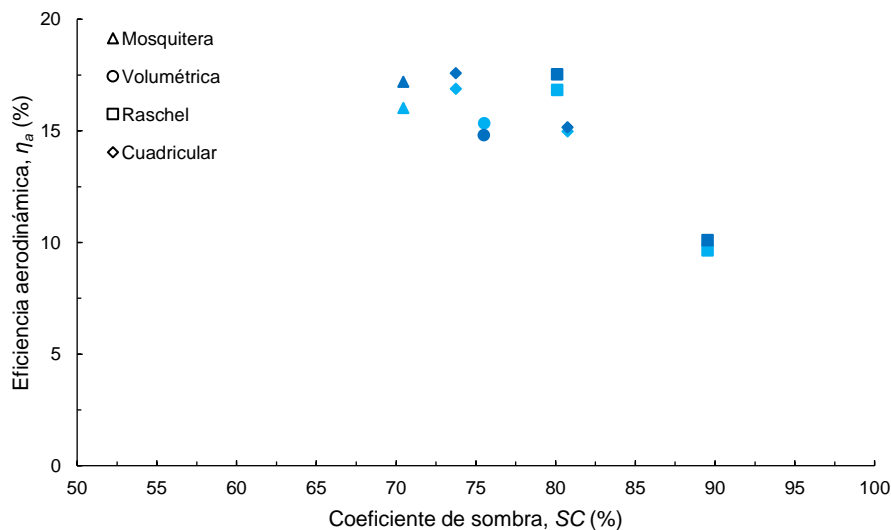
Por otro lado, por debajo de las mallas Raschel, las mallas cuadrangulares son el siguiente tipo de malla más aerodinámica. Al comparar la eficiencia aerodinámica de la malla cuadrangular de  $SC=73.75\%$  con la malla mosquitera ( $SC=70.46\%$ ), se observa una mayor  $\eta_a$  de la malla cuadrangular, aun con un  $SC$  más alto. Mientras que si se compara  $\eta_a$  con la volumétrica doble ( $SC=75.52\%$ ) se observa una diferencia significativa de un 2.79% para el caso de  $u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$ . Aprovechando esta última comparación, la malla mosquitera ( $SC=70.46\%$ ) presenta mayor  $\eta_a$  en comparación con la malla volumétrica doble ( $SC=75.52\%$ ) con una diferencia de

2.39%. Aunque hay que tener presente que existe una diferencia de  $SC=5\%$  entre estas dos mallas de captación.

**Tabla 22.** Eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) obtenida para diferentes mallas de captación con diferentes  $SC$  y velocidades del flujo libre ( $u_\infty$ ).

	Eficiencia aerodinámica, $\eta_a$ (%)	
	$u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$	$u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$
<b>Cuadrangular (SC=73.75%)</b>	16.89	17.58
<b>Cuadrangular (SC=80.75%)</b>	14.98	15.16
<b>Mosquitera triple (SC=70.46%)</b>	16.03	17.18
<b>Volumétrica doble (SC=75.52%)</b>	15.33	14.79
<b>Raschel doble (SC=80.11%)</b>	16.83	17.52
<b>Raschel triple (SC=89.54%)</b>	9.63	10.09

Además, se observa en la *Figura 77* que para una velocidad del flujo libre ( $u_\infty$ ) más alta se obtienen mayores  $\eta_a$  para todos los tipos de configuraciones, exceptuando en el caso de la malla volumétrica. Esto se debe probablemente a que presenta una disposición de los filamentos tridimensional, que la diferencian de las demás mallas. También se puede destacar, que según los resultados, al aumentar el  $SC$  la influencia de  $u_\infty$  en la  $\eta_a$  es menor (casos de malla Raschel y cuadrangular).



**Figura 77.** Eficiencia aerodinámica ( $\eta_a$ ) en función del coeficiente de sombra ( $SC$ ) para diferentes mallas de captación. Puntos en azul claro ( $u_\infty=6.19 \text{ m s}^{-1}$ ) y puntos en azul oscuro ( $u_\infty=8.79 \text{ m s}^{-1}$ ).

## 6. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha llevado a cabo un estudio experimental acerca de diversos parámetros aerodinámicos para mallas de captación de agua de niebla de distintas configuraciones (cuadrangular, mosquitera, Raschel y volumétrica).

En primer lugar, se ha logrado medir caídas de presión ( $\Delta P$ ) superiores a 20 Pa utilizando mallas con altos coeficientes de sombra ( $SC=70.46-89.54\%$ ) y trabajando en el túnel de viento con velocidades del flujo libre altas ( $u_\infty=6.19$  y  $8.79$  m s<sup>-1</sup>). Se han utilizado instrumentos de medida como: el manómetro diferencial ( $\Delta P$ ), el anemómetro de hilo caliente ( $u_\infty$ ) y el escáner ( $SC$ ) para obtener resultados del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) en función del tipo de malla y su  $SC$ . Además, se ha conseguido obtener parámetros aerodinámicos relacionados únicamente con la malla (descontando la contribución del marco) y de esta forma lograr comparaciones más precisas entre las diferentes disposiciones de filamentos ensayadas.

Según los resultados obtenidos, se ha observado que, en general, la malla Raschel muestra coeficientes de arrastre más altos, mientras que la malla volumétrica exhibe los coeficientes de arrastre más bajos. Estos resultados han revelado dos aspectos importantes. Por un lado, como la disminución de la porosidad de la malla aumenta el coeficiente de arrastre. Y por otro lado, teniendo en cuenta la anterior influencia, se ha comprobado cómo la permeabilidad de la malla también influye en los resultados del coeficiente de arrastre, ya que  $C_D$  también depende de cómo están dispuestos los filamentos y no solo del área que ocupan los hilos en relación con el área total de la malla.

El cálculo de la eficiencia aerodinámica utilizando los valores obtenidos de  $C_D$  ha permitido identificar una tendencia clara en la malla Raschel, demostrando que este tipo de malla es la más eficiente de todas las estudiadas. Esta observación puede explicar por qué se utiliza ampliamente esta disposición de filamentos en los captadores bidimensionales para la captura de agua de niebla. Por debajo de la malla Raschel se encuentra la malla cuadrangular, que presenta una eficiencia

aerodinámica comparativamente alta en relación con las otras dos opciones restantes (mosquitera y volumétrica).

Se debe tener en cuenta que estos estudios deben ser cumplimentados con una mayor variedad de  $SC$  (bajos y medios) para mallas de misma disposición de filamentos. De este modo se podría realizar un estudio más amplio del comportamiento de las diferentes mallas de captación estudiadas en este trabajo. De cara a futuros estudios se podrían ampliar los estudios a  $SC$  menores usando un manómetro diferencial específico para medir en rangos de caídas de presión menores. A modo de ejemplo el manómetro PCE-PDA 01L (un modelo superior al utilizado en este estudio) es capaz de medir la diferencia de presión con un error de tan solo  $\pm 0.5$  Pa, error suficientemente bajo como para obtener caídas de presión de mallas menos tupidas.

Por último, los resultados obtenidos a partir de los estudios experimentales realizados en este capítulo siguen las tendencias observadas en los estudios de simulación (capítulo 2). Estos estudios de simulación han desempeñado un papel crucial, al proporcionar orientación acerca de valores y tendencias de los diferentes parámetros aerodinámicos estudiados en este trabajo. Además, es relevante destacar que, si bien existen limitaciones experimentales en las mediciones, como el margen de error y las condiciones de prueba dentro de una cámara de ensayos, es importante valorar y considerar estas medidas como primordiales por encima de los resultados de las simulaciones.

Finalmente indicar, que los resultados de los parámetros aerodinámicos obtenidos en este trabajo nos muestran tendencias interesantes a la hora de valorar que malla de captación se debería utilizar para fabricar un captador de niebla de agua bidimensional (tipo chileno, por ejemplo). Los estudios realizados (experimentación y simulación) apuntan a que las configuraciones más adecuadas (entre las estudiadas) para la captación de agua de niebla ( $\eta_a$ ) serían la mallas tipo Raschel (según experimentación) y la tipo arpa (según simulación). Esta última tiene su punto de máxima eficiencia aerodinámica en  $SC=55\%$  ( $SC$  que podría ser máximo

también para la malla Raschel). Además, una mayor velocidad del flujo mejora la eficiencia aerodinámica como se ha observado en ambos métodos de estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Azeem, M. et al. (2020). Optimal Design of Multilayer Fog Collectors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(6), 7736-7743.  
<https://doi.org/10.1021/acscami.9b19727>
- [2] De Dios Rivera, J. (2011). Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors. *Atmospheric Research*, 102(3), 335-342.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.005>
- [3] Steiros, K., y Hultmark, M. (2018). Drag on flat plates of arbitrary porosity. *Journal of Fluid Mechanics*, 853.  
<https://doi.org/10.1017/jfm.2018.621>
- [4] Idel'cik, I. E. (1987). Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd Edition. *Journal of Pressure Vessel Technology-transactions of The Asme*, 109(2), 260-261.  
<https://doi.org/10.1115/1.3264907>
- [5] Montecinos et al. (2018). Collection efficiency of fog events. *Atmospheric Research*, 209, 163-169.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.004>
- [6] Carvajal, D., Silva-Llanca, L., Larraguibel, D., & González, B. E. V. (2020). On the aerodynamic fog collection efficiency of fog water collectors via three-dimensional numerical simulations. *Atmospheric Research*, 245, 105123.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105123>
- [7] Regalado, C. M., y Ritter, A. (2016a). The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis. *Atmospheric Research*, 178-179, 45-54.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.006>



- [8] Regalado, C. M., y Ritter, A. (2016b). The performance of three fog gauges under field conditions and its relationship with meteorological variables in an exposed site in Tenerife (Canary Islands). *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 80-91.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.009>
- [9] Moncuquet, A. et al. (2022). Collecting fog with vertical fibres: Combined laboratory and in-situ study. *Atmospheric Research*, 277, 106312.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106312>
- [10] Ito, A. S., y Garry, K. P. (1998). PRESSURE MEASUREMENTS AROUND A TWO-DIMENSIONAL GAUZE AT INCIDENCE. *Journal of Fluids and Structures*.  
<https://doi.org/10.1006/jfls.1997.0134>
- [11] Sumner, D. Y. (2010). Two circular cylinders in cross-flow: A review. *Journal of Fluids and Structures*, 26(6), 849-899.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.001>
- [12] Bresci, E. (2002). Wake characterization downstream of a fog collector. *Atmospheric Research*, 64(1-4), 217-225.  
[https://doi.org/10.1016/s0169-8095\(02\)00093-5](https://doi.org/10.1016/s0169-8095(02)00093-5)
- [13] Holmes, R., De Dios Rivera, J., y De La Jara, E. (2015). Large fog collectors: New strategies for collection efficiency and structural response to wind pressure. *Atmospheric Research*, 151, 236-249.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.005>

- [14] Marchand C. et al (2023). Three-dimensional flow around and through a porous screen. *Cornell University*.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.00711>
- [15] De La Jara Hartwig, E. A. (2012). Modelación computacional del impacto de gotas de niebla en fibras cilíndricas paralelas.  
<https://doi.org/10.7764/tesisuc/ing/16521>
- [16] Fernandez, D. et al. (2018b). Fog Water Collection Effectiveness: Mesh Intercomparisons. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(1), 270-283.  
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.01.0040>
- [17] Schemenauer, R. S., Fuenzalida, H., & Cereceda, P. (1988). A Neglected Water Resource: The Camanchaca of South America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 69(2), 138-147.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1988\)069](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1988)069)
- [18] Schemenauer, R. S., & Joe, P. (1989). The collection efficiency of a massive fog collector. *Atmospheric Research*, 24(1-4), 53-69.  
[https://doi.org/10.1016/0169-8095\(89\)90036-7](https://doi.org/10.1016/0169-8095(89)90036-7)
- [19] Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1991). Fog-water collection in arid coastal locations. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 20(7), 303-308.  
<https://eurekamag.com/research/002/112/002112029.php>
- [20] Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1992). The Quality of Fog Water Collected for Domestic and Agricultural Use in Chile. *Journal of Applied Meteorology*, 31(3), 275-290.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031)

- [21] Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994). A Proposed Standard Fog Collector for Use in High-Elevation Regions. *Journal of Applied Meteorology*, 33(11), 1313-1322.
- [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033)
- [22] Schemenauer, R.S., Cereceda, P. y Osses, P. (2005). Fog Water Collection Manual. FogQuest, Ontario, Canada.
- [www.fogquest.org](http://www.fogquest.org).
- [23] White, F. M. (1986). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Companies, New York.
- [24] Clift, R., Grace, J. R., & Weber, M. E. (2013). Bubbles, Drops, and Particles. *Courier Corporation*.
- [25] Cerceda, P. et al. (2014). Agua de niebla: nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable en zonas áridas y semiáridas.
- [26] Brun, R. J. et al. (1955). Impingement of Cloud Droplets on a Cylinder and Procedure for Measuring Liquid-water Content and Droplet Sizes in Supercooled Clouds by Rotating Multicylinder Method. *NACA Technical Report 1215*
- [27] Bonilla, J. M. L. (2014). Diseño Hidráulico de un Sistema Gravimétrico para Relaves Mineros con un Caudal de 202 m<sup>3</sup>/h y 220 m de Desnivel. *Pontificia Universidad Católica del Perú*.
- [28] Organización de las Naciones Unidas (2020). NO DEJAR A NADIE ATRÁS. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos.
- <https://es.unesco.org/watersecurity/wwap/wwdr/2019#:~:text=La%20edici%C3%B3n%20del%202019%20del,h%C3%ADricos%20y%20el%20acceso%20a>

- [29] ÇENGEL et al. (2006). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. Mc Graw-Hill. Tabla A-9.
- [30] Kurak, R. y Hall, N. (2022). Drag of a Sphere. *Glenn Research Center (NASA)*.  
<https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-of-a-sphere/>
- [31] Noguera, I. B. (2021). ¿Qué es la ecuación de Bernoulli? *Ingeniería Química Reviews*.  
<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/ecuacion-de-bernoulli.html>
- [32] Noguera, I. B. (2021). Fenómenos de transporte: Capa límite. *Ingeniería Química Reviews*.  
<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/08/capa.html>
- [33] Albertoadmin. (2022). Tipos de tela mosquitera metálica. *Mosquiteras24H*.  
<https://mosquiteras24h.com/tipos-tela-mosquitera-metalica/>
- [34] Raschel, M. (2022). Mallas Raschel y sus Usos. *Mallas Raschel*.  
<https://mallasraschel.cl/mallas-raschel-y-sus-usos/>
- [35] *Cómo capturar agua de la niebla y abastecer agua contra la sequía*.  
<https://www.clima.com/noticias/como-capturar-agua-de-la-niebla-contra-la-sequia>
- [36] Wmo. *Niebla respecto de neblina | Atlas Internacional de Nubes*. Atlas Internacional de Nubes.  
<https://cloudatlas.wmo.int/es/fog-compared-with-mist.html>

[37] Nieblagua (2018). *Niebla Atlántica*.

<https://www.nieblagua.com/>

[38] Weisstein, Eric W. (2023) Steinmetz Solid. Wolfram Research.

<https://mathworld.wolfram.com/SteinmetzSolid.html>

[39] Solidworks Flow Simulation (2020). *Technical Reference*.

<file:///C:/Program%20Files/SOLIDWORKS%20Corp/SOLIDWORKS%20Flow%20Simulation/lang/English/docs/TechnicalReference.pdf>

[40] Regresión y ajuste de modelos (2010-2011). *Laboratorio de Matemáticas*.

<http://matematicas.uam.es/~pablo.angulo/doc/laboratorio/b6regresion.html>

[41] Estrategias de Inversión. *Dividendos más rentables de la bolsa Española*.

<https://www.estrategiasdeinversion.com/herramientas/diccionario/fondos/r2-r-cuadrado-o-coeficiente-de-determinacion-t-1163>

## **ANEXO 1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES**

## 1. Tablas de la fuerza de arrastre y el coeficiente de arrastre

### - Malla tipo arpa, $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$

MALLA TIPO ARPA		
Coeficiente de sombra, SC (%)	Fuerza de arrastre, $F_D$ (N)	Coeficiente de arrastre, $C_D$ (-)
5	0.010	0.040
15	0.036	0.148
25	0.071	0.287
35	0.120	0.486
45	0.166	0.673
55	0.219	0.889
65	0.254	1.030
75	0.286	1.161
85	0.310	1.257
95	0.317	1.284
100	0.318	1.291

### - Malla tipo arpa, $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$

MALLA TIPO ARPA		
Coeficiente de sombra, SC (%)	Fuerza de arrastre, $F_D$ (N)	Coeficiente de arrastre, $C_D$ (-)
5	0.003	0.047
15	0.010	0.167
25	0.019	0.316
35	0.032	0.522
45	0.044	0.714
55	0.057	0.931
65	0.066	1.069
75	0.072	1.174
85	0.079	1.276
95	0.079	1.288
100	0.079	1.289

- Malla cuadrangular,  $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$ 

MALLA CUADRICULAR		
Coeficiente de sombra, SC (%)	Fuerza de arrastre, $F_D$ (N)	Coeficiente de arrastre, $C_D$ (-)
5	0.013	0.052
15	0.042	0.172
25	0.084	0.342
35	0.131	0.533
45	0.179	0.726
55	0.219	0.889
65	0.254	1.031
75	0.283	1.148
85	0.310	1.256
95	0.315	1.276
100	0.318	1.291

- Malla cuadrangular,  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$ 

MALLA CUADRICULAR		
Coeficiente de sombra, SC (%)	Fuerza de arrastre, $F_D$ (N)	Coeficiente de arrastre, $C_D$ (-)
5	0.003	0.056
15	0.011	0.183
25	0.022	0.362
35	0.034	0.559
45	0.047	0.756
55	0.057	0.922
65	0.065	1.048
75	0.072	1.166
85	0.078	1.261
95	0.079	1.281
100	0.079	1.289



## 2. Tablas del lado del flujo libre y la fracción filtrada

### - Malla tipo arpa, $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$

MALLA TIPO ARPA		
Coeficiente de sombra, SC (%)	Lado del flujo libre, $l_{\infty}$ (mm)	Fracción filtrada, $\varphi$ (-)
5	78.18	0.95
15	76.69	0.92
25	74.47	0.87
35	70.82	0.78
45	67.39	0.71
55	61.94	0.60
65	53.54	0.45
75	44.73	0.31
85	32.53	0.17
95	16.03	0.04

### - Malla tipo arpa, $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$

MALLA TIPO ARPA		
Coeficiente de sombra, SC (%)	Lado del flujo libre, $l_{\infty}$ (mm)	Fracción filtrada, $\varphi$ (-)
5	78.07	0.95
15	76.53	0.92
25	74.15	0.86
35	70.32	0.77
45	65.92	0.68
55	60.13	0.56
65	52.01	0.42
75	43.19	0.29
85	30.39	0.14
95	13.39	0.03

- Malla cuadrangular,  $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$ 

MALLA CUADRICULAR		
Coeficiente de sombra, SC (%)	Lado del flujo libre, $l_{\infty}$ (mm)	Fracción filtrada, $\varphi$ (-)
5	78.07	0.95
15	76.76	0.92
25	73.52	0.84
35	69.90	0.76
45	64.84	0.66
55	58.89	0.54
65	49.58	0.38
75	41.50	0.27
85	31.80	0.16
95	20.04	0.06

- Malla cuadrangular,  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$ 

MALLA CUADRICULAR		
Coeficiente de sombra, SC (%)	Lado del flujo libre, $l_{\infty}$ (mm)	Fracción filtrada, $\varphi$ (-)
5	77.63	0.94
15	76.25	0.91
25	72.59	0.82
35	69.99	0.77
45	63.09	0.62
55	57.61	0.52
65	47.71	0.36
75	40.19	0.25
85	30.34	0.14
95	17.47	0.05

### 3. Tablas del coeficiente de caída de presión

- Malla tipo arpa,  $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$

MALLA TIPO ARPA	
Coeficiente de sombra, SC (%)	Coeficiente de caída de presión, $C_o$ (-)
5	0.05
15	0.20
25	0.42
35	0.85
45	1.42
55	2.59
65	5.33
75	12.01
85	46.69
95	799.57

- Malla tipo arpa,  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$

MALLA TIPO ARPA	
Coeficiente de sombra, SC (%)	Coeficiente de caída de presión, $C_o$ (-)
5	0.05
15	0.20
25	0.43
35	0.88
45	1.55
55	2.92
65	5.99
75	13.82
85	61.28
95	1641.86

- Malla cuadrangular,  $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$ 

MALLA CUADRICULAR	
Coeficiente de sombra, SC (%)	Coeficiente de caída de presión, $C_o$ (-)
5	0.06
15	0.22
25	0.51
35	0.96
45	1.75
55	3.14
65	7.10
75	16.10
85	50.51
95	325.09

- Malla cuadrangular,  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$ 

MALLA CUADRICULAR	
Coeficiente de sombra, SC (%)	Coeficiente de caída de presión, $C_o$ (-)
5	0.06
15	0.22
25	0.53
35	0.95
45	1.96
55	3.43
65	8.28
75	18.30
85	60.99
95	563.09

#### 4. Tablas de la eficiencia aerodinámica

- Malla tipo arpa,  $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$

MALLA TIPO ARPA	
Coeficiente de sombra, SC (%)	Eficiencia aerodinámica, $\eta_a$ (%)
5	4.77
15	13.79
25	21.66
35	27.43
45	31.93
55	32.97
65	29.12
75	23.45
85	14.05
95	3.81

- Malla tipo arpa,  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$

MALLA TIPO ARPA	
Coeficiente de sombra, SC (%)	Eficiencia aerodinámica, $\eta_a$ (%)
5	4.76
15	13.73
25	21.48
35	27.04
45	30.55
55	31.07
65	27.47
75	21.86
85	12.26
95	2.66

- Malla cuadrangular,  $u_{\infty}=8 \text{ m s}^{-1}$ 

MALLA CUADRICULAR	
Coeficiente de sombra, SC (%)	Eficiencia aerodinámica, $\eta_a$ (%)
5	4.76
15	13.81
25	21.11
35	26.72
45	29.56
55	29.80
65	24.96
75	20.18
85	13.43
95	5.96

- Malla cuadrangular,  $u_{\infty}=4 \text{ m s}^{-1}$ 

MALLA CUADRICULAR	
Coeficiente de sombra, SC (%)	Eficiencia aerodinámica, $\eta_a$ (%)
5	4.71
15	13.63
25	20.58
35	26.79
45	27.98
55	28.52
65	23.12
75	18.93
85	12.22
95	4.53

**ANEXO 2. FICHAS TÉCNICAS DE LOS DISPOSITIVOS  
UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES**

- **Anemómetro de hilo caliente (TMA-21 HW):**

**TMA-21HW SPECIFICATIONS**

Specifications	Range
Display	Triple display, 4 digit LCD reading.
Sampling Rate	once per second
Response Time	< 2 seconds
Manual Memory Capacity	5 X 99 sets. (Direct reading from LCD display)
Operating Conditions	0°C – 40°C (32°F – 104°F) 10 – 80% R.H.
Power Source	6 X AAA Battery
Battery Life	Approx. 10 hours
Dimensions	360.7 X 216 X 63.5mm ( L14.2 X W8.5 X H2.5 in) with case
Weight	1043g ( 2.3 Lbs) with case
Probe Dimensions / Weight	Wire length : 2.2 meter (7.2 ft) Probe length : 1.2 meter (3.9 ft) Probe diameter of tip : 15.0 mm (0.59 in.) Probe diameter of base : 28.0 mm (1.1 in.) Probe weight : 165 g (0.36 lbs)
Air Flow	0.1 to 30.0 m/s, 0.2 to 110 km/hr, 10 to 6000 ft/min, 0.1 to 59 knots, 0.12 to 68 MPH Accuracy: ±3% of reading, ±1%FS
Air Flow Volume	0 to 999900 CFM, 0 to 999900 CMM
Temperature	-20°C to +60°C, ±0.5°C / -4°F to +140°F, ±0.9°F
Humidity	0 to 100%RH ±3%RH
Included Accessories	Users manual, Batteries, Hard carrying case, USB Cable, and CD Software

For more detailed specifications see users manual.

- **Manómetro diferencial (PCE-PDA 1L):**

Características técnicas	
Rango de temperatura	0 ... +50 °C
Resolución	0,1 °C
Precisión	±1 °C
Rango de presión	±2 kPa
Resolución	0,1 Pa / 1 Pa
Precisión	±0,5 % FS
Presión nominal	2 kPa
Sobrepresión	4 kPa
Presión de rotura	100 kPa
Medios	Aire y Líquidos
Cuota de medición	10 Hz
Unidades	Pa, hPa, kPa, MPa, mBar, Bar, ATM, kg/cm², mmH2O, cmH2O, inH2O, mmHg, inHg, Torr, PSI, PSF
Tipos de presión	Presión diferencial Presión relativa (cuando la conexión negativa está abierta)
Conexiones	Boquilla de 5 mm para acoplamiento rápido
MIN / MAX / HOLD	Sí
Registro de datos	1024 posiciones de memoria 1 s ... 255 h = Tiempo de registro por posición 1 s ... 24h = Cuota de registro
Medios	Líquidos y gases, no inflamables ni corrosivos
Corrección cero	Sí, mediante tecla
Cálculo del valor promedio	Sí, entre 0,1 ... 9,9 segundos
Pantalla	Gráfica, LCD con iluminación de fondo
Tipo de protección	IP41
Alimentación	2 x pilas 1,5 V AA / Acumulador 1,2 V NiMH Adaptador de red USB, 5 V / 500 mA
Potencia absorbida	50 mA (con iluminación de fondo) 10 mA (sin iluminación de fondo)
Temperatura operativa	0 ... 50 °C
Temperatura de almacenamiento	10 ... 55 °C
Dimensiones	145 x 85 x 35 mm
Peso	Aprox. 285 g



- Ventilador axial (SODECA HBA-31-2T)

# HBA



### Ventiladores helicoidales tubulares bifurcados, con motor fuera del flujo de aire



Ventiladores tubulares bifurcados para trasegar aire hasta 150°C en continuo y hasta 200°C de forma esporádica.

**Ventilador:**

- Envoltente tubular en chapa de acero
- Hélice en fundición de aluminio
- Dirección de aire hélice-motor

**Motor:**

- Motores eficiencia IE-2, excepto potencias inferiores a 0,75 Kw, monofásicos y 2 velocidades.
- Motores clase F, con rodamientos a bolas, protección IP-55
- Trifásicos 230/400V-50Hz (hasta 5,5C.V.) y 400/690V-50Hz. (potencias superiores a 5,5 C.V.)
- Temperatura de trabajo: -25°C. + 150°C

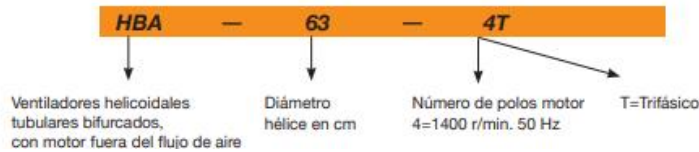
**Bajo demanda:**

- Envoltente en acero inoxidable
- Acabado en galvanizado en caliente
- Bobinados especiales para diferentes tensiones y motores con PTC
- Motores marinos para aplicaciones navales, con certificación para servicio esencial según diferentes entidades de clasificación (BV, DNV, LR)
- Motores CE, NEMA, UL, CSA
- Calidad acabado superficial C3H, C4H, C5M

**Acabado:**

- Anticorrosivo en resina de poliéster, polimerizada a 190°C., previo desengrase alcalino y pretratamiento libre de fosfatos.

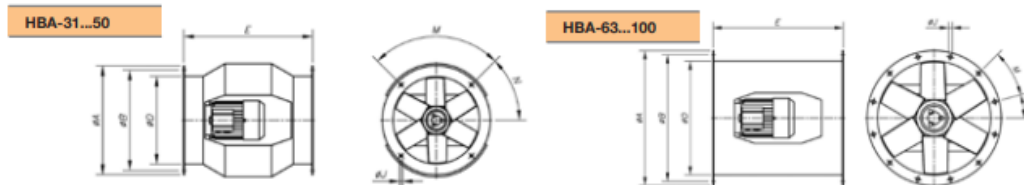
**Código de pedido**



**Características técnicas**

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible (A) 230V	400V	Potencia instalada (kW)	Caudal máximo (m³/h)	Nivel presión sonora dB(A)	Peso aprox. (Kg)
HBA-31-2T	2760	2,57	1,49	0,55	2900	77	25
HBA-31-2M	2810	3,49	-	0,55	2900	77	26
HBA-31-4T	1350	1,66	0,96	0,25	1600	66	24
HBA-31-4M	1370	2,00	-	0,25	1600	66	25
HBA-40-2T	2860	4,20	2,40	1,10	6200	82	45
HBA-40-2M	2820	6,51	-	1,10	6200	82	46
HBA-40-4T	1370	2,02	1,17	0,37	3200	75	40
HBA-45-2T	2900	10,18	5,88	3,00	8550	84	57
HBA-50-4T	1410	3,10	1,79	0,75	6750	76	73
HBA-63-4T	1400	4,03	2,32	1,10	11150	77	91
HBA-71-4T	1440	14,10	8,12	4,00	15850	79	164
HBA-71-6T	900	2,99	1,73	0,55	11200	74	140
HBA-80-6T	945	4,88	2,82	1,10	14900	77	190
HBA-100-6T	945	4,88	2,82	1,10	21700	80	260

**Dimensiones mm**

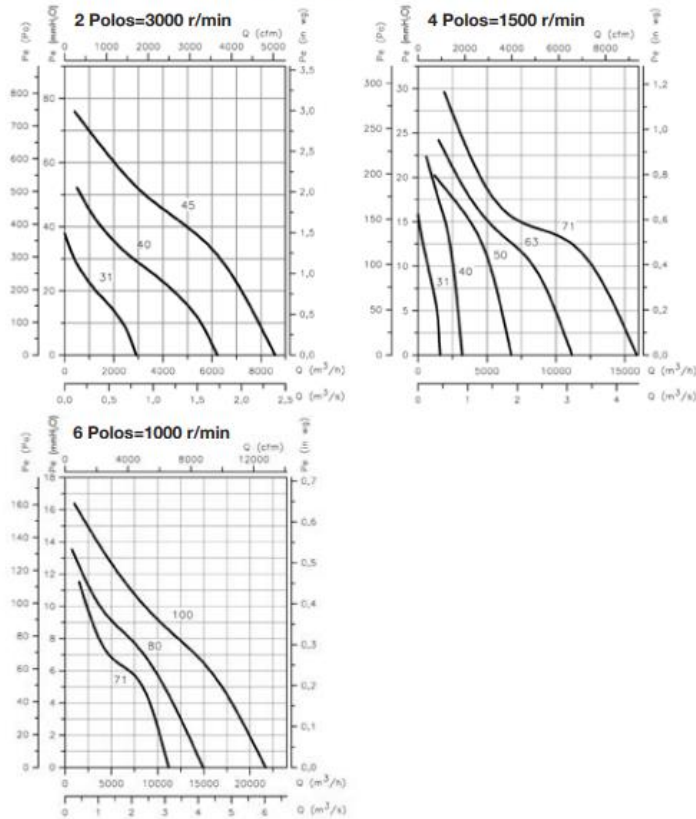


Modelo	ØA	ØB	ØD	E	ØJ	M	N
HBA-31	385	355	308	460	10	4x90°	45°
HBA-40	490	450	410	580	12	8x45°	22°5'
HBA-45	540	500	460	640	12	8x45°	22°5'
HBA-50	600	560	514	730	12	12x30°	15°
HBA-63	730	690	640	730	12	12x30°	15°
HBA-71	810	770	710	770	12	16x22°5'	11°25'
HBA-80	900	860	800	830	12	16x22°5'	11°25'
HBA-90	1015	970	900	1000	15	16x22°5'	11°25'
HBA-100	1115	1070	1000	1270	15	16x22°5'	11°25'

**Curvas características**

Q= Caudal en m<sup>3</sup>/h, m<sup>3</sup>/s y cfm.

Pe= Presión estática en mm.c.a., Pa e inwg.



- **Variador de frecuencia (SODECA VSD3/A-RFT-1)**

**VSD3/A-RFT - VSD1/A-RFM**

Variador electrónico de velocidad para motores AC

Características:

- Convertidores para la variación de velocidad mediante tensión y frecuencia, de ventiladores helicoidales y centrífugos con motores trifásicos asíncronos.
- Alimentación del convertidor:
- Monofásico (VSD1/A-RFM): 200-240 V 50/60 Hz.
- Trifásico (VSD3/A-RFT): 380-480 V 50/60 Hz.
- De acuerdo con la Directiva de Compatibilidad Electromagnética 2014/30/UE, la Directiva de Baja tensión 2014/35/UE y la Directiva de Seguridad de máquinas 2006/42/EC.
- Entrada paro/marcha para deshabilitar/habilitar el variador.
- Entrada 0-10 V para el control de velocidad.
- Conexión a bus ModBus RTU disponible.
- Modelo estándar con grado de protección IP20. Disponible también en versión IP66 hasta 10 CV. Para potencias superiores a 15 CV sólo disponible con grado de protección IP55.
- De acuerdo con las normas:
- UNE EN 61800-3: Accionamientos eléctricos de potencia de velocidad variable. Norma de producto relativa a CEM incluyendo métodos de ensayos específicos.
- UNE EN 61800-5-1: Accionamientos eléctricos de potencia de velocidad variable. Requisitos de seguridad. Eléctricos, térmicos y energéticos.
- UNE EN 60204-1: Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Requisitos generales.
- UNE EN 55011: Límites y métodos de medida de las características relativas a las perturbaciones radioeléctricas de los aparatos industriales, científicos y médicos (ICM) que producen energía en radiofrecuencia.
- IEC 60529: Especificaciones para los grados de protección en los recintos.

- **Sistema medidor de área foliar (WD-E3 WinDIAS)**

### WinDIAS Specifications

	Entry Level System	Standard System	Rapid System
<b>Throughput</b> (leaves/hour)	~50 (typical, depends on leaf size)	~150	~800
<b>Resolution</b>	Typically >1000 dpi	2048 x 1536 pixels	2048 x 1536 pixels
<b>Minimum object size</b>	~0.02 mm	1 pixel	1 pixel
<b>Maximum sample area</b>	297 x 210 mm (A4)	300 x 295 mm	250 x 290 mm (conveyor) 250 x >1000 mm (long leaf mode)
<b>Accuracy</b>			
area measurement	± 1% typical	± 4% typical	± 4% typical
diseased/healthy area	contrast dependent	contrast dependent	contrast dependent
long leaf mode	not applicable	not applicable	± 5% typical
<b>Calibration</b>			
static measurements	against object of known length, e.g. a ruler	against object of known length, e.g. a ruler	against a ruler
conveyor measurements	not applicable	not applicable	against a target of known area
<b>Conveyor belt speeds</b>			
	not applicable	not applicable	60/100/140/190 mm/s (20% faster for 60 Hz model)
<b>Colour depth</b>			
	WinDIAS works in 24 bit colour space (16 million colours)		
<b>Image file formats</b>			
	.jpg, .bmp and .tif (WinDIAS is compatible with many scanners and cameras that are TWAIN compliant)		
<b>Operating system &amp; drivers</b>			
	Windows 7,8 and 10 (32 and 64 bit)		

Specifications apply to a WinDIAS system using standard components supplied by Delta-T Devices. Use of other cameras, lighting systems or camera stands may reduce accuracy due to reflections, poor contrast or image distortion.