



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

**“Instrumentación y simulación de
un túnel de viento de baja
velocidad para estudios de
eficiencia de captación de agua de
niebla mediante mallas”**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

CURSO 2020 - 2021

AUTOR:

CARLOS FARIÑA CARBALLO

DNI: 43389649-B

TUTORES:

MARIA TERESA ARENCIBIA PÉREZ (ULL)

CARLOS M. REGALADO REGALADO (ICIA)

SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA, MARZO 2021

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a **María Teresa Arencibia Pérez** y **Carlos Regalado Regalado** por su inconmensurable implicación, ayuda y entusiasmo desde el mismo momento en el que se me adjudicó este proyecto. He aprendido muchísimo bajo su tutorización durante este año de trabajo gracias a que han compartido conmigo toda su paciencia, capacidad y conocimiento científico.

A la **Universidad de La Laguna** y la **Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología** por haberme abierto sus puertas y ofrecerme la oportunidad de entrar poco a poco y conocer ese mundo tan bonito que es la ingeniería.

A todos aquellos **profesores/as** que en su momento llegaron a darme clase. Cada uno ha aportado su granito de arena en la formación de los ingenieros e ingenieras que son y serán, y a su manera ayudan a desarrollar la creatividad, la curiosidad y el buen hacer que caracteriza a nuestra profesión.

Al taller del **ICIA** y a sus técnicos por su predisposición y cercanía, y por hacer posible la fabricación de las piezas del túnel de viento.

A mis padres, **Jaime Leandro Fariña García** y **Juana Inés Carballo de León**, por haberme forjado como la persona que soy hoy en día, por ser una ayuda enorme en todos aquellos momentos no tan buenos, y por disfrutar conmigo en todos los momentos felices, pero, sobre todo, haberme inculcado desde pequeño que los sueños están para luchar por ellos y alcanzarlos.

A toda **mi familia**, tíos, tías, primos... por ser una fuente de motivación y de apoyo.

A mis dos abuelos, **Jaime**, por tu sabiduría y cariño infinitos, y a **Jesús**, que, aunque no lo hubiera conocido, sé que los dos estarán orgullosos de su nieto dondequiera que estén.

A mis dos abuelas, **Carmen** y **Candelaria**, por sus lecciones de vida y por siempre aconsejarme y estar ahí, y desear lo mejor para mí.

A mi pareja, **Julia**, por su infatigable apoyo, por entenderme en todo, por apoyarme en las buenas y malas etapas, e incluso por llegar a ayudarme directamente en algunas partes de este proyecto. Has sido y eres la motivación y la inspiración no sólo para este

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

trabajo, sino para mi vida, nunca podré agradecerte lo suficiente: me ayudaste en lo posible, y muchas veces en lo imposible.

A mis **amigos** de la infancia y a aquellos que he hecho durante estos cuatro años y medio, con los que he compartido muy buenos momentos, penas y glorias, anécdotas que uno recordará toda la vida...pero, sobre todo, por empujar todos en una misma dirección y apoyarnos para salir adelante como profesionales y personas de calidad.

A aquellos **compañeros y compañeras** de clase que tuve durante el grado, por un compañerismo y cercanía que hoy en día no se ve con mucha frecuencia.

A todos, gracias de corazón,

Carlos.

HOJA DE IDENTIFICACIÓN

TÍTULO DEL PROYECTO

INSTRUMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

PERSONA FÍSICA O JURÍDICA QUE HA ENCARGADO EL PROYECTO

Nombre: Universidad de La Laguna. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología (ESIT). Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA).

Dirección: Camino San Francisco de Paula, 38203 San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife / Finca “Isamar”, Ctra. de El Boquerón s/n, Valle Guerra.

C.P.: 38200 / 38270

Teléfono: 922 31 83 09 / 922 92 32 65

Correo electrónico: esit@ull.es

DATOS DEL AUTOR DEL PROYECTO

Nombre: Carlos Fariña Carballo

D.N.I.: 43389649-B

Estudios: Grado en Ingeniería Mecánica

Dirección: Calle Romen 6 Planta 1 Piso 1.

C.P.: 38400

Teléfono de contacto: 658 479 324

Correo electrónico: carlos1998.cc@gmail.com / alu0101025766@ull.edu.es

RESPONSABLES DE LA TUTORIZACIÓN DEL PROYECTO

Nombre: Carlos M. Regalado Regalado (MSc, PhD)

Ubicación: Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. Dep. Producción Vegetal en Zonas Tropicales y Subtropicales. Apdo 60 La Laguna.

Teléfono: 922 92 33 28

Correo electrónico: cregalad@icia.es

Nombre: María Teresa Arencibia Pérez

Ubicación: Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología - Módulo B - AN.4F ESIT nº 63, 3º piso

Teléfono: 922 316 502 - Ext 6143

Correo electrónico: mtarenci@ull.edu.es

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

Yo, Carlos Fariña Carballo, con documento de identificación 43389649B, y estudiante del Grado en Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, en relación con el Trabajo Fin de Grado presentado para su defensa y evaluación en el curso 2020/2021, declara que asume la originalidad de dicho trabajo, entendida en el sentido de que no ha utilizado fuentes sin citarlas debidamente.

San Cristóbal de La Laguna, a 18 de marzo de 2021.

X

Carlos Fariña Carballo

MEMORIA: ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
HOJA DE IDENTIFICACIÓN	4
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO.....	5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	13
ÍNDICE DE TABLAS.....	24
1. RESUMEN.....	25
2. ABSTRACT.....	26
3. INTRODUCCIÓN.....	27
4. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	32
5. ANTECEDENTES DEL PROYECTO. HISTORIA Y ESTADO DEL ARTE....	34
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	41
1. TEORÍAS DE INGENIERÍA FLUIDOMECÁNICA.....	42
1.1. MECÁNICA DE FLUIDOS	42
1.2. NÚMERO DE MACH.	42
1.3. CATEGORIZACIÓN DE LOS FLUJOS.	42
1.4. TEOREMA DE BERNOULLI.	46
1.5. EFECTO VENTURI.....	48
1.6. N° DE REYNOLDS.....	50
1.7. CONDICIÓN DE NO – DESLIZAMIENTO Y CAPA LÍMITE.....	51
1.8. PÉRDIDAS DE CARGA PRIMARIAS Y SECUNDARIAS.	52
1.8.1. PÉRDIDAS DE CARGA PRIMARIAS.	52
1.8.2. PÉRDIDAS DE CARGA SECUNDARIAS.	55
1.9. PRINCIPIOS DE LA AERODINÁMICA: INTERACCIÓN CUERPO – FLUIDO.....	56
1.9.1. FUERZA DE ARRASTRE O RESISTENCIA AL AVANCE.....	57

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

1.9.2. FUERZA DE EMPUJE	57
1.9.3. PESO.....	57
1.9.4. FUERZA DE SUSTENTACIÓN	58
2. EL TÚNEL DE VIENTO.....	58
2.1. ¿QUÉ ES UN TUNEL DE VIENTO? COMPONENTES ESENCIALES Y FUNCIONAMIENTO	58
2.2. COMPONENTES DE USO ESPECIAL	60
2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES DE VIENTO.....	62
2.4. APLICACIONES DENTRO DE LA INDUSTRIA.....	65
2.5. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES DE VIENTO A LO LARGO DE LA HISTORIA.	68
3. LA CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA. TEORÍA DE MALLAS.	73
3.1. ¿QUÉ ES LA NIEBLA?.....	73
3.2. PSICROMETRÍA: PROPIEDADES DEL AIRE HÚMEDO.....	75
3.2.1. COMPOSICIÓN DEL AIRE HÚMEDO	75
3.2.2. PARÁMETROS PSICROMÉTRICOS RELEVANTES.	76
3.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA.....	78
3.4. TECNOLOGÍA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA	83
CAPÍTULO II: INSTRUMENTACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO	99
1. INTRODUCCIÓN: CONDICIONANTES TÉCNICOS RELACIONADOS CON LA ELECCIÓN DE INSTRUMENTAL DE MEDIDA.	100
1.1. TÚNEL DE VIENTO OBJETO DE ESTUDIO.	101
1.2. CONDICIONANTES: EMPLAZAMIENTO Y FACTORES AMBIENTALES Y DE OPERACIÓN.	103
1.3. INSTRUMENTACIÓN NECESARIA.....	106

2. CRITERIOS GENERALES PARA LA SELECCIÓN DEL INSTRUMENTAL DE MEDIDA.....	111
3. CRITERIOS ESPECÍFICOS PARA CADA ELEMENTO Y ELECCIÓN DEL INSTRUMENTAL DE MEDIDA.	113
3.1. CRITERIOS ESPECÍFICOS.....	113
3.2. HUMIDIFICADOR:.....	114
3.3. MEDIDOR DE VELOCIDAD: ANEMÓMETRO.....	121
3.4. MEDIDOR DE PRESIÓN Y DE FUERZAS	123
3.5. MEDIDOR DE TEMPERATURA.....	124
3.6. MEDIDOR DE HUMEDAD.....	125
3.7. IMPRESORA 3-D:.....	126
3.8. VISUALIZACIÓN DEL FLUJO	130
3.9. SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE AGUA.....	131
4. JUSTIFICACIÓN EN LA ELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN. CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
4.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN ELEGIDA	135
CAPÍTULO III: ENSAYOS VIRTUALES DE VERIFICACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO	138
1. MODELADO DEL TÚNEL DE VIENTO.....	139
1.1. PARÁMETROS DE DISEÑO Y MODELADO DE PIEZAS.	140
1.2. MODELADO Y ENSAMBLADO DE COMPONENTES	141
1.2.1. TRAMO DE ABSORCIÓN / SECCIÓN DE HUMIDIFICACIÓN ...	141
1.2.2. PIEZA PARA RECOGIDA DE CONDENSADO ENTRE EL TRAMO DE ABSORCIÓN Y EL CONO DE CONTRACCIÓN.....	147
1.2.3. CONO DE CONTRACCIÓN.....	147
1.2.4. CÁMARA DE ENSAYOS.....	148
1.2.5. DIFUSOR.....	149

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

1.2.6. SECCIÓN DE ASPIRACIÓN (PENDIENTE DE FABRICACIÓN)..	150
1.2.7. ENSAMBLAJE DE COMPONENTES PARA EL TÚNEL INICIAL	151
2. ESTUDIOS VIRTUALES. SIMULACIÓN MEDIANTE CFD (SOLIDWORKS FLOW SIMULATION).....	152
2.1. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN DEL MODELO 3D INICIAL.	152
2.1.2. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN PARA UN CAUDAL MÁXICO COMPRENDIDO ENTRE 0.0959 kg/s. Y 0.3835 kg/s.....	158
2.2. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN DEL MODELO 3D MODIFICADO.	162
2.3. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN CON INSTRUMENTACIÓN	180
2.4. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN DEL MODELO CON IMPLEMENTACIÓN DE MALLAS DE CAPTACIÓN.....	181
CAPÍTULO IV: CÁLCULOS REFERENTES A LAS PÉRDIDAS EN LA INSTALACIÓN.....	185
1. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA, CURVA RESISTENTE DE LA INSTALACIÓN Y PUNTO DE OPERACIÓN DEL VENTILADOR.	186
1.1. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN LOCALES ..	186
1.2. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA LOCALES	187
1.2.1. CÁMARA DE ENSAYOS.....	187
1.2.2. SECCIÓN DE HUMECTACIÓN	187
1.2.3. CONO DE CONTRACCIÓN.....	189
1.2.4. LANZA HUMIDIFICADORA	189
1.2.5. MALLAS DE CAPTACIÓN.....	194
1.2.6. CÓMPUTO TOTAL DE PÉRDIDAS DE CARGA. CASO MÁS DESFAVORABLE.....	198
1.3. CÁLCULO DE CURVA RESISTENTE DE LA INSTALACIÓN Y PUNTO DE OPERACIÓN DEL VENTILADOR.	198

CAPÍTULO V: MONTAJE Y DISPOSICIÓN FINAL DEL TÚNEL DE VIENTO
205

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES DEL PROYECTO 211

1. CONCLUSIONES TÉCNICAS 212

2. CONCLUSIONES PERSONALES 214

CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 216

1. LISTADO DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 217

ANTECEDENTES HISTÓRICOS..... 217

MARCO TEÓRICO 219

TUNEL DE VIENTO 220

TEORÍA DE MALLAS 221

HISTORIA CAPTACIÓN DE AGUA 222

TIPOS DE ATRAPANIEBLAS 222

INSTRUMENTACIÓN 224

IMPRESORAS 3D 226

VÍDEOS..... 227

HUMIDIFICADORES 227

SIMULACIÓN Y ESTUDIOS COMPUTARIZADOS 228

LIBROS, ARTÍCULOS Y OTROS TRABAJOS DE REFERENCIA 228

ANEXOS 237

ANEXO I: FICHAS TÉCNICAS Y DE USO DE LA INSTRUMENTACIÓN ESCOGIDA..... 238

ANEXO II: PRESUPUESTO DE INSTRUMENTACIÓN Y FACTURAS DE COMPRA 267

PRESUPUESTO Y ENLACES DE COMPRA..... 268

ANEXO III: RESULTADOS OBTENIDOS EN SIMULACIONES 274

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

SIMULACIONES REALIZADAS CON LA SECCIÓN DE HUMECTACIÓN DE 2 M DE LONGITUD.....	275
SIMULACIONES REALIZADAS CON LA SECCIÓN DE HUMECTACIÓN DE 2.5 M DE LONGITUD.....	277
Caso 1: 2 m/s en la cámara de ensayos.....	277
Caso 2: 3 m/s en la cámara de ensayos.....	277
Caso 3: 4 m/s en la cámara de ensayos.....	278
Caso 4: 5 m/s en la cámara de ensayos.....	279
Caso 5: 6 m/s en la cámara de ensayos.....	280
Caso 6: 7 m/s en la cámara de ensayos.....	281
Caso 7: 8 m/s en la cámara de ensayos.....	282
OTROS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON LA SECCIÓN DE HUMECTACIÓN DE 3 M DE LONGITUD.....	284
LANZA EN POSICIÓN 1: Ensayos para 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s respectivamente. 284	
LANZA EN POSICIÓN 2: Ensayos para 4 m/s, 5 m/s y 6 m/s respectivamente. 286	
LANZA EN POSICIÓN 3: Ensayos para 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s y 8 m/s respectivamente.	287
LANZA EN POSICIÓN 4: Ensayos para 6 m/s, 7 m/s y 8 m/s respectivamente. 289	
SIMULACIONES REALIZADAS CON LA SECCIÓN DE HUMECTACIÓN DE 4 M DE LONGITUD.....	291
Caso 1: 2 m/s en la cámara de ensayos.....	291
Caso 2: 3 m/s en la cámara de ensayos.....	291
Caso 3: 4 m/s en la cámara de ensayos.....	292
Caso 4: 5 m/s en la cámara de ensayos.....	293
Caso 5: 6 m/s en la cámara de ensayos.....	293

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Caso 6: 7 m/s en la cámara de ensayos.....	294
Caso 7: 8 m/s en la cámara de ensayos.....	295
ANEXO IV: PLANOS.....	296

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa sobre la escasez física y económica del agua por regiones (2012). Fuente: UNESCO.	28
Ilustración 2. Representación esquemática del proceso de captación de niebla (También aplicable a hilos verticales). Fuente: www.imnovation-hub.com	30
Ilustración 3. Interpretación ilustrada de los aborígenes herreños recolectando agua del Arbol Garoé. Fuente: mundoguanche.com	34
Ilustración 4. Carlos Espinosa posando junto al captador de niebla de tipo macrodiamante, de diseño propio. Fuente: UCN Antofagasta.	35
Ilustración 5. Campo de captadores tipo chileno. Fuente: bbc.com	36
Ilustración 6. Estudios CFD en régimen transitorio orientados a desarrollar máscaras faciales de protección contra la COVID-19. Fuente: YouTube - Javelin Technologies Inc.	38
Ilustración 7. Flujo laminar, de transición, y turbulento. Fuente: Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones. Yunus A. Cengel, 1ª Edición.	43
Ilustración 8. Representación ilustrada del Teorema de Bernoulli. Fuente: Fisimat....	46
Ilustración 9. Caracterización de un Tubo Venturi. Fuente: ecured.cu	49
Ilustración 10. Caracterización de los flujos laminar (izquierda) y turbulento (derecha) durante los estudios experimentales de Osborne Reynolds. Fuente: Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones. Yunus A Cengel.	50
Ilustración 11. Ilustración de la Condición de No-Deslizamiento y Capa Límite. Fuente: Wikipedia.org	52
Ilustración 12. Esquema de fuerzas aerodinámicas en un perfil alar. Fuente: es.wikipedia.org	58
Ilustración 13. Túnel de viento abierto con cámara de ensayos abierta. Tipo Eiffel. Fuente: I. Prada y Nogueira (2006)	63
Ilustración 14. Túnel de viento cerrado con cámara de ensayos abierta. Tipo Prandtl. Fuente: I. Prada y Nogueira (2006)	64
Ilustración 15. Túnel de viento abierto con cámara de ensayos cerrada. Tipo NPL. Fuente: I. Prada y Nogueira (2006)	64
Ilustración 16. Túnel de viento cerrado con cámara de ensayos cerrada. Tipo Göttingen. Fuente: I. Prada y Nogueira (2006)	64

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 17. Ingenieros Aerodinámicos de Audi testeando el Audi R18 TDI en un túnel de viento. Fuente: motorsport.com.....	65
Ilustración 18. Pruebas aerodinámicas previas al campeonato internacional de Superbikes del modelo BMW S1000RR WSBK (Temporada 2011). Fuente: asphaltandrubber.com.....	65
Ilustración 19. La aeronave Boeing X-48C en el túnel de viento de la NASA, Langley Research Center (Hampton, Virginia, EEUU). Fuente: nasa.gov.....	66
Ilustración 20. Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Fuente: www.inta.es.....	66
Ilustración 21. Principio esquemático de funcionamiento de un túnel de viento orientado al Skydiving. Fuente: Indoor Skydiving World.	67
Ilustración 22. Maqueta azotada por una corriente de aire, en un túnel de viento de ingeniería civil, destinado a tests para medir la resistencia climática de puentes y edificios. Fuente: Universidad de Costa Rica.....	67
Ilustración 23. Ensayo en túnel de viento para determinar la disposición óptima de los aerogeneradores en una granja eólica. Fuente: Draper, Martín & Guggeri, Andres & López, Bruno & Díaz, A & Campagnolo, Filippo & Usera, Gabriel. (2018). A Large Eddy Simulation framework to assess wind farm power maximization strategies: Validation of maximization by yawning.	68
Ilustración 24. Brazo giratorio desarrollado por Benjamin Robins en 1746. Fuente: nasa.gov.....	68
Ilustración 25. Vuelo inaugural del "Flyer" en 1903. Fuente: nasa.gov.....	70
Ilustración 26. Planos del laboratorio de Champ de Mars. Fuente: http://almadeherrero.blogspot.com/	70
Ilustración 27. Sección longitudinal del túnel de 2ª generación de Prandtl. Fuente: nasa.gov.....	71
Ilustración 28. Túnel de Viento de Densidad Variable (VDT) ubicado en Langley Research Center. Fuente: nasa.gov.....	71
Ilustración 29. Esquema de partes del Lockheed P-38 Lightning, aeronave multipropósito introducida en 1941 en la USAF gracias al desarrollo de perfiles alares NACA. Fuente: U.S. Air Force.	72
Ilustración 30. Formación de la niebla de irradiación. Fuente: AEMET.	74

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 31. Niebla de advección en Barcelona. Fuente: AEMET.....	74
Ilustración 32. Niebla de vapor formándose a las orillas de un lago. Fuente: NOAA Photo Library.....	74
Ilustración 33. Esquema de las posibles disposiciones de las mallas en captadores planos, con la correspondiente nomenclatura de los parámetros necesarios para definir la eficiencia de captación. Fuente: C. Regalado & A. Ritter (2016).	82
Ilustración 34. Captador tipo macrodiamante. Fuente: docplayer.es	83
Ilustración 35. Atrapanieblas de tipo plano o chileno en Alto Patache (Chile). Fuente: Pontificia Universidad Católica de Chile.	84
Ilustración 36. Captador cilíndrico. Fuente: ICIA.....	85
Ilustración 37. Huerto hídrico de captadores RAA. Fuente: nieblagua.com.....	86
Ilustración 38. Onymacris unguicularis, inspiración natural de los captadores con forma de escarabajo. Fuente: Wikipedia.....	87
Ilustración 39. Renderizado de un DewBank y comparativa de tamaño con un Onymacris unguicularis. Fuente: yankodesign.com.....	87
Ilustración 40. Instrucciones de montaje y funcionamiento del Dew Bank. Fuente: inhabitat.com	88
Ilustración 41. Captador de niebla tipo tienda de campaña. Fuente: portalfrutícola.com	89
Ilustración 42. Demostración de recogida de agua desde el depósito de almacenamiento de Dropnet. Fuente: inhabitat.com	90
Ilustración 43. Captador tipo cometa en funcionamiento. Fuente: behance.net.....	91
Ilustración 44. Aplicaciones a las que está destinada el captador Yakka y su principio de funcionamiento. Fuente: ecoinventos.com	91
Ilustración 45. Propuesta de implementación de captadores Yakka en terreno agrícola, con información técnica básica. Fuente: yakka.cl	92
Ilustración 46. Estructura ensamblada del Watair. Fuente: ecoinventos.com.....	93
Ilustración 47. Renderizado de la puesta en funcionamiento y extensión de varios captadores de rocío Watair adosados. Fuente: inhabitat.com.....	94
Ilustración 48. Implementación de un modelo de Warka Tower en un asentamiento rural en Etiopía. Fuente: metalocus.es.....	94
Ilustración 49. Árbol Warka. Fuente: Google Imágenes.....	95

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 50. Materiales empleados para la construcción de la Warka Tower: Bambú local, malla de poliéster, hilo de poliéster y cuerda de cáñamo. Fuente: warkawater.org	95
Ilustración 51. Funcionamiento de Warka Tower. Fuente: www.warkawater.org.....	96
Ilustración 52. Evolución de los modelos de Warka Tower , desde 2012 a 2017. Fuente: www.warkawater.org.....	97
Ilustración 53. Imágenes del túnel de viento construido y emplazado sobre su bancada en uno de los laboratorios del Instituto de Investigaciones Agrarias (ICIA). Fuente: ICIA.....	101
Ilustración 54. Ventilador Sodeca HBA-31-2T- Fuente: sodeca.com.....	102
Ilustración 55. Dimensiones del ventilador SODECA HBA-31-2T. Fuente: sodeca.com	102
Ilustración 56. Mapa topográfico correspondiente a la superficie ocupada por el Instituto Canario de Investigación Agrícola (Escala 1:1000). Fuente: Visor GrafCAN.	103
Ilustración 57. Punto psicrométrico de operación de la niebla de trabajo presente en el túnel de viento. Fuente propia.	104
Ilustración 58. Diferencia entre precisión y exactitud. Fuente propia.....	112
Ilustración 59. Funcionamiento esquemático de un humidificador ultrasónico. Fuente: bioazul.com	116
Ilustración 60. Humidificador ultrasónico Humisonic. Fabricante: Carel. Fuente: carel.es	117
Ilustración 61. Humidificador Chillbooster de Carel. Fuente: Carel.es	117
Ilustración 62. Resumen gráfico de los procesos de ósmosis y ósmosis inversa, así como del estado de equilibrio. Fuente: lenntech.es.....	118
Ilustración 63. Anemómetro de hilo caliente Beha Amprobe TMA - 21HW. Fuente: rs-online.com	121
Ilustración 64. Anemómetro de Hilo Caliente PCE-009. Fuente: PCE Instruments..	121
Ilustración 65. Anemómetro de tubo de Pitot PCE-PDA 10L. Fuente: www.pce-instruments.com.....	123
Ilustración 66. Sensor de humedad HYHU00000 de Carel, destinado al uso con el modelo Humisonic. Fuente: carel.com.....	126
Ilustración 67. Impresora RoboxPRO en funcionamiento. Fuente: all3dp.com.....	127

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 68. Impresora de resina UV Anycubic Photon Mono X. Fuente: anycubic.com.....	128
Ilustración 69. Cámara de alta velocidad PCE-HSC 1660. Fuente: PCE Instruments.	130
Ilustración 70. Diagrama de flujo en el que se explica el funcionamiento del sistema de recolección de agua propuesto para el túnel de viento, así como su propósito final. Fuente propia.	131
Ilustración 71. Isometría del colector de condensado propuesto. Fuente propia.....	132
Ilustración 72. Bandeja de drenaje con desagüe lateral de Ø 14 mm para condensados. Fuente: algsistemas.com.....	132
Ilustración 73. Cecotec Conga WET&DRY. Fuente: www.storececotec.com	134
Ilustración 74. Perspectiva del marco para precipitación de condensado. Fuente propia.	147
Ilustración 75. Perspectiva del cono de contracción inicial modelado en comparación con el cono de contracción con su modificación implementada para unirse a otras piezas. Fuente propia.	148
Ilustración 76. Isometría de la cámara de ensayos modelada con sus dimensiones, expresadas en milímetros. Fuente propia.	149
Ilustración 77. Perspectiva del difusor modelado, con sus dimensiones expresadas en mm. Fuente propia.....	150
Ilustración 78. Perspectiva del modelo tridimensional de la sección de aspiración, con cotas expresadas en mm. Fuente propia.	150
Ilustración 79. Isometría del diseño inicial del túnel de viento ensamblado, con sus correspondientes materiales asignados y una malla introducida a modo de ejemplo para visualizar su disposición durante los estudios. Fuente propia.	151
Ilustración 80. Perspectiva isométrica de la estructura actualizada del túnel de viento, en la que se incluye la nueva pieza dedicada a la inclusión de las lanzas humectadoras. Fuente propia.	152
Ilustración 81. Pasos para acceder al gestor de proyectos en SolidWorks Flow Simulation. Fuente propia.....	153
Ilustración 82. Primera ventana del gestor de proyectos, orientada a rellenar los datos del proyecto de simulación. Fuente propia.....	153

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 83. Selección del tipo de análisis. Fuente propia.....	154
Ilustración 84. Ventana de selección del sistema de unidades. Fuente propia.	154
Ilustración 85. Selección de fluidos de trabajo. Fuente propia.....	155
Ilustración 86. Selección de las condiciones de muro. Fuente propia.	155
Ilustración 87. Condiciones Iniciales del Estudio. Fuente propia.	156
Ilustración 88. Definición de parámetros del ventilador. Fuente propia.	157
Ilustración 89. Curva característica del ventilador introducida en " Engineering Database ". Fuente propia.	158
Ilustración 90. Ventana Run, destinada a definir las condiciones de resolución del estudio. Fuente propia.	159
Ilustración 91. Ventana del solucionador (Solver). Fuente propia.	160
Ilustración 92. Distribuciones de presiones y velocidades y estudio de trayectorias enfocado a las velocidades para el caudal másico de 0.0959 kg/s.	161
Ilustración 93. Distribuciones de presiones y velocidades y estudio de trayectorias enfocado a las velocidades para el caudal másico de 0.3834 kg/s.	161
Ilustración 94. Estudios de trayectorias 3D y distribuciones de presiones y velocidades a lo largo del eje del túnel, y estudio del perfil de velocidades enfocado a las velocidades para un caudal másico de 0.0959 kg/s.	162
Ilustración 95. Estudios de trayectorias 3D y distribuciones de presiones y velocidades a lo largo del eje del túnel, y estudio del perfil de velocidades enfocado a las velocidades para un caudal másico de 0.3835 kg/s.	163
Ilustración 96. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 2 m/s. Fuente propia.....	164
Ilustración 97. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 3 m/s. Fuente propia.....	165
Ilustración 99. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 5 m/s. Fuente propia.....	165
Ilustración 98. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 4 m/s. Fuente propia.....	165
Ilustración 100. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 6 m/s. Fuente propia.....	165

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 101. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 7 m/s. Fuente propia.....	166
Ilustración 102. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 8 m/s. Fuente propia.....	166
Ilustración 103. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.0958 kg/s (2 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.	167
Ilustración 104. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.1438 kg/s (3 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.	167
Ilustración 105. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.1917 kg/s (4 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.	168
Ilustración 106. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.	168
Ilustración 107. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.	168
Ilustración 108. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.	169
Ilustración 109. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.	169
Ilustración 110. Croquis de la propuesta de ubicación de los aligeramientos para la lanza humectadora ultrasónica e isometría que muestra la colocación de las lanzas en el túnel. Fuente propia.	170
Ilustración 111. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.0958 kg/s (2 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el primer aligeramiento. Fuente propia.	170
Ilustración 112. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.1438 kg/s (3 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el primer aligeramiento. Fuente propia.	171
Ilustración 113. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.1917 kg/s (4 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el primer aligeramiento. Fuente propia.	171

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 114. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el segundo aligeramiento. Fuente propia.	172
Ilustración 115. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el segundo aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.	172
Ilustración 116. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el segundo aligeramiento. Fuente propia.	173
Ilustración 117. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el segundo aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.	173
Ilustración 118. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento. Fuente propia.	174
Ilustración 119. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.	174
Ilustración 120. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento. Fuente propia.	175
Ilustración 121. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.	175
Ilustración 122. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento. Fuente propia.	176

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 123. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.	176
Ilustración 124. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento. Fuente propia.	177
Ilustración 125. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.	177
Ilustración 126. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el cuarto aligeramiento. Fuente propia.	178
Ilustración 127. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el cuarto aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.	178
Ilustración 128. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el cuarto aligeramiento. Fuente propia.	179
Ilustración 129. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el cuarto aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.	179
Ilustración 130. Isometría del tubo de pitot modelado para su implementación en los estudios CFD. Fuente propia.	180
Ilustración 131. Perfil de velocidades alrededor del tubo de Pitot previo a las ranuras de introducción de las mallas. Fuente propia.	181
Ilustración 132. Isometría de la geometría de captador plano planteada para los ensayos y su información geométrica. Fuente propia.	182

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 133. Vista en planta del túnel de viento de la evolución del perfil de presiones y trayectorias de flujo. Fuente propia.	183
Ilustración 134. Vista en planta ampliada de la evolución del perfil de presiones del flujo de aire húmedo al pasar por la malla de 1 mm de diámetro y 2 mm de separación entre centros de hilos (75% de sombra). Fuente propia.	183
Ilustración 135. Gráfico de evolución de presiones a lo largo del eje de simetría del túnel de viento. Fuente propia.	184
Ilustración 136. Ecuación 3.29 de Barlow (1999), en la que se estipula el factor de expansión de un difusor de sección cuadrada en función de su ángulo de conicidad. Fuente: J.B. Barlow (1999).Low–Speed Wind Tunnel Testing.	188
Ilustración 137. Lanza humectadora del dispositivo Humisonic. Fuente: carel.es ...	189
Ilustración 138. Esquematación de la 1ª hipótesis de trabajo empleada para el cálculo de pérdidas de carga debidas a la lanza humectadora. Fuente propia.	190
Ilustración 139. Gráfico que relaciona la dependencia entre el coeficiente de arrastre y el Número de Reynolds local de un obstáculo cilíndrico que obstruye un conducto de sección cuadrada. Fuente: Idelchik, I (2005). Handbook of Hydraulic Resistance. 4ª Edición.....	192
Ilustración 140. Cálculo del factor de Reynolds en función del número de Reynolds local existente en un hilo. Fuente: J.B. Barlow (1999). Low–Speed Wind Tunnel Testing	195
Ilustración 141. Eficiencia aerodinámica de una malla de hilos de sección circular en función del porcentaje de sombra. Fuente: Rivera, 2011	196
Ilustración 142. Ubicación de los puntos de referencia en el túnel de viento para plantear el cálculo de la curva resistente del sistema y punto de operación del ventilador. Fuente propia.	198
Ilustración 143. Intersección de las curvas resistentes del túnel de viento para los casos de introducción de 1, 2 o 3 mallas y las curvas características del ventilador. Fuente propia.	203
Ilustración 144. Perspectiva isométrica del ensamblaje y disposición final de las piezas del túnel de viento. Fuente propia.	206
Ilustración 145. Isometría de la propuesta de soporte para el humectador Humisonic. Fuente propia.	207

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ilustración 146. Condiciones de contorno propuestas para el estudio de cargas estáticas del soporte del humisonic. Fuente propia.	208
Ilustración 147. Resultados de tensión equivalente de Von Mises (izquierda) y deformada (derecha) de los estudios de carga planteados para el soporte del humectador ultrasónico en SolidWorks. Fuente propia.	209

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los ventiladores según la presión total desarrollada.	59
Tabla 2. Clasificación de los ventiladores según la trayectoria del aire.....	59
Tabla 3. Clasificación de los ventiladores según su tipo de accionamiento.....	59
Tabla 4. Composición del aire atmosférico.	75
Tabla 5. Resumen de tecnologías de captación de agua.....	97
Tabla 6. Otras alternativas de captación de agua.....	98
Tabla 7. Caudales de aportación de agua (en $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ y $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivamente) en función de LWC y de la velocidad de flujo.	114
Tabla 8. Abanico de presiones dinámicas para el flujo de aire húmedo presente en el túnel de viento, con las condiciones de contorno necesarias (19°C y 100% HR). Fuente propia.....	124
Tabla 9. Velocidades en las diferentes secciones transversales del tramo de absorción en función de la velocidad de flujo requerida en la cámara de ensayos.....	142
Tabla 10. Factores adimensionales de pérdidas para cada ubicación posible de la lanza humectadora, en función de la sección transversal de emplazamiento, el Número de Reynolds Local y su valor aproximado del coeficiente de arrastre.	193
Tabla 11. Pérdidas de carga asociadas al caso de colocación de la lanza humectadora más desfavorable.	193
Tabla 12. Comparación entre las pérdidas de carga teórica generadas por una malla de 1mm de diámetro de hilo y 2 mm de separación entre centros (distintos materiales) y los resultados de pérdidas obtenidos en simulaciones CFD.....	197
Tabla 13. Curva resistente de la instalación en función del número de mallas colocadas.	202
Tabla 14. Puntos de funcionamiento del ventilador asociados a la introducción de una malla.	204
Tabla 15. Puntos de funcionamiento del ventilador asociados a la introducción de dos mallas.....	204
Tabla 16. Puntos de funcionamiento asociados a la introducción de 3 mallas.....	204
Tabla 17. Presupuesto de instrumentación.	268

1. RESUMEN

A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se desarrolla el proceso a seguir de cara a la selección del instrumental necesario para un túnel de viento de ciclo abierto con cámara de ensayos cerrada. El túnel está orientado a estudios de optimización de captación de agua de niebla mediante mallas, siendo el objetivo principal su implantación y puesta en funcionamiento en el Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), organismo que lleva a cabo actividades de investigación, desarrollo y transferencia de conocimientos y tecnologías en este ámbito.

Posteriormente al proceso de selección del instrumental, se implementan estudios 2D y 3D del desarrollo del flujo a lo largo de una versión del túnel de viento modificada (necesaria para asegurar una correcta humidificación de la cámara de ensayos de cara a los experimentos posteriores) variando las condiciones de operación permisibles. De este modo, se incluyen estudios de velocidades, presiones, turbulencias, fenómenos físicos y aerodinámicos que intervienen directamente en el proceso de recolección de las gotículas de agua de niebla. Los resultados obtenidos en los análisis computerizados ejecutados mediante SolidWorks (software CAD/CAM/CAE que contiene un módulo CFD), han permitido comprobar que las condiciones de contorno previamente planteadas del túnel de viento se cumplen. Por otra parte, han ayudado a validar ciertas modificaciones estructurales no convencionales, necesarias para la correcta operación de este túnel de viento, así como comprobar que las condiciones de desarrollo del flujo a lo largo de la estructura son satisfactorias, en todas las situaciones concebidas.

Palabras clave: Captador, Niebla, Instrumentación, CFD, Captación, Agua, Gotas, Malla.

2. ABSTRACT

Throughout this Final Degree Project, the process to be followed to select the necessary instruments for an open cycle wind tunnel with a closed test chamber (NPL) is developed, oriented to mist water capture studies, being the main objective its implementation and start-up in the Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), whose objective is to carry out research, development (R&D) and transfer of knowledge and technologies in this field. After the instrument selection process, 2D and 3D studies of the flow development are implemented along a modified version of the wind tunnel (necessary to ensure correct humidification of the test chamber for subsequent tests), varying the permissible operating conditions. Thus, studies of speeds, pressures, turbulence, and physical and aerodynamic phenomena that directly intervene in the water collection process are included. The results obtained in the computerized analyzes, executed using SolidWorks, on the one hand, have helped to verify that the previously established boundary conditions of the wind tunnel are met. On the other hand, they have helped to carry out the validation of certain unconventional structural modifications, necessary for the correct operation of this wind tunnel, as well as to verify that the flow development conditions throughout the structure in all the conceived conditions are satisfactory.

Key words: Collector, Fog, Instrumentation, CFD, Collection, Water, Drops, Mesh.

3. INTRODUCCIÓN.

Según datos proporcionados por la ONU, el agua es el epicentro de todo desarrollo sostenible, e imprescindible para el desarrollo económico, social, energético, alimentario, de los ecosistemas y, sobre todo, para la supervivencia de la especie humana, formando un vínculo entre la sociedad y el medioambiente. No de menos importancia por ser mencionado en último lugar, el agua es un derecho fundamental para todo ser humano, por lo que la ONU, mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial, el ODS 6 pretenden “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos”, cubriendo todo el ciclo del agua, desde el natural, al ciclo presente en su utilización como recurso en la sociedad. Esto es debido a una previsión de la OMS que indica que hacia el año 2025 prácticamente la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez hídrica.

La escasez de recursos hídricos, a pesar de que es un concepto de mucha relevancia en los últimos 30 años, no es un concepto novedoso, ni tampoco ha surgido recientemente a causa del cambio climático. La realidad es totalmente distinta: numerosos núcleos poblacionales, e incluso países y civilizaciones enteras las han sufrido a lo largo de la historia, tanto por una sobreexplotación masiva de los recursos hídricos disponibles, como por la incapacidad de hallar agua potable, o simplemente porque la demanda de agua supera con creces a los recursos disponibles.

Esto es un problema que, según la UNESCO, afecta a aproximadamente una quinta parte de la población (entre 1200 y 1600 millones de personas), que residen en áreas afectadas por la escasez de agua, o que se hallan en regímenes restrictivos de uso hídrico, ya sea por escasez o por la carencia de recursos técnico-económicos suficientes para acceder a ellos.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

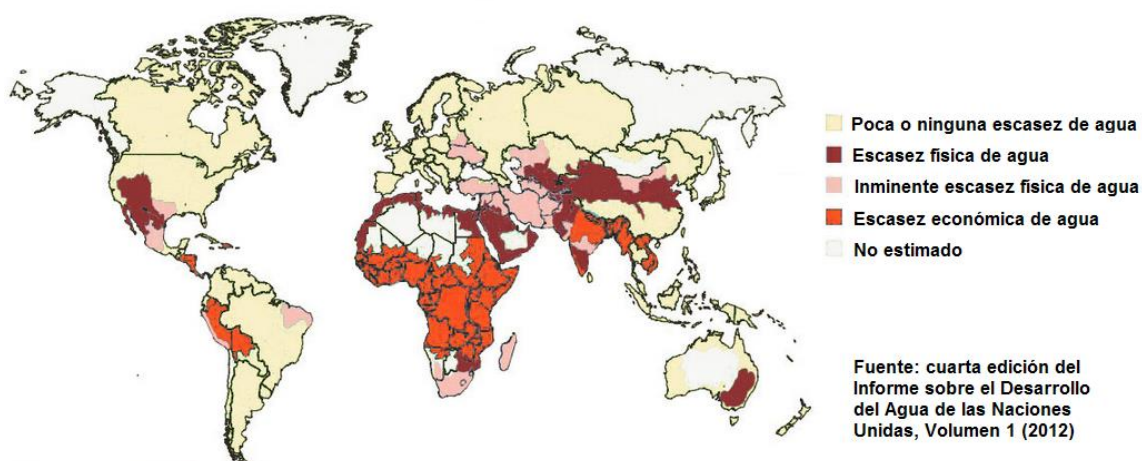


Ilustración 1. Mapa sobre la escasez física y económica del agua por regiones (2012). Fuente: UNESCO.

Por otra parte, el término escasez de agua no es sólo achacable a la insuficiencia de recursos hídricos o a la incapacidad de cualquier tipo para acceder a ellos, sino también a la degradación de su calidad como consecuencia de las acciones y actividades del ser humano (urbanizaciones masivas, uso de fertilizantes, incremento exponencial de la actividad agrícola o la contaminación de fuentes de agua dulce debido a un sistema de tratamiento de residuos ineficaz o inexistente), que transforman un agua de calidad apta para consumo a un recurso no apto a niveles práctico. Esto causa también un decremento de la disponibilidad y reutilización hídrica, y puede elevarse a tres niveles, dependiendo de su gravedad:

- **Estrés hídrico:** Ocurre cuando la demanda de agua excede la cantidad disponibles de recursos durante un tiempo determinado, o cuando una calidad pobre de estos recursos restringe su uso a la población. Causa un deterioro de los recursos de agua potable en términos de calidad (ríos o lagos secos, sobreexplotación de acuíferos...) y cantidad (ya sea por contaminación, intrusión de salinidad u otros fenómenos).
- **Escasez hídrica:** Se define como un suceso natural en el que una zona con recursos hídricos posee menor agua de la prevista por antecedentes históricos en un momento o época del año dada. En otras palabras, son oscilaciones negativas naturales del recurso hídrico disponible en una zona.
- **Déficit hídrico:** Situación en la que el recurso hídrico disponible en una zona no es suficiente para abastecer la demanda de la zona en cuestión.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- **Crisis hídrica:** Este concepto atiende a la disminución en calidad y cantidad en las reservas disponibles de agua dulce, en base los potenciales efectos nocivos para la salud humana y la actividad económica.

El interés principal por la realización de este proyecto reside en el *Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)*, institución que apuesta por la adición de metodologías y herramientas novedosas en el **I+D+i** de tecnologías destinadas al sector agrario en su conjunto, a mejorar la calidad de vida y a contribuir en el aprovechamiento racional y sostenible de los recursos naturales.

Concretando más en profundidad, el peticionario (**ICIA**) busca realizar ensayos de captación de agua de niebla mediante mallas en un entorno controlado y empleando un túnel de viento de baja velocidad, de manera que pueda estudiarse tanta variedad de situaciones hipotéticas como se desee, así como complementando el estudio de situaciones reales en campo mejorando sus resultados y, permitiendo así:

- **Obtener datos** de una alta fiabilidad, derivados de realizar los ensayos en un ambiente controlado y regulable, gracias a una **instrumentación adecuada**, sin incurrir en fenómenos externos (humanos o naturales) que sean susceptibles de causar una obtención de datos falseada o irreal.
- **Testear** novedosas y diferentes tecnologías de construcción de mallas para la captación de agua (material, construcción y diseño), de cara a testear la efectividad de ciertas tecnologías, sin necesidad de realizar la inversión inicial del proyecto a escala real o prototipo.
- **Extrapolar las condiciones atmosféricas** de ciertas zonas geográficas con deficiencia de recursos hídricos al túnel de viento, para determinar qué tipo de tecnología de captación de agua se ajusta mejor a las necesidades y a las características de una región en concreto.

En esencia, el objetivo primordial de este Trabajo de Fin de Grado, orientado a completar y profundizar en el estudio y la investigación, al igual que su predecesor, “*Diseño y Construcción de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Captación de Agua de Niebla*”, reside en una futura aplicación de Investigación y Desarrollo (I+D) orientada al diseño, test e implementación de tecnologías eco-sostenibles orientadas a la obtención de recursos hídricos en zonas extremadamente

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

áridas, con un nivel de precipitaciones anual bajo, así como de una economía y recursos tecnológicos y energéticos limitados. De este modo, es posible desarrollar métodos de obtención de agua potable y apta para consumo humano de uso intuitivo, bajo coste y ecológicos (en base a materiales con una huella de carbono baja, altamente reciclables y con estructuras de captación de niebla que no afecten significativamente la apariencia de los entornos naturales).

Un buen ejemplo de estos métodos de obtención de agua sostenibles son los captadores de niebla. Aunque presentes en gran diversidad de tipos y materiales, para cubrir necesidades diferentes, los más conocidos y predominantes son los captadores planos (si bien es cierto que existen muchos tipos, explicados en profundidad más adelante): estructuras de malla de polipropileno o nylon trenzado (conocidas comúnmente como malla Raschel si son de polipropileno) tensada entre dos postes laterales empotrados en el suelo y estabilizados mediante cables tensores, generalmente de acero, cuyo sistema de recolección de agua suele consistir en un canal de PVC situado en el flanco inferior de la malla, que recoge el agua que gotea de ellas y la dirige hacia un depósito.

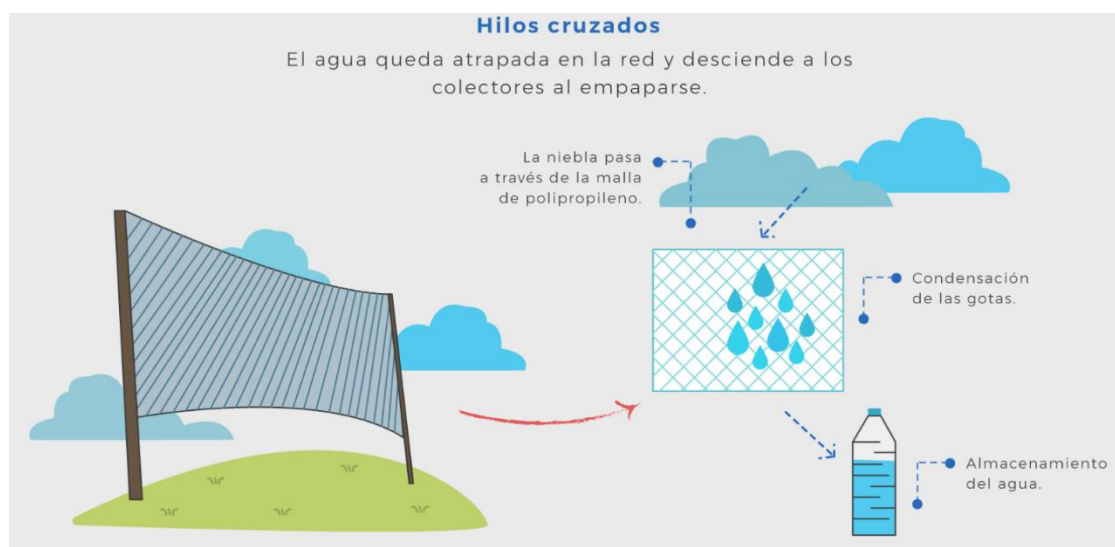


Ilustración 2. Representación esquemática del proceso de captación de niebla (También aplicable a hilos verticales).
Fuente: www.innovation-hub.com

Este tipo de tecnologías de captación de agua son de tipo pasivo, dado que se necesita un banco de niebla con un rango de velocidades determinada, de modo que ni se deja de recolectar agua por la pasividad del cúmulo de niebla, ni por la violencia de un viento desmesurado, que acabaría arrastrando las gotas atrapadas y destruyendo el captador.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

De hecho, aunque gracias a estas tecnologías es posible captar de manera sostenible el agua presente en la niebla, no es una metodología de adquisición de agua apta para todas las regiones. Es común ver atrapanieblas en zonas de alta aridez o que estén relativamente cerca de la costa, no obstante, las condiciones más favorables se encuentran entre los 800-900 m de altitud, un collado (punto más bajo de una línea de cumbres, que se sitúa entre dos elevaciones) que sirva como canalización de la niebla, una orientación perpendicular a los vientos cargados de humedad y cercanos a la línea de costa (como se comentó anteriormente).

4. OBJETIVOS Y ALCANCE.

Los objetivos generales principales de este trabajo residen en:

- Llegar a conocer la problemática presente a nivel internacional, en relación con las dificultades de algunas zonas para la obtención de recursos hídricos suficientes y aptos para consumo humano, que han llevado al desarrollo de ingenios tecnológicos como los atrapanieblas y sus derivados.
- Conocer los principales mecanismos físicos de captación de agua de niebla, y cómo están relacionadas con la mecánica de fluidos tradicional.
- Estudiar los diferentes ingenios capaces de recolectar niebla, que a su vez son proyectos sostenibles, innovadores y respetuosos con el medio ambiente, y que además producen un impacto ambiental mínimo, con gasto de energía y generación de residuos nimios.
- Seleccionar la tecnología necesaria para instrumentar un túnel de viento de baja velocidad, propiedad del **Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)** orientado a simular estudios de captación de nieblas y sus parámetros físicos más influyentes.
- Efectuar un planteamiento alternativo en términos de diseño que permita adaptar este túnel de viento a la consecución del grado de humectación necesaria para recrear la niebla en el interior de dicho túnel, lo que posibilitará la realización de los ensayos posteriores en las condiciones requeridas.
- Realizar simulaciones mediante estudios computacionales para verificar el correcto funcionamiento de las modificaciones estructurales planteadas en el túnel de viento, así como de la interacción aerodinámica entre mallas de captación e instrumentación y la influencia de la implementación de una malla en la cámara de ensayos. Estos estudios de simulación se justifican como los estudios previos orientados a conseguir el diseño óptimo de la pieza nueva a incorporar en el túnel de viento objeto de estudio (de cara a su posterior construcción) y la ubicación más adecuada de la instrumentación seleccionada en dicho túnel. Todo esto se realiza con el objeto de poder simular en el interior del túnel las condiciones ambientales asociadas a los estudios de captación de

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

agua de niebla mediante mallas que se ensayarán en un futuro próximo en el túnel de viento e implementarán en campo.

Además, un aliciente importante de la puesta en práctica de este proyecto es la dificultad que existe actualmente para generar niebla en condiciones artificiales (mediante dispositivos humectadores) y de una forma en la que se pueda controlar su topología (tamaño medio de las gotículas que forman la niebla). De este modo, al resolverlo se permite a los investigadores acotar y abordar de forma directa un problema, reduciendo los costes mediante la aplicación de ensayos computarizados, ejecutando simulaciones de interacción de niebla con mallas para posteriormente decidir de un modo más concreto el siguiente paso a seguir: los estudios de campo.

Por otra parte, el alcance de este proyecto se define en varios puntos:

- En primer lugar, recabar información sobre la historia de la captación de agua de niebla y de los túneles de viento, aquellos principios físicos que intervienen en su desarrollo, cómo se desarrolla actualmente el campo de la captación de niebla y qué tecnologías se implementan, así como de todos aquellos aspectos relevantes (tanto constructivos como relativos al instrumental necesario) en cualquier tipología de túnel de viento.
- En segundo lugar, se llevará a cabo un proceso de evaluación y selección que comprenda toda aquella instrumentación necesaria o adecuada para un túnel de viento de baja velocidad, cuyo objetivo es realizar estudios de captación de agua de niebla mediante mallas.
- Finalmente, se realizarán estudios computacionales, divididos en dos secciones diferenciadas:
 - Simulaciones con resultados 2D y 3D con el modelo tridimensional del túnel de viento objeto de estudio, analizando las condiciones de flujo y las interacciones fluido – instrumentación, de cara a comprobar que se cumplen los perfiles de velocidades buscados y que la instrumentación escogida no afecta negativamente al comportamiento del flujo de niebla.
 - Simulaciones con resultados 2D y 3D de modelos tridimensionales de mallas, para corroborar su comportamiento teórico en términos de generación de pérdidas de carga.

5. ANTECEDENTES DEL PROYECTO. HISTORIA Y ESTADO DEL ARTE.

El concepto de la captación de agua de niebla, debido a los avances tecnológicos recientes en esta materia de la mano de la comunidad científico-tecnológica, ha despertado gran expectación a nivel general debido a la potencialidad de obtener agua de manera sostenible y de alta calidad, aunque no por esto estamos ante un campo de investigación novedoso.

Los primeros antecedentes históricos del aprovechamiento de niebla se remontan al siglo XVI en la isla de El Hierro, en nuestro archipiélago, Canarias. En esta época, los Bimbaches, pobladores precolombinos de la isla, tomaban como divinidad a un árbol, nombrado **Garoé** (*Ocotea foetens*, un árbol que se cree pertenece a la familia de los Tilos), debido a que, según la leyenda, brotaba de éste agua de forma misteriosa. Este suceso, tomado como anómalo por la población precolombina de la isla, y sumado al hecho de que El Hierro, al igual que el resto de las islas del archipiélago canario, carezcan de ríos y escaseen de nacientes (debido a la sobreexplotación de acuíferos y el consiguiente descenso del nivel freático a lo largo de los años, aunque, por ejemplo, en la isla de La Palma se destacan los Nacientes de Marcos y Cordero), propició que se documentara en profundidad. Aunque, nada más lejos de la realidad, este “árbol sagrado” abastecía a la población autóctona gracias al agua que recolectaba de la niebla mediante sus hojas, que era capturada y precipitaba por gravedad para que pudiera ser aprovechada. A pesar de que en esta isla las precipitaciones anuales rondan los 450 mm



Ilustración 3. Interpretación ilustrada de los aborígenes herreños recolectando agua del Árbol Garoé. Fuente: mundoguanche.com

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

(nada que ver con, por ejemplo, las cifras presentes el Desierto de Atacama o del Sáhara), en los períodos de sequía se puede llegar tan sólo a los 5 mm.

Uno de los primeros cronistas sobre el Árbol Garoé, **Bartolomé de Las Casas**, describía así el entorno del árbol:

“En lo alto de este árbol siempre hay una nubecilla y el Garoé deja caer unas gotas de agua que los hombres encauzan hacia una modesta fuente; gracias a ella, viven, durante los periodos de sequía extrema, seres humanos y animales [...]”. (**Fray Bartolomé de Las Casas, 1875**).

Más tarde, a mediados del siglo XX (concretamente en 1956) Carlos Espinosa Arancibia, físico y matemático investigador para la Universidad Católica del Norte (Chile), logró diseñar junto a otros investigadores chilenos lo que hoy se conoce como captadores tipo chileno: Un sistema novedoso en su tiempo, que permitía obtener agua de la niebla, en el que, según el propio testimonio de Carlos Arancibia: “Al momento de



Ilustración 4. Carlos Espinosa posando junto al captador de niebla de tipo macrodiamante, de diseño propio. Fuente: UCN Antofagasta.

pasar la niebla se mojaban los hilos y empezaban a llover agua. Fue muy ingenioso, pero muy simple”. En esencia, este diseño consistió en realizar una malla rectangular entretejida de polietileno con aberturas de aproximadamente 1 mm de espesor nominal que atrapaban las gotas de agua líquida presentes en la niebla, una niebla formada en la costa que se mueve hasta el interior en forma de bancos de nubes. Es popularmente conocida como “**Camanchaca**”.

Como muchos proyectos de ingeniería, este también nació de la necesidad, una necesidad de un recurso tan simple, pero a la vez tan importante como lo es el agua potable. Durante el año 1956, la región de Antofagasta, en Chile, sufrió una sequía extrema en la que las restricciones del uso del agua reducían la cantidad de agua disponible por familia a 8 litros y en la que muchos casos se defendían con el uso de armas. A pesar de lo novedoso de este diseño, el equipo investigador se percató de que parte del agua captada por la malla era

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

arrastrada por el viento, lo que propició el desarrollo de un diseño basado en octaedros cubiertos de polietileno que evitaban el arrastre de la estructura: el **Captador Tipo Macrodiamante (Ilustración 4)**.

Durante todo este tiempo, estos artilugios han sido de gran ayuda para evitar la desertificación de las regiones más áridas de Chile, así como para propiciar el éxito de empresas como **Atrapaniebla**, cuya ocupación principal reside en la producción de cerveza en base al agua recogida por los captadores de niebla de la ciudad de Peña Blanca.



Ilustración 5. Campo de captadores tipo chileno. Fuente: bbc.com

Otros estudios de gran relevancia sobre el fenómeno de captación de agua se remontan a la década de 1960, donde el **Dr. Robert Schemenauer** y la **Profesora Pilar Cereceda**, ambos pertenecientes a la Universidad Católica de Chile, diseñaron y probaron en campo el captador tipo SFC (**Standard Fog Collector**), consistentes en una doble malla de polietileno (denominada malla Raschel) limitada por un marco metálico y soportada por dos postes verticales, erigida de manera perpendicular a la dirección del viento.

Los primeros resultados obtenidos en el estudio de la captación de niebla en Canarias, gracias a la presencia de los vientos **Alisios**, datan de 1962, de la mano del investigador García Prieto, que llevó a cabo ensayos experimentales de captación de niebla en el Observatorio de **Izaña (Tenerife)**. A posteriori comenzaron a sumarse a los aportes

científicos autores como **M. Morey** y **F. González**, realizando pruebas en La Cumbre (Gran Canaria) con captadores cilíndricos (**Tipo Grunow**).

Actualmente, gracias a una evolución constante de la técnica durante casi sesenta años y a las aportaciones científicas realizadas desde la década de 1960, el estado del arte de los atrapanieblas en Canarias se encuentra en una fase de constante evolución, donde tanto empresas privadas, como organismos de investigación afiliados al gobierno regional aportan su visión objetiva del aprovechamiento de la niebla mediante nuevos estudios y productos. Buenos ejemplos de entidades privadas que se dedican a esta área de obtención sostenible de recursos en el archipiélago son: **Montes Verdes Ingeniería Agraria**, **Nieblagua**, **Agua de Niebla de Canarias S.L.**, **Teidagua**, entre otras.

En cuanto a la aportación gubernamental respecto a esta área de estudio, se tienen diversas referencias en el archipiélago:

- **El Gobierno de Canarias** participa activamente en el proyecto **LIFE NIEBLAS**, un proyecto europeo que busca paliar los efectos del cambio climático en regiones del sur de Europa y ultraperiféricas, centrándose en *“ensayar colectores de niebla y tipologías innovadores de reforestación, basadas en la recolección de agua de niebla”*.
- En 2012, con motivo de las fuertes sequías que afectaron a Canarias, el Ayuntamiento de San Cristóbal de La Laguna en colaboración con la empresa **Teidagua**, instalaron cuatro dispositivos de captación tridimensional (explicados más adelante) de niebla que pueden obtener un pico de 500 litros diarios por unidad, dependiendo de las condiciones climatológicas.

De igual manera, aunque estas dos regiones sean las precursoras de la tecnología de captación de niebla, numerosos estudios e investigaciones sobre este tema se están realizando actualmente en diversos países del mundo, llevando a la creación y patentado de novedosas y muy diversas tipologías de atrapanieblas, favoreciendo un futuro tecnológico basado en la sostenibilidad y fomentando el uso, explotación y tratamiento responsable de los recursos hídricos. Algunos ejemplos de estas investigaciones tienen su objetivo de implantación en países como Perú, Etiopía, Haití, Colombia, Brasil, Camerún, y cualquier región cuyas características principales sean la pobreza en el volumen de precipitaciones anuales, infraestructuras insuficientes o inexistentes para

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

abordar la demanda de agua potable de la población y la existencia de bancos de niebla de los que se pueda aprovechar su contenido hídrico para abastecimiento poblacional.

Además, el interés por la investigación en este campo, y en otros ámbitos estrechamente relacionados (como el transporte de aerosoles y flujos bifásicos líquido – gas), ha proliferado con la reciente pandemia de **SARS – CoV – 2**, o **COVID - 19**, en la dirección de la realización de análisis de aerosoles emitidos por las personas, cuyas metas iniciales son:

- Estudiar el flujo de aire durante la exhalación para:
 - Desarrollar máscaras faciales (*face shields*) que protejan de manera efectiva al usuario portador, y reducir el riesgo de contagio mediante un diseño eficaz. Además, estudiar la permanencia temporal de estos aerosoles en un entorno cerrado.

Un ejemplo muy notable de este tipo de estudios es el realizado por la empresa **Javelin Technologies INC.**, quien, asociada con hospitales canadienses, está ayudando a diseñar máscaras faciales eficientes mediante la implementación de **SolidWorks Flow Simulation®**.

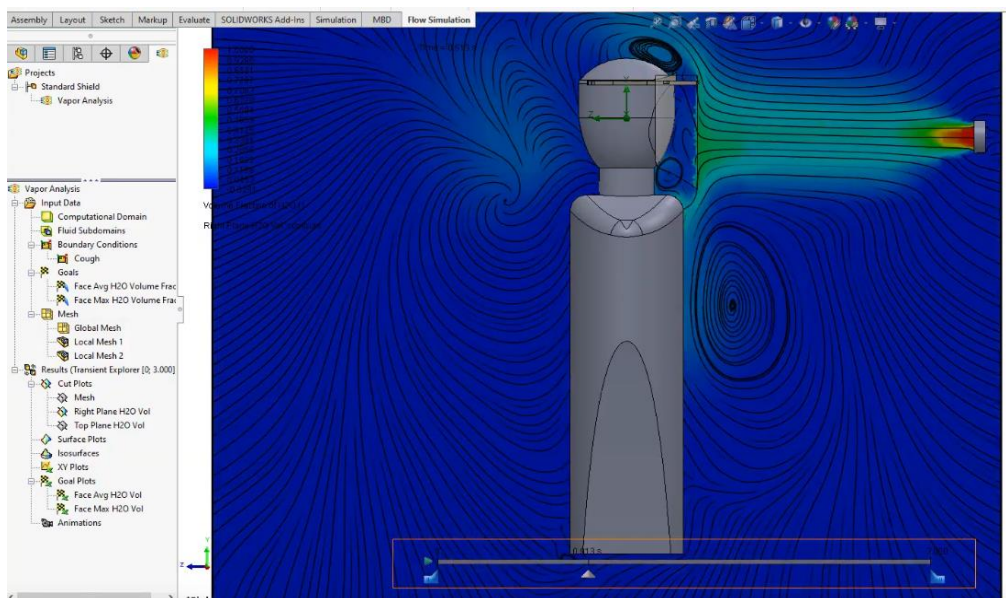


Ilustración 6. Estudios CFD en régimen transitorio orientados a desarrollar máscaras faciales de protección contra la COVID-19. Fuente: YouTube - Javelin Technologies Inc..

Tal y como se puede apreciar en la ilustración 6, una vez planteado el diseño preliminar, se realizan estudios de trayectorias de aire, para comprobar si la solución planteada es segura para el usuario; esto se verifica observando la fracción de vapor de agua presente

en la zona intermedia entre la cara y la máscara: en este caso, se han comprobado los valores máximos y promedios de fracción volumétrica 4 diseños diferentes a lo largo de un tiempo t , para decantarse por uno u otro.

Este ejemplo es uno de los pocos en los que se emplea el método CFD para satisfacer las problemáticas tecnológicas o de salud de los consumidores y empresas; por otra parte, si hacemos mayor hincapié en las aportaciones científicas en el ámbito de la captación de niebla, es posible encontrar aportaciones muy interesantes:

- **Schemenauer, R. S.; Joe, P. I. The Collection Efficiency of a Massive Fog Collector. Atmos. Res. 1989.**

Un referente a nivel mundial en cuanto a estudios de atrapanieblas masivos (Área de captación $\approx 48 \text{ m}^2$) ubicados en las montañas costeras chilenas, donde prevalece la aparición de la niebla **Camanchaca**. Realiza estudios sobre captadores de doble capa de hilos trenzados de polipropileno de 1 mm de diámetro en diferentes condiciones ambientales, variando la velocidad del banco de niebla, el tamaño de gota y el contenido de agua líquida, de cara a hacer comparaciones directas con los rendimientos a diferentes velocidades y con los resultados teóricos.

- **E. Bresci. Wake characterization downstream of a fog collector. Università Di Firenze. Atmos. Res. 2002.**

A lo largo de este artículo se pretende realizar una caracterización en profundidad del perfil de velocidades de un banco de niebla que discurre a través de un atrapanieblas tipo chileno (flujo transversal al captador) y cómo éste depende de la geometría y porosidad del obstáculo. Además, se estudia el perfil de velocidades en términos de altura positiva y negativa respecto de la altura del captador, y cómo evoluciona el perfil de velocidades una vez el banco de niebla ha pasado por el captador, recuperando gradualmente la velocidad de flujo libre.

- **E. De La Jara. Modelación Computacional del Impacto de Gotas de Niebla en Fibras Cilíndricas Paralelas. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2012.**

Esta tesis de grado se centra en desglosar la ciencia y tecnología detrás de los atrapanieblas, la caracterización física y fluidomecánica de la niebla, y de desarrollar procedimientos computacionales que permitan simular de manera

exacta y con un alto grado de fiabilidad y los mecanismos físicos de captación y la interacción de las gotas de agua con las mallas captadoras.

- **Regalado, C. M.; Ritter, A. The Design of an Optimal Fog Water Collector: A Theo-retical Analysis. Atmos. Res. 2016.**

En este artículo se realiza un proceso de profundización teórica mediante ecuaciones paramétricas de aquellos factores físicos y geométricos que influyen significativamente en el proceso de captación de niebla, proponiendo geometrías y condiciones de contorno que serán estudiadas y comparadas entre sí, y obteniendo aquellos detalles constructivos y de entorno que derivan en el diseño óptimo de un atrapanieblas.

- **W. Shi, M.J. Anderson, J.B. Tulkoff, B.S. Kennedy, J.B. Boreyko. Fog Harvesting with Harps. 2018.**

Este artículo de investigación centra sus esfuerzos en resolver la baja eficiencia de las mallas gruesas en la captación de gotas micrométricas suspendidas en el flujo de niebla y la obstrucción causada por las mallas más finas y densas, que suponen un efecto negativo en la aerodinámica del flujo. De manera resumida, el enfoque experimental se basa en variar la geometría de las mallas implementando diversos diámetros de hilo, manteniendo la distancia entre centros, y empleando filamentos metálicos para contrastar su rendimiento con materiales altamente hidrofóbicos. Además, comparan su el rendimiento y la tasa de captación de las mallas tipo arpa respecto del tipo Raschel, inclinando la balanza de la tasa de captación hacia las primeras.

- **M. Azeem, A. Guérin, T. Dumais, L. Caminos, R.E. Goldstein, A. Pesci, J. Rivera, M. Torres, J. Wiener, J. Campos, J. Dumais. Optimal Design of Multi – Layer Fog Collector. 2020.**

Esta investigación cimienta su modus operandi en dos aspectos bien diferenciados. En primer lugar, se pretende buscar la optimización teórica de la geometría del captador de niebla mediante la maximización matemática de los parámetros principales de la captación. En segunda y última instancia, se llevan los diseños presentados por optimización a una sala de pruebas para contrastar el rendimiento experimental con el teórico y el rendimiento en campo de una malla Raschel convencional.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1. TEORÍAS DE INGENIERÍA FLUIDOMECÁNICA

1.1. MECÁNICA DE FLUIDOS

La mecánica de fluidos es un área de la mecánica que se define como “*la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en reposo (estática de fluidos) o en movimiento (dinámica de fluidos), y la interacción de éstos con sólidos o con otros fluidos en las fronteras*”. (Çengel, 2006)

De manera más concreta, a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se trata la mecánica - dinámica de fluidos incompresibles (esto se debe a que, a pesar de que el fluido de trabajo es aire, las variaciones de presión son tan pequeñas que aproximamos el fluido como incompresible), tomando como fluido de trabajo el aire húmedo con una humedad relativa del 100%, debido a la naturaleza de los ensayos, tratados en mayor profundidad más adelante.

Asimismo, es importante comprender todos aquellos aspectos de la mecánica de fluidos, que tendrán un alto grado de relevancia a lo largo del proyecto.

1.2. NÚMERO DE MACH.

El número adimensional de Mach se define como el cociente entre la velocidad del flujo respecto a la velocidad del sonido:

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{\text{Velocidad del flujo}}{\text{Velocidad del sonido}} \quad (1)$$

Donde:

- C es la velocidad del sonido, cuyo valor asciende a 346 m/s en el aire a temperatura ambiente a nivel del mar. Este concepto del número de Mach abre una categorización de flujo en función de su velocidad.

1.3. CATEGORIZACIÓN DE LOS FLUJOS.

- **Flujo de baja velocidad / subsónico / sónico / transónico / supersónico / hipersónico:**
 - Flujo de baja velocidad: Para valores de **Ma < 0.3**, donde los efectos de la compresibilidad en los gases se desprecian. Esta es la tipología de flujo que se abordará en este Trabajo de Fin de Grado a efectos de velocidad.
 - Flujo subsónico: Para valores de **0.3 < Ma < 0.8**.

- Flujo transónico: Para valores de $0.8 < Ma < 1.2$.
- Flujo sónico: Para valores de $Ma = 1$.
- Flujo supersónico: Para valores de $1.2 < Ma < 5$.
- Flujo hipersónico: Para valores de $Ma > 5$.

• **Flujo laminar / Flujo turbulento:**

- Flujo laminar: En esencia, un flujo laminar, se distingue por su movimiento ordenado y caracterizado por capas no alteradas del mismo. Es muy común en el flujo de fluidos intensamente viscosos, como el aceite.
- Flujo de transición: Se caracteriza por ser una alternancia de los flujos laminar y turbulento.

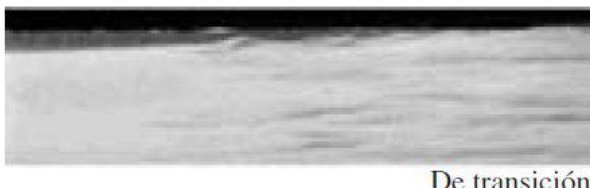


Ilustración 7. Flujo laminar, de transición, y turbulento. Fuente: Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones. Yunus A. Cengel, 1ª Edición.

- Flujo turbulento: Consiste en el flujo altamente desordenado de un fluido, en el que las capas de fluido se alteran y mezclan entre sí. Es muy común en fluidos con baja viscosidad, como el aire a grandes velocidades.

• **Flujo natural / Flujo forzado:**

- Flujo forzado: El fluido se obliga a fluir sobre una superficie o ducto por medio de factores o medios artificiales, como una bomba o un ventilador.
- Flujo natural: En este caso, el fluido realiza la misma acción, pero por medios naturales, como por ejemplo el fenómeno de flotación, manifestado mediante la elevación del fluido con más temperatura (más energía interna - menos

densidad) y la caída del fluido más frío (menos energía interna - más densidad).

- **Flujo compresible / Flujo incompresible.** La clasificación de esta categorización de flujo atiende a la variación de la densidad del fluido a lo largo del flujo.
 - Se dice que un fluido es incompresible si la densidad permanece constante (de manera aproximada) a lo largo de todo el flujo. Por el contrario, si las variaciones son considerables, se considera un fluido compresible.
- **Regiones viscosas / no viscosas del flujo:** El término viscosidad proviene de la resistencia en forma de fuerza de fricción que experimentan dos capas adyacentes de fluido, donde la capa más lenta trata de desacelerar a la más rápida, y depende de la cohesión molecular en los líquidos, y por las colisiones moleculares en los gases. En términos de su definición, la viscosidad se puede contemplar como *“una medida de la adherencia interna del fluido”*. Dado que no existen fluidos con viscosidad nula, solo se pueden diferenciar regiones viscosas y no viscosas.
 - En un flujo, si los efectos de la fuerza de fricción son significativos, estamos ante una **región viscosa**; por el contrario, si estas fuerzas son despreciables en comparación con las de inercia o presión, estamos ante una **región no viscosa**, aunque si se desprecian sus efectos dentro del cálculo puede causar una pérdida de exactitud.
- **Flujo interno / Flujo externo:** Esta clasificación atiende a si el flujo en cuestión se ve forzado a circular por un canal confinado o, por el contrario, libremente o sobre una superficie.
 - **Flujo interno:** Corresponde a la condición en la que un flujo se halla discurriendo por el interior de un conducto, si éste queda totalmente limitado por las superficies sólidas que delimitan dicho ducto. En otras palabras, el fluido debe cubrir la totalidad de la superficie transversal (destinada a la conducción del fluido) del tubo.

En los flujos internos la influencia de la viscosidad en todo el campo de flujo es dominante.
 - **Flujo externo:** Por otra parte, en esta categorización debemos distinguir cuidadosamente dos casos.

1. El flujo del fluido no se ve limitado y circula sobre una placa, un alambre o un tubo.
2. Si circula por el interior de un ducto pero solo está lleno parcialmente del fluido y existe una superficie libre. Este caso se conoce como flujo en canal abierto (por ejemplo, el flujo de agua en el interior de una tajea o en un río).

En los flujos externos, los efectos derivados de la viscosidad se limitan a la capa límite cercana a las superficies sólidas.

- **Flujo estacionario / Flujo no estacionario:**
 - Flujo estacionario: Este tipo de flujo se da cuando las variables que lo definen son constantes, es decir, que la derivada de cualquiera de estas variables respecto del tiempo es igual a cero.
 - Flujo no estacionario: Por el contrario, si alguna de las variables que definen al flujo son dependientes del tiempo, estamos ante un flujo no estacionario.
- **Flujo unidimensional / bidimensional / tridimensional:** Esta caracterización de flujo se realiza en base a la distribución de su campo de velocidades. Para ilustrarlo, se usará como ejemplo el flujo estacionario de un fluido a través de un conducto de sección circular de altura z y radio r .
 - Desde que entra el fluido en la tubería, la velocidad de éste varía tanto en la dirección radial como en la dirección que define la longitud de la tubería. Esto es debido a que, por la condición de no – deslizamiento el fluido no tiene velocidad en todos los puntos de la superficie interior del conducto. Por tanto, se contempla un flujo bidimensional
 - Por otra parte, una vez que el perfil de velocidades del flujo está totalmente desarrollado, estamos ante un flujo unidimensional, dado que varía en sentido radial, pero no axial ni angularmente. El perfil se mantiene constante en cualquier ubicación axial.

De igual manera, un flujo puede considerarse bidimensional cuando una dimensión predomina sobre la otra y las variaciones del flujo en la dirección predominante no son significativas.
 - Finalmente, un flujo es tridimensional cuando las variaciones en el perfil de velocidades son significativas en las tres direcciones del espacio.

1.4. TEOREMA DE BERNOULLI.

Este teorema, enunciado por primera vez por Daniel Bernoulli en 1726, postula que, **en puntos ubicados a lo largo de una dirección horizontal de flujo, las regiones con altas presiones tienen una menor velocidad de fluido, mientras que las regiones de menor presión tienen una mayor velocidad de flujo.**

Este principio se demuestra matemáticamente mediante la **Ecuación de Bernoulli**, en la que se relaciona la presión, velocidad y altura piezométrica de un mismo fluido (densidad constante) en dos puntos cualesquiera de una conducción por medio del principio de conservación de la energía. La expresión idealizada en términos de energía (despreciando las pérdidas energéticas del fluido) se expresa como:

$$P_1V_1 + \frac{1}{2} m v_1^2 + mgh_1 = P_2V_2 + \frac{1}{2} m v_2^2 + mgh_2 \quad (2)$$

Donde:

- P_1V_1 y P_2V_2 son las expresiones de la energía debida a la presión del fluido.
 - P es la presión estática del fluido, expresada en Pascales [Pa].
 - V es el volumen del fluido, expresado en m^3 .
- $\frac{1}{2} m v_1^2$ y $\frac{1}{2} m v_2^2$ son las expresiones de la energía cinética del fluido.
 - m es la masa del fluido. Se expresa en kg.
 - v es la velocidad del fluido. Se expresa en m/s.
- mgh_1 y mgh_2 son las expresiones que definen la energía potencial del fluido.

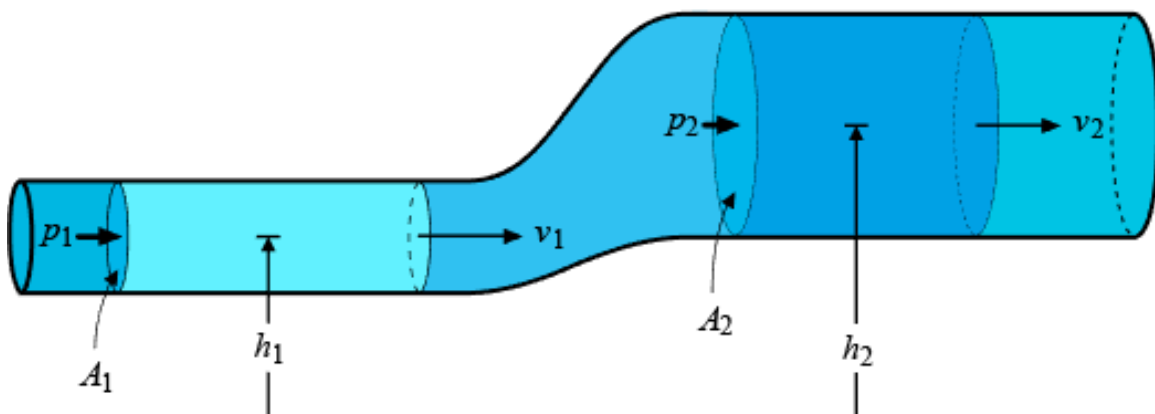


Ilustración 8. Representación ilustrada del Teorema de Bernoulli. Fuente: Fisimat.

Si tomamos la ecuación anterior, y dividimos cada uno de los términos por el peso específico del fluido en cuestión, obtendremos una versión de la ecuación de Bernoulli en función de la carga:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 \quad (3)$$

Donde:

- **P₁** y **P₂** son las presiones estáticas (absolutas o manométricas) del fluido en dos puntos distintos de la instalación o conducción.
- **γ (gamma)** es el peso específico del fluido, expresado en N/m³
- **h₁** y **h₂** son las cotas piezométricas del fluido en los puntos 1 y 2. Se expresan en metros.
- **g** es la aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

Dejando de lado las formulaciones matemáticas idealizadas del teorema de Bernoulli, si tenemos en cuenta las pérdidas de carga, así como las máquinas hidráulicas que suministran energía al fluido, aparecerán dos nuevos términos en la ecuación:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 - \Sigma Hr + \Sigma H = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 \quad (4)$$

Para este caso concreto, los nuevos términos que aparecen en la ecuación son:

- **ΣHr** se corresponde con el sumatorio aritmético de todas las pérdidas de carga del fluido a lo largo de la conducción. Se expresa en metros [m].
- **ΣH** se corresponde con el sumatorio aritmético del conjunto de aportes de carga al fluido durante el paso por la conducción en cuestión. Puede venir proporcionado por bombas hidráulicas o ventiladores (como es el caso del túnel de viento).

Si expresamos la ecuación anterior en términos de presión (multiplicando cada término por su peso específico), empleada frecuentemente con ventiladores, en el que todas las zonas se hallan a la misma cota ($h_1 = h_2$) y por máquinas hidráulicas que absorben energía del fluido, obtenemos:

$$P_1 + v_1^2 \frac{\rho}{2} - \Delta P_{1-2} + \Delta P = P_2 + v_2^2 \frac{\rho}{2} \quad (5)$$

Donde:

- **P1** y **P2** son las presiones estáticas (absolutas o manométricas) del fluido en dos puntos distintos de la instalación o conducción.
- $v_1^2 \frac{\rho}{2}$ y $v_2^2 \frac{\rho}{2}$ son las presiones dinámicas del fluido en dos puntos distintos de la instalación o conducción.
- ΔP_{1-2} es la pérdida de presión por rozamiento del fluido con las delimitaciones del conducto entre los puntos 1 y 2.
- ΔP es el aporte de presión al fluido por medios mecánicos, como turbomáquinas (bombas o ventiladores).

1.5. EFECTO VENTURI

El **Efecto Venturi** fue descubierto por el físico italiano Giovanni Battista Venturi en 1797, y permite demostrar el hecho de que la variación de presión en un fluido disminuye proporcionalmente a la disminución de la sección del conducto circular por el que está circulando, ocasionando reducción local de la presión y generación de vórtices en los estrechamientos. De hecho, se trata de un caso particular del **Teorema de Bernoulli** y se puede explicar de manera matemática mediante la **Ecuación de Bernoulli** y el **Principio de Continuidad de Masa**.

El Principio de Continuidad de Masa determina que, para un caudal dado de un fluido estacionario sin viscosidad, en un conducto de sección variable, saldrá de ese conducto la misma cantidad de fluido que la entrante. En otras palabras, se postula que el caudal se mantiene constante a lo largo de toda la conducción (no hay pérdidas másicas).

Esto se puede precisar mediante el concepto de flujo, es decir, la cantidad de masa que discurre por una superficie por unidad de tiempo:

$$\Phi = \frac{dm}{dt} \quad (6)$$

Dado que se conserva la masa, el flujo neto será cero, de modo que, para las dos secciones de estudio:

$$dm_1 = \rho_1 \cdot dV_1 = \rho_1 \cdot (v_1 \cdot A_1 dt) \quad (7)$$

$$dm_2 = \rho_2 \cdot dV_2 = \rho_2 \cdot (v_2 \cdot A_2 dt) \quad (8)$$

Dado que, como se mencionó anteriormente, no existen pérdidas másicas en la conducción y que, además, se considera el fluido incompresible ($\rho = \text{constante}$), obtendremos la forma final de la ecuación de continuidad.

$$dm_1 = dm_2 \quad (9)$$

$$\rho_1 (v_1 A_1 dt) = \rho_2 (v_2 A_2 dt) \quad (10)$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (11)$$

Donde:

- v es la velocidad del fluido, en m/s.
- A_1 y A_2 son las áreas de las secciones transversales de los puntos 1 y 2, respectivamente, del conducto por el que discurre el fluido, en m^2 .

Las aplicaciones de este fenómeno se aplican mediante el **Tubo de Venturi**, el cual, dispuesto de manera horizontal, en el que la diferencia de cota entre cualesquiera de sus puntos es cero, se emplea para medir la velocidad del flujo en una tubería mediante un manómetro de columna de líquido. De este modo, se obtendrá un caso particular de la Ecuación de Bernoulli:

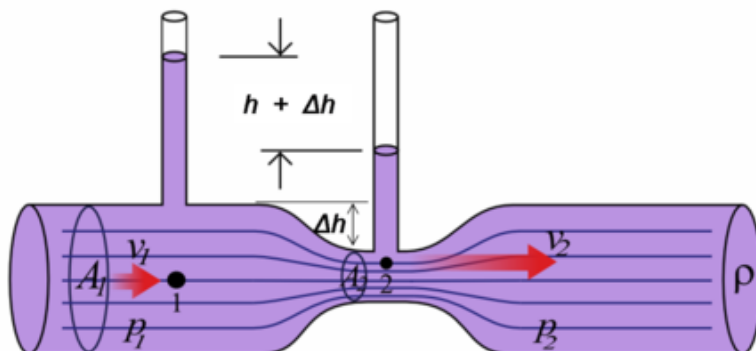


Ilustración 9. Caracterización de un Tubo Venturi. Fuente: ecured.cu

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (12)$$

1.6. N° DE REYNOLDS.

El concepto del Número de Reynolds está ligado directamente con los conceptos de flujo laminar y turbulento; de hecho, es el resultado de los estudios de verificación de dichos flujos por parte del ingeniero británico **Osborne Reynolds**, quien, con ayuda de una tubería de vidrio y un inyector de colorante fue capaz de caracterizar los flujos en función de su velocidad.

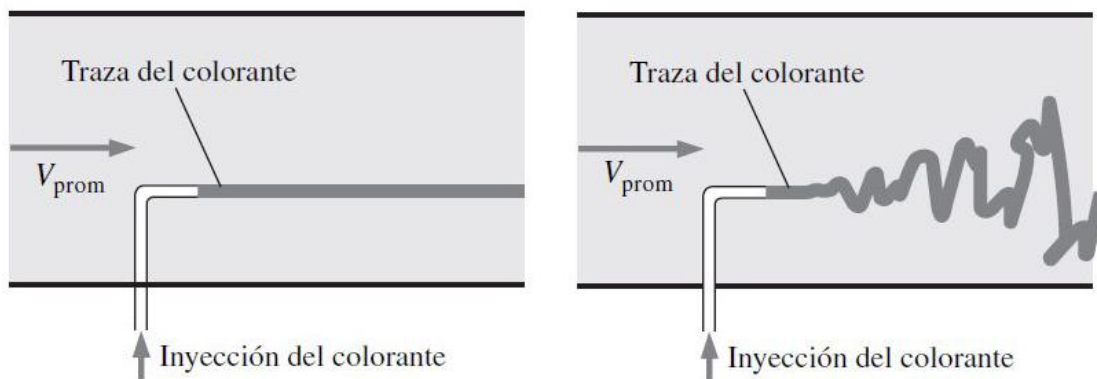


Ilustración 10. Caracterización de los flujos laminar (izquierda) y turbulento (derecha) durante los estudios experimentales de Osborne Reynolds. Fuente: Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones. Yunus A Cengel.

Tras numerosos y exhaustivos experimentos en la década de 1880, Reynolds llegó a la conclusión de que el régimen de flujo es dependiente de la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas del fluido. Expresando este razonamiento de manera matemática, obtenemos:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{v_{promedio} \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot v_{promedio} \cdot D}{\mu} \quad (13)$$

Donde:

- $v_{promedio}$ es la velocidad media del flujo, expresada en m/s.
- D es la longitud característica de la conducción. Si se trata de una tubería circular, es el diámetro; para otras geometrías empleamos el Diámetro Hidráulico (D_h). El diámetro hidráulico se define matemáticamente como el

cociente del producto de cuatro veces el área transversal de la conducción y el perímetro húmedo:

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{p} \quad (14)$$

Tuberías Circulares

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{p} = \frac{4 \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}{\pi D} = D \quad (15)$$

Tuberías Cuadradas

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{p} = \frac{4a^2}{4a} = a \quad (16)$$

Tuberías Rectangulares

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{p} = \frac{4ab}{2 \cdot (a + b)} = \frac{2 \cdot ab}{(a + b)} \quad (17)$$

De manera general, obviando la rugosidad de la superficie del ducto, las posibles vibraciones de éste y las fluctuaciones presentes en el flujo, se aceptan los siguientes intervalos del Número de Reynolds que acotan los tipos de flujos según su velocidad, pero sólo son aplicables para flujo en conductos y tuberías:

- **Flujo laminar:** $Re \leq 2300$ (2300 se corresponde al número crítico inferior del Número de Reynolds, a partir del cual se rompe el régimen laminar en la mayoría de los casos; por debajo, se restablece por sí mismo en caso de ser perturbado).
- **Flujo transitorio:** $2300 \leq Re \leq 4000$
- **Flujo turbulento:** $Re \geq 4000$

1.7. CONDICIÓN DE NO – DESLIZAMIENTO Y CAPA LÍMITE

En la mecánica de fluidos es muy común encontrarse con fluidos que discurren limitados por algún tipo de superficie que influye de manera significativamente en el desarrollo del flujo a lo largo de su trayectoria.

Si, como hipótesis de partida, consideramos un flujo de un fluido de carácter estacionario, ya sea en una superficie o en un conducto impermeable, se puede observar experimentalmente que la fracción del flujo que entra en contacto con la superficie sólida que lo delimita se detiene por completo en dicha superficie, sin deslizarse. Este

fenómeno se produce debido a los efectos viscosos, y se denomina **condición de no-deslizamiento**.

Esta condición de no-deslizamiento define el perfil de velocidades del flujo, dado que la capa de fluido que está adyacente a la superficie tiende a decelerar la capa inmediatamente superior, y así sucesivamente, hasta que llega a un punto que deja de ser significativa. Por tanto, podemos definir la capa límite como la región del fluido adyacente a la pared en la cual los efectos viscosos y gradientes de velocidades son significativos.

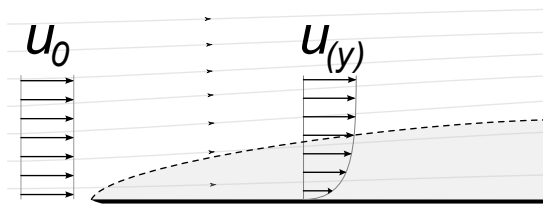


Ilustración 11. Ilustración de la Condición de No-Deslizamiento y Capa Límite. Fuente: Wikipedia.org

1.8. PÉRDIDAS DE CARGA PRIMARIAS Y SECUNDARIAS.

1.8.1. PÉRDIDAS DE CARGA PRIMARIAS.

Como se ha podido observar en el apartado del Teorema de Bernoulli, todo fluido en una conducción, ya sea abierta o cerrada, debido a los efectos viscosos del fluido, a lo largo de toda la trayectoria del flujo se producen pérdidas de carga.

Si tomamos como referencia una conducción cerrada de sección constante y un caudal de fluido constante y uniforme, la pérdida de carga se define por la siguiente expresión:

$$H_r = \left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2 \right) \quad (18)$$

Para concretar de manera más precisa la forma general de la ecuación para las pérdidas de carga, se tiene en cuenta el concepto de radio hidráulico y resistencia de superficie, de modo que se expresa la **resistencia de superficie** en una conducción de la siguiente manera:

$$F_r = C_f \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} = C_f \cdot (L \cdot P_m) \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} \quad (19)$$

Donde:

- C_f es un coeficiente adimensional.
- P_m es el perímetro mojado [m].
- L es la longitud de la conducción [m].
- A es el área derivada de multiplicar el Perímetro mojado por la longitud del conducto [m²].
- u es la velocidad del fluido [m/s].

Más adelante se podrá observar que esta ecuación es la que se emplea para calcular el coeficiente de resistencia al avance de un cuerpo en un fluido.

Si multiplicamos esta expresión por la velocidad media del fluido, obtenemos la potencia consumida por el rozamiento, P_r , que se puede expresar de dos maneras diferentes:

$$P_r = C_f \cdot (L \cdot P_m) \cdot \rho \cdot \frac{V^3}{2} = \rho \cdot g \cdot (V \cdot S) \cdot H_r \quad (20)$$

Igualando estos dos términos y despejamos, obtendremos la forma general de la ecuación de pérdidas de carga en conducciones:

$$H_r = C_f \cdot \frac{L}{R_h} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (21)$$

A continuación, si sustituimos el valor del radio hidráulico por su valor en función del diámetro, obtendremos la **Ecuación de Darcy – Weisbach**:

$$H_r = 4 \cdot C_f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (22)$$

Como su variante en función del caudal, aplicando la ecuación de continuidad:

$$H_r = \frac{8}{g \cdot \pi^2} \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (23)$$

Siendo:

- f es el coeficiente de fricción adimensional en tuberías.
- g es la aceleración de la gravedad [9.806 m²/s]
- Q es el caudal de fluido en la tubería [m³/s]

El coeficiente de fricción, f , es una función dependiente de la viscosidad del flujo, así como de la longitud y velocidad características, por lo que también dependerá directamente del Número de Reynolds. Este coeficiente de fricción adimensional puede valorarse matemáticamente de varias maneras:

- Régimen laminar:

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (24)$$

- Régimen turbulento:

- Para una tubería hidráulicamente lisa:

- **Fórmula de Blasius (1911):**

$$f = \frac{0.3164}{Re_D^{0.25}} \quad (25)$$

- **Fórmula de Kármán – Prandtl:**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \frac{2.51}{Re_D \cdot \sqrt{f}} \quad (26)$$

- Tuberías con dominio de la rugosidad:

- **Fórmula de Kármán – Nikuradse (1933):**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \frac{k/D}{3.7} \quad (27)$$

- Con influencia de la rugosidad relativa y de Reynolds:

- **Fórmula de Colebrook (1939):**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re_D \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (28)$$

En esta última expresión, se necesita iterar cuantas veces sean necesarias hasta dar con un valor de f lo suficientemente aceptable como para no incurrir en errores importantes en el cálculo. Por esto, se recurre a la ecuación mostrada abajo.

- Ecuación de **Swamee – Jain (1976)**: Tal y como se ha mencionado previamente, esta ecuación puede sustituir fácilmente a la fórmula de

Colebrook debido a su sencillez, que reside en la posibilidad de obtener un valor de f lo suficientemente preciso y válido a efectos de cálculo. En otras palabras, se considera una ecuación explícita:

- Forma general:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (29)$$

- Expresión para un flujo completamente turbulento. Se simplifica la ecuación al suprimir la segunda fracción del paréntesis, debido a la gran magnitud del número de Reynolds:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} \right) \right]^2} \quad (30)$$

Es preciso destacar que en todas las ecuaciones, la k hace alusión a la rugosidad del material empleado en el conducto, generalmente expresado en mm.

1.8.2. PÉRDIDAS DE CARGA SECUNDARIAS.

Las pérdidas de carga secundarias no se producen debido a la naturaleza de la conducción, sino a los cambios de sección y dirección de la corriente en los accesorios que puedan existir en la misma: difusores, codos, diafragmas, etcétera. Estos elementos perturban el flujo, produciendo vorticidades y desprendimientos de la capa límite, aumentando las pérdidas de carga.

Es preciso destacar que, en ocasiones, a pesar de que se denominan pérdidas secundarias, para conducciones cortas pueden suponer incluso mayores pérdidas que por la conducción en sí misma: todo depende de los accesorios presentes en la instalación. Por ejemplo, un difusor no supone las mismas pérdidas que una válvula completamente cerrada.

En esencia, las pérdidas de carga secundarias pueden calcularse por medio de dos métodos:

- Primer método: Se aplica una fórmula similar a la de Darcy – Weisbach, pero incluyendo un término denominado **coeficiente adimensional de pérdidas secundarias**.

$$H_r = \zeta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (31)$$

Donde:

- ζ se corresponde con el coeficiente adimensional de pérdidas de carga secundarias:

$$\zeta = 0.32 \cdot f \cdot \frac{L}{R_H} \quad (32)$$

- Siendo R_H el radio hidráulico del conducto, f el coeficiente de fricción y L la longitud del conducto.
- Segundo método: Aplicando la fórmula de Darcy – Weisbach, pero se sustituye la longitud de la conducción por la longitud equivalente de el / los accesorios, en función de las pérdidas que se quieran conocer.

$$H_r = f \cdot \frac{\Sigma L_{eq}}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (33)$$

Donde:

- ΣL_{eq} se corresponde con el sumatorio aritmético de todas las longitudes equivalentes presentes en la instalación, relativas a los accesorios, expresada en m.

1.9. PRINCIPIOS DE LA AERODINÁMICA: INTERACCIÓN CUERPO – FLUIDO

La aerodinámica se define como aquella rama de la mecánica que estudia el movimiento de gases sobre los cuerpos estacionarios y el comportamiento de los cuerpos que se mueven en el aire; es decir, se aplica cuando existe un movimiento relativo entre un cuerpo sólido y el fluido que lo envuelve. Es un campo de estudio indispensable para la industria aeronáutica, aeroespacial, naval (hidrodinámica), automotriz y eólica.

En la aerodinámica, además de estudiar los movimientos del fluido a lo largo de un cuerpo, y los cambios que éste pueda provocar en el flujo (variaciones de presión y/o

velocidad, desprendimiento de la capa límite, ganancia de carga aerodinámica, etc.), se estudian cuatro fuerzas principales:

1.9.1. FUERZA DE ARRASTRE O RESISTENCIA AL AVANCE

También conocida como **Drag**, es la fuerza aerodinámica que se opone al movimiento de un cuerpo (ya sea un automóvil, aeronave u otro cuerpo) dentro del flujo de aire. Depende de varios factores como la densidad del flujo, el área frontal con la que impacta el flujo y la velocidad relativa entre flujo y cuerpo:

$$F_{DRAG} = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot S \quad (34)$$

Donde:

- C_D es el coeficiente de arrastre o coeficiente aerodinámico de resistencia. Es adimensional.
- ρ es la densidad del aire, en kg/m^3 .
- u es la velocidad del flujo, en m/s .
- S es el área de incidencia del flujo, en m^2 .

En base a esto, existe una expresión matemática en términos de potencia, que se emplea para determinar el gasto energético necesario para vencer el Drag:

$$\begin{aligned} \text{Potencia} &= \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}} = \frac{\text{Fuerza} \cdot \text{Espacio}}{\text{Tiempo}} = F \cdot V \quad (35) \\ &= C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S \end{aligned}$$

1.9.2. FUERZA DE EMPUJE

El empuje, por otro lado, es una fuerza que se opone al Drag, es decir, permite al cuerpo moverse a través de la masa de aire. Esta fuerza se produce mediante motores, turbinas o hélices. Se representa mediante una línea horizontal en sentido opuesto a la del flujo.

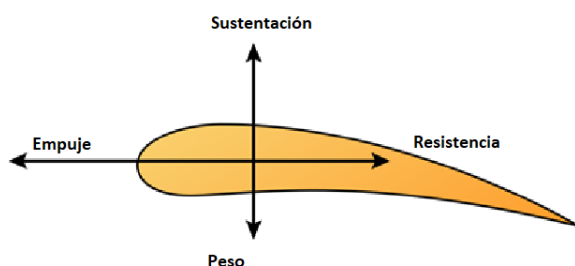
1.9.3. PESO

El peso es la fuerza con la que la gravedad terrestre atrae a la masa del objeto que se estudia. Se aplica desde su centro de gravedad, donde todas las fuerzas

debidas al peso del cuerpo se mantienen en equilibrio, y se representa mediante una línea vertical orientada hacia abajo.

1.9.4. FUERZA DE SUSTENTACIÓN

La fuerza de sustentación es la fuerza más importante en la industria aeronáutica, dado que es la que permite a las aeronaves mantenerse en vuelo, y es aquella que desarrolla un perfil aerodinámico al moverse en el aire. Se ejerce verticalmente



*Ilustración 12. Esquema de fuerzas aerodinámicas en un perfil alar.
Fuente: es.wikipedia.org*

hacia arriba, y depende de la superficie alar, curvatura del perfil alar, el ángulo de ataque y la velocidad relativa del viento.

Debido a la naturaleza cilíndrica de las geometrías que estudiaremos, y al hecho de que el aire siempre incidirá perpendicularmente a la superficie de impacto dentro del túnel de viento, sólo se tendrá en cuenta la fuerza de arrastre (**Drag**) a efectos prácticos.

2. EL TÚNEL DE VIENTO

2.1. ¿QUÉ ES UN TUNEL DE VIENTO? COMPONENTES ESENCIALES Y FUNCIONAMIENTO

Un túnel de viento es, en esencia, una herramienta de investigación destinada al estudio de la interacción de objetos sólidos con fluidos en movimiento, mediante la imposición de condiciones de contorno, que simularán las condiciones de servicio a las que se someterá dicho objeto en una situación real.

Como norma general, un túnel de viento contiene, como mínimo, los siguientes componentes básicos:

- **Ventilador.** Se encarga de producir la corriente de aire que circulará por dentro del circuito en el que se realizan los ensayos. Generalmente suele ser de regulación precisa, para generar las condiciones necesarias de una manera lo más exacta posible. Además, en túneles de viento de tipo abierto se ubican aguas

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

abajo de la cámara de ensayos, y se encarga de hacer circular el aire mediante aspiración. Los ventiladores de tipo industrial se organizan según la siguiente topología:

Tabla 1. Clasificación de los ventiladores según la presión total desarrollada.

Clase	Presión total desarrollada
Ventilador de baja presión	< 10 mbar
Ventilador de media presión	$10 \text{ mbar} < P \leq 30 \text{ mbar}$
Ventilador de alta presión	$30 \text{ mbar} < P \leq 100 \text{ mbar}$

Tabla 2. Clasificación de los ventiladores según la trayectoria del aire.

Clase	Funcionamiento
Ventilador centrífugo	La trayectoria del aire sigue una dirección axial a la entrada y paralela a un plano radial a la salida.
Ventilador axial	El flujo de aire circula con una trayectoria coaxial a la dirección del eje del ventilador.
Ventilador transversal	La trayectoria de aire en el rodete es normal al eje, tanto a la entrada como a la salida.
Ventilador helicocentrífugo	La trayectoria del aire es como en un ventilador axial en la entrada y como un centrífugo en la salida.

Tabla 3. Clasificación de los ventiladores según su tipo de accionamiento.

Accionamiento	Funcionamiento
Directo	El motor eléctrico comparte eje con el rodete o hélice del ventilador.
Por transmisión	El motor se encuentra aislado de la corriente de aire y el accionamiento se realiza por correas y poleas

- **Cámara de ensayos.** Siendo uno de los componentes más relevantes de un túnel de viento, en la cámara de ensayos se ubican los modelos experimentales y se realizan las mediciones y estudios más relevantes (Presiones, velocidades, fuerzas aerodinámicas, etc.).
- **Estabilizadores de flujo.** Se encargan de disminuir las turbulencias presentes en el fluido de trabajo mediante *honeycombs* y mallas, que proporcionan uniformidad al flujo y eliminan las componentes de velocidad perpendiculares a la dirección principal del flujo.
- **Difusor.** Se coloca tras la cámara de ensayos, con la finalidad de recuperar presión estática y reducir la velocidad de flujo, dado que las pérdidas energéticas de un túnel son directamente proporcionales a la velocidad de flujo. **A menor velocidad, menores pérdidas.**
- **Cono de contracción.** Tiene como función principal acelerar el flujo, gracias a la contracción progresiva en su sección transversal, además de disminuir el espesor de la capa límite que se haya podido formar en los estabilizadores de flujo.

Independientemente del tipo de túnel de viento que se esté empleando, y es que hay muchos y muy variados según el estudio que se quiera realizar, el objeto de estudio permanece fijado en una cámara de ensayos mientras el fluido de estudio (aire, gas o agua) fluye alrededor de él.

2.2. COMPONENTES DE USO ESPECIAL

Si bien es cierto que los túneles de viento poseen un abanico general de componentes que son suficientes para la gran mayoría de los casos de estudio, también es preciso destacar que existen componentes que permiten realizar estudios de mayor complejidad y/o singularidad:

- **Generador de niebla:** Aunque **no es un dispositivo empleado comúnmente en túneles de viento**, es de gran importancia para los estudios que se realizarán a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado. Un generador de niebla, también conocido como humidificador o humectador, realiza la función principal de regular las características del vapor, para variar las características de la humedad ambiental y ayudar a los diferentes procesos para los que puede estar destinado:

hogar, industria, implementación en hospitales, conservación en almacenes, etcétera.

De hecho, los principios de funcionamiento de estos humidificadores (expuestos en profundidad en el Capítulo II) varía según el tipo que sean y, por tanto, también serán más idóneos para una u otra aplicación. Además, una característica de gran importancia relativa a los humidificadores en este proyecto es que **deben cumplir ciertos requisitos** de velocidad de flujo o de distancia mínima a la cámara de ensayos para que se pueda generar la niebla artificial correctamente.

- **Visualizador de flujo:**
 - **Cámara de alta velocidad:** Son instrumentos empleados para registrar gráficamente operaciones o sucesos que, o bien son extremadamente rápidos, o extremadamente breves, o que cumplen ambas condiciones. Este tipo de cámaras son muy empleadas en investigación (pruebas de colisión de la **Euro NCAP**, resolución de problemas de ingeniería, estudios médicos de movimiento...), debido a que son capaces de registrar una cantidad mucho mayor de fotogramas por segundo (Frames per Second - FPS) que las cámaras convencionales: por ejemplo, una cámara convencional se halla en un rango frecuente de 25-60 fps; en cambio, una cámara de estas características puede llegar a registrar hasta 10 billones de fps, pero este modelo concreto diseñado en **Caltech** (Instituto Tecnológico de California) se emplea para aplicaciones muy específicas, como estudiar los rayos de luz. En rangos más convencionales, una cámara de alta velocidad es capaz de registrar entre 1000 y 4000 fps, lo que, reproducido posteriormente a cámara lenta, sirve de mucha ayuda a investigadores en diversos campos.
 - **Inyectores de humo:** Los inyectores o generadores de humo son aparatos que generan un vapor muy denso, mediante la vaporización de agua mezclada con un fluido secundario basado en el glicol o glicerol (por ejemplo, glicerina). Cuando se inyecta el fluido sobre una base caliente se produce su vaporización y, al entrar en contacto con el aire circundante (más frío) se produce el humo artificial. De este modo, si se

introduce este humo resultante en el túnel de viento, es posible visualizar las trayectorias que toma un fluido cuando interactúa con el o los objetos emplazados en la cámara de ensayos (vehículos terrestres o aéreos a tamaño real o a escala, perfiles alares y piezas / estructuras susceptibles a las interacciones aerodinámicas).

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES DE VIENTO

Los túneles de viento pueden clasificarse según dos aspectos cruciales en su utilidad:

- **Clasificación según su topología física:**
 - **Abierto (Tipos Eiffel y NPL):** En un túnel de viento de circuito abierto, el aire sigue una trayectoria prácticamente recta desde la entrada hasta la salida, donde pasa, por orden, por: cono de contracción, cámara de ensayos, difusor, sección del ventilador y zona de escape del aire. El aire empleado dentro del túnel se devuelve a la atmósfera.
 - **Ventajas:**
 - Los costes de construcción son comúnmente mucho menores que los de un túnel de viento cerrado.
 - Si se pretende ensayar motores de combustión interna o realizar visualización de flujo intensiva mediante humo, el concepto de la purga del aire no supone ningún problema, debido a que tanto la entrada como la salida de flujo están abiertas a la atmósfera.
 - **Desventajas:**
 - Por lo general, los túneles de viento abiertos suelen ser ruidosos; para túneles con secciones de pruebas de 70 in² o más, el ruido puede generar problemas ambientales, lo que podría incurrir en limitación de las horas de uso de este y/o un tratamiento acústico del túnel y de la sala que lo contiene.
 - Para un tamaño y velocidad de flujo predeterminadas el túnel requerirá más energía para trabajar. Esto es un factor

de importancia en casos en los que el túnel tiene un grado alto de utilización.

- Si se hallan implementados en una estancia cerrada, dependiendo del tamaño del túnel y de la estancia, es posible que se requiera mayor grado de apantallado a la entrada del túnel para conseguir un flujo de mayor calidad. También es aplicable si la entrada y la salida están abiertas a la atmósfera, cuando las condiciones del aire exterior pueden condicionar la operación del túnel.
 - **Cerrado (Tipos Prandtl o Göttingen):** En este tipo de túnel el aire recircula continuamente con un mínimo o nulo intercambio de aire con el exterior.
- **Clasificación según la velocidad de operación.** La clasificación se corresponde a la estipulada para la velocidad de los flujos:
 - **De baja velocidad:** $Mach < 0.3$
 - **Subsónico:** $Mach < 0.8$
 - **Transónico:** $0.8 \leq Mach < 1.2$
 - **Sónico:** $1.2 \leq Mach < 5$
 - **Hipersónico:** $Mach \geq 5$

En túneles de régimen subsónico es importante destacar que se desprecian los efectos de la compresibilidad, al igual que aquellos en los que se trabaja con velocidades transónicas. No ocurre igual en los túneles de viento de régimen sónico, donde hay que tener en cuenta los efectos de compresibilidad e hipersónico, en los que incluso debe tenerse en cuenta el estado químico del gas.

- Clasificación según su configuración:
 - **Tipo Eiffel:** Ciclo abierto con sección de ensayos abierta, lo que significa que no está confinada por paredes.

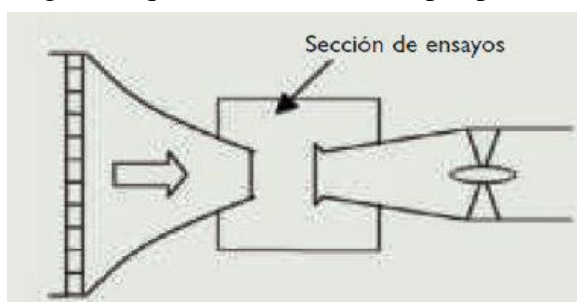


Ilustración 13. Túnel de viento abierto con cámara de ensayos abierta. Tipo Eiffel. Fuente: I. Prada y Nogueira (2006)

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- **Tipo NPL (National Physics Laboratory):** Ciclo abierto con cámara de ensayos cerrada. Este es el modelo de túnel de viento en específico que se estudia a lo largo de este TFG.

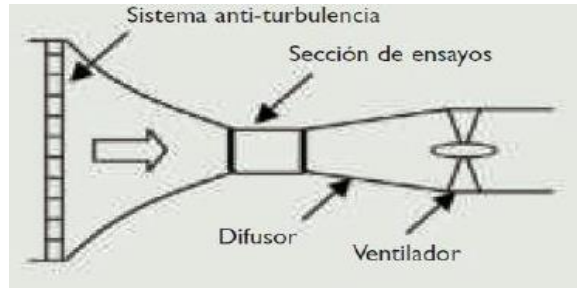


Ilustración 14. Túnel de viento cerrado con cámara de ensayos abierta. Tipo Prandtl. Fuente: I. Prada y Nogueira (2006)

- **Tipo Prandtl:** Ciclo cerrado con cámara de ensayos abierta.

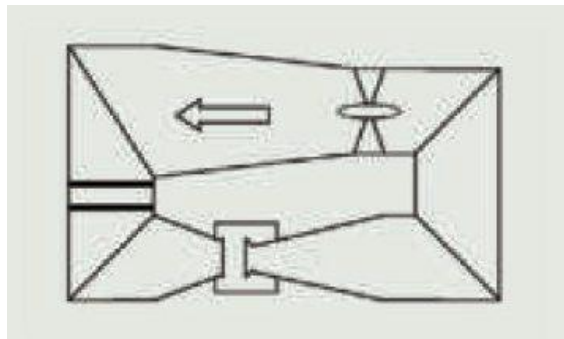


Ilustración 15. Túnel de viento abierto con cámara de ensayos cerrada. Tipo NPL. Fuente: I. Prada y Nogueira (2006)

- **Tipo Göttingen:** Ciclo cerrado con cámara de ensayos cerrada.

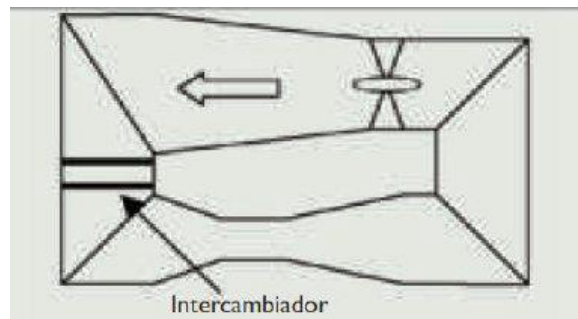


Ilustración 16. Túnel de viento cerrado con cámara de ensayos cerrada. Tipo Göttingen. Fuente: I. Prada y Nogueira (2006)

- Clasificación según el fluido de trabajo:
 - Aire: Apto para la mayoría de los ensayos relacionados con aeronaves de baja velocidad.
 - Agua: Empleada para visualizar ondas de choque de aeronaves de alta velocidad, o para estudiar el comportamiento del flujo alrededor de barcos y/o submarinos.
 - Nitrógeno o helio: Empleados en instalaciones de estudio hipersónico.
 - Nitrógeno criogénico: Empleado para flujos transónicos con un alto Número de Reynolds.
- Túneles de propósito especial:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- **Túneles aptos para propulsión y/o visualización de flujo:** Se caracterizan por aguantar las altas temperaturas producidas por los escapes de turbinas o motores cohete, así como de soportar los contaminantes de dichos escapes.
- **Túneles aptos para estudios de estabilidad:** Permiten al modelo moverse con libertad dentro de la zona de ensayos.
- **Complejos/instalaciones de alta temperatura:** Diseñadas para simular de manera más precisa los efectos de las altas temperaturas en los flujos hipersónicos.

2.4. APLICACIONES DENTRO DE LA INDUSTRIA

Es un instrumental de **I+D+i** con una gran versatilidad dado que se emplea en muchas ramas de la industria:

- **Ingeniería de competición (automoción, motociclismo, deportes acuáticos/aéreos):** Sirve como herramienta a ingenieros para desarrollar piezas aerodinámicamente eficientes, tanto en disciplinas de dos y cuatro ruedas, como competencias de otra índole (**DR.ONE**, **F1H20**): alerones, difusores, *endplates*, carenados, y un extenso etcétera.



Ilustración 17. Ingenieros Aerodinámicos de Audi testeando el Audi R18 TDI en un túnel de viento. Fuente: motorsport.com



Ilustración 18. Pruebas aerodinámicas previas al campeonato internacional de **Superbikes** del modelo BMW S1000RR WSBK (Temporada 2011). Fuente: asphaltandrubber.com

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- **Ingeniería aeronáutica y aeroespacial:** Gracias al uso de túneles de viento, los ingenieros aeronáuticos y aeroespaciales son capaces de diseñar todo tipo de aeronaves, que van desde ultraligeros o avionetas, hasta transbordadores espaciales de alta complejidad o balística aérea (misiles), pasando por helicópteros, aviones de todo tipo, y otras aeronaves.



Ilustración 19. La aeronave Boeing X-48C en el túnel de viento de la NASA, Langley Research Center (Hampton, Virginia, EEUU). Fuente: nasa.gov

- **Ingeniería naval:** En este caso concreto, puesto que la ingeniería naval se centra en desarrollar todo tipo de artefactos que destacan por su flotabilidad (buques y embarcaciones de todo tipo) o que interactúan frecuentemente con el agua (parques eólicos “off-shore”, plataformas petrolíferas, etc.), emplean canales de ensayos hidrodinámicos.

Un canal hidrodinámico consiste en una piscina de grandes dimensiones, en la que la longitud es ostensiblemente mayor que la profundidad y la anchura. Posee un carro remolcador en cuya base se fija el modelo de estudio, para emular el paso de éste a través del fluido, y una serie de dinamómetros para obtener datos de los ensayos.



Ilustración 20. Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Fuente: www.inta.es

Un ejemplo de estos canales hidrodinámicos es

el CEHIPAR, o Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- **Deporte:** Es cada vez más común que equipos dentro de los cientos de disciplinas deportivas empleen túneles de viento para emular el comportamiento de sus deportistas y sus monturas en situaciones reales. Buenos ejemplos de esto son: el *Bobsleigh*, ciclismo, *Skydiving* (paracaidismo) y deportes del motor, que entrarían en la categoría de ingeniería de competición.

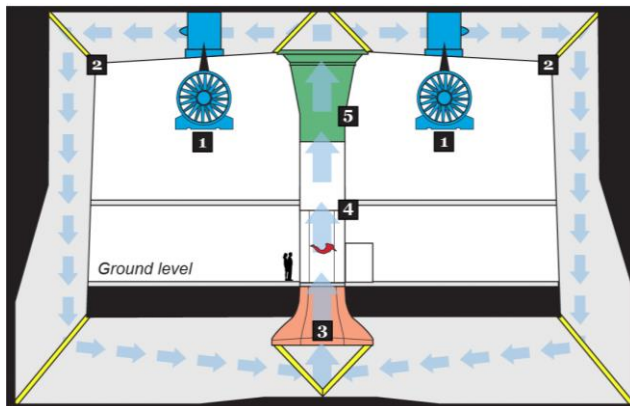


Ilustración 21. Principio esquemático de funcionamiento de un túnel de viento orientado al Skydiving. Fuente: Indoor Skydiving World.

- **Ingeniería civil y arquitectura:** Con mucha frecuencia en el campo de la construcción y diseño de estructuras enfocadas al ámbito civil es posible ver la implementación de túneles de viento. La introducción de esta herramienta supone una reducción en la incertidumbre que surge desde la etapa final del diseño en adelante para el técnico en aquellas estructuras que, por diversos motivos, aplicando la normativa de acciones del viento, no permiten calcular con suficiente precisión las cargas aerodinámicas que soportará la estructura a lo largo de su vida útil.



Ilustración 22. Maqueta azotada por una corriente de aire, en un túnel de viento de ingeniería civil, destinado a tests para medir la resistencia climática de puentes y edificios. Fuente: Universidad de Costa Rica.

- **Ingeniería agrícola y energías renovables:** Debido al cambio climático, la agricultura y la obtención sostenible de recursos energéticos han sufrido un repunte significativo en la última década. Por ello, muchas instituciones a nivel

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

internacional se han sumado al avance en Investigación, Desarrollo e Innovación de la técnica, implementando túneles de viento para muy diversos conceptos:

- Diseño, construcción, simulación aerodinámica y validación técnica de granjas eólicas.



Ilustración 23. Ensayo en túnel de viento para determinar la disposición óptima de los aerogeneradores en una granja eólica. Fuente: Draper, Martín & Guggeri, Andres & López, Bruno & Díaz, A & Campagnolo, Filippo & Usera, Gabriel. (2018). A Large Eddy Simulation framework to assess wind farm power maximization strategies: Validation of maximization by yawning.

- Estudios de erosión eólica.
- Creación y simulación de nuevas geometrías y materiales para mallas de captación de lluvia horizontal.

Un buen ejemplo de un túnel de viento destinado a los fines mencionados arriba (así como a aeronáutica, arquitectura y deportes) es el presente en el **ITER (Instituto Tecnológico y de Energías Renovables)**, ubicado en Tenerife.

2.5. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES DE VIENTO A LO LARGO DE LA HISTORIA.

Para llegar a comprender toda la evolución de los túneles de viento en la historia, uno se debe remontar al siglo XVIII, a pesar de que actualmente estas herramientas de investigación están a la vanguardia de la técnica.

En 1746, el ingeniero militar y matemático británico **Benjamin Robins** (1707-1751), desarrolló un aparato que contaba con un brazo giratorio capaz de generar velocidades de entre 1 y 2 m/s, para realizar estudios de resistencia dentro de la teoría de la aviación.

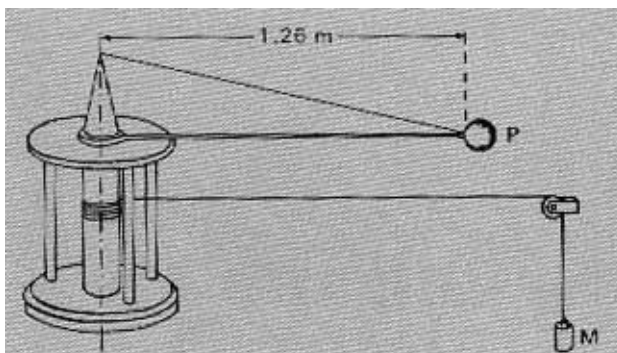


Ilustración 24. Brazo giratorio desarrollado por Benjamin Robins en 1746. Fuente: nasa.gov

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Gracias a este artilugio, pudo demostrar que la resistencia al aire era un factor crítico en el vuelo de proyectiles.

Unos años más tarde, **Sir George Cayley** (1773-1857) logró desarrollar un brazo similar al de **Benjamin Robins**, pero que lograba unas velocidades superiores, de entre 3 y 6 m/s, lo que sirvió para medir la resistencia del aire. En base a los datos recopilados, construyó un pequeño planeador que empleó para hacer pruebas; sin embargo, el flujo de aire causado por el movimiento circular del brazo no impactaba los objetos con una incidencia normal y el hecho de que el modelo se moviera constantemente a través de su propia estela, causó que estos datos fueran muy difíciles de tratar y extrapolar a la realidad.

En el último tercio del siglo XIX, concretamente en 1871, **Francis Herbert Wenham** (1824-1908), un distinguido integrante del Consejo de la Sociedad Aeronáutica Británica fue capaz de solventar los problemas y limitaciones técnicas del modelo de Cayley, desarrollando y operando así el primer túnel de viento de la historia propiamente dicho. Consistía en un cilindro horizontal con un soplador que funcionaba mediante un motor de vapor, proveyendo de aire al modelo.

Con el incipiente nacimiento del túnel de viento, la comunidad científica finalmente empezó a comprender todos aquellos factores que intervienen en el **Drag** y en el **Lift**, pero todavía permanecía la pregunta: ¿Es posible que los resultados obtenidos con un modelo de escala 1:10 puedan ser extrapolados a un modelo final a escala real?

Esta incógnita no fue resuelta hasta que, en 1883, **Osborne Reynolds** (1842-1912), profesor de la Universidad de Manchester, consiguió demostrar que el patrón del flujo de aire en un modelo a escala sería el mismo que para el modelo a tamaño real si un parámetro concreto del flujo fuera igual en ambos casos. Este factor es lo que conocemos hoy en día como Número de Reynolds, un parámetro básico y de uso frecuente en todas aquellas situaciones de flujo incluidas las formas de los patrones de flujo, la facilidad de transferencia de calor y la aparición de turbulencias.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Previamente al mundialmente conocido vuelo del “Flyer” en la playa de **Kitty Hawk** en 1903, los **Hermanos Wright** llevaron a cabo numerosos ensayos con modelos (cometas en su inicio) y planeadores, que condujeron a que su planeador fuese capaz de realizar 4 vuelos satisfactorios con su modelo hecho de madera, cable y muselina (tela fina de algodón originaria de Mosul, Irak), en los que el más largo logró cubrir una distancia de 859 pies en 59 segundos.

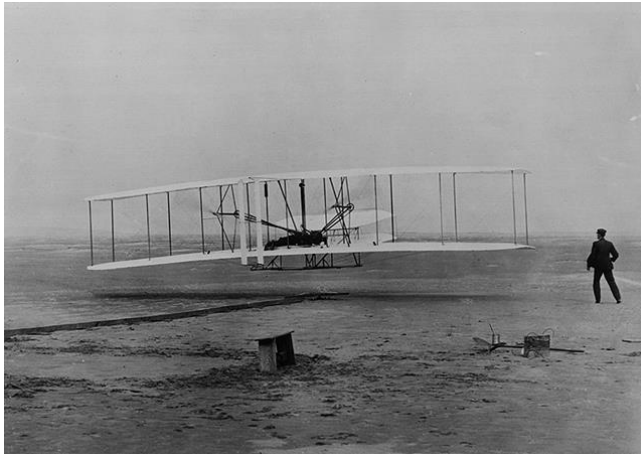


Ilustración 25. Vuelo inaugural del “Flyer” en 1903. Fuente: nasa.gov.

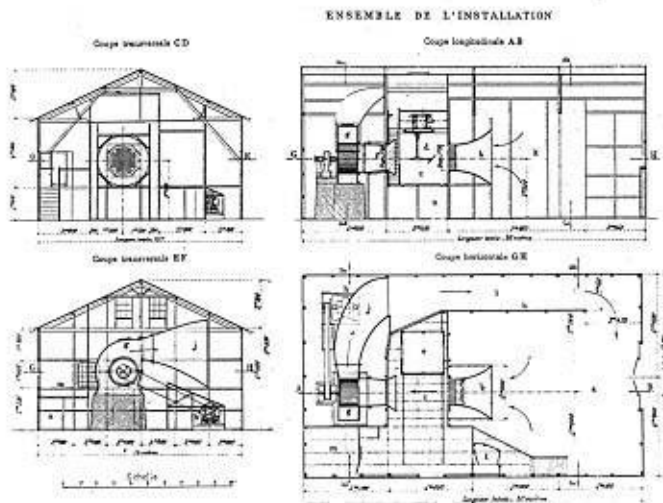


Ilustración 26. Planos del laboratorio de Champ de Mars. Fuente: <http://almadeherrero.blogspot.com/>

En Francia, **Gustave Eiffel** erigió un laboratorio privado de aerodinámica en **Champ de Mars** con fondos personales, cuya construcción finalizó en 1909. Desde este año hasta 1920, Eiffel realizó más de 400 ensayos en un túnel de viento de tipo abierto, con un flujo de hasta 20 m/s. Durante este período de once años, construyó un túnel de viento más avanzado técnicamente y fue el primero en realizar pruebas de túnel de viento con configuración completa de aeronaves (fuselaje, cola, alas y *flaps*, y tren de aterrizaje), lo que sirvió de gran ayuda para la aviación francesa durante la 1ª G.M. y a la implementación del liderazgo europeo a la vanguardia de los estudios aerodinámicos.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Por otra parte, mientras la técnica francesa estaba enfocada al desarrollo de aeronaves, el túnel de viento de 2ª generación de **Prandtl**, construido en **Göttingen** en 1916, estaba más enfocado a ser un contribuyente en el avance de diseño básico de los túneles de viento y que, de hecho, sirvió como precedente para los modelos modernos.

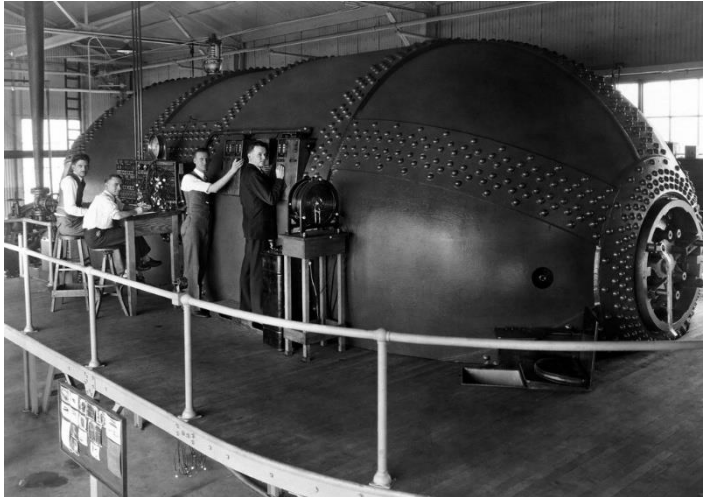


Ilustración 27. Sección longitudinal del túnel de 2ª generación de Prandtl. Fuente: nasa.gov.

Antes de que finalizaran las hostilidades de la Primera Guerra Mundial, en 1917, EE.UU. respondió al reto que había presentado Europa, construyendo instalaciones aptas para realizar estudios en diversas materias dentro de la aerodinámica, como investigación en turbulencias del aire y fenómenos de capa límite, a manos de la **NBS** (*National Bureau of Standards*) y de la **NACA** (*National Advisory Committee for Aeronautics*). El trabajo de estas dos instituciones consistía, desde realizar modelos a escala de los túneles de viento europeos para comprender su funcionamiento, hasta emplear dicha información para desarrollar modelos de túnel propios, implementando mejoras de diseño, como la implementada en 1921: un túnel de viento que permitía obtener presiones de flujo variables hasta 20 bar, el **VDT** o *Túnel de Densidad Variable*

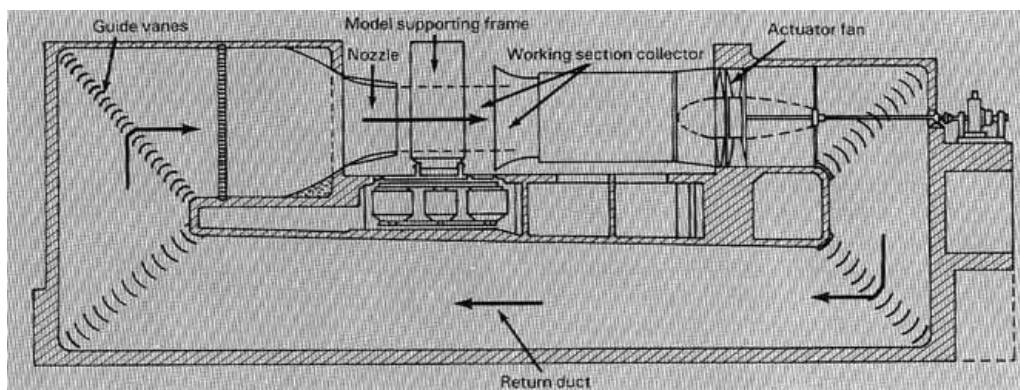


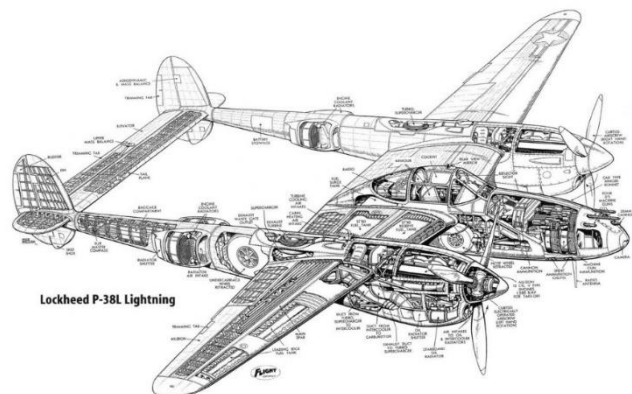
Ilustración 28. Túnel de Viento de Densidad Variable (VDT) ubicado en Langley Research Center. Fuente: nasa.gov

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

erigido en el Laboratorio Langley, empleado para medir la calidad aerodinámica de los perfiles alares.

Este acontecimiento señaló en el mapa a la **NACA** como una organización investigadora competente tecnológicamente a partir de entonces. Estos avances propiciaron en 1933 al lanzamiento del *Technical Report 460*, que marcaría un punto de inflexión en los avances en materia de aerodinámica aviónica y mecánica de fluidos. Su contenido se convirtió en algo de vital importancia para diseñadores aeronáuticos, dado que las investigaciones de la entidad americana permitieron reflejar la aerodinámica completa de 78 perfiles alares, lo que permitió a estos diseñadores de la época a escoger el perfil más adecuado en función de las necesidades. De hecho, este avance tecnológico marcó la diferencia durante la 2ª G.M., ya que muchos perfiles presentes en este informe se implementaron en algunas de las aeronaves más icónicas y decisivas de la guerra, como el DC-3, el B-17 “La fortaleza volante”, o el P-38.

Ilustración 29. Esquema de partes del Lockheed P-38 Lightning, aeronave multipropósito introducida en 1941 en la USAF gracias al desarrollo de perfiles alares NACA. Fuente: U.S. Air Force.



Asimismo, la introducción de los túneles de viento de alta velocidad (0.5 – 1 Mach), como el **HST** (High Speed Tunnel – octubre 1934) de Langley, permitió demostrar el pronunciado incremento en la resistencia, la pérdida de sustentación y los cambios en los momentos de cabeceo que ocurren en la frontera del Mach 1. Este progreso permitió desarrollar nuevos perfiles alares aptos para altas velocidades, siendo implementados en aeronaves de combate propulsadas a reacción en los últimos meses de la Segunda Guerra Mundial, alcanzando velocidades de 800 km/h.

Mientras tanto, en Alemania ya se había implementado el primer túnel supersónico de la historia, con una potencia de 10^5 caballos de vapor, lo que permitió la puesta en servicio de las primeras y numerosas unidades de aviones propulsados a reacción con

finés bélicos. Durante este periodo se desentrañaban a contrarreloj los misterios del régimen en Mach 1, y el origen de las ondas de choque.

A medida que el siglo XX avanzaba, también lo hacían los conocimientos y los nuevos descubrimientos sobre la aerodinámica y sus emergentes y novedosas aplicaciones. Entre el amplio abanico de aplicaciones, permitieron reducir en gran medida el vuelo de los viajes comerciales, el desarrollo de nuevas geometrías de aeronaves, aviones de despegue vertical / corto (VTOL's y STOL's), vehículos de competición de alto rendimiento sumamente rápidos y con un nivel de agarre al asfalto nunca visto antes en la historia, el desarrollo de cohetes y transbordadores para la carrera espacial entre EEUU (NASA) y la URSS (cuyos inicios sentaron una base de gran solidez en la ingeniería aeroespacial), y con aplicaciones singulares y de alto valor, como la agraria, en la que la aerodinámica trabaja conjuntamente con la tecnología de materiales y la psicrometría, para permitir al ser humano obtener recursos hídricos en zonas con suma pobreza de éstos, así como de recursos en general.

3. LA CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA. TEORÍA DE MALLAS.

3.1. ¿QUÉ ES LA NIEBLA?

En esencia, la niebla no es más que aire saturado de vapor de agua, que comienza a condensarse desde el momento en que alcanza el punto de rocío, es decir, la temperatura más alta a la que empieza a condensar dicho vapor de agua contenido en el aire. Este fenómeno de condensación provoca rocío, niebla, escarcha (si la temperatura es lo suficientemente baja) o cualquier tipo de nube.

Este tipo de nubes poseen cualidades similares a los estratos, y se encuentra en contacto con la superficie terrestre, está formado por gran cantidad de gotas microscópicas y presenta un color grisáceo o blanquecino, dificultando la visión. En el caso más favorable, la presencia de niebla acota el rango de visibilidad a menos de un kilómetro (aproximadamente media milla náutica).

En cuanto a su clasificación, se organiza en función del origen del enfriamiento que dio comienzo a la condensación:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

1. **Niebla de radiación o irradiación:** Tras la puesta de sol, el suelo pierde calor a través de la emisión infrarroja en una noche sin nubes; de este modo, se produce una condensación a nivel del aire cercano al suelo gracias a la transferencia de calor.



Ilustración 30. Formación de la niebla de irradiación. Fuente: AEMET.

2. **Niebla de viento o de advección:** Se genera cuando masas de aire cargadas de humedad discurren por superficies frías, lo que enfría también el aire, aumentando su humedad relativa y dando lugar a la condensación del vapor de agua presente en el aire.



Ilustración 31. Niebla de advección en Barcelona. Fuente: AEMET.

3. **Niebla de vapor:** Su formación ocurre comúnmente cuando existe desplazamiento de un frente de aire frío sobre una masa de agua más cálida. En este proceso de formación, el vapor de agua entra en la atmósfera gracias a la evaporación, y la condensación ocurre al alcanzar el punto de rocío.



Ilustración 32. Niebla de vapor formándose a las orillas de un lago. Fuente: NOAA Photo Library.

4. **Niebla de precipitación:** Se produce cuando llueve y el aire existente bajo la nube se halla relativamente seco, lo que provoca una evaporación de las gotas de lluvia y formación de vapor de agua, que posteriormente se enfría y, tras llegar al punto de rocío, se convierte en niebla.
5. **Niebla de ladera:** Al chocar el viento contra la ladera de una montaña u otra formación geológica similar, debido al ascenso de la masa de aire, se condensa y genera niebla.
6. **Niebla de valle:** Su formación ocurre en los valles, generalmente durante período invernal, y es el fruto de la inversión de temperatura dentro de estos, generada por una masa de aire frío asentada en las zonas bajas, mientras una corriente de aire cálido circula por encima. En esencia, se trata de niebla de radiación confinada por un accidente geográfico.

3.2. PSICROMETRÍA: PROPIEDADES DEL AIRE HÚMEDO

Dado que en las condiciones de contorno que engloban este Trabajo de Fin de Grado son necesarias condiciones de aire saturado en humedad con “gotículas” en suspensión (formando un flujo en dos fases), es necesario aplicar principios y conceptos de la psicrometría que permitirán justificar el desarrollo técnico de las propuestas formuladas más adelante.

Según la *ASHRAE* (*Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado*), la psicrometría se define como:

“El estudio de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y el uso de estas propiedades para analizar las condiciones y procesos en los que interviene el aire húmedo”. (ASHRAE, 1997).

3.2.1. COMPOSICIÓN DEL AIRE HÚMEDO

Dado que la composición del aire atmosférico posee cierta complejidad, debido a los numerosos compuestos que la componen, a efectos de cálculo se considera una mezcla ideal de aire seco y vapor de agua.

Tabla 4. Composición del aire atmosférico.

Componente	Porcentaje en volumen de aire seco
Nitrógeno	78.084 %

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Oxígeno	29.946 %
Argón	0.934 %
Dióxido de carbono	0.033 %
Neón	0.001820 %
Helio	0.000524 %
Metano	0.000150 %
Criptón	0.000114 %
Hidrógeno	0.000050 %
Ozono	0.000004 %
Vapor de agua	Variable

Por tanto, para una masa de aire húmedo determinada, se aproxima que:

$$m = m_a + m_w \quad (36)$$

Donde:

- **m** es la masa de aire húmedo [g o kg].
- **m_a** es la masa de aire seco [g o kg].
- **m_w** es la masa de agua presente en el aire [g o kg].

3.2.2. PARÁMETROS PSICROMÉTRICOS RELEVANTES.

Dado que la psicrometría es un campo de estudio de gran extensión, pero cuyas aplicaciones abundan en la climatización de locales y en la meteorología, se mencionarán los conceptos más relevantes que se tratarán a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado.

- **Temperatura seca:** Es la temperatura que indica directamente un termómetro, y a la que se encuentran tanto el aire seco como el vapor de agua presente en el aire húmedo.
- **Temperatura húmeda:** Es la temperatura de equilibrio alcanzada por el agua al contacto con el aire, y es posible medirla mediante termómetros de bulbo húmedo.

Este equilibrio se produce debido al intercambio de calor por convección /radiación y masa (debido a la evaporación) desde el agua al aire. Cuando el

calor para evaporar el agua se consigue del intercambio de calor mencionado, el agua mantiene su temperatura constante, dado que se ha alcanzado el equilibrio.

Es posible calcularla mediante la temperatura seca, la humedad absoluta del aire (cantidad de vapor de agua por kg de aire seco) y la humedad absoluta del aire saturado a la temperatura seca de referencia.

$$T_h = \frac{T_s(1 + 1.805 \cdot W) + 2501(W - W_s)}{1 + 4.186 \cdot W - 2.381 \cdot W_s} \quad (37)$$

Donde:

- T_h y T_s son la temperatura húmeda y seca, respectivamente, expresadas en °C
 - W es la humedad específica del aire. Se expresa en kg/kg aire seco
 - W_s es la humedad específica del aire saturado a la temperatura seca de referencia. Se expresa en kg/kg aire seco
- **Humedad relativa:** Es la relación porcentual entre la fracción másica de vapor de agua en el aire respecto a la fracción molar de vapor de agua en aire saturado a la misma temperatura seca.

Para conocer el porcentaje de humedad relativa en el aire, es preciso conocer la presión parcial de vapor y la presión parcial de vapor de saturación, así como la temperatura. De este modo, si se supone el comportamiento de los gases como ideales, la expresión matemática para conocer la humedad relativa se define como:

$$\varphi = 100 \cdot \frac{P_V}{P_{VS}} \quad (38)$$

$$P_{VS} = \exp\left(14.283 - \frac{5.291}{T}\right) \quad (39)$$

Siendo:

- P_V la presión parcial de vapor, expresada en Bar.
 - P_{VS} la presión parcial de vapor de saturación, expresada en Bar.
 - T es la temperatura de referencia, expresada en K.
- **Temperatura de rocío:** Es la temperatura a la cual comienza a condensar el vapor de agua cuando el aire se enfría.

3.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA

Las bases de operación para los dispositivos de captación de agua de niebla se fundamentan principalmente en el mecanismo físico del impacto inercial, en el que las microgotas de agua existentes en los bancos de niebla que son transportados por corrientes de aire no son capaces de evitar el impacto con los obstáculos que aparecen a lo largo de su trayectoria. De este modo, en vez de rodear el obstáculo, acaban impactando debido a su inercia. Aun así, aparte del impacto inercial existen otros dos mecanismos físicos de captación, menos relevantes:

- **Intercepción directa:** Este tipo de interceptación se produce cuando una gota no impacta directamente con el obstáculo (el hilo de la malla) pero pasa a una distancia equivalente a un radio de este. Entonces, se realiza la captación, pero sólo si las gotas tienen un tamaño igual o superior al espacio entre hilos.
- **Movimiento browniano:** Este fenómeno se basa en los comportamientos observados por el botánico escocés Robert Brown en el siglo XIX, y se observa en partículas que se hallan en un fluido líquido o gaseoso, como resultado de los choques contra las moléculas de este, generando movimiento aleatorio de dichas partículas. Es un fenómeno relativamente común, ya que juega un papel importante en la difusión y en la ósmosis.
- **Sedimentación gravitacional:** Es un mecanismo potencial de deposición de niebla, aunque debido a las condiciones de baja velocidad, la condición de sedimentación para aquellos tamaños de gota inferiores a 80 micras (que serán las tratadas a lo largo de este TFG, en torno a 1-50 micras) se considera despreciable como mecanismo de captación de niebla en los estudios.

Aplicando este fenómeno a las mallas de captación de agua, al incidir los bancos de niebla en movimiento debido a las corrientes de aire sobre los captadores, las microgotas, que frecuentemente se hallan en el rango de 5 a 50 micrómetros de diámetro de gota, quedan atrapadas por su propia inercia en el entramado de malla.

Para conocer la potencialidad de suministro de agua de un banco de niebla, es posible conocer su contenido en agua líquida en función de su visibilidad (Ω):

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

$$LWC = 38.91 \cdot \Omega^{-1.15} \quad (40)$$

Siendo:

- LWC: *Liquid Water Content* (Contenido en agua líquida) en g/m^3
- Ω = Visibilidad del banco de niebla, en metros. Se distinguen diversos intervalos de visibilidad:
 - Niebla densa: Visibilidad inferior a 200 m
 - Niebla suave: Visibilidad entre 200 m y 1 km
 - Sin niebla: Visibilidad de 1 km en adelante.

Mediante esta expresión es posible deducir que, a medida que disminuye la visibilidad de la niebla, aumenta su densidad volumétrica de gotas de agua.

Asimismo, también se puede cuantificar la cantidad de agua interceptada por impacto en un elemento con geometría cilíndrica u otro tipo de obstáculo bajo condiciones de niebla conducida por viento:

$$q = 3.6 \cdot w \cdot A \cdot \eta \cdot u \quad (41)$$

Donde:

- q es la ratio de recolección de agua de niebla [$\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$].
- w es la cantidad de agua presente en el aire húmedo [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$].
- A es el área de la sección transversal de la malla de captación [m^2].
- η es el índice adimensional de eficiencia de captación por impacto del sistema.
- u es la velocidad del viento [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].
- 3.6 es un factor de conversión de unidades empleado para convertir $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ en $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$.

De manera análoga, la eficiencia de captación es cuantificable y depende de diversos factores influyentes en el proceso:

- Eficiencia de intercepción o interceptación directa. Siempre es menor o igual al 6%:

$$\eta_{INT} = K_U^{-1} \cdot \left(\frac{D_g}{D_w}\right)^2 \quad (42)$$

Donde:

- K_U es el número de Kubawara:

$$K_U = 2 - \ln(Re) \quad (43)$$

- D_g es el diámetro de gota.
- D_w es el diámetro del obstáculo, en este caso, de la malla de captación.
- Eficiencia en la captación por difusión:

$$\eta_{diff} = 3.68 \cdot (2 \cdot K_U)^{-\frac{1}{3}} \cdot P_e^{-\frac{2}{3}} \quad (44)$$

Donde:

- P_e es el **Número de Peclet**. Para condiciones de gota de niebla típicas (entre 5 y 50 micras de diámetro) y velocidades de viento frecuentes (entre 1 y 3 m/s) nunca es mayor que el 1%.
- Eficiencia en la captura por impacto en un solo cilindro. Por lo general, esta eficiencia suele ser superior al 60% para tamaños de gota iguales o superiores a 10 micras.

$$\eta_{imp} = \frac{Stk^2}{(Stk+0.6)^2}, \text{ si } Stk \geq 0.08 \quad (45)$$

$$\eta_{imp} = 0, \text{ si } Stk \leq 0.08$$

Siendo Stk el N° de Stokes, el cociente entre la distancia de parada de una partícula y la dimensión característica del obstáculo (d_c):

$$S_{TK} = \frac{\tau \cdot U_0}{d_c} \quad (46)$$

- Si el resultado es mayor a 1, las partículas impactarán con el obstáculo.
- Si, por el contrario, es menor a 1, las partículas seguirán las líneas de corriente del fluido.

También puede expresarse como:

$$S_{TK} = \frac{\rho_d \cdot D_d^2 \cdot u}{18 \cdot \nu \cdot l_0} \quad (47)$$

- τ es el tiempo de relajación de la partícula, en s.
- U_0 es la velocidad del fluido en corriente libre o lejos del obstáculo, en m/s.
- D_d es el diámetro de gota, en m.
- d_c es la dimensión característica del obstáculo, en m.
- ρ es la densidad del agua, en kg/m³.
- ν es la viscosidad cinemática del agua, en m²/s.
- u es la velocidad del aire, en m/s.
- l_0 es la dimensión característica del obstáculo, en m.

$$l_0 = \frac{d}{2} \quad (48)$$

- Eficiencia total de la captura por impacto.

$$\eta_{imp} = 1 - (1 - \eta_{cyl} \cdot f_R)^{n_R} \quad (49)$$

Donde:

- η_{cyl} es la eficiencia de los hilos de malla (elementos de impacto o intercepción), con una geometría comúnmente cilíndrica.

$$\eta_{cyl} = \frac{S_{TK}^3}{S_{TK}^3 + 0.735 \cdot S_{TK}^2 + 2.796 \cdot S_{TK} - 0.202} \quad (50)$$

- f_R es la relación aritmética entre el área de sección transversal de la zona de impacto en una capa y el área transversal total del captador.

$$f_R = \frac{d}{sy} \quad (51)$$

- n_R es el número de capas de malla sobre las que impacta el banco de niebla. Se asumen que las distintas capas de la malla son independientes.

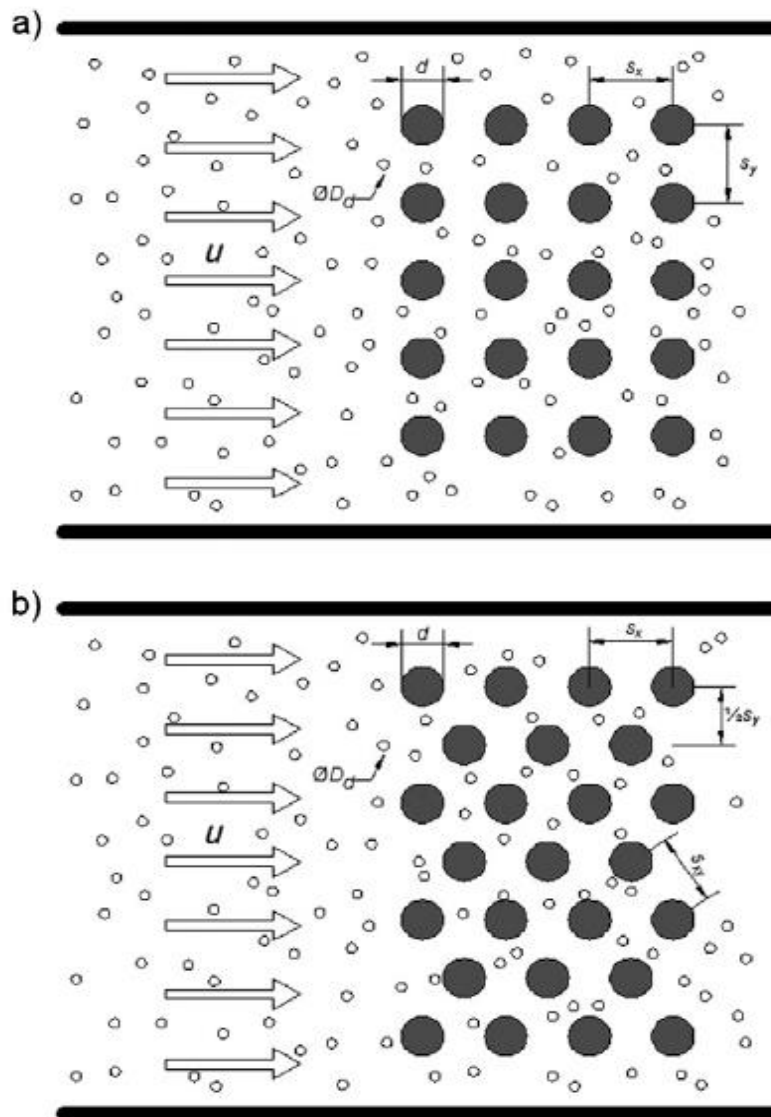


Ilustración 33. Esquema de las posibles disposiciones de las mallas en captadores planos, con la correspondiente nomenclatura de los parámetros necesarios para definir la eficiencia de captación. Fuente: C. Regalado & A. Ritter (2016).

- Eficiencia de recolección aerodinámica. Surge como consecuencia directa de la introducción de un atrapanieblas que obstaculiza el paso libre del viento, causando los fenómenos de fricción y drag en los hilos de malla debido a esta interacción:

$$\eta_a = \frac{SC}{1 + \sqrt{\zeta/C_D}} \quad (52)$$

Siendo:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- SC es el coeficiente de sombra: la porción del área de sección transversal de la malla normal a la dirección del viento, que es ocluida por elementos de recolección sólidos.
- ζ es el coeficiente de caída de presión.

$$\zeta = k_{Rew} \cdot \left[1.3 \cdot SC + \left(\frac{SC}{1 - SC} \right)^2 \right] \quad (53)$$

Siendo k_{Rew} un parámetro que varía con el número de Reynolds y que depende del diámetro de hilo que compone la malla de captación.

- C_D es el coeficiente de drag (arrastre).

3.4. TECNOLOGÍA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA

Una primera clasificación de los tipos de captadores de niebla o “atrapanieblas” gira en torno a su geometría:

- Sistemas de recolección convencionales:
 - **Captador tipo macrodiamante:** Diseñado por Carlos Arancibia (Universidad Católica de Chile) en 1958, consiste en un diseño poligonal, en el que se realiza una estructura tubular con un entretejido de **malla Raschel**. La patente de invención de este atrapanieblas fue cedida a la UNESCO para favorecer que la organización ejecutara y fomentase investigaciones de captación de niebla a nivel internacional.

La ventaja principal a simple vista de este diseño es su geometría: al extenderse en las tres direcciones del espacio, los estudios previos de los vientos se relegan a un segundo puesto, dado que es capaz de recoger agua proveniente de cualquier orientación.



Ilustración 34. Captador tipo macrodiamante. Fuente: docplayer.es

Otra ventaja derivada de su geometría es su estabilidad ante inclemencias del tiempo; los captadores tipo chileno, que se mostrarán a continuación,

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

presentan una debilidad importante, y es que, al ser azotados por vientos especialmente violentos, su estructura actúa frente la carga dinámica del viento como una viga en voladizo y corre el riesgo de ser arrancada de su emplazamiento.

Estas estructuras de captación de niebla suelen elevarse comúnmente hasta alturas iguales o superiores a 10 metros, aunque también presentan un coste muy alto de instalación por metro cuadrado de captación.

- **Captadores planos (2D) o tipo chileno:** Un porcentaje bastante amplio de los atrapanieblas existentes en todo el mundo se basa en la geometría bidimensional, que se caracteriza por consistir en una superficie de recolección plana (malla Raschel u otra) fijada entre dos postes y por ubicarse de manera perpendicular a la dirección del viento. Tienen una canaleta en el inferior de la zona ocupada por las mallas para recoger el agua captada por las mallas y redirigirla a un depósito.

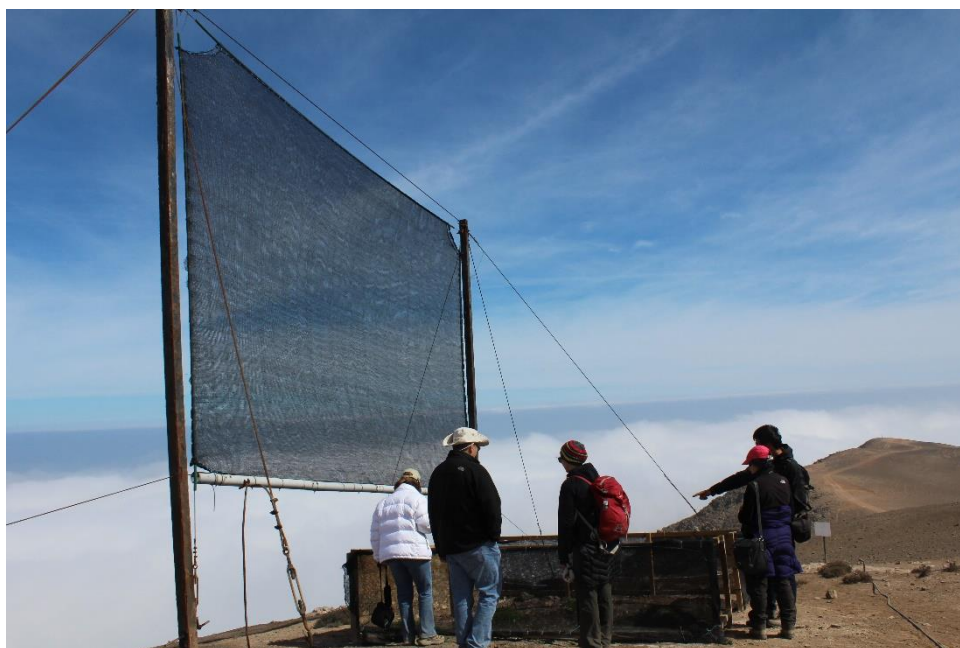


Ilustración 35. Atrapanieblas de tipo plano o chileno en Alto Patache (Chile). Fuente: Pontificia Universidad Católica de Chile.

- **Captadores cilíndricos:** Tal y como su nombre indica, su diseño está basado en cilindros de radio R y altura H . Presentan la ventaja respecto a la variante 2D que pueden ser colocados de cualquier manera y en cualquier lugar, sin necesidad de llevar a cabo estudios previos para determinar la zona de mayor eficiencia de recogida de agua.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Sin embargo, la desventaja más prominente de este sistema de recolección es su tamaño, lo que le permite recoger una cantidad mucho menor de agua que los captadores planos. Por este motivo es empleado como prueba de potencial de recolección, previamente a la introducción de otra tipología de captador.

- **Captadores NRP 3.0.:** Diseñados, desarrollados y contruidos por la empresa canaria “**Agua de niebla de Canarias S.L.**”, forman parte de la vanguardia técnica de la tecnología de captación tridimensional:
 - Estos captadores poseen una captación superior a 1000 l/día, con un pico de 1074 l/día (**según el fabricante**).
 - Su superficie captadora es de 56 m², mientras que su superficie de implantación es de 1.6 m².
 - Al poseer extensión tridimensional: son más estables a las inclemencias del viento que los captadores planos, se minimizan las pérdidas hídricas en el exterior de la estructura y las variaciones de producción debidas a variaciones de dirección del viento se ven disminuidas.
- **Captadores RAA:** Diseñados por la empresa tinerfeña “**Nieblagua**”, siguen un principio casi idéntico al de los NRP mencionados anteriormente:
 - Ocupan un área de implantación de 1.6 m².



Ilustración 36. Captador cilíndrico. Fuente: ICIA.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- En función de factores climatológicos de la zona de implantación de la malla, como la cota, los vientos y las nieblas, se ha estipulado una media de recolección que oscila entre los 11000 y los 20000 litros de agua anuales (**según el fabricante**).



Ilustración 37. Huerto hídrico de captadores RAA. Fuente: nieblagua.com

- El agua recolectada, dado que no entra en contacto con el suelo en ningún momento, posee una gran calidad y un bajo porcentaje de residuos minerales.
- La empresa posee varios emplazamientos de captadores RAA repartidos por todo el territorio español:
 - El Hierro: Suministro de agua para ganadería.
 - Instalación de captadores para la empresa municipal de aguas Teidagua S.A. (La Laguna, Tenerife, Canarias).
 - Instalación de captadores para embotellado de agua en Gran Canaria.
 - Instalación de captadores en Las Mercedes (Tenerife) para suministro de agua para agricultura.
 - Instalación de un captador RAA en Santander como proyecto piloto para un futuro huerto hídrico, orientado para suministrar al sector ganadero.
- Geometrías innovadoras para captación de agua:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- **Con forma de escarabajo:** Con un diseño concebido de la mano de investigadores del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), y basándose en el *Onymacris unguicularis*, una especie de escarabajo propio del **Desierto de Nabib** (Angola, Namibia y Sudáfrica), han desarrollado una tecnología de captación de agua de niebla que combina materiales hidrófobos e hidrofílicos, el **Dew Bank**, simulando el proceso de hidratación de este artrópodo: en

Namibia la lluvia es un fenómeno bastante poco común y los recursos hídricos son muy escasos, pero desde las costas es frecuente la aparición de una niebla muy persistente que se adentra hasta 50 km

Ilustración 38. *Onymacris unguicularis*, inspiración natural de los captadores con forma de escarabajo. Fuente: Wikipedia.



dentro del Desierto del Namib. De este modo, cuando el *Onymacris* encuentra estas masas móviles de humedad, almacena las gotas de agua en los bultos hidrófilos de su espalda (atrapando el vapor de agua y condensándolo) y, cuando las gotas alcanzan un tamaño suficiente, resbalan a través de unos canales cerrados que llevan hasta su boca.



Ilustración 39. Renderizado de un DewBank y comparativa de tamaño con un *Onymacris unguicularis*. Fuente: yankodesign.com

Aplicando este principio de hidratación a los captadores con forma de escarabajo, la simbiosis entre ingeniería de materiales y un diseño geométrico óptimo funcionan de la siguiente forma:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- En primer lugar, el fabricante recomienda su despliegue en una zona llana y en calma por la noche, y comprobar el volumen de captación por la mañana.
- Durante la noche, la zona de acero inoxidable de la cúpula del captador reúne el agua presente en el aire, debido a que está a una temperatura mucho más baja que el aire circundante.
- La forma desigual y rugosa presente en los laterales genera más gotas de rocío.
- El orificio estrecho en su base sólo permite la infiltración de gotas de agua, evitando así la contaminación por agentes exteriores y el despojo de aguas provocado por la fauna salvaje.

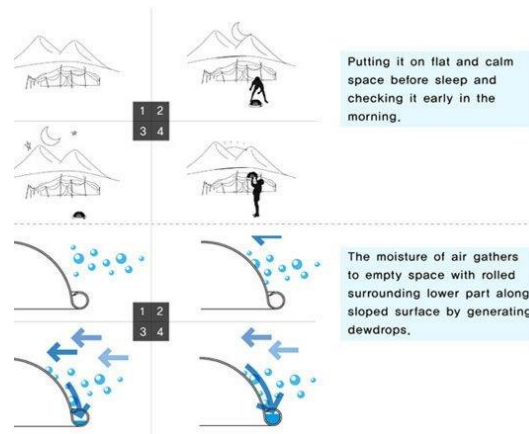


Ilustración 40. Instrucciones de montaje y funcionamiento del Dew Bank. Fuente: inhabitat.com

- **Con forma de tienda de campaña:** Desarrollado por el diseñador alemán *Imke Hoehler*, es un recolector de agua de niebla ideado para su implementación en zonas aisladas o zonas con una infraestructura pobre.
 - **Geometría:**
 - 3 metros de alto x 4.5 metros de ancho y una superficie de captación útil de 6 m².
 - Posee curvatura en dos ejes, lo que le proporciona estabilidad y rigidez frente a condiciones meteorológicas adversas.
 - **¿Cómo funciona?:**
 - Al discurrir el aire por la malla, las gotas contenidas en la niebla impactan con los hilos tensados, provocando que mientras el aire sigue su curso, las gotas queden adheridas.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Si se produce convergencia de gotas, éstas se fusionan creando una de mayor tamaño; posteriormente bajan por la malla y llegan a los colectores de drenaje.
 - Tras alcanzar el depósito de almacenaje, aquí se limpia el agua recolectada antes de transferirla a la red de tuberías.
 - Este sistema de recolección posee un sistema de seguridad de doble malla en la que, si por ejemplo el viento es muy fuerte y arrastra las gotas consigo, una segunda malla capta las gotas que la primera capa no ha podido atrapar.
- **Materiales de fabricación:** Malla de polipropileno entretejida en un patrón triangular.
 - **Uso previsto:** Zonas llanas o con irregularidades en zonas con o sin inclinación.



Ilustración 41. Captador de niebla tipo tienda de campaña. Fuente: portalfrutícola.com

- **Condiciones óptimas de funcionamiento:** Zonas entre los 400 y 1200 msnm (zonas áridas y/o costeras) en las que se observa gran cantidad de niebla acumulada (niebla de advección) y donde se puede captar según las condiciones (**y según el fabricante**), una cantidad de 10-20 l/m² día.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- **Operación:** Individual y colectiva. Si se despliega una unidad de este tipo de captador, ésta posee un depósito de pequeño tamaño que está conectado al captador mediante tuberías que transportan el agua desde los colectores de drenaje. Si se emplean varios interconectados mediante redes de tuberías, es viable el abastecimiento de pequeñas aldeas con suficiente cantidad de agua potable para todos sus habitantes.



Ilustración 42. Demostración de recogida de agua desde el depósito de almacenamiento de Dropnet. Fuente: inhabitat.com

- **Con forma de cometa:** Este modelo de colector de niebla ha sido desarrollado por el diseñador británico **Alon Alex Gross**, basándose en la innovación de los materiales ligeros. Su estructura, que sólo pesa 1 kg, es, según el propio diseñador, capaz de recoger hasta 30 litros diarios en zonas áridas (ayudándose de su geometría) y, además, posee sensores que permiten retraer y extender su geometría en función de las condiciones climatológicas.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

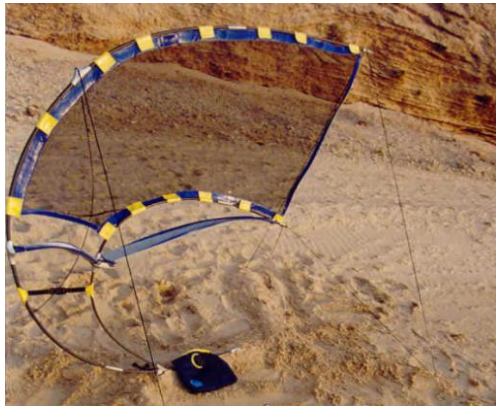


Ilustración 43. Captador tipo cometa en funcionamiento. Fuente: behance.net

- **Captadores tipo Yakka:** Nombrados a partir de una contracción de dos palabras del dialecto quechua: “yakku” (agua) y “Katari” (serpiente), “Serpiente de Agua”; este tipo de captadores, diseñados en la región de

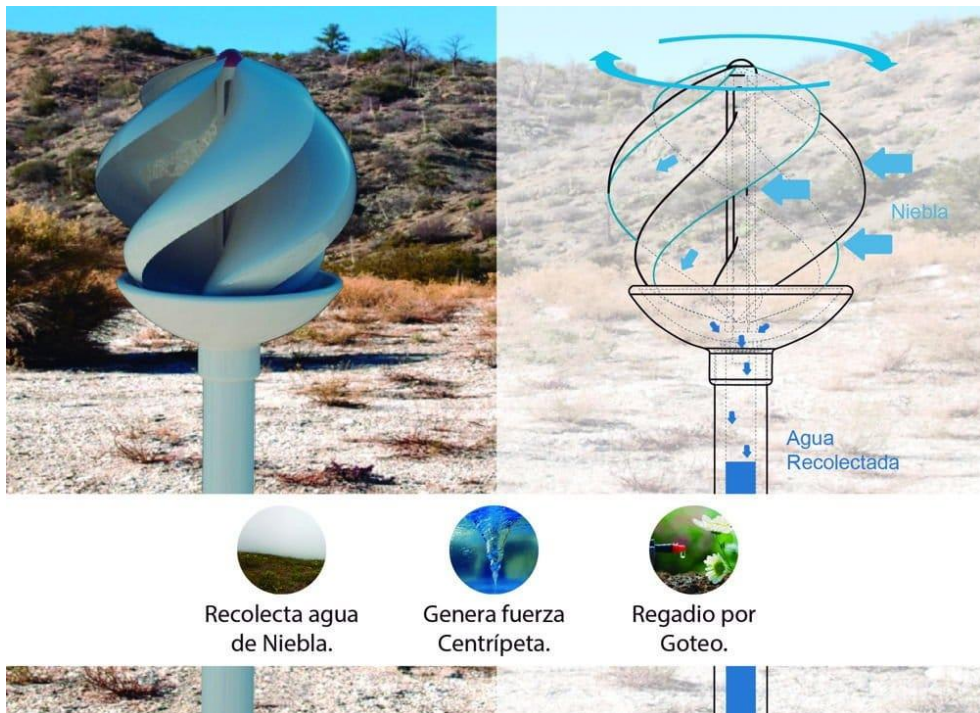


Ilustración 44. Aplicaciones a las que está destinada el captador Yakka y su principio de funcionamiento. Fuente: ecoinventos.com

Atacama (Chile), diseñados por el ingeniero industrial **Alejandro Abarcia**, consisten en módulos helicoidales con un diámetro de 60 centímetros, que se instalan a tres metros de altura. Según su diseñador, en base a las pruebas realizadas, este dispositivo de captación recoge el agua presente en la niebla y el rocío en las laderas de los cerros, con un 95% más de eficacia que los sistemas tradicionales (**unos 10000 cc diarios de agua recolectada, según el fabricante**).

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Estos captadores, gracias a una turbina presente en su interior, recolectan el agua de niebla y generan fuerza centrípeta debido a la incidencia del viento en sus álabes helicoidales. Además, los tubos que sostienen el módulo de captación sirven de depósito y permiten el sistema de riego por goteo.
- Su implementación es viable en cualquier zona que posea condiciones meteorológicas costeras.
- Orientado principalmente a la implementación en terrenos agrícolas, en una hectárea de terreno es posible instalar 2880 captadores con una separación en cuadrículas de 3x3 metros.
- Actualmente se encuentra en fase de desarrollo, dado que, a pesar de que se ha probado su efectividad y demostrado que la inversión es posible amortizarla en 3 años, aún quedan pendientes estudios de



calidad del agua. Además, este proyecto cuenta con el apoyo de diversas instituciones chilenas.

Ilustración 45. Propuesta de implementación de captadores Yakka en terreno agrícola, con información técnica básica. Fuente: yakka.cl

- **Watair:** Esta invención, fruto de **Eyal Alka** y **Joseph Cory**, del Instituto Tecnológico de Israel, consiste en una construcción con forma de pirámide invertida que consta de un conjunto de paneles cuya función reside en **recolectar el rocío del aire** y transformarlo en agua potable, almacenándola

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

en un depósito aguas debajo de la estructura. A pesar de no orientarse a recolectar agua de niebla, sino a la condensación del vapor de agua presente en el aire, es un claro ejemplo de que no es el único mecanismo de recolección de recursos hídricos.

Su diseño, basado en los mecanismos de recolección de la naturaleza, como las hojas de los árboles y diversas plantas, dispone de un área efectiva de recolección de 29 m² con una recolección mínima de 48 litros diarios, **según sus creadores.**



Ilustración 46. Estructura ensamblada del Watair. Fuente: ecoinventos.com

Este proyecto, surgió de la mano de la competición “*Arup’s and WaterAid’s drawing water challenge*” en septiembre de 2006, donde ganó a otros 90 proyectos participantes de 19 países, que compitieron para impulsar el objetivo del campeonato: **“ayudar a que más personas ganen acceso a fuentes de agua segura y un saneamiento efectivo”.**

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Su puesta en marcha es muy sencilla, dado que únicamente se necesitan postes metálicos para formar la estructura, cables y tres puntos de apoyo para erigirla y tensarla, y la malla para recolectar el rocío. Además, este dispositivo es polivalente en lo que a lugares de implementación se refiere:

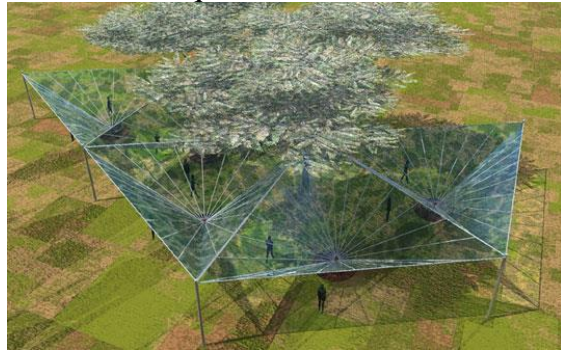


Ilustración 47. Renderizado de la puesta en funcionamiento y extensión de varios captadores de rocío Watair adosados. Fuente: inhabitat.com

debido a la huella tan reducida que causa su puesta en funcionamiento, sus creadores aseguran que es fácil de incorporar tanto en espacios rurales como urbanos.

- **Warka Tower:** Consiste en un conjunto de modelos de captación de aguas pluviales y de niebla ideado por el arquitecto Arturo Vittori y su equipo, de cara a solventar los graves problemas de disponibilidad de recursos hídricos (en cantidad o potabilidad) en zonas de extrema pobreza, que en la gran mayoría de los casos derivan en graves problemas de salud.



Ilustración 48. Implementación de un modelo de Warka Tower en un asentamiento rural en Etiopía. Fuente: metalocus.es

- **Objetivo:** Para los diseñadores de la Warka Tower, el objetivo principal es satisfacer la necesidad de un suministro de agua constante de entre 40 y 80 litros diarios, que sea apta para el consumo

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

humano. Asimismo, se pretende crear un centro de reunión social para los habitantes del asentamiento en los que se establezca este captador de agua mediante la adición de una cubierta, y cuyos usos pueden variar: desde una escuela al aire libre, un mercado, o incluso una zona de asambleas.

- **Principios de diseño:** El diseño de este captador de agua pretende aunar los aspectos positivos de tres conceptos: la biomimética de los insectos y plantas que son capaces de recolectar agua por sus propios medios en los ambientes más hostiles de la tierra (como el árbol Warka), las tradiciones de manufactura y principios arquitectónicos de la zona objetivo.



Ilustración 49. Árbol Warka. Fuente: Google Imágenes.

- **Materiales y fabricación:** Todos los materiales empleados son 100% biodegradables y reciclables, y la fabricación pretende usar materiales y técnicas tradicionales tanto como sea posible.

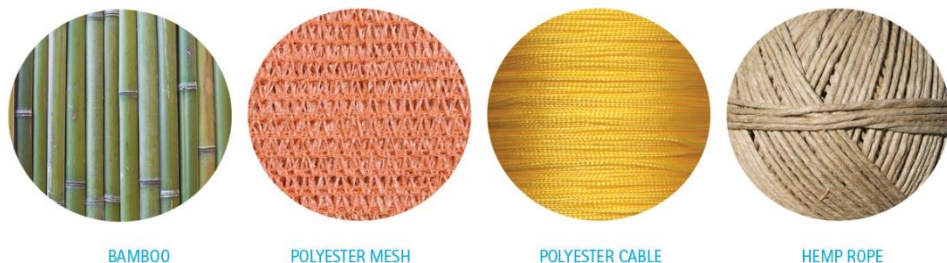


Ilustración 50. Materiales empleados para la construcción de la Warka Tower: Bambú local, malla de poliéster, hilo de poliéster y cuerda de cáñamo. Fuente: warkawater.org

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- **Funcionamiento:** Este tipo de captador, al igual que todos los mencionados anteriormente, opera mediante fenómenos naturales, como el impacto inercial, fuerzas gravitatorias, y cambios de estado como condensación y evaporación; por lo que no requiere de input de otras energías. Además, el equipo de diseño ha ideado este sistema para que pueda ser usado de manera intuitiva y sencilla por los lugareños. En esencia, **Warka Tower** funciona de la siguiente manera:
 - La malla de poliéster capta las gotas existentes en el aire con alto contenido en humedad, o bien, procedentes de la lluvia.
 - El agua recogida pasa a un depósito de almacenaje, ubicado bajo tierra, inmediatamente debajo de la estructura de captación.



Ilustración 51. Funcionamiento de Warka Tower. Fuente: www.warkawater.org

- Esta agua se redirige a un depósito mediante un sistema de tuberías, en el que se filtra y se almacena para su posterior distribución.
- También, este cosechador de agua permite ser empleado como generador de energía eléctrica a partir de la inclusión en su estructura de paneles solares, por lo que puede ser utilizado como estación de carga de aparatos y dispositivos, además de servir como un lugar de reunión iluminado tras la puesta de sol.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

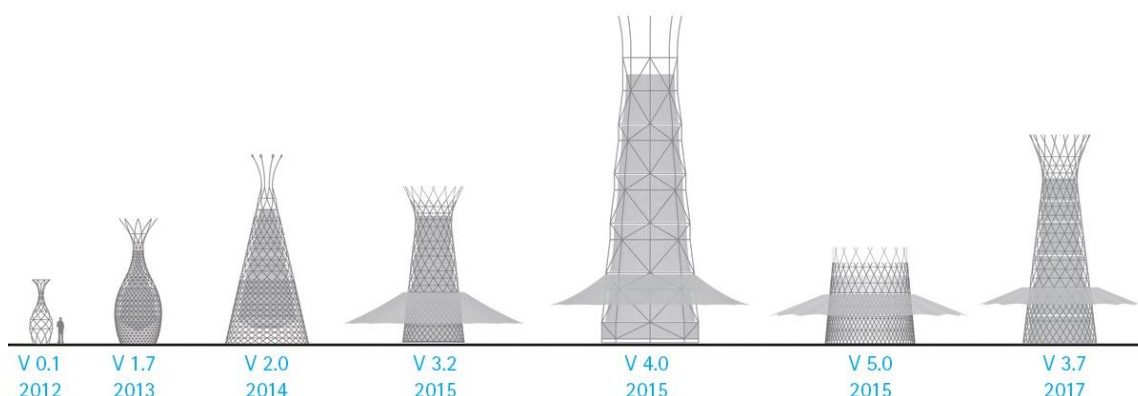


Ilustración 52. Evolución de los modelos de *Warka Tower*, desde 2012 a 2017. Fuente: www.warkawater.org

Tabla 5. Resumen de tecnologías de captación de agua.

<i>Tipo</i>	Materiales	Forma	Tasa de recolección media diaria* (l/m²·día)	Dirección del viento
GEOMETRÍA BIDIMENSIONAL (2D)				
<i>Planos o Tipo chileno</i>	Malla Raschel o de Polietileno	Bidimensional	2 – 10	Perpendicular a la superficie captadora
GEOMETRÍA TRIDIMENSIONAL (3D)				
<i>Captador Cilíndrico (Tipo Grunow y Juvic)</i>	Malla Raschel o de Polietileno	Cilíndrica	5	Cualquier dirección
<i>NRP 3.0</i>	Malla Raschel	Prisma rectangular	2 – 10	Perpendicular a la superficie captadora
<i>RAA</i>	Malla Raschel	Prisma rectangular	30-55 por captador	Perpendicular a la superficie captadora
<i>Macrodiamante</i>	Aleaciones metálicas y	Poliédrica	3.9	Cualquier dirección

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

	mallas Raschel			
<i>Tienda de campaña (Dropnet)</i>	Malla de polipropileno	Tienda de campaña	10 – 20	Perpendicular a la superficie captadora
<i>Cometa</i>	Malla de polipropileno	Cometa	10 (máximo)	Perpendicular a la superficie captadora
<i>Yakka</i>	-	Hélice	10 (por cada unidad de captador)	Cualquier dirección
<i>Warka Tower</i>	Bambú local, malla de poliéster, hilo de poliéster y cuerda de cáñamo	Torre Cilíndrica	40 – 80	Cualquier dirección

***Según el fabricante / desarrollador**

Tabla 6. Otras alternativas de captación de agua.

<i>Tipo</i>	Objetivo de captación	Materiales	Geometría	Tasa de recolección media diaria* (l/m²·dia)	Dirección del viento
<i>Watair</i>	Rocío del aire	Polietileno	Pirámide Invertida	48	Cualquier dirección
<i>Dew Bank</i>	Rocío del aire	Acero inoxidable	Cúpula	Aproximadamente un vaso de agua diario*	Cualquier dirección

***Según el fabricante / desarrollador**

CAPÍTULO II: INSTRUMENTACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

1. INTRODUCCIÓN: CONDICIONANTES TÉCNICOS RELACIONADOS CON LA ELECCIÓN DE INSTRUMENTAL DE MEDIDA.

Como todo túnel de viento orientado a investigación, es preciso seleccionar e implementar ciertos aparatos de medida, entre otros complementos tecnológicos que ayudarán a lograr la consecución de los estudios realizados. Pero no pueden ser seleccionados a la ligera: deben imponerse previamente unas restricciones técnicas sobre el objetivo del túnel de viento en cuestión y en qué condiciones de operación trabajará una vez se haya puesto en funcionamiento.

Por ello, de cara a seleccionar correctamente la instrumentación de este túnel de viento orientado a estudios de captación de agua de niebla es preciso fijar en primer lugar: el tipo de túnel de viento que se va a poner en marcha, las condiciones de operación y el instrumental que se debe implementar.

1.1. TÚNEL DE VIENTO OBJETO DE ESTUDIO.

Denominación: Túnel de viento de baja velocidad de circuito abierto con cámara de ensayos cerrada con aspiración de aire e incorporación mecánica de gotículas de agua de tamaño variable mediante dispositivos de humectación.

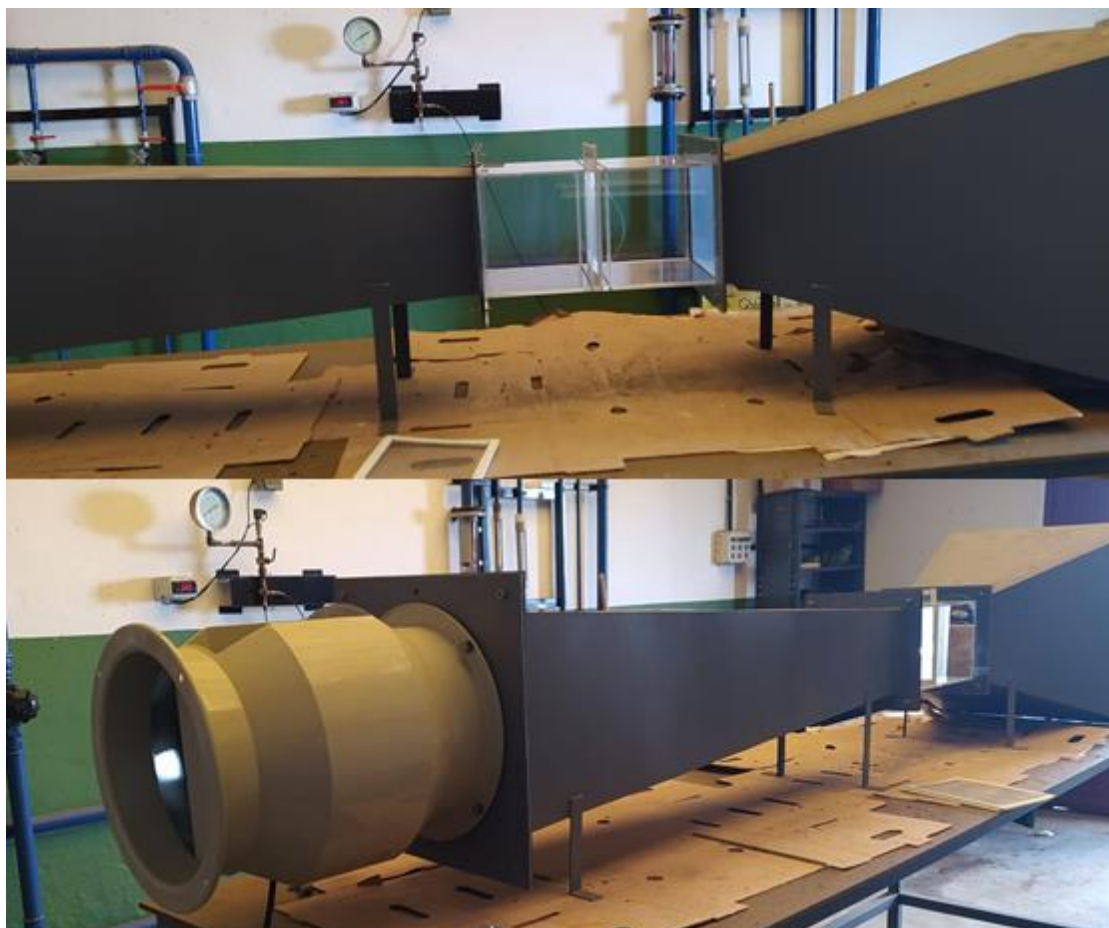


Ilustración 53. Imágenes del túnel de viento construido y emplazado sobre su bancada en uno de los laboratorios del Instituto de Investigaciones Agrarias (ICIA). Fuente: ICIA.

- **Clasificación de baja velocidad:** Tal y como se ha descrito en el *Capítulo I: Marco Teórico*, un túnel de viento de esta tipología corresponde a aquel que opera con velocidades de flujo inferiores a Mach 0.3 (teniendo en cuenta que la velocidad del sonido a 20 °C es de 344 m/s):

$$Mach = \frac{v}{c} = \frac{8 \text{ m/s}}{344 \text{ m/s}} = 0.023$$

- **Circuito abierto, tipo NPL:** El aire captado directamente desde la atmósfera circundante se satura a la entrada del túnel de viento gracias

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

a humidificadores ultrasónicos y de alta presión, dependiendo del tamaño de gota deseado.

- **Flujo de aire:** Para evitar las turbulencias del aire en la cámara de ensayos y así evitar el uso de estabilizadores de flujo y/o honeycombs, el flujo de aire se provocará mediante aspiración.
- **Características del túnel de viento:**
 - Partes: Sección de humectación (destinada a emplazar las lanzas humidificadoras, se desglosará su diseño en el **Capítulo III** y anexos), cono de contracción, cámara de ensayos, difusor y sección de aspiración (donde se contiene el ventilador en todo momento).
 - Materiales de construcción del túnel: Acero galvanizado y PMMA (Metacrilato).
 - Ventilador empleado y características técnicas: **SODECA HBA-31-2T**.

- Velocidad: 2760 rpm.
- Potencia instalada: 0.55 kW.
- Caudal máximo: 2900 m³·h⁻¹.
- Nivel de presión sonora: 77 dB(A).
- Peso: 25 kg.



Ilustración 54. Ventilador Sodeca HBA-31-2T- Fuente: sodeca.com

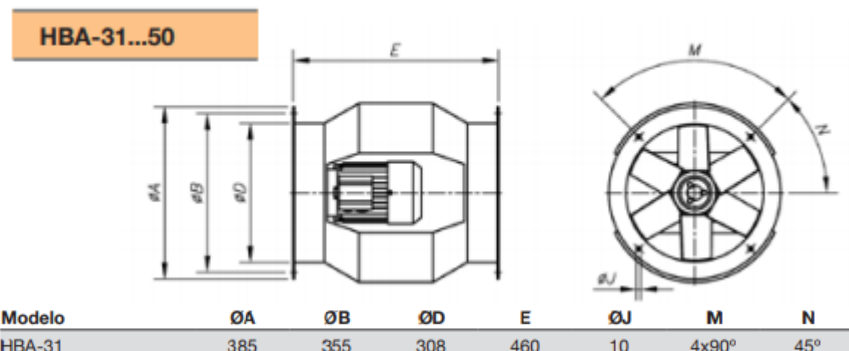


Ilustración 55. Dimensiones del ventilador SODECA HBA-31-2T. Fuente: sodeca.com

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

1.2. CONDICIONANTES: EMPLAZAMIENTO Y FACTORES AMBIENTALES Y DE OPERACIÓN.

- Lugar de implementación: Un dato crucial a la hora de establecer los parámetros de funcionamiento, el **Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA)** está ubicado en la Carretera TF-156, en San Cristóbal de La Laguna.
- Altura del ICIA: Entre 330 y 350 m.s.n.m. (según datos obtenidos en **Visor GrafCAN**).



Ilustración 56. Mapa topográfico correspondiente a la superficie ocupada por el Instituto Canario de Investigación Agrícola (Escala 1:1000). Fuente: Visor GrafCAN.

- Presión atmosférica: Aproximadamente 101325 Pa (1 atm).
- Velocidad de operación: Desde 2 m/s hasta 8 m/s aproximadamente.
- Propiedades del aire húmedo presente en la cámara de ensayos: De cara a obtener estos parámetros, necesarios a la hora de elegir el instrumental (tanto de medida como equipos de humectación), recurriremos a la psicrometría y, por tanto, al diagrama psicrométrico. Para ello, acudiremos al programa informático **Sicro®**, desarrollado por la **UPV** (Universidad Politécnica de Valencia).
 - Introducimos los datos de partida: Humedad relativa del aire 100%, (dado que se requiere niebla para los estudios) y 19°C de temperatura seca dentro del laboratorio. Esto se realiza mediante el comando “Calcular un punto”.
 - Una vez hemos realizado este paso, en el diagrama psicrométrico aparecerá el punto calculado con los datos de partida. Si posamos el

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

icono del ratón encima de dicho punto, el programa nos proporcionará todos los datos relativos al estado del aire.

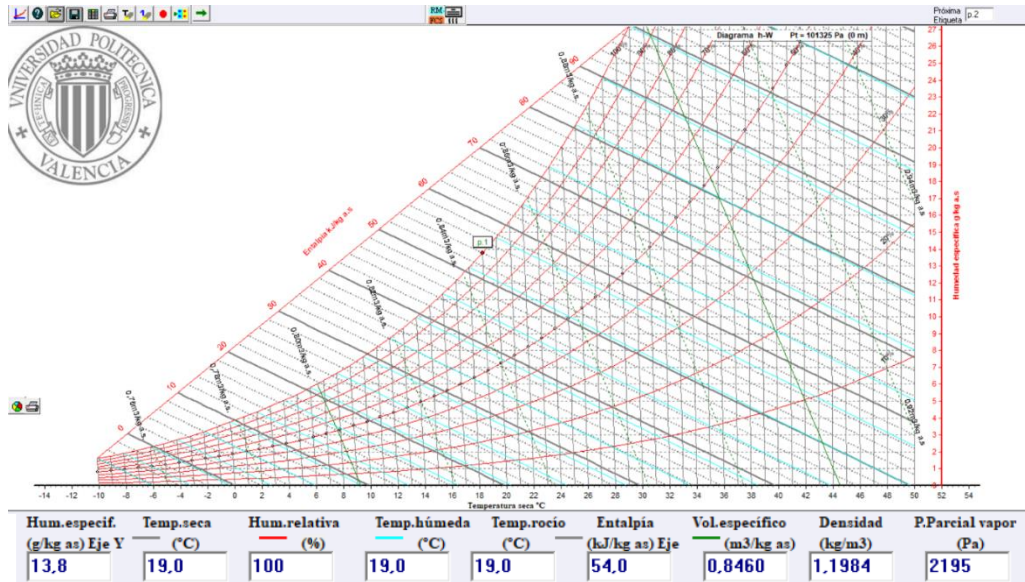


Ilustración 57. Punto psicrométrico de operación de la niebla de trabajo presente en el túnel de viento. Fuente propia.

- De manera análoga, gracias a la obtención de las propiedades psicrométricas del aire húmedo que se introducirá en la cámara de ensayos del túnel de viento en forma de niebla, podremos obtener el caudal másico y volumétrico máximo y mínimo de niebla que discurrirá a través de la cámara de ensayos.

Sabiendo que la densidad del aire húmedo es $\rho = 1.1984 \text{ kg/m}^3$ y que, para la niebla, la densidad total se expresa como:

$$\rho = \rho_H + \rho_{H_2O}$$

Siendo:

- ρ_H : La densidad del aire húmedo $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
- ρ_{H_2O} : La densidad del agua líquida presente en el aire húmedo $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$. En este caso, la densidad del agua líquida a 19°C y 1 atm de presión es 998.4 kg/m³; pero dado que el contenido de agua líquida en la niebla oscila entre 0.1 y 1 g_{agua}/m³_{aire húmedo}, la densidad de agua máxima será:

$$\rho_{\text{máx-H}_2\text{O}} = 0.001 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Así, podremos aproximar la densidad total del fluido como la densidad del aire húmedo, puesto que, en comparación con el agua líquida, esta última es despreciable en magnitud.

Entonces:

$$\rho = 1.1984 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Por tanto, el caudal másico de niebla, si tenemos en cuenta que depende de la densidad del flujo, de la sección transversal por la que discurre y de la velocidad que se espera en esa sección, se tiene:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (54)$$

Por tanto, si se conoce que la velocidad máxima a la que operará el túnel de viento es de 8 m/s, que la velocidad mínima será de 2 m/s y que su cámara de ensayos tiene una sección transversal de 0.2 x 0.2 [m²], sería:

$$\dot{m}_{\text{máximo}} = 1.1984 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.2 \text{ m} \cdot 0.2 \text{ m} \cdot 8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.3835 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{máximo}} = \frac{0.3835 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1.1983 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.32 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1151.83 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{mínimo}} = 1.1984 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.2 \text{ m} \cdot 0.2 \text{ m} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.09587 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{mínimo}} = \frac{0.09587 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1.1984 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.08 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 288 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

La principal explicación de por qué hemos fijado este rango de velocidades dentro del túnel de viento, se debe a tres razones fundamentales:

- Este rango de velocidades es el más común en zonas de captación.

- Las velocidades inferiores a 2 m/s generan como resultado una eficiencia y rendimiento bajo de captación de las mallas.
- Por otra parte, si las velocidades del flujo son superiores a 10 m/s, es frecuente que se ponga a prueba la resistencia mecánica de las mallas y que las gotas atrapadas en éstas por alguno de los mecanismos de captación sean arrastradas debido a la alta velocidad del flujo libre.

1.3. INSTRUMENTACIÓN NECESARIA.

A continuación, se hará un desglose detallado de todo el instrumental necesario para el proyecto, ordenados en grupos según su importancia de mayor a menor. De igual manera, se hará un desglose de cada categoría.

- **Humidificador / Humectador:** Para una exitosa consecución del proyecto, este aparato es indispensable y relevante muy por encima del resto de instrumental, dado que será la fuente extra de humedad que permitirá saturar el aire dentro del túnel de viento e incorporar las gotículas de agua en el aire, necesarias para conseguir reproducir la niebla en el interior del túnel. Puesto que necesitaremos un rango de gota de entre 1 y 50 μm , es posible que se necesiten dos tipos de nebulizadores:
 - **Nebulizador ultrasónico (tamaño de gota medio de 1-5 μm):** Su funcionamiento se basa en la oscilación de transductores piezoeléctricos ubicados en la parte inferior de un depósito de agua, que oscilan a una velocidad de 1.65 MHz aproximadamente. Este fenómeno de vibración a altas velocidades impide al agua seguir las oscilaciones del transductor debido a su propia inercia, causando en las amplitudes negativas del ciclo de vibración se la generación de un vacío que provoca la aparición de burbujas microscópicas, burbujas que son empujadas contra la superficie del agua durante el tiempo que dura la amplitud positiva. En pocas palabras, se provoca la cavitación del agua.

Mientras sucede este proceso, las ondas generadas bajo la superficie del agua crean gotas de agua muy pequeñas para separarlas, formando una lámina muy discreta de vapor que es absorbida por el flujo de aire circundante.

- **Nebulizador de alta presión (tamaño de gota 5-50 μm):** El principio de funcionamiento de los humidificadores de alta presión reside en el aprovechamiento de la energía potencial aplicada al agua por una bomba volumétrica, elevando la presión entre 60 y 70 bar generalmente (aunque trabajan en otros rangos, dependiendo de la aplicación y el modelo), y la posterior nebulización por medio de boquillas atomizadoras.
- **Humidificador de enfriamiento evaporativo:** Este tipo de humidificadores emplea agua como refrigerante, mediante el contacto del fluido con una corriente de aire en el intercambiador de calor. De esta manera, se humecta y refrigera el aire, atomizando las gotas de agua, que enfrían el aire mediante su evaporación.
- **Balanza electrónica de precisión:** Es un instrumento de pesaje que usa la acción gravitatoria para la determinación de la masa de un cuerpo que se deposita en su receptor, denominado plato. De manera más concreta, la medición se realiza mediante una célula de carga que calcula la fuerza (peso) ejercida por el cuerpo sobre el receptor de carga, dando como resultado la masa equivalente. Este dispositivo se empleará para medir la cantidad de agua recolectada por las mallas durante los ensayos en laboratorio.
- **Medición de velocidad:** Conocido como anemómetro o anemográfico, es un aparato de medición ampliamente usado para obtener numéricamente la velocidad del viento en meteorología, aeronáutica, agricultura, calefacción y ventilación, industria e ingeniería civil, entre otras aplicaciones. Existen diversos tipos:
 - **Anemómetro de rotación:** Dotado de cazoletas Robinson, o hélices adosadas a un eje central que giran solidariamente a un

eje que gira proporcionalmente a la velocidad del viento. Por ejemplo, los anemómetros magnéticos al girar activan un generador eléctrico de pequeño tamaño que facilita una medida de alta precisión.

- **Anemómetro de compresión:** Basado en el tubo de Pitot, cuenta con dos tubos pequeños: uno con un orificio frontal, que mide la presión dinámica; y otro con un orificio lateral, que mide la presión estática. La diferencia entre ambas presiones determinará la velocidad del fluido.
- **Medición de humedad:** Los higrómetros o higrógrafos son aquellos aparatos de medida que se encargan de medir la humedad presente en el aire, ya sea relativa, absoluta o ambas. Se distinguen cinco tipos principales:
 - **Higrómetro de condensación:** Obtiene la humedad en la atmósfera al determinar la temperatura de rocío de una superficie pulida que se enfría artificial y paulatinamente.
 - **Higrómetro o higrómetro de cabello:** Emplea un hilo de cabello que se retuerce con mayor o menor grado en función de la humedad ambiental. Este hilo de cabello desplaza una aguja indicadora que determina la proporción, sin conocer el porcentaje de humedad.
 - **Higrómetro de absorción:** Emplea compuestos químicos higroscópicos, que absorben y exhalan la humedad, dependiendo del ambiente circundante.
 - **Higrómetro eléctrico:** Compuesto por dos electrodos hilados en espiral, entre los que se halla un tejido de cloruro de litio acuoso, si se aplica una corriente alterna, el tejido se calienta y evapora una fracción del agua. A una temperatura previamente definida se establece el equilibrio entre la evaporación por calentamiento y la absorción de humedad por el cloruro de litio (material higroscópico). Con estos dos datos se establece con una precisión muy alta el grado de humedad en el ambiente.

- **Termohigrómetro:** Combina la integración simultánea de sensores de temperatura y humedad.
- **Medición de temperatura:** Coloquialmente denominados como termómetros, son aquellos instrumentos capacitados para medir la temperatura. Existen gran cantidad de tipos y subtipos, en función de la época, el principio de funcionamiento y la tecnología empleada:
 - **Termómetro de mercurio:** Consiste en un tubo de vidrio sellado que contiene mercurio. Este termómetro se basa en la dilatación de los materiales de manera proporcional a la temperatura. Fue inventado por Gabriel Fahrenheit en 1714.
 - **Pirómetros:** Termómetros aptos para altas temperaturas, se categorizan en cuatro clases principales en base a su principio de funcionamiento:
 - **Pirómetro óptico:** Basado en la **Ley de Wien** de distribución de la radiación térmica, en la que se postula que el color de la radiación varía con la temperatura. Para realizar lecturas de temperatura, se compara el color de la superficie a medir con el de un filamento ajustado mediante un reóstato calibrado. Pueden medir temperaturas en un rango de entre 700 °C y 3200 °C.
 - **Pirómetro de radiación total:** Fundamentado en la Ley de Stefan-Boltzmann, según la cual “la intensidad energética emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.”
 - **Pirómetro IR:** El proceso de medición de temperatura de estos dispositivos se basan en la ejecución de varios pasos: se capta la radiación infrarroja y se filtra en una lente mediante un sensor fotorresistivo, luego se genera una corriente eléctrica a partir de la que un circuito electrónico calcula la temperatura. Pueden medir temperaturas en un rango de temperaturas inferiores a 0 °C y superiores a 2000 °C.

- **Pirómetro fotoeléctrico:** Basado en el efecto fotoeléctrico, produce una liberación de electrones en función de la cantidad de radiación térmica incidente.
- **Termómetro de lámina bimetálica:** Empleado con mucha frecuencia como sensor de temperatura dentro de los termohigrómetros, es un termómetro formado por dos láminas de metales con coeficientes de dilatación muy dispares.
- **Termómetro de gas:** Pueden ser de presión constante o de volumen constante, y su alta precisión causa que sean empleados para la calibración de otros tipos de termómetros.
- **Termómetro de resistencia:** Se basa en la implementación de un alambre metálico cuya resistencia eléctrica varía con la temperatura.
- **Termopar:** También denominado termocupla, es un transductor empleado para medir temperaturas en base a la fuerza electromotriz (del orden de mV) generada al calentar la soldadura de dos materiales distintos.
- **Termistor:** Dispositivo que varía su resistencia eléctrica en función de la temperatura.
- **Termómetros digitales:** Se valen de transductores y de circuitos electrónicos para transformar las variaciones de tensión obtenidas en valores numéricos, para mostrar la lectura final de temperatura en un display.
- **Impresión 3D:** Actualmente el fenómeno de la impresión 3D está en pleno auge, y el avance tecnológico de estos instrumentos camina a pasos agigantados, lo que no sólo permite la impresión en materiales ampliamente conocidos como el polímero ABS, PLA y/o diversos tipos de resinas, sino con fibras o pellets de Nylon, o incluso con fibras de Nylon reforzadas con composites, como fibra de carbono o de vidrio, lo que, en impresiones de poco espesor, se pueden obtener piezas de alta flexibilidad con propiedades mecánicas sin precedentes. Esto puede ser beneficioso para no sólo obtener mallas de diferentes geometrías y con

materiales hidrófilos / hidrófugos, sino para aumentar su resistencia a las inclemencias ambientales durante su vida útil.

En cuanto a Software para modelado y gestión de impresiones en 3D, se recomienda el siguiente abanico de programas informáticos:

- **Modelado y optimización de diseños 3D:** Permiten modelar tanto paramétricamente (definir un modelo mediante programación de sus características geométricas) como realizar diseño generativo (permite definir objetos y restricciones de diseño gráficamente y comprobar el costo / rendimiento de cada pieza o parámetro).
 - **SolidWorks, Ansys, Catia, Autodesk Fusion 360 / Inventor, SketchUp, Free CAD, Rhinoceros.**
- **Corrección de modelos 3D:** Permiten al usuario reparar archivos stl dañados, de modo que puedan ser imprimibles.
 - **Meshmixer, NetFabb o Make Printable.**
- **Programas de laminado (Slicers):** Permiten enviar las instrucciones de impresión a la impresora, definiendo la resolución, la velocidad de impresión o la altura de la capa.
 - De código abierto: **Cura, Repetier, Slic3er, Chitubox.**
 - De marcas: **ReplicatorG (MakerBot), ZSuite (Zortrax) o Voxelizer (ZMorph).**

Una vez explicados los tipos de instrumental y software más comúnmente empleados, se procederá a seleccionar las piezas más adecuadas para la toma de datos y diseño de piezas.

2. CRITERIOS GENERALES PARA LA SELECCIÓN DEL INSTRUMENTAL DE MEDIDA.

Dado que el instrumental que se va a seleccionar proporcionará de manera numérica las magnitudes de fenómenos físicos producidos en el interior del túnel de viento (así como el control del caudal de aportación de niebla y el agua recogida durante los ensayos), es crucial que los datos se ajusten lo más posible a la realidad y al rango de mediciones esperado durante los ensayos realizados en su interior.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

De este modo, de cara a la elección de un instrumental adecuado, preciso, confiable y apto para el uso agrícola de del túnel de viento de baja velocidad y a la fiabilidad de los estudios y resultados que se obtengan, se comprobarán diez criterios fundamentales:

- ✓ **Trazabilidad:** Toda calibración debe ser trazable, dado que la trazabilidad es la especificación del patrón de comparación entre un instrumento de medición determinado y una consecución ininterrumpida con patrones nacionales e internacionales; esto, entendiendo la calibración como la comparación entre una señal medida con otra de referencia conocida.
- ✓ **Sensibilidad:** La mínima variación en la entrada que puede detectarse en la salida. En otras palabras, es el intervalo mínimo de variación en el input de un sensor que se puede manifestar en el display de lectura. Para esto, es indispensable que el instrumento de medida posea una buena resolución.
- ✓ **Resolución:** Mínimo intervalo legible entre dos lecturas que ofrece un cambio medible en el output.
- ✓ **Precisión:** Nivel de concordancia entre los resultados. Se cuantifica mediante la repetibilidad y la reproducibilidad, y se emplea para definir la variación entre mediciones.



Ilustración 58. Diferencia entre precisión y exactitud. Fuente propia.

- ✓ **Estabilidad:** Se indica como el porcentaje de variación en la salida calibrada de un instrumento a lo largo de un intervalo de tiempo predeterminado (usualmente entre 90 días y 1 año), siempre en condiciones nominales de funcionamiento.
- ✓ **Histéresis:** Diferencia en la medida dependiendo del sentido en que se ha alcanzado. En otras palabras, un valor de magnitud de entrada es capaz de provocar salidas diferentes, en función si se ha llegado a dicho valor mediante un aumento o un decremento de la entrada.

- ✓ **Repetibilidad:** Es la capacidad que tiene el instrumento de dar la misma salida a lo largo de entradas repetidas de la misma magnitud durante un período de tiempo. Suele expresarse como la desviación estándar.
- ✓ **Reproducibilidad:** Indica la capacidad de reproducir los datos entre medidas sucesivas, en diferentes condiciones, y pudiendo realizarse por diferentes personas o entidades y diferentes instrumentos.
- ✓ **Rango:** Campo comprendido entre el menor y el mayor valor entre los que se puede llevar a cabo una medición.
- ✓ **Zona muerta:** Región de la curva de calibración que tiene una sensibilidad nula.

3. CRITERIOS ESPECÍFICOS PARA CADA ELEMENTO Y ELECCIÓN DEL INSTRUMENTAL DE MEDIDA.

La búsqueda del instrumental necesario para la correcta operación del túnel de viento, así como de todos los procesos que se puedan derivar de su uso (diseño y fabricación de mallas, obtención y postratamiento de datos, control de parámetros físicos y ambientales) se ha realizado comparando los productos de varios proveedores / fabricantes: **PCE Instruments España, RS Componentes, Omega, Carel y Condair, entre otros.**

3.1. CRITERIOS ESPECÍFICOS

De igual manera que los criterios generales, otros criterios a tener muy en cuenta para la elección de una instrumentación adecuada han sido:

- Tiempo de respuesta y tasa de actualización de datos lo más rápidos posible.
- Fácil manejo, calibración e instalación.
- Interfaz de usuario intuitiva.
- En el caso de los humectadores, que se adecúen a las condiciones de contorno que se han previsto para su puesta en funcionamiento dentro del túnel de viento.
- Se valora positivamente la inclusión de software propio para tratamiento de datos, o en su defecto, un almacenamiento con

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

memoria extraíble o una interfaz que permita transferir los archivos de los estudios a una computadora para su postratamiento.

- Que sea posible su funcionamiento en un entorno con aire saturado (100% HR) y agua dispersa en una segunda fase de carácter líquido.

3.2. HUMIDIFICADOR:

Para determinar qué equipos humectadores se requieren para su implementación en el túnel de viento, primero se debe realizar el cálculo del caudal de agua necesario para la elección del generador de niebla.

Para obtener los datos relativos al aporte de humidificación, calcularemos el caudal necesario de aportación de agua en base a dos parámetros fundamentales para la captación de agua de niebla: el contenido de agua líquida presente en el aire (también denominado **LWC – Liquid Water Content**) y la velocidad del flujo de niebla a través de la cámara de ensayos ($2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} - 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), que es el lugar donde irán emplazadas las mallas de captación.

Teniendo estos parámetros fijados, el cálculo de caudal másico de aportación de agua se cimentará en la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = LWC \cdot V \cdot A_{CE} = [g \cdot m^{-3}] \cdot [m \cdot s^{-1}] \cdot [m^2] = [g \cdot s^{-1}] \quad (55)$$

Tabla 7. Caudales de aportación de agua (en $g\cdot s^{-1}$ y $kg\cdot h^{-1}$ respectivamente) en función de LWC y de la velocidad de flujo.

CAUDALES DE APORTACIÓN DE AGUA EN FUNCIÓN DE LWC Y LA VELOCIDAD DE FLUJO (g/s)							
	VELOCIDADES DE FLUJO (m/s)						
LWC (g/m ³)	2	3	4	5	6	7	8
0,1	0,008	0,012	0,016	0,02	0,024	0,028	0,032
0,2	0,016	0,024	0,032	0,04	0,048	0,056	0,064
0,3	0,024	0,036	0,048	0,06	0,072	0,084	0,096
0,4	0,032	0,048	0,064	0,08	0,096	0,112	0,128
0,5	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16
0,6	0,048	0,072	0,096	0,12	0,144	0,168	0,192
0,7	0,056	0,084	0,112	0,14	0,168	0,196	0,224
0,8	0,064	0,096	0,128	0,16	0,192	0,224	0,256
0,9	0,072	0,108	0,144	0,18	0,216	0,252	0,288
1	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32
CAUDALES DE APORTACIÓN DE AGUA EN FUNCIÓN DE LWC Y LA VELOCIDAD DE FLUJO (kg/h)							
	VELOCIDADES DE FLUJO (m/s)						
LWC (g/m ³)	2	3	4	5	6	7	8
0,1	0,0288	0,0432	0,0576	0,072	0,0864	0,1008	0,1152
0,2	0,0576	0,0864	0,1152	0,144	0,1728	0,2016	0,2304
0,3	0,0864	0,1296	0,1728	0,216	0,2592	0,3024	0,3456
0,4	0,1152	0,1728	0,2304	0,288	0,3456	0,4032	0,4608
0,5	0,144	0,216	0,288	0,36	0,432	0,504	0,576
0,6	0,1728	0,2592	0,3456	0,432	0,5184	0,6048	0,6912
0,7	0,2016	0,3024	0,4032	0,504	0,6048	0,7056	0,8064
0,8	0,2304	0,3456	0,4608	0,576	0,6912	0,8064	0,9216
0,9	0,2592	0,3888	0,5184	0,648	0,7776	0,9072	1,0368
1	0,288	0,432	0,576	0,72	0,864	1,008	1,152

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Como anotación final a estos cálculos de aportación de agua, es necesario destacar que, mediante dichos caudales, los humidificadores elegidos realizan dos funciones: saturar el aire hasta un 100% HR y conseguir la cantidad de LWC necesaria para cada caso concreto.

En base a los resultados obtenidos, procedemos a seleccionar los humidificadores.

- Humidificador de ultrasonidos: Se han barajado opciones de la empresa suministradora **Carel**, especialista en tratamiento de aire y humidificadores. De manera más concreta, se han valorado los modelos de humidificador destinados a humidificación ambiental y conductos y unidades de tratamiento de aire, debido a la mayor aportación de caudal.

Como modelo ultrasónico para generar el tamaño de gota más pequeño de todo el rango contemplado (1-5 μm), se ha escogido el modelo **Humisonic Compact UU01G**:

- Tipología: Humidificador adiabático por ultrasonidos con cuatro transductores piezoeléctricos (cantidad de transductores específica para el modelo **UU01G**).
- Aplicación: Implementación en unidades de tratamiento de aire, fan coils y/o vitrinas.
- Dimensiones: 125 mm x 121 mm x 221 mm.
- Peso: 3.9 kg
- Caudal nominal máximo de aportación: 1 l/h a 230 V.
- Consumo energético: 100 W
- Geometría de las lanzas humidificadoras:
 - Diámetro: 35 mm
 - Longitud: 610 mm
- Agua: Es capaz de operar tanto con agua de red como desmineralizada, pero, según el fabricante, con la completamente desmineralizada es posible extender la vida útil de los transductores piezoeléctricos a 3000 h además de evitar posibles obstrucciones en la lanza a largo plazo (tanto en el cuerpo de la tubería como en los orificios), por lo que es muy recomendable.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Funcionamiento (**ilustración 60**): El **Humisonic** (en cualquiera de sus dos variantes) opera mediante transductores piezoeléctricos

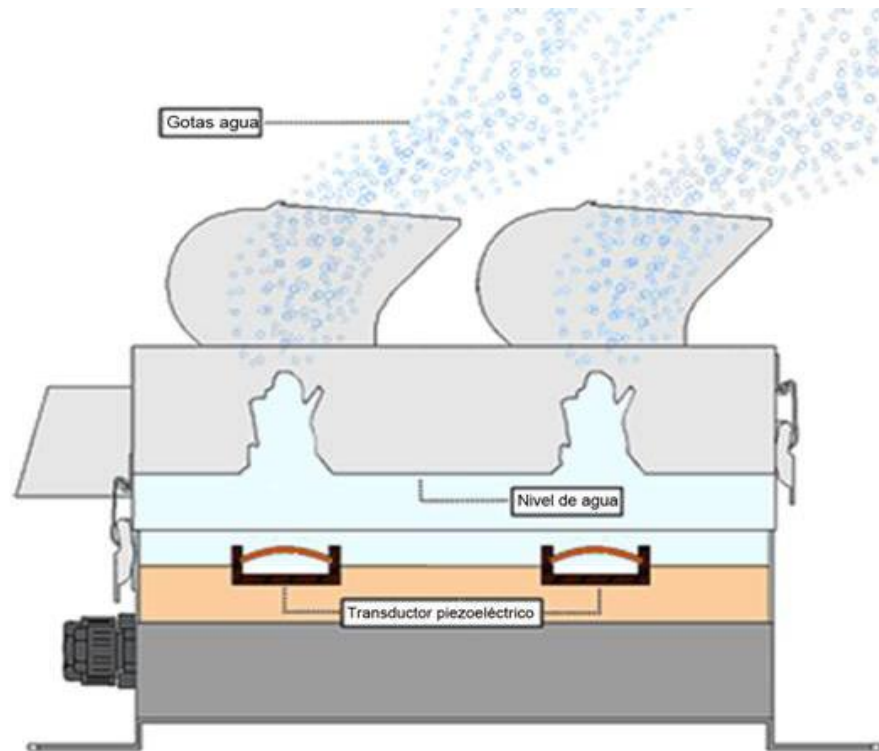


Ilustración 59. Funcionamiento esquemático de un humidificador ultrasónico. Fuente: bioazul.com

ubicados en la parte inferior del depósito de agua (se puede observar en la ilustración 61), cuyas membranas oscilan a razón de 1.65 MHz (1.65 millones de veces por segundo), generando una serie de ondas de presión y columnas de gotículas de agua del orden de 5 micras. Una vez se han formado las gotas, un ventilador integrado en la parte superior del módulo traslada la neblina al ambiente objetivo (una habitación, una unidad de tratamiento de aire, un conducto, etc.).

- Velocidad de salida necesaria para las gotas: $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} - 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Estos requisitos tan específicos son debidos a la naturaleza de la aplicación de estos sistemas: Para velocidades inferiores a $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ las gotículas no son capaces de integrarse correctamente en el flujo de aire y tienden a precipitar desde la lanza humectadora; por otra parte, para velocidades superiores a $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, se ve impedida la absorción de las gotículas de agua debido al arrastre de agua.
- Accesorios:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Tubería flexible con distribuidor cilíndrico perforado de agua de acero inoxidable: L= 610 mm.
- Sensor de humedad.
- Terminal con display.



Ilustración 60. Humidificador ultrasónico Humisonic. Fabricante: Carel. Fuente: carel.es

- Humidificador de alta presión: Tras hacer una revisión de las prestaciones técnicas necesarias se ha decidido elegir el modelo **Chillbooster de Carel**:
 - Aplicación: Instalación en conducto / Unidad de Tratamiento de Aire.
 - Caudal nominal de aportación: Hasta 100 l/h. Cada boquilla implementada en la lanza humectadora aporta 5 l/h.
 - Calidad del agua de entrada: Potable y desmineralizada (ésta no es obligatoria debido al relativo gran tamaño de las gotas respecto de las producidas por el **Humisonic**).



Ilustración 61. Humidificador Chillbooster de Carel. Fuente: Carel.es

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Accesorios: Lanza con varias boquillas, válvula de fin de línea, colector, y conexiones rápidas.
- Tamaños medios de gota posibles: 35 y 50 micras, con dos tipos de boquillas.
- Presión de la bomba: 10 bar.
- Distancia óptima de absorción: Entre 1 – 1.5 m. Debido al mayor tamaño de gota, éstas necesitan una mayor distancia para ser absorbidas por el aire circundante.
- Equipo de ósmosis y tratamiento de agua: Estos dispositivos, aunque no sean cruciales en vistas a los estudios de captación de niebla, si son indispensables de cara a preservar en buen estado los equipos de humidificación y la estructura del túnel de viento a medio y largo plazo.
 - **¿Qué es la ósmosis inversa?:** Para conocer en qué consiste este fenómeno, es necesario primero conocer la ósmosis: es un fenómeno físico relacionado con el movimiento de un disolvente a través de una membrana semipermeable, desde una zona de baja concentración de disolución, hasta una zona de alta concentración, generando presión osmótica en el proceso (aquella presión que debe aplicarse a una solución para detener el flujo neto de disolvente a través de la membrana semipermeable). Entonces, en la ósmosis inversa se aplica una presión externa (mediante una bomba o un conjunto de bombas

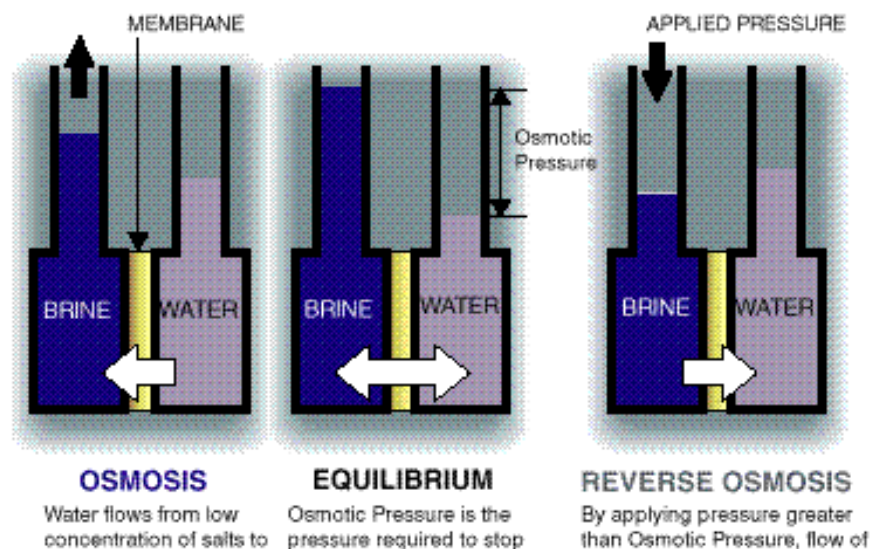




Ilustración 62. Resumen gráfico de los procesos de ósmosis y ósmosis inversa, así como del estado de equilibrio. Fuente: lenntech.es

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

hidráulicas) para invertir el flujo natural del disolvente y así eliminar las impurezas presentes en el disolvente.

En cuanto al equipo de ósmosis inversa necesario para satisfacer las necesidades hídricas de los sistemas humectadores, se ha optado por escoger un modelo de la misma empresa Carel, que pueda satisfacer las necesidades de agua osmotizada que requieren el túnel y los humectadores para su buen funcionamiento. Para ello, se ha realizado una comparativa directa entre los dos modelos que ofrece Carel: **WTS Compact** y **WTS Large**.

Modelo	WTS Compact	WTS Large
Imagen del modelo		
Caudal de aportación	Entre 12 y 20 l/h (versión sin bomba) y entre 25 y 40 l/h (versión con bomba)	100, 320, 460, 600, 1000 l/h
Presión de red necesaria	Menor a 4 bar (escoger versión con bomba) o superior a 4 bar (escoger versión sin bomba).	-
Adecuado para:	Humidificadores de pequeño tamaño (hasta 10 l/h)	Humidificadores por adiabáticos por atomización y de vapor.
Tipos de agua empleada	Agua de lluvia (baja cantidad de sustancias disueltas en su interior) y de red de suministro.	

En este caso, teniendo en cuenta las características de los equipos de ósmosis inversa y las de los equipos humectadores, sería necesario el **WTS Compact**. Debido a que, a pesar de que se tiene el **Chillbooster**, que supera con creces el caudal másico de

aportación necesario (1.15 kg/h de aportación máxima necesaria frente a 5 kg/h de aportación mínima), en ningún momento se superan 12 l/h, que es el caudal mínimo de agua osmotizada que aporta el **WTS Compact** en su versión sin bomba. De este modo, el módulo de tratamiento de agua proporcionará más agua de la necesaria para los estudios, por lo que sería conveniente tener un depósito de almacenamiento aguas arriba. A partir de este punto, sólo es necesario comprobar la presión de red presente en el **ICIA** para discernir si se elige el modelo con o sin bomba.

Por otra parte, dado que se necesita tanto un humidificador de ultrasonidos como uno de alta presión, es preciso destacar el especial cuidado que se debe tener con las condensaciones. En términos de problemas técnicos o de funcionamiento se traduce en condensaciones de agua en áreas no deseadas (cono de contracción, zonas sin bandeja de drenaje, etcétera.), ergo, en corrosión a largo plazo y depósitos calcáreos, aunque las propiedades que presenta el acero galvanizado y el metacrilato son idóneas para evitar estos fenómenos:

- Al galvanizarse el acero, la capa de zinc creada en su superficie evita que el oxígeno del agua alcance al hierro.
- Es un material difícilmente deteriorable en términos de abrasiones.
- Apenas requiere de mantenimiento, pero es recomendable realizarlo periódicamente.

Aunque, a pesar de estas cualidades idóneas como elemento constructivo, es posible paliar estos problemas mediante la implementación de un conducto extra, previo al cono de contracción, en el que se realice la inyección de agua, y que tenga una longitud suficiente para asegurar dos necesidades primordiales:

1. La absorción de las gotas en el flujo de aire: Que puedan llegar a evaporarse correctamente y se alcance un 100% de humedad relativa en la cámara de ensayos y el LWC deseado.
2. Las previamente mencionadas velocidades límite para la adecuada implementación del humectador ultrasónico.

Por tanto, **es preciso realizar modificaciones estructurales de ampliación en el diseño del túnel de viento propuesto**, pero este tema se tratará en el **Capítulo III**.

3.3. MEDIDOR DE VELOCIDAD: ANEMÓMETRO

3.3.1. Opción 1: Anemómetro de hilo térmico / hilo caliente Beha – Amprobe TMA – 21HW (Opción escogida).

- Fabricante: **Beha - Amprobe**
- Modelo: TMA-21HW
- Peso: 1 kg
- Funciones: Medición de velocidad de aire, temperatura, humedad relativa, caudal volumétrico, temperatura de rocío, temperatura de bulbo húmedo y temperatura percibida (sensación térmica).
- Unidades de medida:
 - Temperatura: °F y °C
 - Velocidad del aire: m/s, km/h, ft/min, nudos, mph.
 - Humedad relativa: % HR
- Condiciones ambientales de operación:
 - Temperatura: 0°C – 40°C
 - Humedad relativa del aire: 10-80 %HR (Aunque es capaz de medir todo el rango de humedades relativas en el aire).



Ilustración 63. Anemómetro de hilo caliente Beha Amprobe TMA - 21HW. Fuente: rs-online.com

3.3.2. Opción 2: Anemómetro de hilo térmico / hilo caliente PCE - 009.

- Fabricante: **PCE Instruments**
- Modelo: PCE – 009
- Dimensiones:
 - Cuerpo del anemómetro: 203 mm x 76 mm x 38 mm
 - Sonda:
 - Longitud recogida: 280 mm
 - Longitud extendida: 940 mm



Ilustración 64. Anemómetro de Hilo Caliente PCE-009. Fuente: PCE Instruments.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Diámetro máximo: 12 mm
- Diámetro mínimo: 8 mm (en el puntero)
- Peso: 515 g.
- Material: Polímero ABS.
- Funciones: Medición de velocidad de aire, temperatura, caudal volumétrico (tras introducir la sección transversal).
- Unidades de medida:
 - Temperatura: °C, °F.
 - Velocidad del aire: m/s, km/h, milla/h, nudos, pie/min.
 - Caudal: m³/min.
- Condiciones ambientales de operación: No constan.
- Rangos de medición:
 - Temperatura: Entre 0 y 50 °C.
 - Velocidad: Entre 0.2 y 20 m/s.
 - Caudal volumétrico: Entre 0 y 36000 m³/min.
- Cuota de medición: Cada 2 segundos.
- Precisión:
 - Temperatura: ± 0.8 °C
 - Velocidad:
 - Para velocidades inferiores o iguales a 4 m/s = ± 0.3 m/s.
 - Para velocidades superiores a 4 m/s = ± (5% del valor de medición + 0.1 m/s).
 - Caudal volumétrico: Valor calculado.
- Resolución:
 - Temperatura: 0.1 para todas las unidades excepto para ft/min, que es 1.0
 - Velocidad: 0.1 °C
 - Caudal volumétrico: Entre 0.001 y 1 m³/min, según el valor de medición.

- Software / volcado de datos: Uso de cable e interfaz RS-232 compatible con Windows y posibilidad de volcado de datos a MS Excel.

3.4. MEDIDOR DE PRESIÓN Y DE FUERZAS

3.4.1. Opción escogida: Anemómetro de tubo de Pitot con dos tubos de Pitot.

- Fabricante: **PCE Instruments.**
- Modelo: PCE-PDA 10L (Manómetro) y SR-305 (Tubos de Pitot)
- Dimensiones: 145 x 85 x 35 mm
- Peso: 285 g.
- Funciones: Dispositivo para medir la presión de gases y líquidos (>100 Pa) no inflamables ni corrosivos.
- Unidades de medida: Pa, hPa, kPa, MPa, mBar, Bar, ATM, kg/cm², mmH₂O, cmH₂O, inH₂O, mmHg, inHg, Torr, PSI, PSF
- Rango de medición: ±20 kPa
- Resolución: 1 Pa
- Precisión: ±0,5 % v. E.



Ilustración 65. Anemómetro de tubo de Pitot PCE-PDA 10L. Fuente: www.pce-instruments.com

El cálculo de la fuerza de arrastre sufrida por la malla a causa del aire se realizará gracias a la medición de la velocidad del aire y posterior cálculo de la presión dinámica, y se monitorizarán las pérdidas de carga del aire a su paso por las mallas mediante presión diferencial (antes y después del paso de aire a través de la malla). Los motivos principales por los que se han hecho esta elección y no se ha optado por una balanza aerodinámica reside en:

1. La cámara de ensayos posee tres aberturas para la implementación de las mallas captadoras.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

2. Bajo estas aberturas es indispensable colocar algún tipo de recipiente para recoger el agua resultante de la captación. Lo que dificulta su implementación.

Por tanto, una vez explicado esto, la presión ejercida por el viento se puede extraer mediante la igualdad:

$$P_{Dinámica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 = \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \left[\frac{m^2}{s^2} \right] = \left[\frac{N}{m^2} \right] = Pa \quad (56)$$

De esta manera, conociendo la sección de impacto de la malla y velocidad del flujo al paso por la malla mediante la lectura del tubo de Pitot a la entrada de la cámara de ensayos, es posible conocer la fuerza de arrastre generada y, por ende, el coeficiente de arrastre asociado a la geometría ensayada en el túnel de viento.

Tabla 8. Abanico de presiones dinámicas para el flujo de aire húmedo presente en el túnel de viento, con las condiciones de contorno necesarias (19°C y 100% HR). Fuente propia.

Velocidad del aire (m/s)	Presión dinámica (Pa) con una densidad del aire de 1.1983 kg/m ³ (100% HR a 19°C)
2	2.4
3	5.39
4	9.58
5	14.98
6	21.57
7	29.36
8	38.35

3.5. MEDIDOR DE TEMPERATURA

3.5.1. OPCIÓN 1: Termohigrómetro de precisión de respuesta rápida.

- Fabricante: OMEGA™
- Modelo: RH92
- Funciones: Termohigrómetro con medición del punto de condensación (punto de rocío) y de la temperatura de bulbo húmedo.

- Sensor de humedad: Hecho en película polímero con capacitancia electrónica.
 - Sensor de temperatura: Termistor.
- Unidades de medida:
 - Temperatura: °F y °C
 - Humedad relativa: % HR
- Rango de medición:
 - Temperatura: -20 hasta 50°C
 - Humedad relativa: 0 a 100% HR
- Precisión en la medición:
 - Temperatura: $\pm 0,6$ °C ($\pm 1,0$ °F)
 - Humedad relativa: $\pm 3\%$ 0-100% sin condensación
- Resolución en la medición:
 - Temperatura: 0,1 °C (0,1 °F)
 - Humedad relativa: 0,1%
- Tiempo de respuesta: 60 segundos.
- Vida útil de la batería: Aproximadamente 500 horas.

3.6. MEDIDOR DE HUMEDAD

3.6.1. OPCIÓN 1: Termohigrómetro de precisión de respuesta rápida.

El mismo modelo que en el apartado 3.5.

3.6.2. OPCIÓN 2: Sensores de humedad de Carel.

La empresa Carel no sólo suministra dispositivos de humectación, sino todo tipo de accesorios para garantizar el correcto funcionamiento y control de los humidificadores. Entre estos dispositivos existen termohigrómetros para distintas condiciones ambientales y conectividades (con cable o Wireless) o sensores de calidad del aire, destinados para Unidades de Tratamiento de Aire y a realizar lecturas sobre Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC en inglés), como el benceno, el formaldehído o el tolueno, y lecturas sobre CO₂.

De cara a su inclusión en el túnel de viento se ha escogido el sensor de humedad proporcionado por el fabricante con el modelo del Humisonic.



Ilustración 66. Sensor de humedad HYHU00000 de Carel, destinado al uso con el modelo Humisonic. Fuente: carel.com

3.7. IMPRESORA 3-D:

3.7.1. Opción 1 (modelo escogido): CEL RoboxPRO™.

- Fabricante: **CEL** (Reino Unido).
- Modelo: **RoboxPRO™**
- Volumen máximo de construcción: 210 x 300 x 400 mm
- Tamaño de filamentos admitidos: 1.75 mm de diámetro.
- Impresión: De extrusión doble con boquilla Olsson Ruby (Fabricadas en Suecia). Esto permite la fácil impresión de piezas que para una impresora de extrusión simple son difíciles o imposibles de reproducir.
- Materiales permitidos: PLA, ABS, PETG, TPU, PC y Nylon; así como Nylon reforzado con Fibra de Vidrio o de Carbono (Nylforce Carbon Fiber / Nylforce Glass Fiber), debido a la alta resistencia de la boquilla a materiales abrasivos.
- Permite nivelación automática de la plataforma de impresión.
- Seguridad: Puerta de bloqueo, cámara de impresión con filtrado HEPA y de aire de carbón activo.
- Software incluido: **Automaker™**. Facilita el proceso de configuración de la impresora 3D.
- Interfaz y control: Pantalla táctil de 5” en color para realizar configuraciones de impresión, calibraciones de la placa de impresión y gestionar opciones de conectividad.
- Conectividad: WiFi, Ethernet y lector USB. Compatible con SO’s Windows, Apple y Linux.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Enchufe: Versión Reino Unido. Por tanto, es necesario disponer de adaptadores tipo europeo.
- Otras características:
 - **Según el fabricante**, este modelo es un 30% más veloz durante la impresión 3D que otras impresoras de extrusión dual presentes en el mercado.
 - La colaboración de CEL con el fabricante de filamentos italiano **FiberForce**, permite al cliente disponer de filamentos de Nylon reforzados con fibra de carbono o fibra de vidrio.



Ilustración 67. Impresora RoboxPRO en funcionamiento.
Fuente: all3dp.com

3.7.2. Opción 2 (modelo escogido): ANYCUBIC Photon Mono X.

- Fabricante: **ANYCUBIC** (Shenzen, China).
- Modelo: **Photon Mono X**
- Tamaño de la impresora: 270 mm x 290 mm x 475 mm
- Volumen máximo de construcción: 192 mm x 120 mm x 245 mm
- Precisión de impresión: De hasta 50 micrones.
- Interfaz de usuario (IU): Pantalla táctil LCD de 3.5 pulgadas.
- Sistema de curado: Pantalla fotocromática UV de 8.9 pulgadas. Permite reducir los tiempos de curado a un 25-35% por capa en relación a las impresoras de pantalla convencional RGB.
- Materiales permitidos: Resina 405nm UV (líquida).
- Huella de ruido máxima: 47 dB a 1 metro de distancia.
- Sistemas operativos compatibles con la impresora:
 - Windows 7 en adelante.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Mac OS X 10.7 en adelante.
- Formatos de archivo compatibles: STL y OBJ.
- Conectividad: WiFi y USB.
- Software: **Photon Workshop** (Slicer). Además de la función predeterminada de preparador de impresiones, es capaz rotular físicamente las impresiones 3D, o convertir un conjunto de imágenes en un modelo tridimensional mediante el generador de caras.

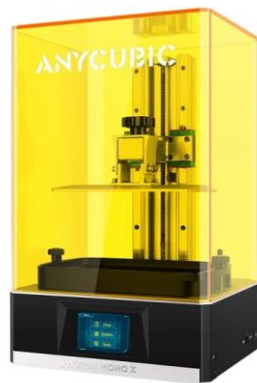


Ilustración 68. Impresora de resina UV Anycubic Photon Mono X. Fuente: anycubic.com

3.7.3. Filamentos de Nylon / Polímero

Dado que se propone un sistema de impresión 3D por filamentos, para imprimir nuevas geometrías de malla, o cualquier otra pieza adicional que pueda requerir el túnel de viento, también se recomiendan algunos tipos de filamentos de impresión, del proveedor **Filament2print**:

- Filamentos de nylon: Se pueden usar tanto directamente del bobinado, como filamento de impresión.
 - Nylon natural: Bobinas de Nylon natural Taulman 645.
 - Diámetro de fibra: 1.75 mm.
 - Alargamiento de rotura: 186 %
 - Densidad: 1.25 kg/m³.
 - Formatos: Bobinas de 0.45 kg y 1 kg, pack de 50g.
 - Nylon reforzado con fibra de vidrio: PolyMide PA-GF
 - Tipos para elegir: Nylon 6 o Nylon 12.
 - Diámetro de fibra: 1.75 mm
 - Formatos: Bobina de 2 kg.
 - Densidad: 1.2 g/cm³

- Nylon reforzado con fibra de carbono: CF15
 - Diámetro de fibra: 1.75 mm
 - Formatos: Bobina de 0.6 kg o pack de 50 g.
 - Densidad: 1.2 g/cm³
- Tereftalato de Polietileno (PET -PETG): Taulman T-Glase (PETT)
 - Diámetro de fibra: 1.75 mm
 - Formatos: Bobina de 0.45 kg o pack de 50 g.
 - Densidad: 1.2 g/cm³

3.7.4. Resinas UV

La resina UV de 405nm destinada para la impresora **Anycubic Photon Mono X**, es posible encontrarla en la misma página web del fabricante, donde se ofrecen diversas variantes:

- **Resinas orgánicas:** Biodegradables y basadas en aceites vegetales, sensibles a luces UV con longitudes de onda en el rango 355nm-405nm.
- **Resinas profesionales de moldeo:** Optimizan el proceso de impresión, así como aumentan la calidad y rigidez de los modelos impresos, el proceso de limpieza posterior a la impresión. Son altamente estables a las variaciones climáticas del entorno circundante.
- **Resinas traslúcidas:** Su rendimiento es equiparable al del grupo anterior de resinas, salvo la diferencia de su apariencia traslúcida.
- **Resinas especiales para fundición destinadas a piezas dentales:** Soportan temperaturas superiores a 950°C durante más de media hora. También existe una variante que no es apta para fundición.

3.8. VISUALIZACIÓN DEL FLUJO

3.8.1. Opción 1: Cámara de alta velocidad.

- Fabricante: **PCE Instruments**
- Modelo: PCE-HSC 1660
- Peso: 180 g sin objetivo.
- Dimensiones: 80 x 74 x 40 mm
- Funciones: Grabación del comportamiento del flujo de niebla dentro del túnel de viento.
- Cuota de grabación: Entre 210 FPS (a 1280 x 1024 píxeles) y 2420 FPS (a 256 x 256 píxeles).
- Condiciones ambientales de operación: Entre 0°C y 40°C de temperatura y un máximo de 80% HR. Estas condiciones de operación no serán un problema para la cámara, dado que se ubicará fuera del túnel de viento apuntando a la cámara de ensayos.
- Posibles variantes de objetivos (opcionales y con compra aparte):
 - Distancia focal de 50 mm.
 - Distancia focal de 25 mm.
 - Distancia focal de 4 mm.



Ilustración 69. Cámara de alta velocidad PCE-HSC 1660. Fuente: PCE Instruments.

3.9. SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE AGUA

La idea de desarrollar un sistema de recolección de agua reside en la necesidad de los investigadores de este ámbito en conocer en todo momento el flujo de agua entrante, saliente y que es interceptada por las mallas, así como aquella que se queda adherida a las paredes del túnel y no es capaz de llegar a la cámara de ensayos o aquella que es capaz de llegar a la cámara, pero no es captada y queda retenida en el tramo de expansión (difusor). En el diagrama de flujo mostrado abajo se explica más detalladamente el propósito de este sistema.

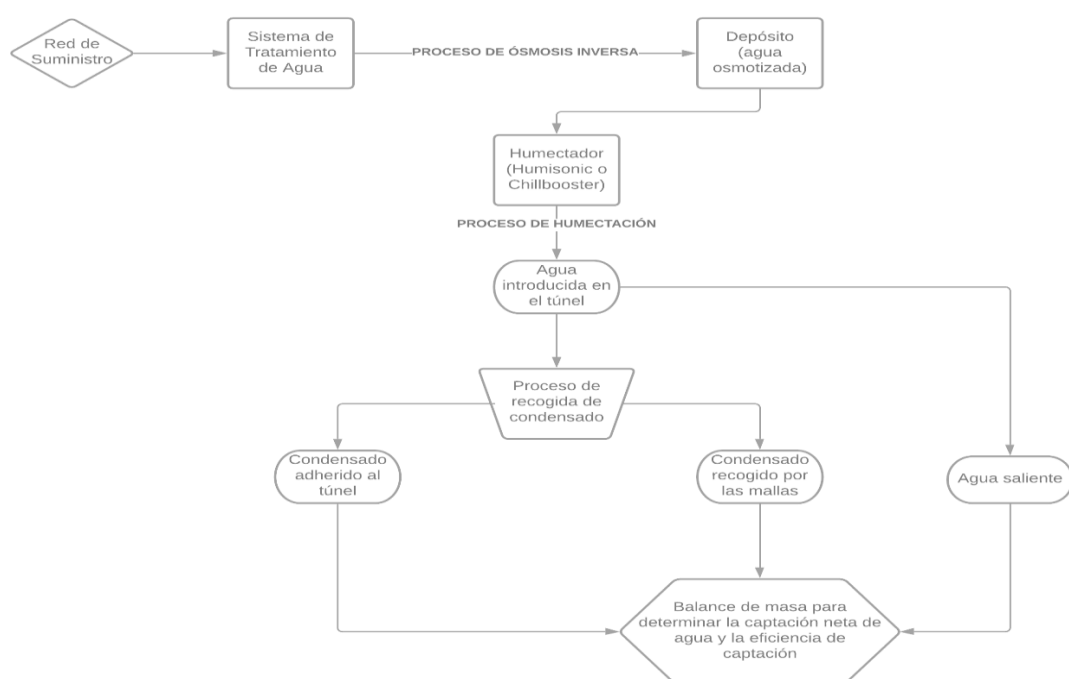


Ilustración 70. Diagrama de flujo en el que se explica el funcionamiento del sistema de recolección de agua propuesto para el túnel de viento, así como su propósito final. Fuente propia.

3.9.1. COLECTOR DE AGUA

Las propuestas para el colector de agua se basan principalmente en la simplicidad y la funcionalidad. En artículos científicos apoyados en el método experimental, en el que ensaya un túnel de viento por el que discurre un caudal de niebla, se ha podido corroborar la manufactura e implementación sencilla de sistemas de recolección de agua, abarcando diseños simples, desde embudos acomodados debajo de la malla de captación, hasta otros diseños más elaborados, como placas curvadas de polímero con tratamiento hidrofóbico, que canalizan las gotas captadas por la malla hasta depósitos aguas abajo del colector.

- Propuesta 1: Colector prismático con tubería de canalización.
 - Material: PET impregnado de una capa de solución hidrofóbica.
 - Ubicación: Debajo de la cámara de ensayos. Su ancho abarca todas las ranuras para evitar fugas de agua.
 - Principio de funcionamiento: Durante los ensayos, las gotas captadas por las mallas descenderán por gravedad y caerán hacia el colector; una vez se alcance la zona donde se halla la tubería (donde irá fijada la manguera), se realizará un trasvase por gravedad progresivo hasta el depósito aguas abajo del sistema.
- Propuesta 2 (vista en el apartado 3.9.2.): Bandeja de recogida de condensados comercial cuyo uso es propio de sistemas de aire acondicionado. Permite el desahogo del agua acumulada mediante un inserto para tubería en un lateral.

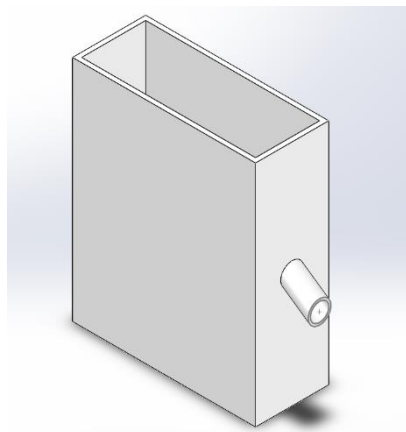


Ilustración 71. Isometría del colector de condensado propuesto. Fuente propia.

3.9.2. BANDEJAS DE RECOGIDA DE CONDENSADOS.

Esta pieza, apoyada en la bancada y dispuesta de un acople para una tubería de desahogo, se propone para recoger los condensados no deseados en los tramos previos a la cámara de ensayos. Es el mismo modelo que se ha planteado en la propuesta 2 del apartado anterior, dado que su reducido espesor la hace idónea para recoger el condensado evacuado entre la nueva sección del túnel y el cono de contracción.



Ilustración 72. Bandeja de drenaje con desahogue lateral de \varnothing 14 mm para condensados. Fuente: algsistemas.com

3.9.3. TUBERÍAS.

En cuanto al medio de transporte del agua desde la cámara de ensayos al recipiente de recolección, simplemente es necesaria una tubería que sea capaz de transportar el agua desde el colector hasta el depósito de almacenamiento.

Para este propósito se ha propuesto una tubería flexible destinada al riego y uso agrícola, que se puede conseguir por un precio asequible en cualquier ferretería / grandes superficies.

Modelos:

- Tubería flexible de Ø 25 mm.
- Tubería flexible de Ø 14 mm de pared interior (para la bandeja de recogida de condensado).

Características:

- Longitud: 25 m (Es posible cortar a medida).
- Diámetro exterior: 25 mm
- Espesor de pared: 2.3 mm

3.9.4. RECIPIENTE DE RECOLECCIÓN

Se recomienda un depósito que posea en su parte inferior una llave de abastecimiento, de modo que el agua recolectada pueda ser accesible fácilmente en caso de que se quiera realizar ensayos de calidad.

Dependiendo de la duración de los ensayos con mallas, se recomienda también emplear depósitos de mayor o menor volumen. Para este proyecto se recomienda un intervalo de depósitos de 10 a 50 litros, en función del propósito o estudio que se vaya a realizar.

3.9.5. ASPIRADORA DE LÍQUIDOS.

Este aparato se plantea para el proyecto para aquellos casos en los que no todo el condensado pueda evacuarse por las aberturas de desahogo del tramo de absorción y el cono de contracción (o que el agua adherida no pueda ser evacuada debido a la succión del ventilador), y para que la limpieza del agua

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

restante adherida a las paredes del conjunto de piezas del túnel de viento sea rápida y sencilla. Como aclaración, se propone para sí, tras una prueba con el túnel de viento operativo en su totalidad (lanza humectadora en funcionamiento) y habiéndole aplicado a las paredes interiores del túnel algún tipo de pintura impermeabilizante o sustancia hidrofóbica, éste sigue presentando residuos de agua en cualesquiera de sus componentes principales.

Siguiendo esta línea, proponemos como punto de partida un aspirador versátil, con potencia suficiente para succionar agua, con una manguera de un tamaño discreto para facilitar la limpieza de todas las secciones del túnel de viento y con la longitud suficiente para realizar el trabajo con comodidad. Se propone el modelo Conga WET&DRY de Cecotec:

- Potencia: 1400 W.
- Apto para: Sólidos y líquidos.
- Posee un depósito de almacenamiento de 15 l.
- Filtrado HEPA y radio de acción de 7 m.



Ilustración 73. Cecotec Conga WET&DRY. Fuente: www.storececotec.com

3.9.6. BALANZA DE LABORATORIO

3.9.6.1. Opción 1. Balanza de precisión con capacidad para 30 kg.

- Fabricante: **PCE Instruments**
- Modelo: PCE-SD 30 SST C
- Dimensiones de la plataforma de pesaje: 400 x 500 mm
- Rango de pesaje: Desde 200 g hasta 30 kg.
- Resolución: 10 g.
- Rango de temperaturas de aplicación: -10°C hasta 40°C.

3.9.6.2. Opción 2. Balanza de precisión con capacidad para 60 kg.

- Fabricante: **PCE Instruments**
- Modelo: PCE-SD 60 SST C
- Dimensiones de la plataforma de pesaje: 400 x 500 mm

- Rango de pesaje: Desde 400 g hasta 60 kg.
- Resolución: 20 g.
- Rango de temperaturas de aplicación: -10°C hasta 40°C.

Ambos modelos de balanza se consideran adecuados para el uso previsto en el Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, dado que abarcan un rango de medición considerable y una alta resolución de medida. Por tanto, cualquiera de los dos modelos es apto para su propósito de medir el agua recolectada por los captadores planos durante los estudios en el laboratorio.

4. JUSTIFICACIÓN EN LA ELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN. CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN ELEGIDA

- Anemómetro: Debido a la implementación de la tecnología de hilo caliente, mediante el anemómetro escogido es posible realizar medidas de alta precisión en cuestión de segundos. Otros anemómetros barajados no tenían esta tecnología implementada, lo que en tiempo de lectura se traduce en esperar aproximadamente 1 minuto para obtener una lectura estable y confiable, o en sus limitados rangos de trabajo en lo que a humedad se refiere, lo que a largo plazo incurriría en fallos técnicos y/o rotura del instrumental.
- Manómetro: A diferencia de otros modelos investigados, el escogido posee una cuota de medición y una resolución excepcional para el uso de baja velocidad (10 Hz y 1 Pa respectivamente). De igual manera, su construcción destinada a la medición en conducciones con líquidos es idónea para el proyecto, debido a que no es necesario tener en cuenta las futuras roturas de la sonda por acción prolongada de altos porcentajes de humedad relativa.
- Termohigrómetro: Aunque los humidificadores escogidos ya contengan una sonda de control de humedad, se ha considerado oportuno incluir un termohigrómetro por dos razones fundamentales:
 - Es posible obtener una lectura de apoyo y realizar comparaciones respecto de las lecturas obtenidas con el

higrómetro de control, y así poder comprobar con mayor seguridad el contenido de humedad en el aire antes del comienzo de cualquier ensayo.

- Por otra parte, es posible obtener lecturas adicionales de la variación de la humedad tras el paso por las mallas dispuestas en la cámara de ensayos (en el difusor, por ejemplo).
- **Impresoras 3D:** Dado que este Trabajo de Fin de Grado está orientado a instrumentar el túnel de viento de un organismo de investigación, se ha considerado viable y de mucha utilidad el disponer de dos unidades de impresión 3D (con su correspondiente software de gestión de impresiones y de modelado, así como material de impresión) que permita imprimir mallas en un amplio rango de materiales y geometrías (aparte de las que se puedan disponer de manera directa mediante proveedores), así como de tener la posibilidad de realizar prototipado rápido para cualquier pieza necesaria en el túnel de viento, u otra aplicación que se crea oportuna.
- **Cámara de alta velocidad:** Se ha podido observar en otros Trabajos de Fin de Grado que el modelo escogido posee buenas cualidades técnicas, además de que su variedad de objetivos permite realizar diversos estudios visuales de la interacción del flujo de niebla con las mallas de captación. Por otra parte, si se busca una observación más directa de los ensayos, es necesario contar con dispositivos que disipen las condensaciones en la lente y protejan al cuerpo de la cámara del alto grado de humedad.
- **Balanza de pesaje:** En un inicio se barajó incluir una balanza de gran capacidad, superior a 50 kg, para ensayos de captación de niebla de larga duración. En su lugar, se ha escogido una balanza de 30 kg debido a que posee una mejor resolución y precisión (10g frente a 20g), con la que es posible controlar mejor el contenido de agua líquida recogido mediante los ensayos.
- **Humidificadores:** La razón principal por la que se han elegido los dos humidificadores es porque, además de cumplir con los requisitos de aporte de humedad (**0.008-0.32 g/s**), tienen multitud de opciones extra

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

para ser implementadas en los estudios de captación de niebla, que ayudarían a su ejecución en gran medida. Además, ambos sistemas poseen un tiempo y distancia de absorción de gota bastante reducidos, lo que se ajusta muy bien a las necesidades de un túnel compacto, como es el que se estudia a lo largo de este TFG.

Finalmente, hay que destacar que la instrumentación elegida, o bien viene con su propio software de tratamiento de datos, o posee puertos de conexión para el vaciado de datos en una computadora.

CAPÍTULO III: ENSAYOS VIRTUALES DE VERIFICACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

1. MODELADO DEL TÚNEL DE VIENTO.

Con la finalidad de llevar a cabo los ensayos, se empleará el programa **SolidWorks**, tanto para modelar y ensamblar cada pieza que conforma el túnel de viento, como para establecer condiciones de contorno, simular y realizar un tratamiento posterior de los datos obtenidos tras los ensayos computarizados.

Este programa, cuya característica principal destaca por su gran versatilidad e interfaz intuitiva para el diseño mecánico, también ofrece grandes posibilidades a la hora de trabajar con dos de sus herramientas de trabajo, que han sido las empleadas para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado:

- **SOLIDWORKS CAD 3D:** Este módulo del programa compone una cantidad muy amplia de funciones, tanto básicas como avanzadas para facilitar el modelado de piezas mecánicas de todo tipo, crear ensamblajes y generar planos, entre otras funcionalidades destinadas a validación, gestión y comunicación de proyectos.
- **SOLIDWORKS SIMULATION:** El segundo y último complemento que se ha empleado en este TFG contiene opciones para realizar ensayos estáticos de carga, ensayos térmicos, de frecuencias propias, pandeo, caída, fatiga y ensayos para validación de recipientes a presión. Por otra parte, es posible realizar estudios de diseño y aplicar la dinámica no lineal.

De manera mucho más concreta, dentro de todos los aspectos que conforman el complemento **SOLIDWORKS SIMULATION**, se han usado las herramientas **FloXpress®** y **Flow Simulation®**, aunque es importante saber diferenciarlas de cara a su uso posterior:

- **FloXpress®** se emplea comúnmente en las primeras etapas de diseño como herramienta básica de validación que proporcionará información de trayectorias y velocidades de flujo aproximadas en fluidos como el agua o el aire.
- Por otra parte, **Flow Simulation®** se trata de una herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de mayor complejidad y precisión, tanto en la definición de funciones, como de resultados y condiciones de contorno.

Requiere un mayor conocimiento del software, pero si se conoce debidamente, se pueden llegar a obtener resultados muy satisfactorios. De hecho, no sólo es exclusivo para fluidos, sino también permite analizar sucesos de transferencia de calor varios, como conducción térmica en sólidos, convección entre sólido y líquido, y radiación.

1.1. PARÁMETROS DE DISEÑO Y MODELADO DE PIEZAS.

Los parámetros geométricos para el diseño del túnel de viento serán relevantes en los estudios mostrados más adelante debido a que, a pesar de que este túnel ya está construido, será necesario modelar cada una de las piezas que lo conforman con la mayor fidelidad a la realidad posible, de cara a obtener resultados que no estén falseados por un modelado virtual erróneo.

Como resumen previo a los requisitos de diseño y modelado / ensamblado posterior de las piezas que conforman el conjunto de nuestro túnel de viento, destacaremos sus aspectos constructivos más importantes:

- Tipología: Túnel de viento abierto con cámara de ensayos cerrada (Tipo NPL).
- Componentes y materiales de fabricación: Cono de contracción, cámara de ensayos (metacrilato), difusor y sección de aspiración. Excepto la cámara de ensayos, el resto de las partes están fabricadas de acero galvanizado.
- Condiciones de operación:
 - Velocidad de flujo: Entre 2 y 8 m/s.
 - Humedad relativa: 100%
 - Temperatura: 19 °C.
- Parámetros de niebla:
 - Tamaño de gota: Intervalos de 1-5 micras y 5-50 micras.
 - Contenido de agua líquida: 0.1-1 g/m³

Respecto a la tipología del túnel de viento es necesario realizar una aclaración: si bien es cierto que se parte de una base en la que se tiene un túnel tipo NPL, algunas de las piezas que se desarrollarán y simularán en apartados posteriores variarán esa morfología típica que tienen este tipo de túneles abiertos; por lo que, en cuanto a diseño se refiere, la bibliografía convencional no contempla este tipo de aplicaciones singulares, convirtiéndose así en un problema de diseño por iteración.

1.2. MODELADO Y ENSAMBLADO DE COMPONENTES

En este apartado se desglosarán los aspectos constructivos de cada elemento del túnel de viento de manera resumida de cara al posterior ensamblado y modelado del mismo. Dado que a efectos de ensayos aerodinámicos la bancada no es un elemento relevante, se omitirá su modelado y ensamblado dentro del conjunto final.

1.2.1. TRAMO DE ABSORCIÓN / SECCIÓN DE HUMIDIFICACIÓN

Tal y como se ha descrito en el Capítulo II, esta nueva pieza se ha diseñado con el principal objetivo de favorecer la creación de los perfiles de velocidad óptimos para la atomización del agua del humectador ultrasónico, y de alojar la lanza humectadora. Por tanto, como premisas de partida para el diseño, nos hemos basado en cálculos teóricos con la Ecuación de Continuidad para discernir en qué puntos se cumplen los requisitos de velocidad (1.5 m/s – 3 m/s).

Partiendo de la **ecuación 53**, ubicada en el Capítulo II para calcular los caudales máxicos máximos y mínimos de aire húmedo en función de las velocidades requeridas en la cámara de ensayos, se tomarán los caudales máxicos correspondientes a cada velocidad en esa zona y se hará su cociente con las posibles secciones que tendrá la ampliación del túnel. Asimismo, se supondrán las siguientes restricciones y/o hipótesis para el diseño:

1. Se intentará cumplir, en la medida de lo posible, las directrices y recomendaciones para el diseño de un difusor convencional y/o un difusor de gran angular según lo dispuesto en **Barlow (1999)**:
 - a. *“Un difusor de al menos tres o cuatro veces la longitud de la cámara de ensayos. El ángulo equivalente del cono se encuentra en el rango de 2 - 3.5° con los ángulos más pequeños siendo los más deseables. La relación de áreas es típicamente 2-3, de nuevo con los valores más bajos siendo los más deseables”.*
 - b. Por lo general, la relación de áreas se limita a 5:1 o 6:1 como máximo.
 - c. En cuanto a los difusores de gran angular, se emplean para obtener una mayor relación de áreas en contraposición a la recuperación de presión, y se definen como aquellos en los que su sección transversal aumenta tan rápidamente con la distancia axial que la separación de

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

la capa límite sólo puede evitarse mediante el control de las condiciones de borde (succión, aspiración o implementación de pantallas de malla).

2. Los aligeramientos para introducir la lanza humectadora deben emplazarse en aquellas secciones donde se aseguren las velocidades de flujo mencionadas con anterioridad.
3. Dentro de las posibilidades de espacio en los laboratorios del **Instituto Canario de Investigaciones Agrarias**, se planteará esta nueva pieza con un aumento de sección lo más progresivo posible para el flujo. De igual manera, debido a estas dimensiones adicionales, **se deberá plantear una bancada adicional**, acorde con las dimensiones de esta pieza.
4. En complemento al punto anterior, también se asegurará la compacidad de esta parte y, en consecuencia, del conjunto, en la medida en que el comportamiento de los diseños planteados lo permitan.
5. Cualquier cálculo teórico realizado para el dimensionado de la pieza se cotejará con simulaciones computarizadas para verificar la veracidad de los resultados obtenidos de cara a su puesta en funcionamiento a corto plazo.

Además, es preciso destacar que, la inclusión de una modificación de este tipo en un túnel de viento abierto con cámara de ensayos cerrada es de carácter novedoso, dado que altera la estructura estándar de un túnel de viento de estas características y en cierto modo varía el comportamiento del flujo a lo largo del sistema.

Tabla 9. Velocidades en las diferentes secciones transversales del tramo de absorción en función de la velocidad de flujo requerida en la cámara de ensayos.

Velocidades de flujo en el tramo de absorción en función del caudal másico y la sección transversal

Datos asociados al flujo		Secciones del tramo de absorción (cm ²)				
Velocidad en la cámara de ensayos	Caudal másico asociado	(17 x 17)	(20 x 20)	(30 x 30)	(40 x 40)	(50 x 50)
2 m/s	0.0959 kg/s	2.77 m/s	2 m/s	0.89 m/s	0.5 m/s	0.32 m/s
3 m/s	0.1438 kg/s	4.15 m/s	3 m/s	1.33 m/s	0.75 m/s	0.48 m/s
4 m/s	0.1917 kg/s	5.54 m/s	4 m/s	1.77 m/s	1 m/s	0.64 m/s
5 m/s	0.2397 kg/s	6.92 m/s	5 m/s	2.22 m/s	1.25 m/s	0.8 m/s

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

6 m/s	0.2876 kg/s	8.3 m/s	6 m/s	2.67 m/s	1.5 m/s	0.96 m/s
7 m/s	0.3355 kg/s	9.69 m/s	7 m/s	3.11 m/s	1.75 m/s	1.12 m/s
8 m/s	0.3835 kg/s	11.07 m/s	8 m/s	3.56 m/s	2 m/s	1.28 m/s

Partiendo de los resultados obtenidos en la tabla 9, hemos extraído las siguientes conclusiones de cara al diseño del tramo de absorción:

1. Esta ampliación del túnel de viento cumple **teóricamente** con los perfiles de velocidades necesarios para una correcta humectación mediante el dispositivo ultrasónico **Humisonic**.
2. Las secciones transversales planteadas para el emplazamiento de la lanza humectadora que han mostrado resultados satisfactorios se pueden agrupar en tres grupos (señalados en verde):
 - a. Emplazamientos de baja velocidad: Sección de 20 cm x 20 cm.
 - b. Emplazamientos de media / alta velocidad: Sección de 30 cm x 30 cm.
 - c. Emplazamientos de alta velocidad: Sección de 40 cm x 40 cm.
3. Si así se desea, es posible emplazar aligeramientos para introducir las lanzas en las secciones de 25 cm x 25 cm y de 35 cm x 35 cm, en las que teóricamente también se cumpliría con las velocidades requeridas por el dispositivo humectador.

Con los datos obtenidos, se procede a modelar la pieza para su posterior simulación.

Restricciones de diseño:

- Debe estar provisto de aligeramientos para poder alojar la lanza de humectación ultrasónica y para anclar el humectador Humisonic.
- Debido a que esta pieza debe acoplarse al cono de contracción, su sección no puede ser constante (62 cm x 62 cm), debido a que no cumpliría los requisitos de velocidad para una humectación adecuada. Por tanto, su geometría debería ser equiparable a la de un difusor.
- Debido a la restricción impuesta por el punto anterior, debe tener una longitud suficiente para una expansión óptima y progresiva del flujo sin causar desprendimiento de capa límite ni vorticidad (fenómenos que pueden afectar negativamente al funcionamiento de las lanzas humectadoras), o minimizándolo, pero sin incurrir en una longitud excesiva que pueda causar un sobredesarrollo

de la capa límite. En contraposición, se debe asegurar en la medida de lo posible la compacidad de la pieza para una manipulación sencilla y ahorro en coste y espacio.

- Aligeramientos para introducir la lanza de humidificación ultrasónica:
 - Ubicación teórica: Sección de 40 cm x 40 cm, de 30 cm x 30 cm y de 20 cm x 20 cm (Según la **Tabla 9**).
 - Diámetro: 35 mm, dimensionados para la lanza.

Finalmente, tras abordar con estos datos e hipótesis de trabajo de partida el diseño, nos hemos encontrado con un período de iteración en el que se ha trabajado con las siguientes variantes:

1. Un difusor de gran angular de entre 0.775 m (longitud igual a la del cono de contracción) y 1.5 m de longitud con una **relación de áreas de 9.61 o 13.3**. Tras realizar este abanico de simulaciones sabemos que:
 - A pesar de que en régimen transitorio (entre 1 y 5 segundos) los ensayos apuntan a que el flujo a bajas velocidades sufre un desprendimiento de la capa límite, pero posee un perfil de velocidades adecuado, a altas velocidades y en régimen estacionario el desprendimiento de la capa límite causa importantes turbulencias, tanto a altas como a bajas velocidades de flujo en la cámara de ensayos, que afectan a la uniformidad teórica del perfil de velocidades en las piezas previas a ésta.
 - La implementación de una entrada más estrecha (17 cm x 17 cm) causa una aceleración notable del flujo al inicio de la pieza y que el consecuente perfil de velocidades sufra problemas de estabilización a los valores teóricos, impidiendo implementar a altas velocidades ubicaciones para la lanza humectadora ultrasónica.
 - Es importante mencionar que las piezas planteadas en este abanico de ensayos no son típicos difusores de gran angular, dado que la relación de áreas es superior que la recomendada en **Barlow (1999)**. Esto se debe a que la sección de entrada del cono de contracción es un parámetro fijo (62 cm x 62 cm).

Dado el efecto negativo en el perfil de velocidades que supone implementar un estrechamiento tan abrupto a la entrada (17 cm x 17 cm). En adición, tomando en cuenta ángulos de conicidad típicos para difusores convencionales (entre 2.5° y 7°), esta admisión de aire estrecha también supuso problemas en las versiones de menor longitud, por lo que, **para futuros ensayos**, se mantendrá la sección transversal de entrada a 20 cm x 20 cm.

2. Examinar el comportamiento en geometrías típicas de difusores convencionales, con los valores de conicidad mínimos y máximos recomendados y sus valores intermedios (entre 2.5° y 7°):
 - Longitud de 4.3 m y 4 m (Ángulo de conicidad de 2.79° y 3° respectivamente): El reducido ángulo de conicidad de esta pieza permite al flujo seguir un curso normal y una evolución del perfil de velocidades esperado sin apenas desprendimiento de la capa límite, excepto para 7 m/s y 8 m/s en la cámara de ensayos, donde el desprendimiento de la capa límite se hace más notable, sin suponer graves impedimentos para la operación de esta pieza. Por otro lado, a bajas velocidades el desarrollo de la capa límite es significativo.
 - Longitud de 3.68 m (Ángulo de conicidad de 3.26°): Presenta una evolución similar al modelo anterior aunque, al tener 62 cm menos de longitud se aprecia una ligera disminución en el desarrollo de la capa límite. Los perfiles de velocidad son favorables de cara a la introducción de la lanza humectadora.
 - Longitud de 3.22 m (Ángulo de conicidad de 3.73°): Para caudales máxicos correspondientes a una velocidad en la cámara de ensayos de entre 2 m/s y 6 m/s el flujo muestra un comportamiento aceptable; a pesar de que en todos los casos se produce un ligero desprendimiento de la capa límite, sigue un perfil de velocidades adecuado para implementar las lanzas humectadoras. Para los dos últimos casos (7 m/s y 8 m/s en la cámara de ensayos) el desprendimiento se hace más notable, generando gran cantidad de turbulencias y afectando significativamente a una distribución previsible del perfil de velocidades.

- Longitud de 3 m (Ángulo de conicidad de 4°): Para caudales máxicos correspondientes a una velocidad en la cámara de ensayos de entre 2 m/s y 6 m/s el flujo muestra un comportamiento aceptable; a pesar de que en todos los casos se produce un ligero desprendimiento de la capa límite, sigue un perfil de velocidades adecuado para implementar las lanzas humectadoras. Para el caso en el que se tienen 7 m/s y 8 m/s en la cámara de ensayos el desprendimiento de la capa límite sea más notable. En cualquiera de los casos las condiciones de circulación del flujo son aptas para la inclusión de las lanzas humectadoras.
- Longitud de 2.5 m y 2 m (Ángulos de conicidad de 4.8° y 6° respectivamente): Partiendo desde simulaciones con el caudal máxico que otorga las velocidades mínimas en la cámara de ensayos, el desarrollo del flujo es indeseable de cara a una correcta humectación: el desprendimiento de la capa límite es evidente y la turbulencia del flujo impide, o bien que se tengan garantías de una humectación exitosa, o que existan dificultades para emplazar las lanzas de una manera coherente y ordenada.

Aspectos constructivos finales tras varias iteraciones de diseño:

- Longitud final: 3 m
- Ángulo de conicidad final: 4°
- Sección transversal interna a la entrada: 20 cm x 20 cm.
- Espesor de pared: 5 mm (espesor de la chapa de acero galvanizado).
- Sección transversal de salida:
 - 62 cm x 62 cm en el interior.
 - Perímetro exterior del marco de ajuste: 70 cm x 70 cm. Para poder realizar un ajuste correcto con el cono de contracción es preciso contar con un marco de ajuste de las mismas dimensiones en el cono de contracción.
- Material: Acero galvanizado. Tal y como se ha tratado en el capítulo II, es un material idóneo para trabajar en entornos húmedos, debido a su excelente resistencia a la corrosión y la baja necesidad de mantenimiento. Además, se ha escogido este

material en detrimento del Acero inoxidable para mantener la homogeneidad del conjunto.

- Sujeción entre las piezas: Pernos de M10.

1.2.2. PIEZA PARA RECOGIDA DE CONDENSADO ENTRE EL TRAMO DE ABSORCIÓN Y EL CONO DE CONTRACCIÓN.

Dado que durante el período de operación del túnel de viento la lanza humectadora se ubicará en alguno de los aligeramientos planteados, durante el proceso de humidificación existe la probabilidad de que, o bien parte del agua atomizada no se integre correctamente en el flujo de aire, o que parte de esta agua se quede adherida a las paredes de cualquiera de las piezas del túnel. Por este motivo se ha planteado una abertura que permitirá evacuar esta agua hacia una bandeja de condensado.

El diseño planteado para esta pieza consiste en dos marcos de acero galvanizado que se anclarán tanto a la sección de humidificación tanto como al cono de contracción.

Estos marcos serán de las mismas dimensiones que los marcos de las piezas a las que irán fijados y tendrán un espesor de 5 mm, siendo de acero galvanizado. Además, carecerán de cierre inferior, por lo que una vez montados queda una abertura de 10 mm por la que se realizará el trasvase de agua entre el túnel y la bandeja de recogida de condensado.

- Espesor de chapa: 5 mm.
- Material: Acero galvanizado.
- Medio de fijación: Pernos M10.

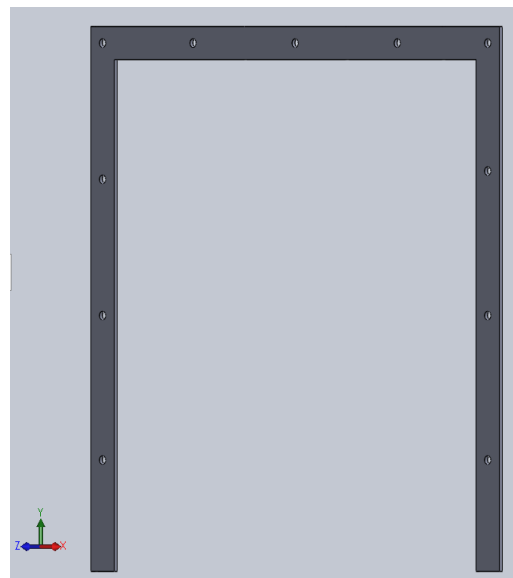


Ilustración 74. Perspectiva del marco para precipitación de condensado. Fuente propia.

1.2.3. CONO DE CONTRACCIÓN.

Aspectos constructivos:

- Longitud: 77.5 cm
- Ángulo de conicidad: 15.16°
- Sección transversal de entrada: 62 cm x 62 cm

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Sección transversal de salida: 20 cm x 20 cm
- Relación entre áreas: 9.61. Cumple la relación entre secciones transversales de entrada y salida establecida por **Barlow (1999)**, comprendida en un intervalo de 6-10.
- Material: Acero galvanizado.
- Medio de fijación: Pernos M10.

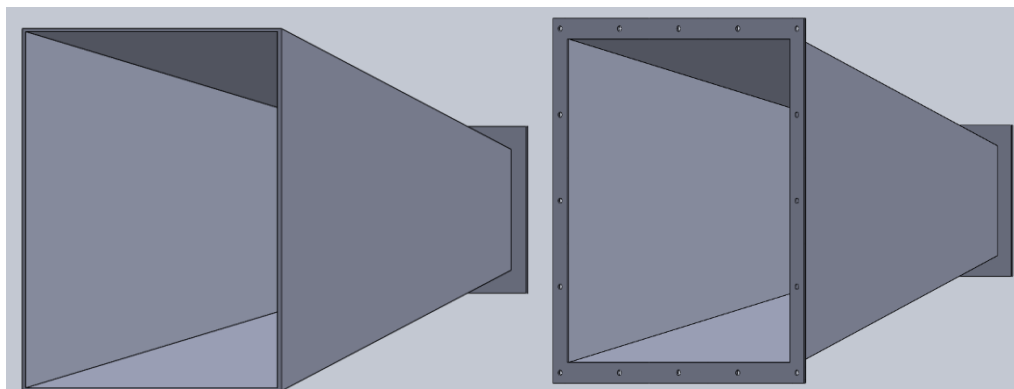


Ilustración 75. Perspectiva del cono de contracción inicial modelado en comparación con el cono de contracción con su modificación implementada para unirse a otras piezas. Fuente propia.

1.2.4. CÁMARA DE ENSAYOS

Aspectos constructivos:

- Sección transversal: 20 cm x 20 cm.
- Longitud: 40 cm
- Ranuras para la introducción de las mallas:
 - Cantidad: 3
 - Ubicación: Una ranura justo en la mitad de la cámara y dos ranuras simétricas desde el plano medio de la primera, separadas 15 mm entre ejes. Se ubican en tres de los cuatro laterales de la cámara (superior, inferior y lateral derecho).
 - Dimensiones: Cubren todo el ancho exterior de la cámara de ensayos y tienen una anchura de 5 mm.
- Material: Metacrilato (PMMA).

- Medio de fijación: Pernos M8.

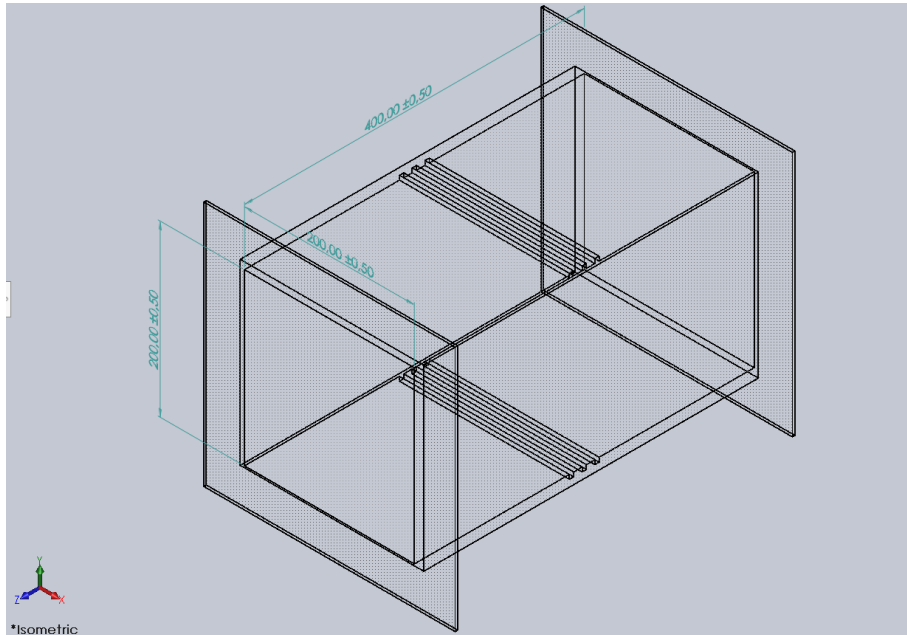


Ilustración 76. Isometría de la cámara de ensayos modelada con sus dimensiones, expresadas en milímetros. Fuente propia.

1.2.5. DIFUSOR

Aspectos constructivos:

- Longitud: 139 cm (1.39 m)
- Sección transversal de entrada: 20 cm x 20 cm
- Sección transversal de salida: 35 cm x 35 cm
- Relación de áreas (entre la sección de salida y la de entrada): 3,06. Según **Barlow (1999)** y **Bradshaw & Pankhurst (1964)**, se recomiendan las características constructivas presentadas anteriormente para un difusor convencional.

De este modo es posible afirmar con seguridad que las dimensiones del difusor cumplen con las recomendaciones técnicas contenidas en la bibliografía.

- Ángulo de conicidad: 3°. Este valor se ha fijado, para posteriormente obtener la longitud total del difusor, dado que se ha observado empíricamente según **Barlow (1999)** que éste es el que mejores resultados proporciona de todo el rango contemplado (1° - 7°).

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Material: Acero galvanizado.
- Medio de fijación: Pernos M8.

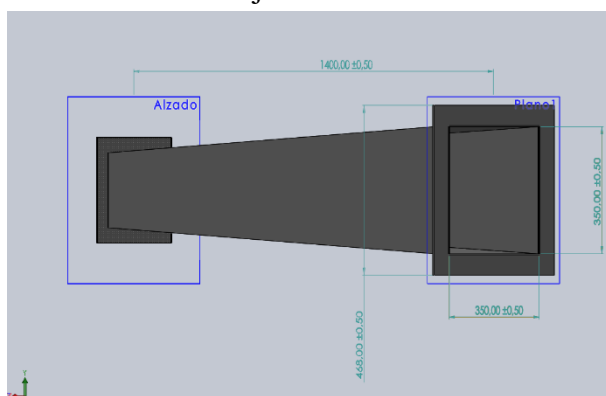


Ilustración 77. Perspectiva del difusor modelado, con sus dimensiones expresadas en mm. Fuente propia.

1.2.6. SECCIÓN DE ASPIRACIÓN (PENDIENTE DE FABRICACIÓN).

Aspectos constructivos:

- Longitud: 46 cm.
- Sección transversal: 38.5 cm x 38.5 cm
- Espesor de placa de anclaje: 4 cm
- Espesor de chapa: 1.5 mm
- Medio de fijación: Pernos M8.

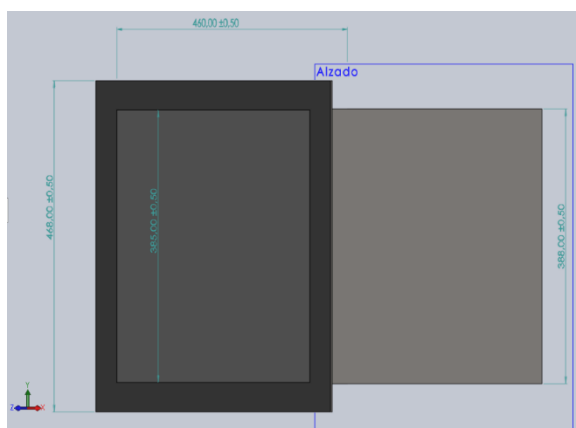


Ilustración 78. Perspectiva del modelo tridimensional de la sección de aspiración, con cotas expresadas en mm. Fuente propia.

1.2.7. ENSAMBLAJE DE COMPONENTES PARA EL TÚNEL INICIAL

Una vez se tienen todos los elementos modelados, se ensamblan de la forma que se aprecia en la imagen inferior; además, es preciso destacar que las aberturas exteriores de la sección de aspiración y del cono de contracción se han cerrado mediante tapas (lids), de tal manera que será posible a continuación definir sin mayor problema las condiciones de contorno y el volumen de control para los estudios posteriores, dado que se realizarán estudios de flujo interno.

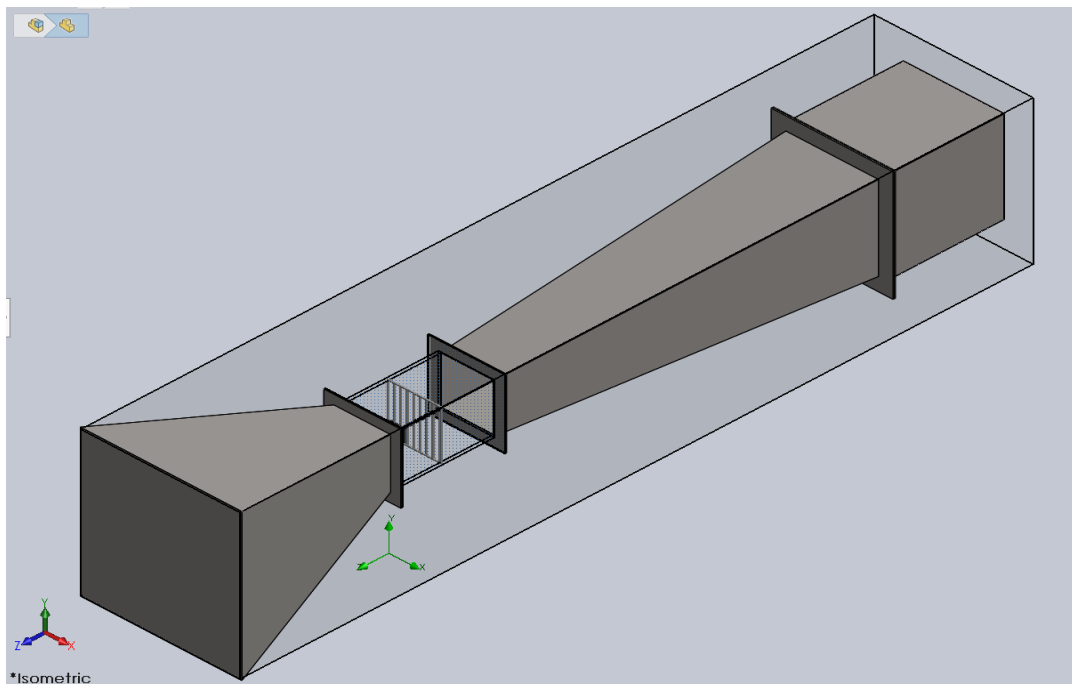


Ilustración 79. Isometría del diseño inicial del túnel de viento ensamblado, con sus correspondientes materiales asignados y una malla introducida a modo de ejemplo para visualizar su disposición durante los estudios. Fuente propia.

Las mallas que se colocarán en la cámara de ensayos tendrán una geometría variable en cuanto al diámetro y separación de los hilos, aunque siempre seguirán la misma topología: desde uno hasta tres marcos (como máximo) introducidos en las ranuras equiespaciadas en el interior de la cámara de ensayos. En cuanto a la versión modificada del túnel de viento, la inclusión de la pieza nueva supone un aumento de su longitud final, de los 3 m iniciales a los 6 m de la modificación, y su ensamblaje final queda de la siguiente manera:

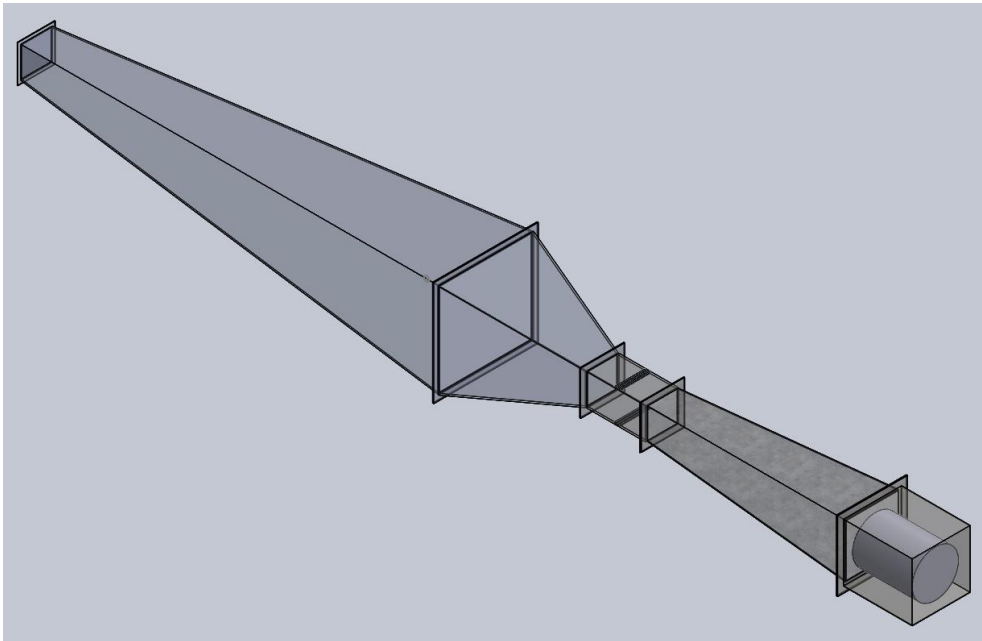


Ilustración 80. Perspectiva isométrica de la estructura actualizada del túnel de viento, en la que se incluye la nueva pieza dedicada a la inclusión de las lanzas humectadoras. Fuente propia.

2. ESTUDIOS VIRTUALES. SIMULACIÓN MEDIANTE CFD (SOLIDWORKS FLOW SIMULATION).

Tal y como se indica, a lo largo de este apartado se mostrarán los estudios simulados mediante software CFD, aplicados a dos objetivos principales:

- Los dos primeros, para comprobar que ambas geometrías del túnel (planteamiento inicial y modificación) se han plasmado correctamente en los modelos 3D y, en consecuencia, cumplen con los requisitos (perfiles de velocidad y de presiones) estipulados para el trabajo.
- El resto de las simulaciones se centrarán en comprobar los parámetros necesarios para una correcta generación de niebla en el túnel de viento, y en determinar los lugares idóneos para implementar la instrumentación (tubos de Pitot, anemómetros, sensores...).

2.1. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN DEL MODELO 3D INICIAL.

De cara a comprobar que el flujo de aire húmedo en el túnel de viento se comporta tal y como se ha previsto en los cálculos teóricos (mostrados más adelante, al tratar la modificación del túnel), se han realizado dos ensayos en SolidWorks con el módulo

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Flow Simulation®, para verificar que los perfiles de velocidad y de presiones se ajustan a los estudios previos realizados en este tema, cuyos cálculos y estudios de simulación se reflejan en el TFG que recoge los estudios iniciales realizados en esta línea de investigación “*Diseño y Construcción de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios relacionados con la Captación de Agua de Niebla*”.

Para corroborar dichas hipótesis en el módulo CFD de SolidWorks, hemos seguido el siguiente procedimiento:

1. En primer lugar, abrimos el ensamblaje del túnel de viento en SolidWorks y, en la pestaña *Tools*, hacemos click en *Flow Simulation*, *Project* y después, *Wizard*, para abrir el gestor de proyectos de **Flow Simulation®**.

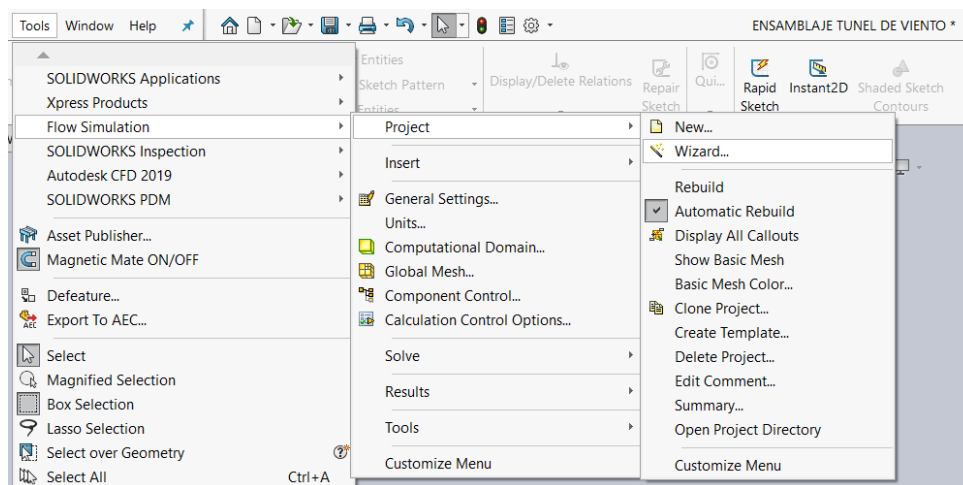


Ilustración 81. Pasos para acceder al gestor de proyectos en SolidWorks Flow Simulation. Fuente propia.

2. A continuación, una vez hemos hecho click en *Wizard*, aparecerá una ventana emergente donde, en primer lugar, deberemos introducir los datos del proyecto, como su nombre y las observaciones que el usuario crea necesarias.
3. En la siguiente sección aparecerá otra ventana en la que tendremos que definir el sistema de medidas del estudio a realizar. En nuestro caso, emplearemos el Sistema Internacional, por lo que haremos click en **SI**, y a continuación en **Next**.

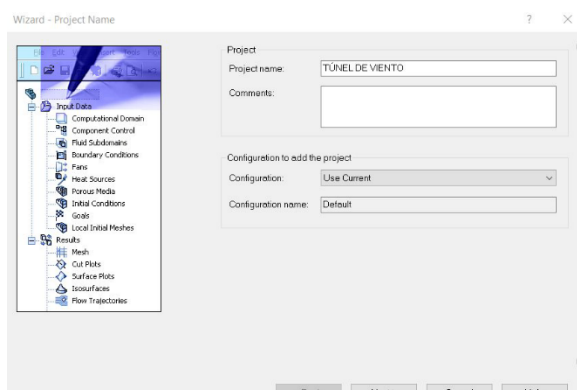


Ilustración 82. Primera ventana del gestor de proyectos, orientada a rellenar los datos del proyecto de simulación. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

4. Acto seguido, el programa le pide al usuario que seleccione el tipo de análisis. En nuestro caso concreto, realizaremos un análisis interno en el que se excluirán las cavidades sin flujo, y sin tener en cuenta la acción de la gravedad (un aspecto irrelevante de cara al comportamiento de las gotas de agua a su paso por el túnel de viento y a su interacción con las mallas, debido al tamaño de éstas).
5. Tras elegir el tipo de ensayo, es preciso definir tres últimos conceptos antes de poder detallar las condiciones de contorno del estudio:

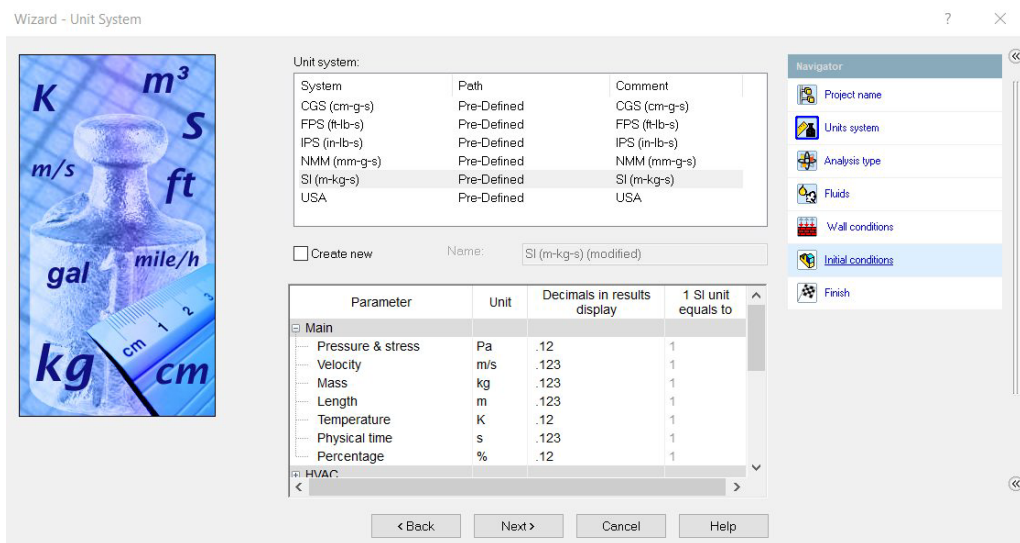


Ilustración 84. Ventana de selección del sistema de unidades. Fuente propia.

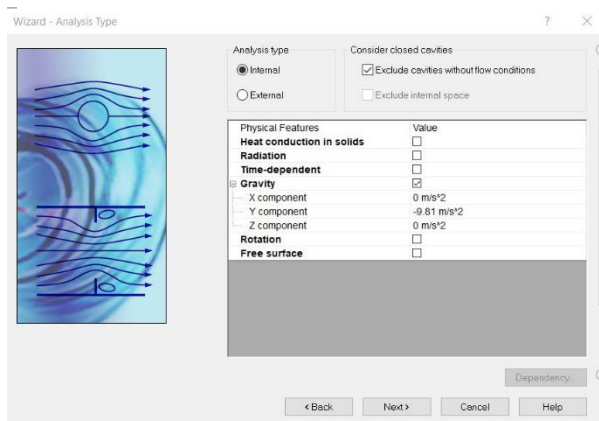


Ilustración 83. Selección del tipo de análisis. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- a. Default fluid: En esta ventana elegiremos el o los fluidos que intervendrán en nuestra simulación; para ello, haremos click dos veces encima del fluido deseado, y éste se incluirá en la lista *Project Fluids*. De manera análoga, podremos definir qué tipo de flujo intervendrá en la simulación (Laminar, turbulento, o ambos) y si se tendrá en cuenta la humedad en los estudios.

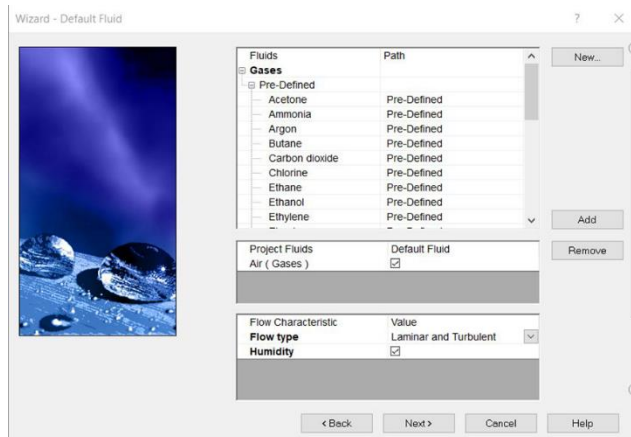


Ilustración 85. Selección de fluidos de trabajo. Fuente propia.

- b. Wall conditions: Tal y como indica su nombre, en esta ventana se hará selección de dos parámetros principales: la condición térmica del muro y su rugosidad en micras.

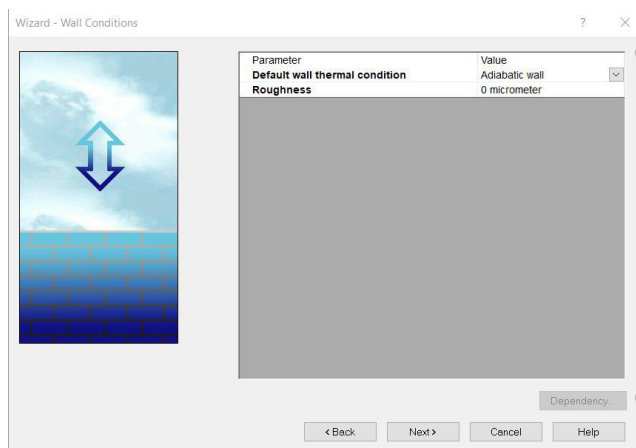


Ilustración 86. Selección de las condiciones de muro. Fuente propia.

- c. Por último, antes de comenzar el proceso de pre-procesado del estudio, se deberán elegir las condiciones iniciales del estudio:
- Velocidad inicial: 0 m/s. Este dato no se refiere a la velocidad del fluido de estudio, sino del modelo; de ahí a que se suponga como cero. El aire de partida será el aire atmosférico presente en la sala de ensayos, que posteriormente se mezclará con el agua atomizada por el humidificador.
 - Humedad: 100% de humedad relativa.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Presión: Atmosférica (101325 kPa).
- Temperatura: 19 °C (292.15 K)

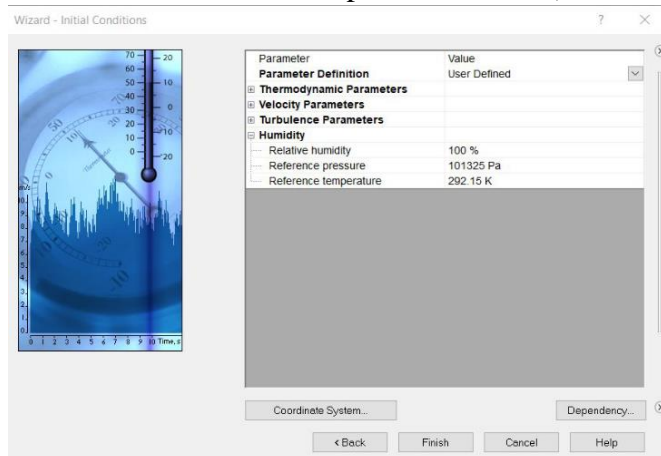


Ilustración 87. Condiciones Iniciales del Estudio. Fuente propia.

Ahora es posible definir, en primer lugar, las condiciones de frontera de nuestro estudio, para ello, accedemos al menú desplegable de la derecha y hacemos click derecho en *Boundary Conditions* y a continuación en *Insert Boundary Conditions*. Repitiendo esta operación dos veces, estipularemos las dos condiciones de contorno que requerirá el estudio previo.

Presión del entorno: Para definir esta condición de borde, en primer lugar, previamente debemos haber creado una tapa (lid en la nomenclatura de SolidWorks) en la entrada del cono de contracción, para que el programa pueda identificar sin problemas el volumen de control. Una vez se ha realizado este paso en la etapa de modelado, seleccionamos la cara interior de esta lámina y realizamos los siguientes ajustes:

- *Type – Pressure Openings – Environment Pressure.*
- *Thermodynamic Parameters:*
 - *Pressure:* 101325 Pa
 - *Temperature:* 292.15 K (19 °C)
 - *Humidity Parameters:*
 - Humedad relativa: 100% HR.

El resto de los parámetros se mantendrán por defecto.

Flujo másico del entorno: Para esto, seleccionamos la cara interior de la sección de aspiración (modelada previamente, al igual que con el cono de contracción). A continuación, seleccionamos *Flow Openings* y *Outlet Mass Flow*, introduciendo en *Flow Parameters* un flujo másico de niebla comprendido entre 0.0954 kg/s y 0.3835

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

kg/s, que son los caudales máxicos correspondientes al intervalo de 2-8 m/s en la cámara de ensayos. En este caso escogeremos los valores máxicos y mínimos para comprobar los perfiles de velocidades y presiones definidos para nuestros estudios.

Fan: Además, para realizar los estudios computarizados, deberemos definir el ventilador que se va a emplear en el túnel de viento. Para ello, es preciso seguir los siguientes pasos:

- Con el SolidWorks abierto, seguimos la siguiente ruta: Pestaña **Tools** → **Flow Simulation** → **Insert** → **Fan**
- Al seleccionar **Fan**, se abrirá un cuadro en el que escogeremos el tipo de ventilador y cómo se comportará dentro del modelo (definiendo unas condiciones de contorno). Dado que nuestro ventilador no se encuentra en la base de datos predeterminada de SolidWorks (**SODECA HBA – 31- 2T – 0.75**), haremos click en la opción **Create / Edit**.
- A continuación, aparecerá una ventana (**Engineering Database**) en la que se podrá modificar / añadir, tanto datos geográficos, como termodinámicos, físicos, mecánicos, electrónicos y, por supuesto, ventiladores de todo tipo de varios fabricantes incluidos de manera predeterminada. En este caso, deberemos hacer click en la opción **New Item** y, posteriormente, rellenar todas las características técnicas del ventilador, así como su curva característica.

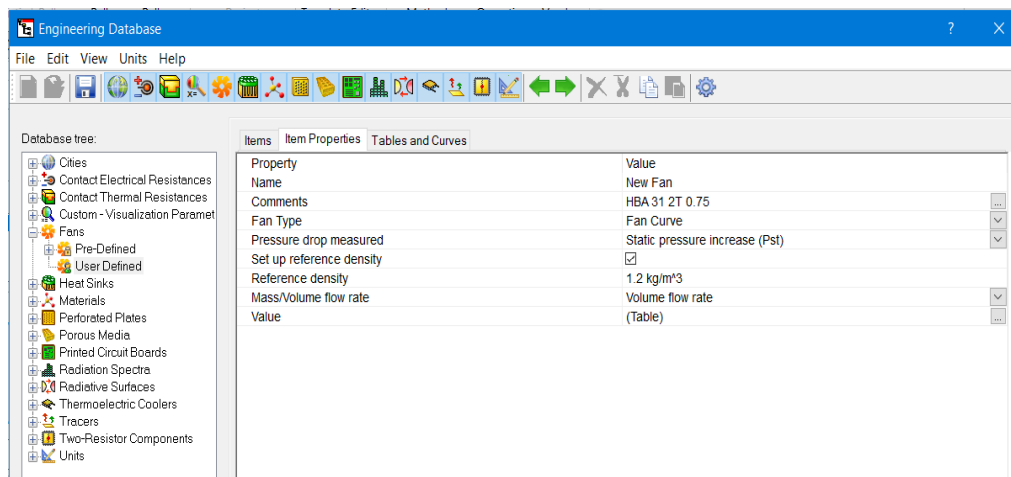


Ilustración 88. Definición de parámetros del ventilador. Fuente propia.

- La curva característica se ha incluido a partir de la existente en la ficha técnica del ventilador escogido, mediante un graficador, en el que se realizan los siguientes pasos:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Se definen los ejes X e Y, así como los valores máximos y mínimos de éstos y su escala.
- Dependiendo de la exactitud que se quiera tener en la curva característica, se hará click en un mayor o menor número de puntos. Estos puntos, posteriormente, se verán reflejados en una hoja de cálculo que deberemos introducir en la parte denominada *Tables and Curves*.

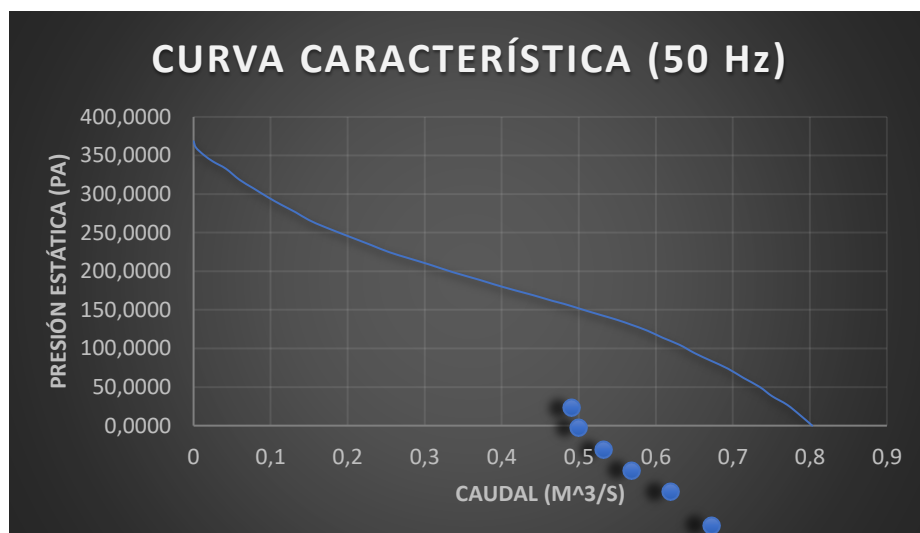


Ilustración 89. Curva característica del ventilador introducida en "Engineering Database". Fuente propia.

Una vez hemos realizado todos los pasos definidos anteriormente, llevaremos a cabo pruebas mediante simulación CFD de la estructura tridimensional del túnel de viento, para comprobar si cumple con los requisitos de distribución de velocidades y presiones.

2.1.2. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN PARA UN CAUDAL MÁSIKO COMPRENDIDO ENTRE 0.0959 kg/s. Y 0.3835 kg/s

Tal y como se indica en el título de esta sección, llevaremos a cabo una simulación del túnel de viento con un caudal másiko de aire, para comprobar que, en efecto, bajo estas condiciones, tendremos dentro de la cámara de ensayos una velocidad de flujo de 2 m/s y 8 m/s.

Para ello, en la sección *Outlet Mass Flow*, introducimos en *Flow Parameters* un flujo másiko de aire húmedo de 0.0959 kg/s y 0.3835 kg/s. El resto de los parámetros se dejarán tal y como se ha definido en la sección anterior.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Una vez realizado el pre-procesado, se procede a ejecutar el estudio. En la pestaña *Flow Simulation* seleccionamos la opción *Solve* y *Run*, en la que aparecerá un cuadro de diálogo (abajo):

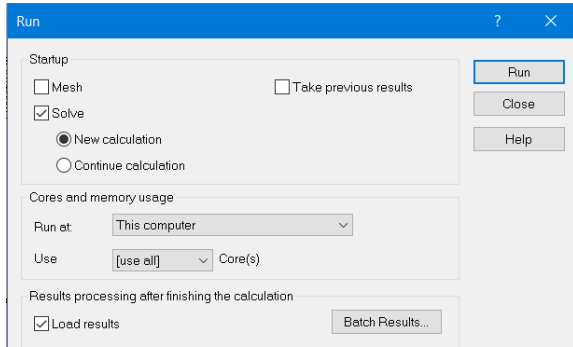


Ilustración 90. Ventana *Run*, destinada a definir las condiciones de resolución del estudio. Fuente propia.

En este cuadro de diálogo, seleccionaremos si se llevará a cabo el cálculo del estudio definido con anterioridad, el cálculo de la malla, o ambas. También es posible escoger el dispositivo en el que se realizarán los estudios y el número de núcleos de la CPU que se destinarán a la resolución de

la simulación CFD. En este caso se han seleccionado todos los núcleos disponibles en el ordenador, y el ordenador personal para la resolución.

Para la resolución de problemas en regiones fluidas, el complemento *Flow Simulation* resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes, un conjunto de formulaciones del principio de las leyes de conservación del momento lineal, de masa y de energía. Además, el complemento es capaz de considerar flujos laminares y turbulentos. Para distinguir flujos turbulentos se emplean las ecuaciones FANS (Favre – averaged Navier Stokes equations), donde los efectos promediados en el tiempo de las turbulencias dentro del flujo se consideran, mientras que, a gran escala, estos efectos se tienen en cuenta directamente. Para esto se necesitan términos extra, como las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y su ratio de disipación, usando el modelo **k-ε**.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Tras finalizar la resolución, el *Solver* indicará que la simulación ha terminado, y nos indicará varios parámetros: iteraciones realizadas para resolver el estudio, tiempo de

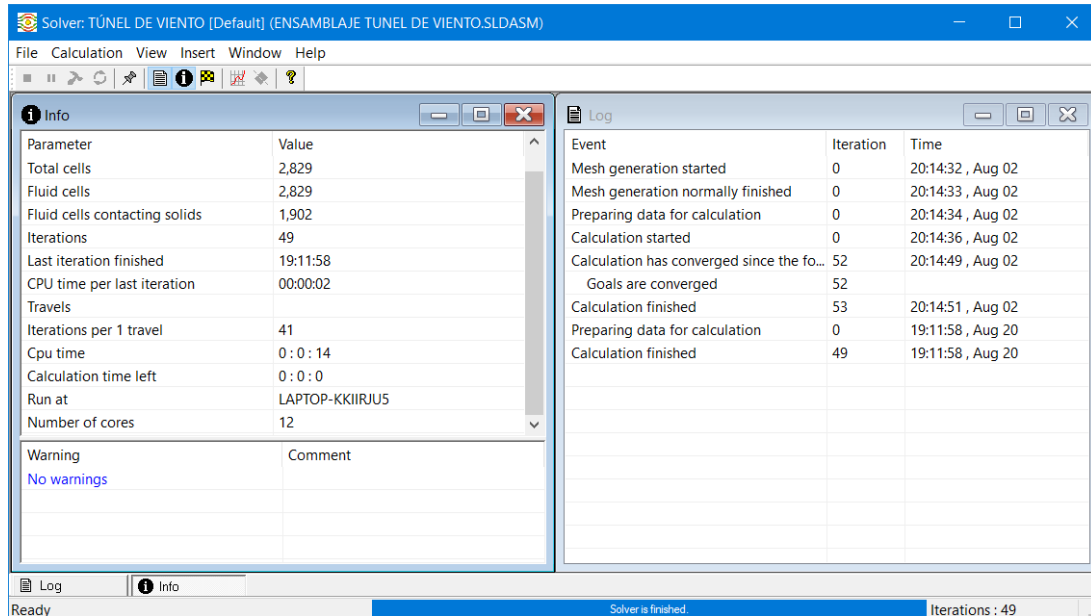


Ilustración 91. Ventana del solucionador (*Solver*). Fuente propia.

cálculo, número de núcleos empleado, metas predefinidas en el apartado de pre-procesado que se han llevado a cabo con éxito, etcétera.

En la zona de post-procesado, una vez se han cargado los resultados del estudio, el programa nos permitirá visualizar tanto trayectorias de flujo, isosuperficies, estudios de partículas, como gráficas y otros elementos definidos por el usuario. En esta ocasión nos centraremos en las dos primeras categorías.

Tal y como se puede observar en la **ilustración 90 y 91**, los perfiles de velocidades y de presiones observados en los estudios realizados concuerdan con los requerimientos de funcionamiento establecidos previamente, mostrando mediante la implementación de isosuperficies que, en efecto, para los caudales máximos y mínimos de aire, en la cámara de ensayos también se tienen las velocidades límite en su interior, por lo que se puede afirmar que el diseño está modelado, ensamblado, y simulado correctamente y con unos resultados satisfactorios:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Para el caudal másico mínimo de niebla (**0.0959 kg/s**), dentro de la cámara de ensayos se registra la velocidad mínima admisible para los estudios de captación de niebla: 2 m/s.

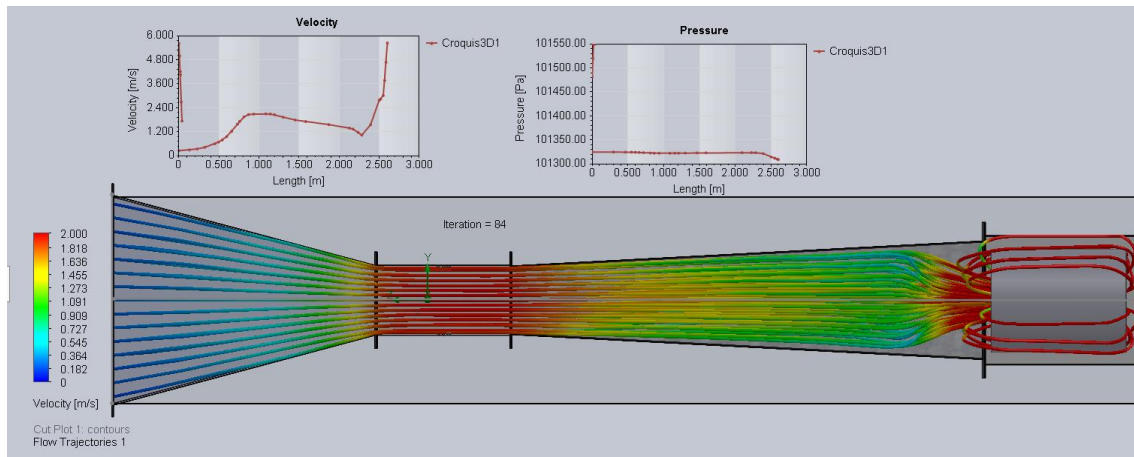


Ilustración 92. Distribuciones de presiones y velocidades y estudio de trayectorias enfocado a las velocidades para el caudal másico de 0.0959 kg/s.

- Para el caudal másico máximo de niebla (**0.3835 kg/s**), dentro de la cámara de ensayos se registra la velocidad máxima admisible para los estudios de captación de niebla: 8 m/s.

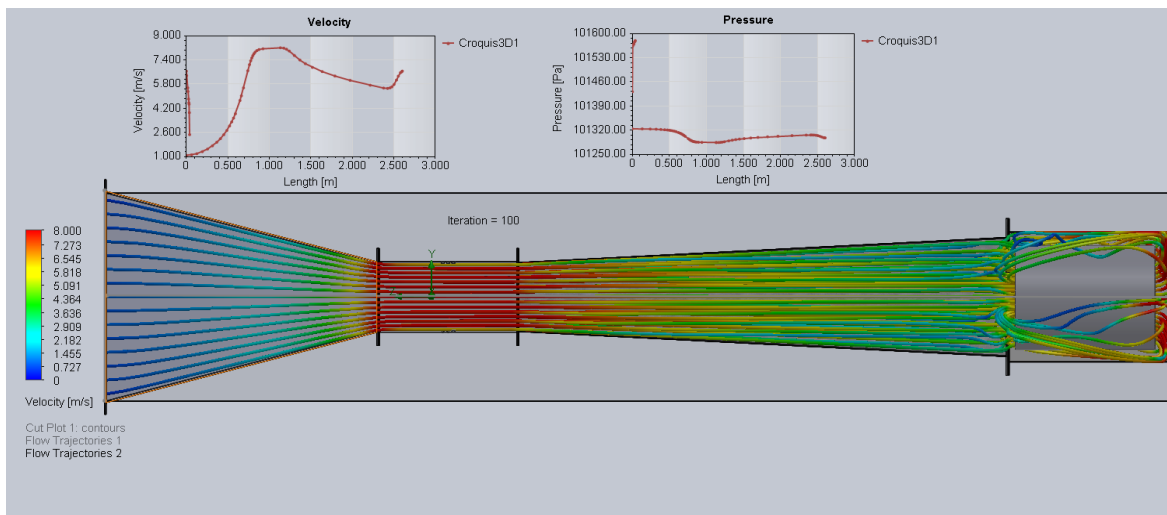


Ilustración 93. Distribuciones de presiones y velocidades y estudio de trayectorias enfocado a las velocidades para el caudal másico de 0.3834 kg/s.

Por tanto, si extrapolamos estos resultados al resto de velocidades, podemos concluir que los perfiles de velocidades y de presiones también se hallarán en los valores esperados para las velocidades intermedias.

2.2. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN DEL MODELO 3D MODIFICADO.

Una vez se ha comprobado el diseño sobre el que se han sentado las bases para este proyecto de instrumentación, es preciso comprobar el diseño con la modificación del tramo de absorción, de cara a verificar si se siguen cumpliendo los perfiles de velocidades y presiones buscados en el túnel. Repitiendo el proceso anterior, con la versión modificada, hemos obtenido los siguientes resultados:

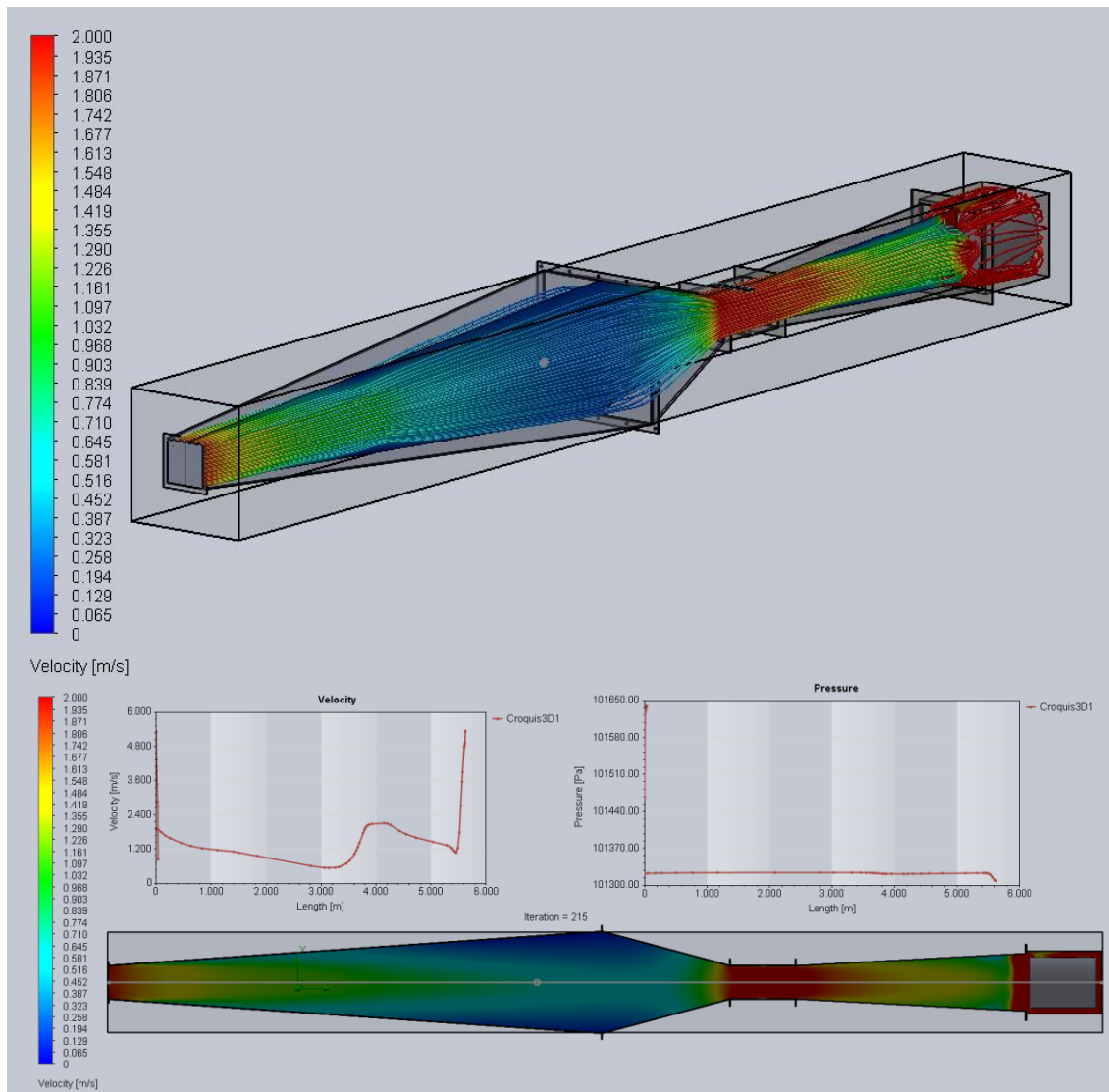


Ilustración 94. Estudios de trayectorias 3D y distribuciones de presiones y velocidades a lo largo del eje del túnel, y estudio del perfil de velocidades enfocado a las velocidades para un caudal másico de 0.0959 kg/s.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

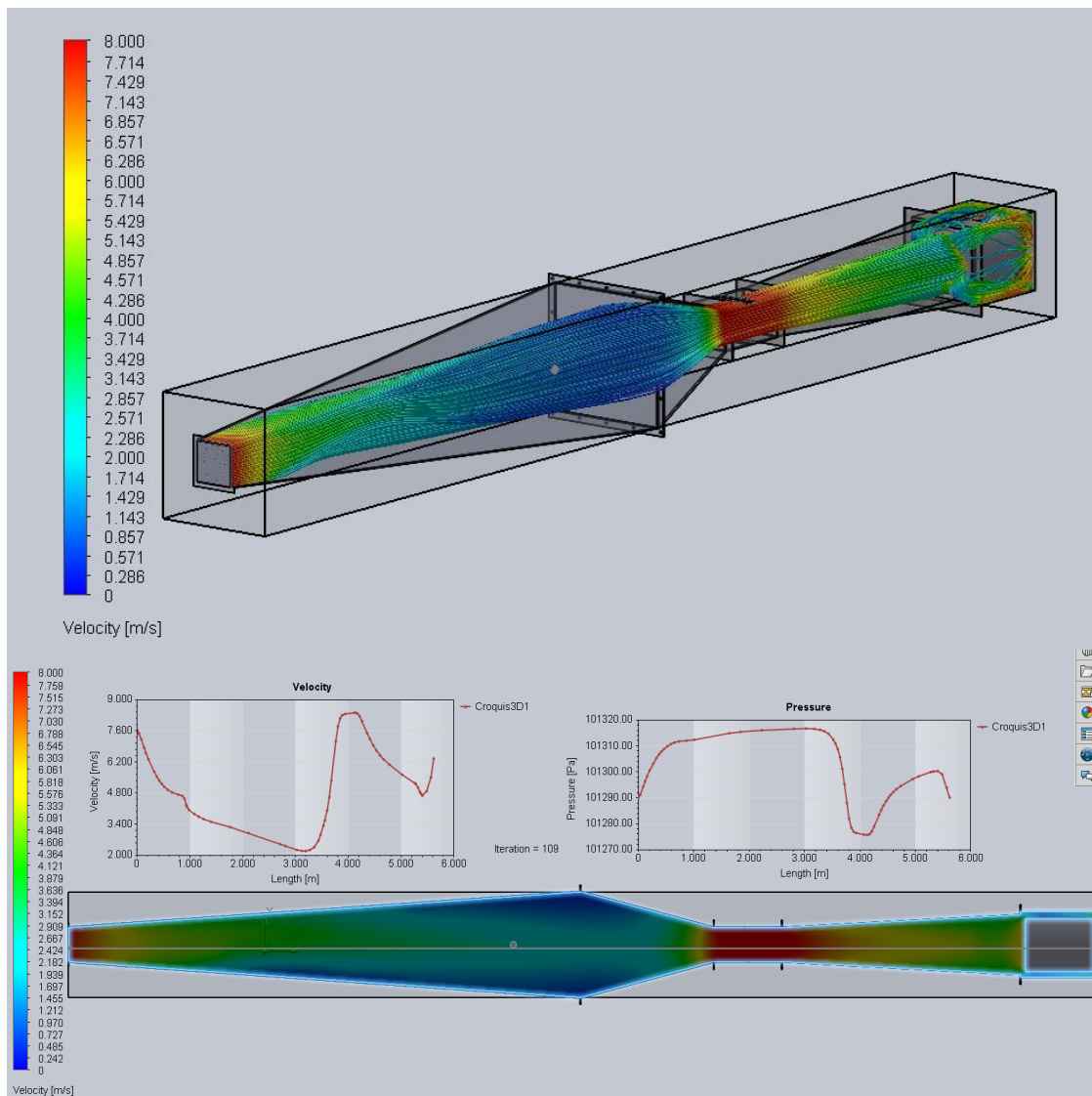


Ilustración 95. Estudios de trayectorias 3D y distribuciones de presiones y velocidades a lo largo del eje del túnel, y estudio del perfil de velocidades enfocado a las velocidades para un caudal másico de 0.3835 kg/s.

Observando las ilustraciones **92** y **93**, es notable que las condiciones de operación del túnel de viento no varían ostensiblemente, si omitimos el paso del flujo por la nueva sección añadida, excepto en el cono de contracción, donde la evolución del flujo en la nueva sección de humidificación si altera el desarrollo del flujo en el cono. Además, y se visualizará más adelante en detalle (a la hora de determinar los emplazamientos idóneos para la lanza humectadora ultrasónica), la adición de la nueva pieza supone a altas velocidades de flujo un desprendimiento de la capa límite muy notable y generación de vorticidad (6 m/s – 8 m/s).

Por otra parte, es necesario hacer un estudio (**ilustraciones 94-127**) de las zonas previas a la cámara de ensayos, dado que, como se mencionó en el **Capítulo II**, los

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

nebulizadores de tecnología ultrasónica requieren de un rango de velocidades específicos para la correcta absorción de las gotas en el flujo de aire húmedo (Entre 1.5 – 3 m/s). En cuanto a estas comprobaciones, se dividirán en dos grupos:

1. Comprobación de las velocidades límite de humectación sin las lanzas colocadas.

- En primer lugar, se comprobará que los perfiles de velocidades se ajustan a las necesidades del proyecto.
- Se comprobarán las velocidades límite para la lanza humectadora ultrasónica.
- Se realizarán otras comprobaciones que se consideren oportunas.

2. Comprobación de la interacción del flujo con las lanzas humectadoras emplazadas en sus respectivos puntos de operación.

En primer lugar, se han planteado las simulaciones en régimen estacionario para esta ampliación del túnel de viento siguiendo las directrices explicadas anteriormente (condiciones de contorno y opciones del estudio) tomando un nivel de refinado de malla de nivel 5 para acrecentar la resolución y precisión de los resultados obtenidos.

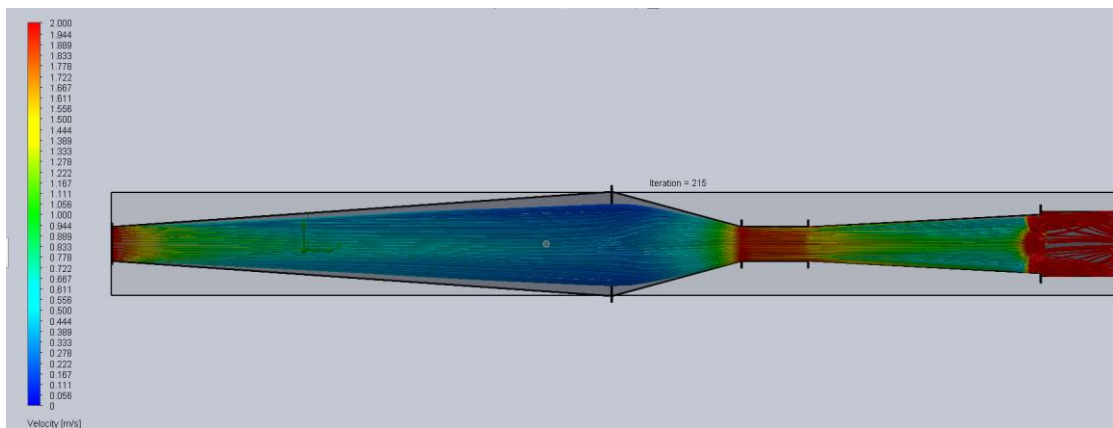


Ilustración 96. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 2 m/s. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

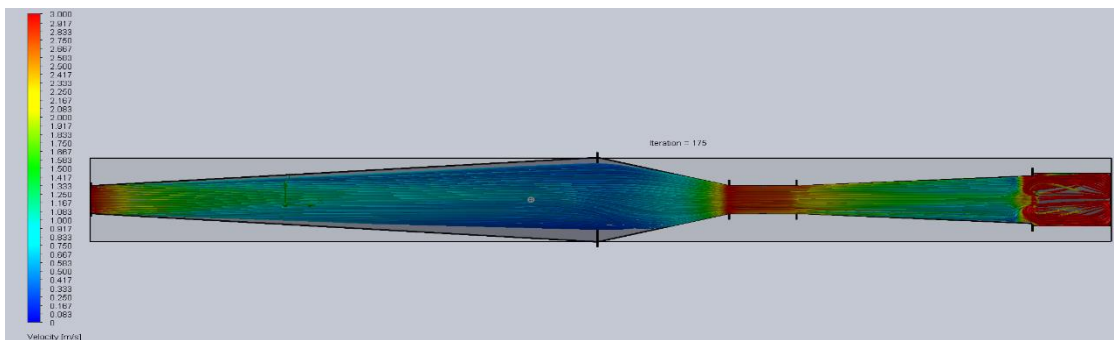


Ilustración 97. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 3 m/s. Fuente propia.

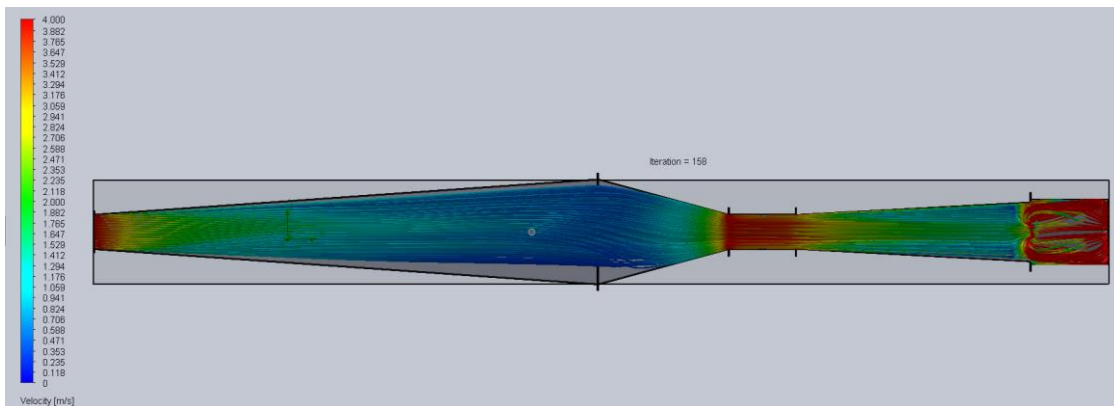


Ilustración 99. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 4 m/s. Fuente propia.

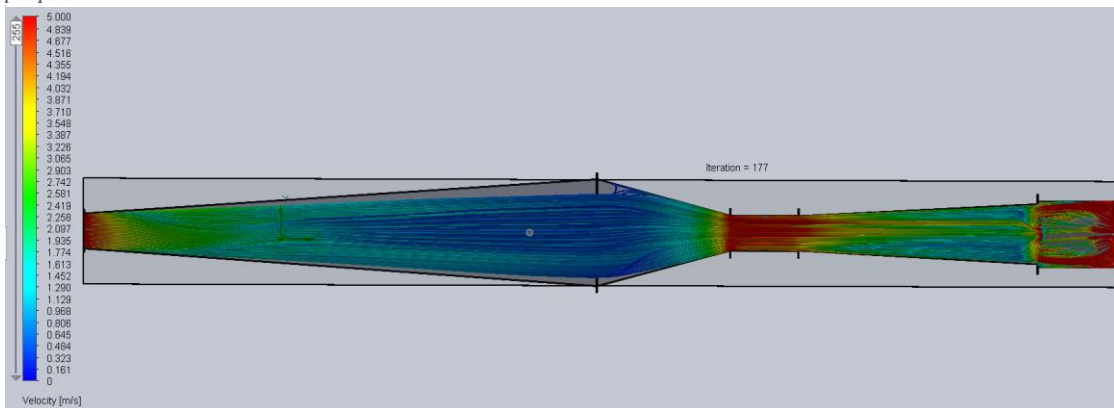


Ilustración 98. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 5 m/s. Fuente propia.

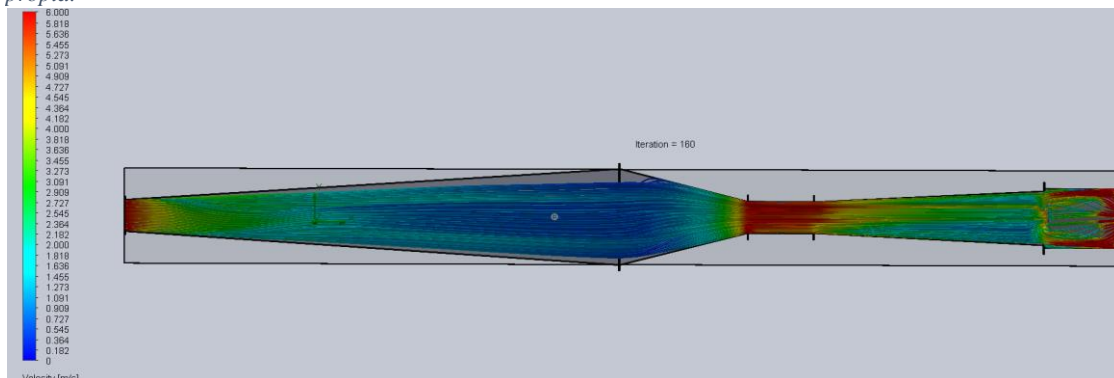


Ilustración 100. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 6 m/s. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

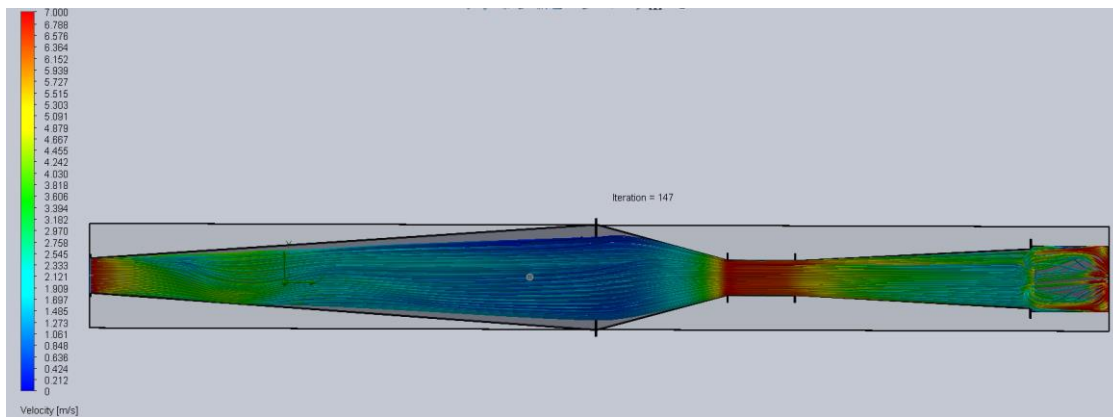


Ilustración 101. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 7 m/s. Fuente propia.

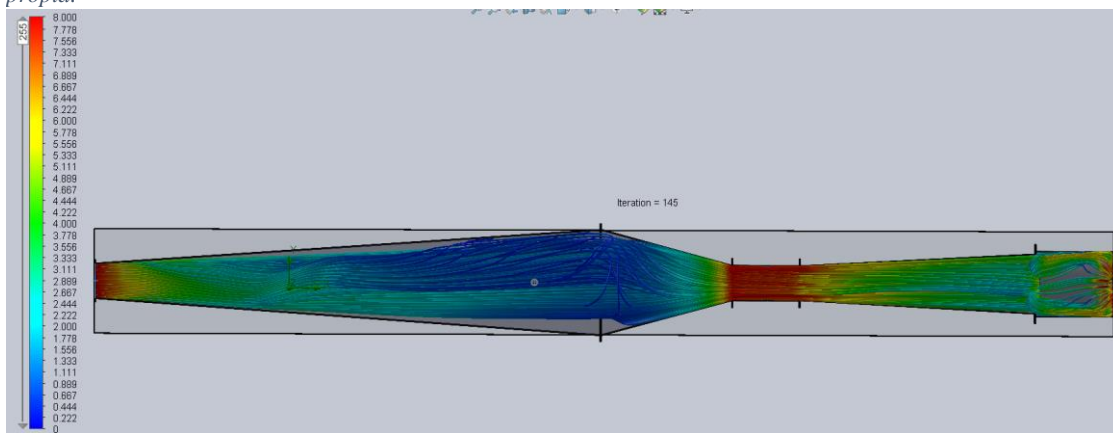


Ilustración 102. Perfil de velocidades y trayectorias para una velocidad en la cámara de ensayos de 8 m/s. Fuente propia.

Tal y como se puede apreciar en las ilustraciones 94-100, los perfiles de velocidades para cada caudal másico asociado a las velocidades previstas en la cámara de ensayos son coherentes, con las siguientes observaciones:

- En todos los casos se produce un desprendimiento de la capa límite que no afecta ostensiblemente a la obtención de un perfil de velocidades con una evolución homogénea a lo largo de su trayectoria por el túnel, excepto en los casos de mayor caudal másico (7 m/s y 8 m/s en la cámara de ensayos), donde las condiciones más turbulentas del flujo propician el desarrollo de vórtices.
- Las condiciones de flujo respecto al planteamiento inicial del túnel de viento permanecen invariables a partir de la segunda mitad del cono de contracción en adelante.

De este modo, concluyendo que el comportamiento del flujo es satisfactorio una vez se ha implementado el nuevo difusor orientado a la humectación, se procede a justificar el emplazamiento de los aligeramientos para la lanza humectadora.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Dado que el rango de velocidades especificado para una correcta humectación mediante el dispositivo ultrasónico es de 1.5 m/s – 3 m/s, de cara a tener un margen superior e inferior de seguridad, se ha planteado buscar aquella sección transversal para cada caudal másico entrante en el túnel de viento que ofrezca un valor intermedio (en torno a 2 m/s) dentro de este rango: así se podrá ofrecer cierta seguridad durante la operación de que no se alcanzarán velocidades superiores o inferiores a las necesarias.

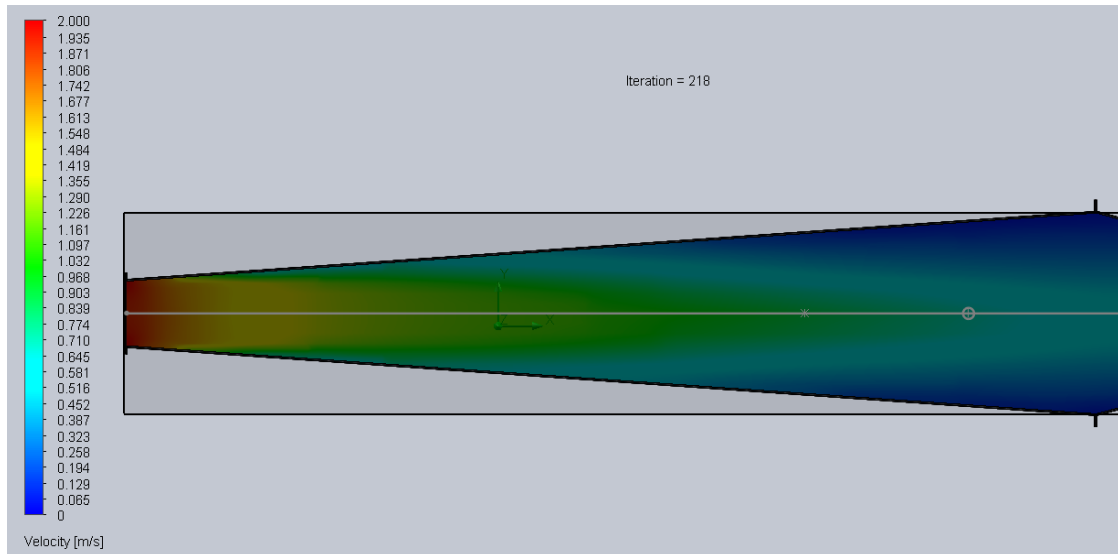


Ilustración 103. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.0958 kg/s (2 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.

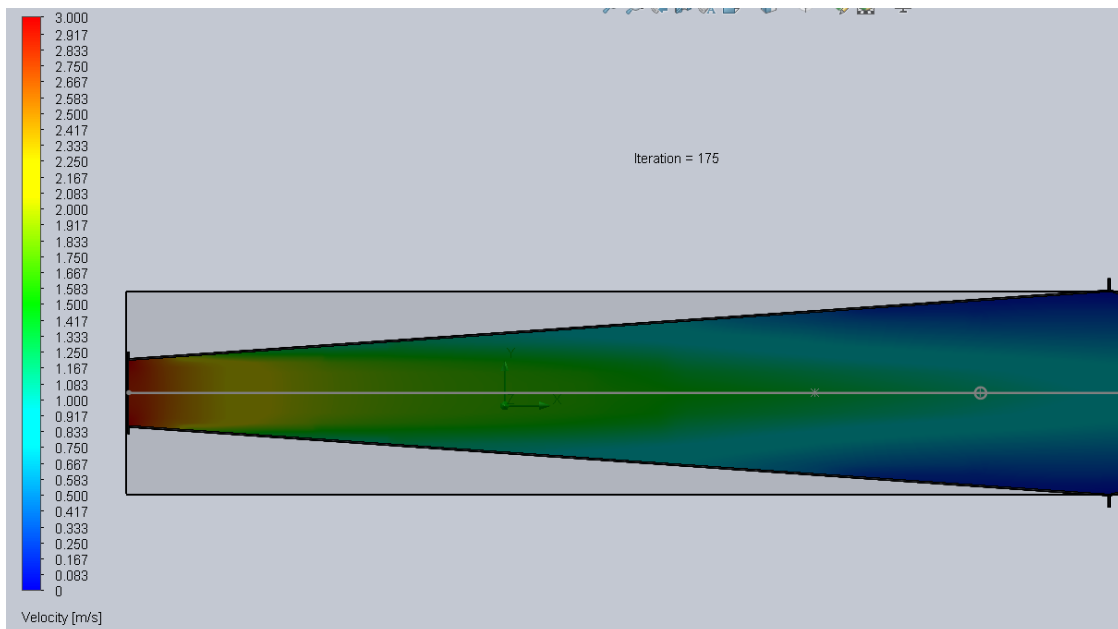


Ilustración 104. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.1438 kg/s (3 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

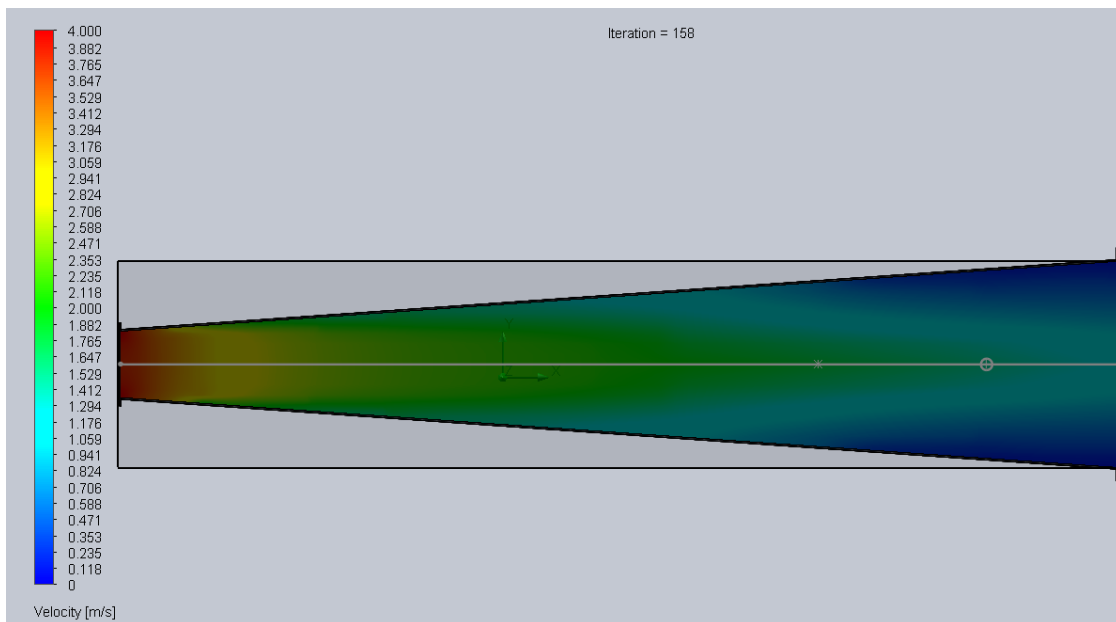


Ilustración 105. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.1917 kg/s (4 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.

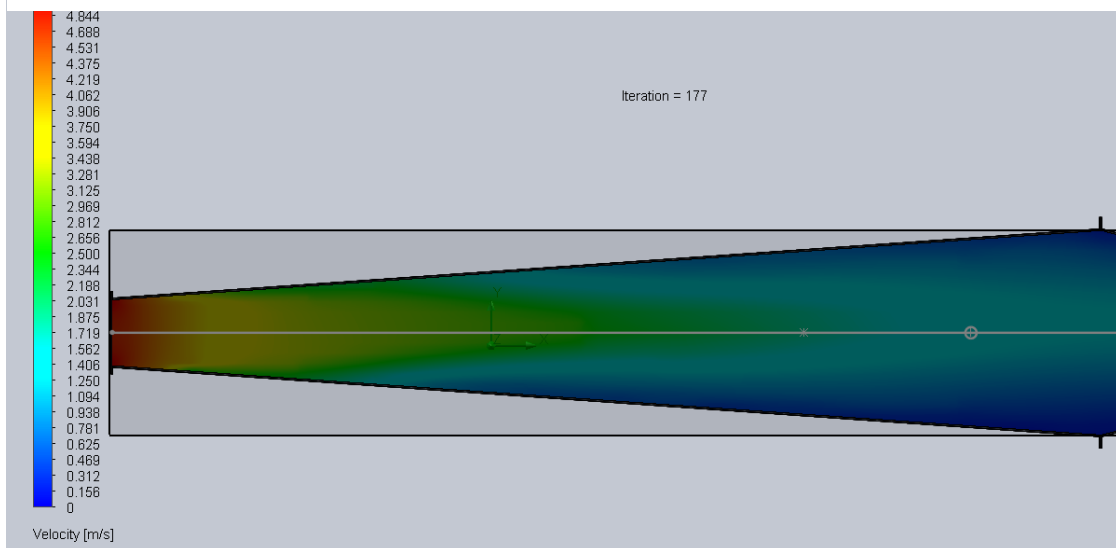


Ilustración 106. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.

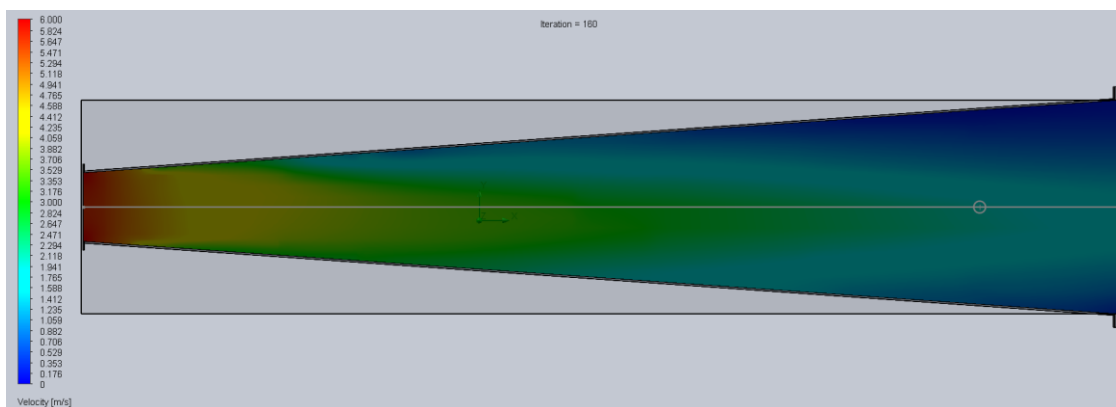


Ilustración 107. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

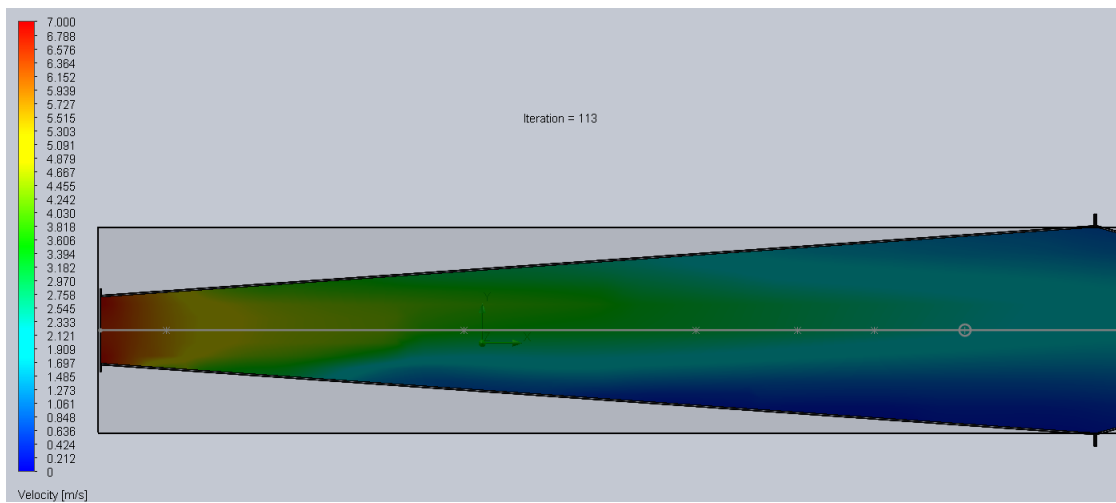


Ilustración 108. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.

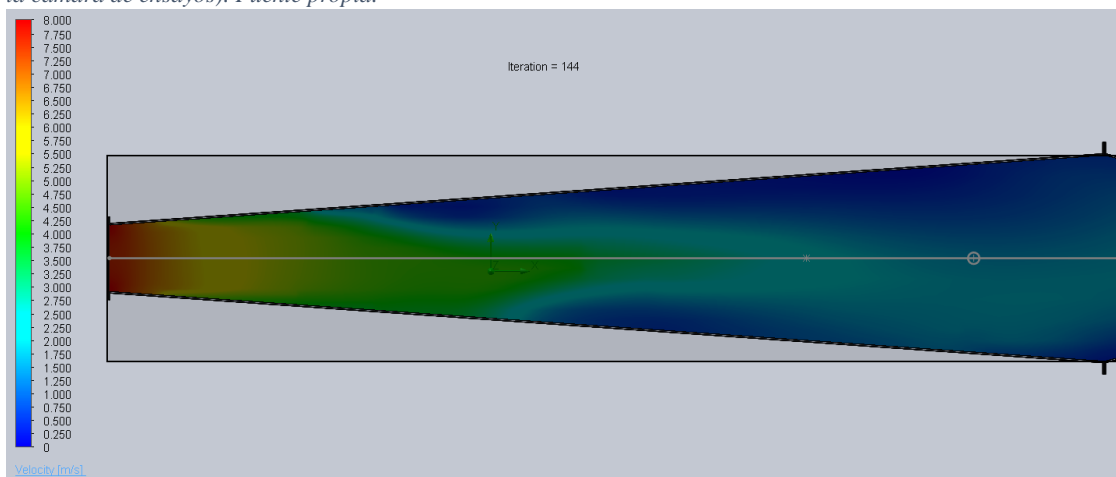


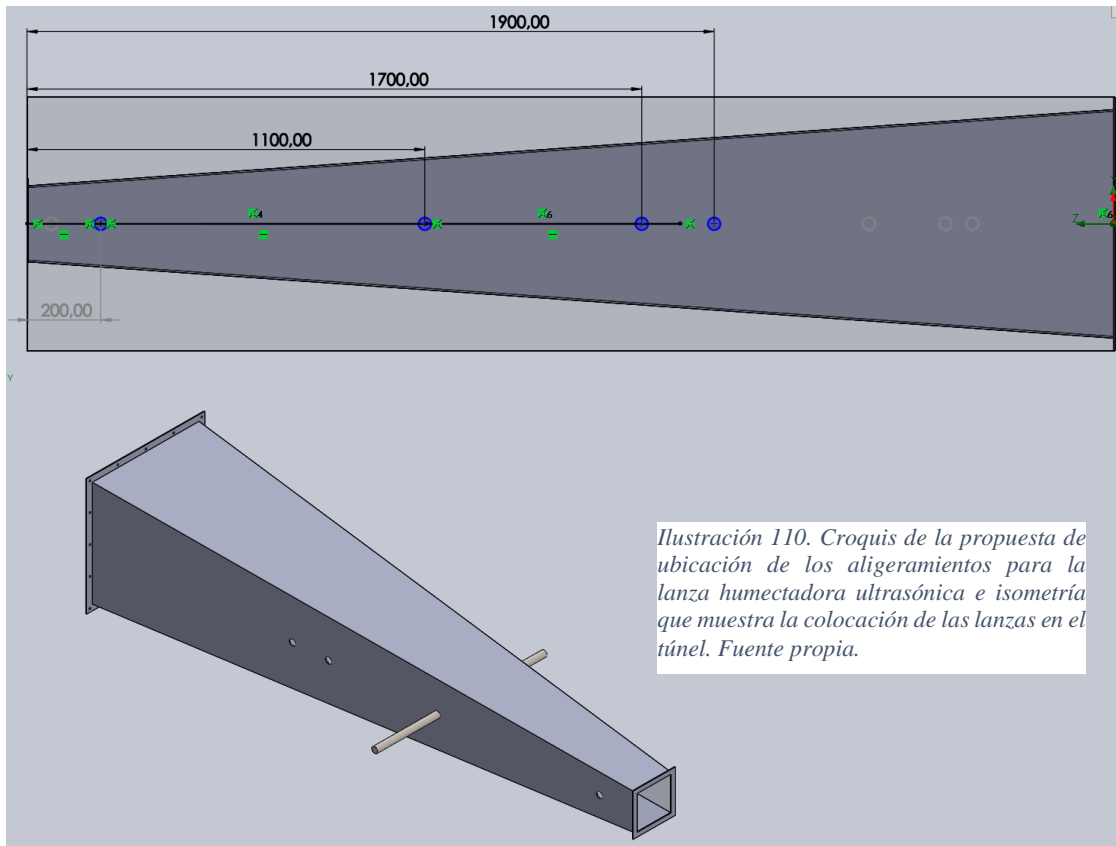
Ilustración 109. Perfil de velocidades en la sección de humectación para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos). Fuente propia.

Una vez se tienen los perfiles de velocidades presentes en el plano XY local ubicado en el eje del conducto, es posible realizar una primera ubicación para la lanza humectadora en función del caudal másico presente en el túnel de viento, con las premisas anteriormente mencionadas presentes.

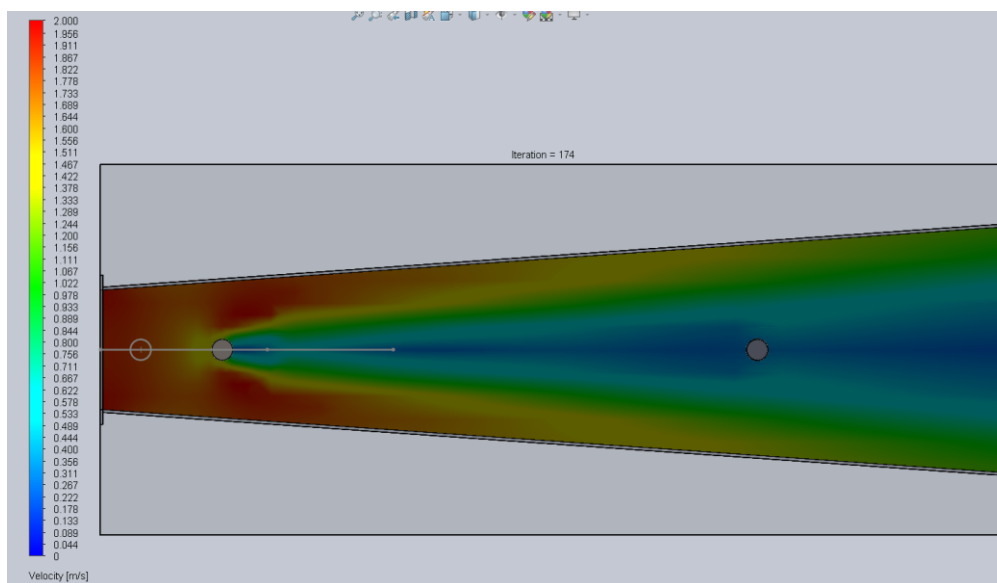
- Ubicación de la lanza para 2 m/s y 3 m/s: A 0.2 m de la sección de entrada (sección de 23 cm x 23 cm).
- Ubicación de la lanza para 4 m/s: A 1.1 m de la sección de entrada (sección de 35.4 cm x 35.4 cm).
- Ubicación de la lanza para 5 m/s: a 1.7 m de la sección de entrada (sección de 43.8 cm x 43.8 cm).

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Ubicación de la lanza para 6 m/s , 7 m/s y 8 m/s: A 1.9 m de la sección de entrada (sección de 46.6 cm x 46.6 cm).



Para finalizar la verificación de esta pieza, es preciso comprobar la interacción del flujo con la lanza humectadora en cada uno de los aligeramientos planteados para el rango de caudales máxicos previstos.



“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

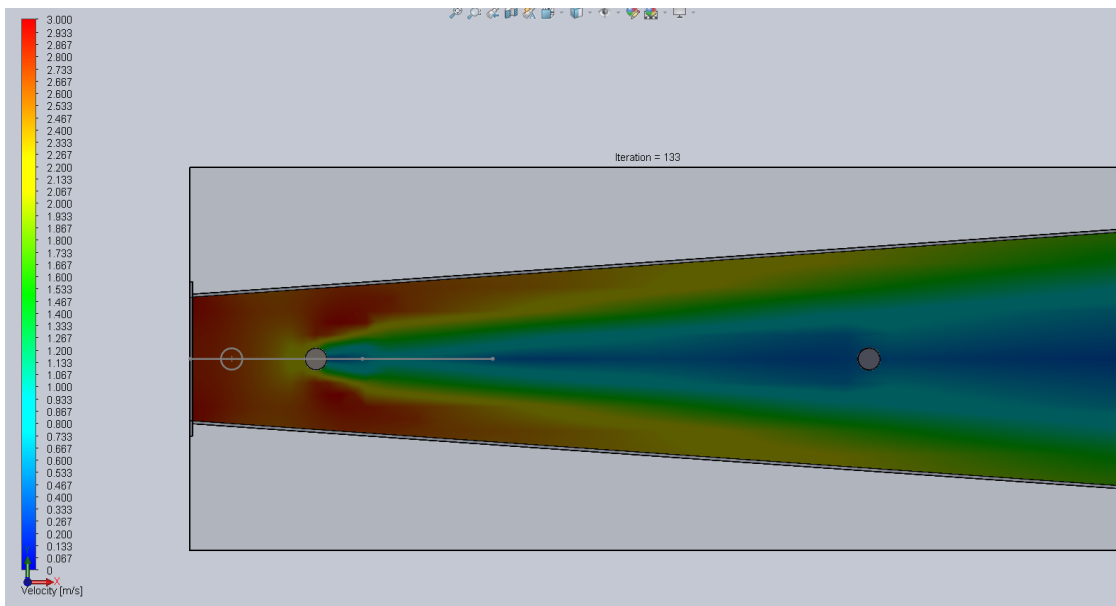


Ilustración 112. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.1438 kg/s (3 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el primer aligeramiento. Fuente propia.

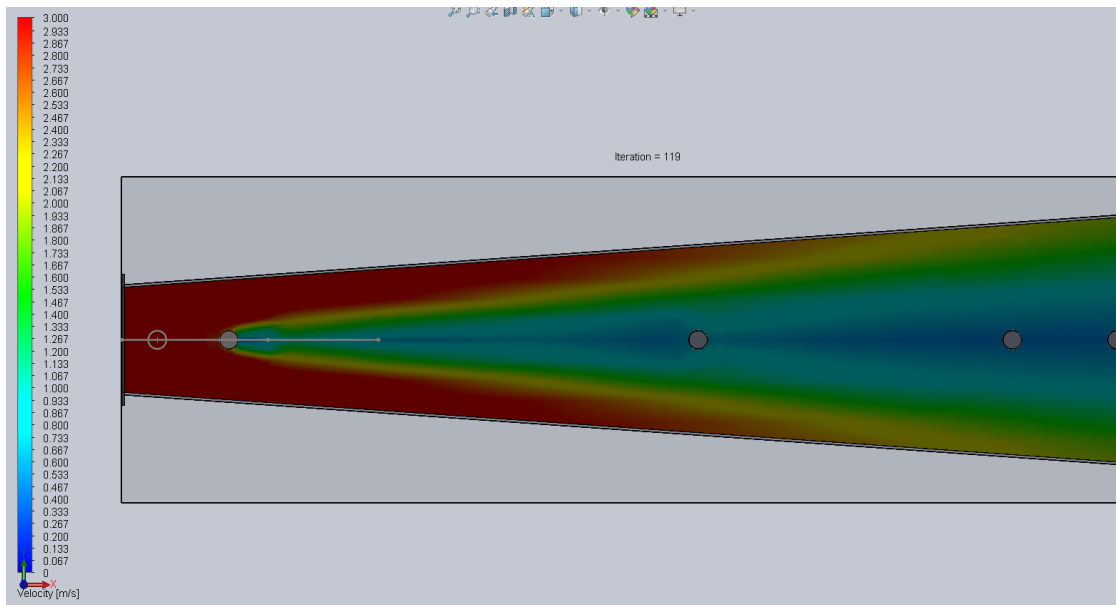


Ilustración 113. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.1917 kg/s (4 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el primer aligeramiento. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

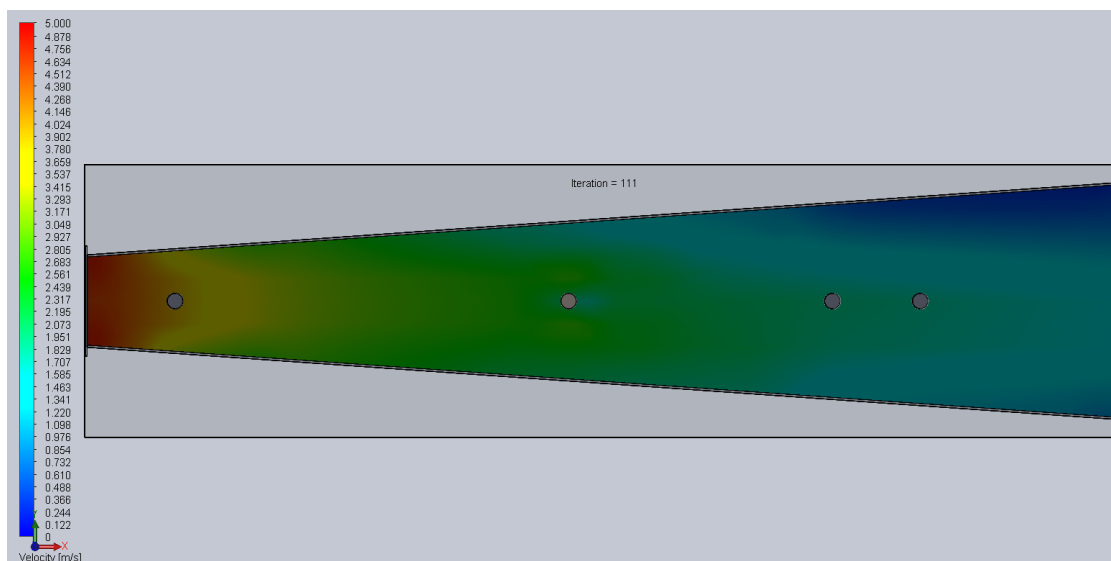


Ilustración 114. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el segundo aligeramiento. Fuente propia.

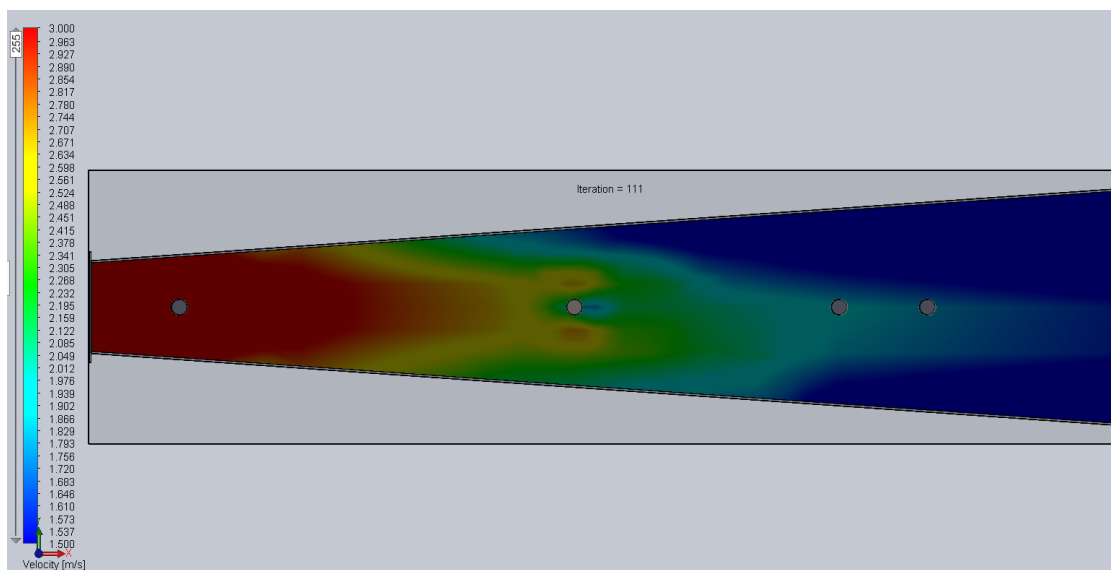


Ilustración 115. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el segundo aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

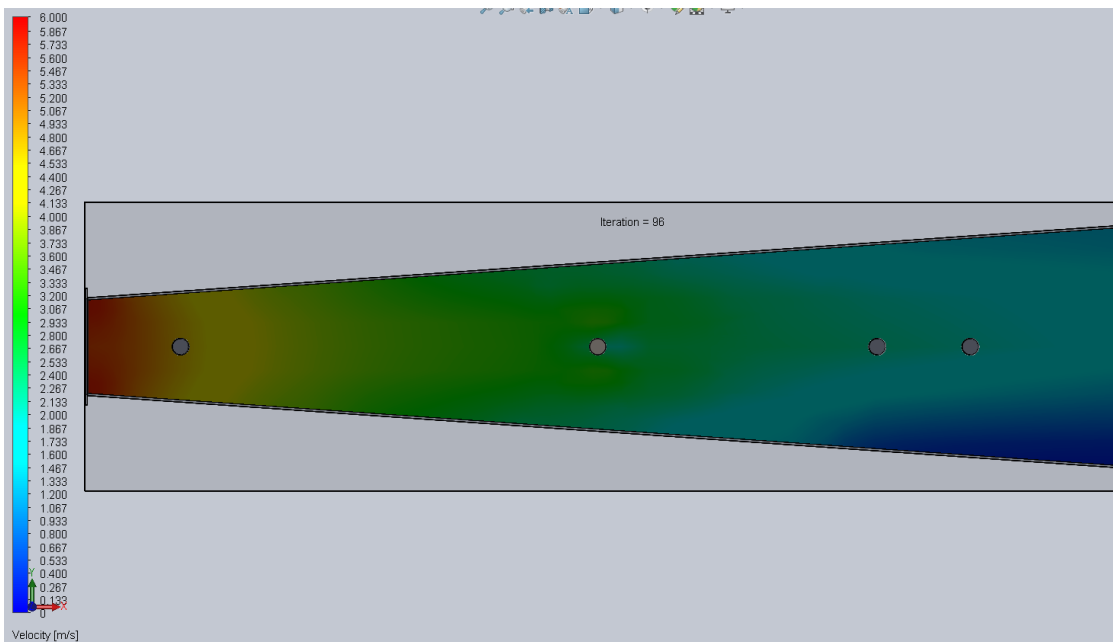


Ilustración 116. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el segundo aligeramiento. Fuente propia.

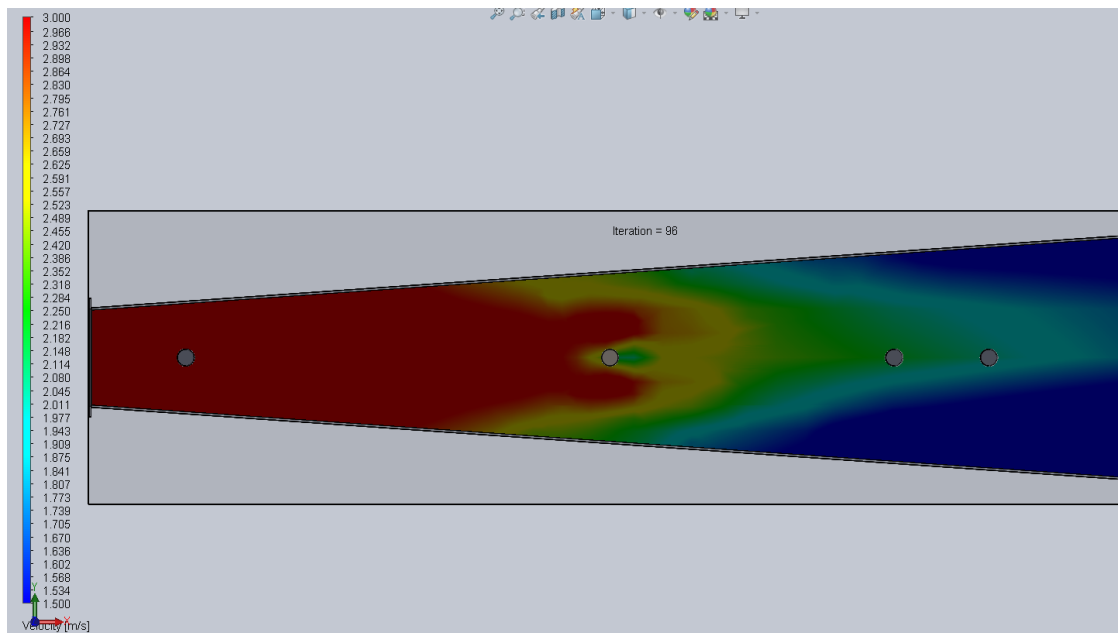


Ilustración 117. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el segundo aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

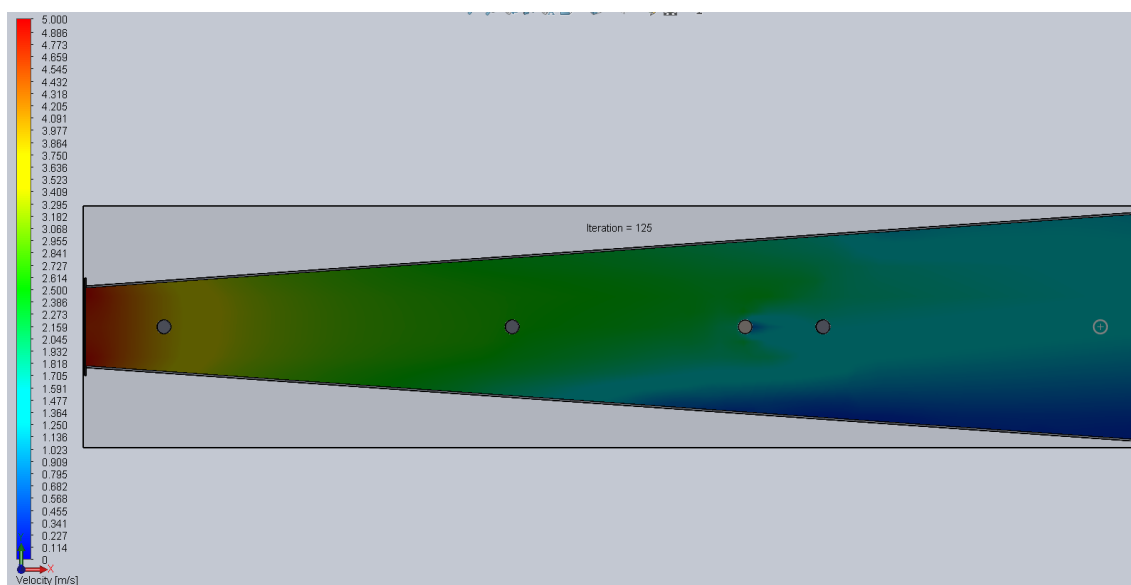


Ilustración 118. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento. Fuente propia.

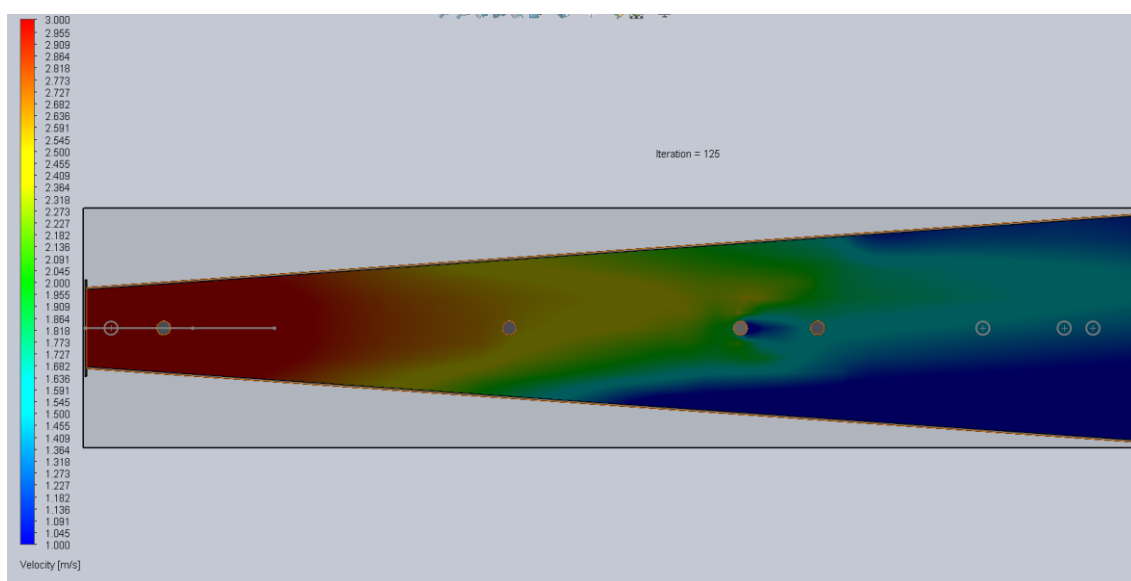


Ilustración 119. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2397 kg/s (5 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

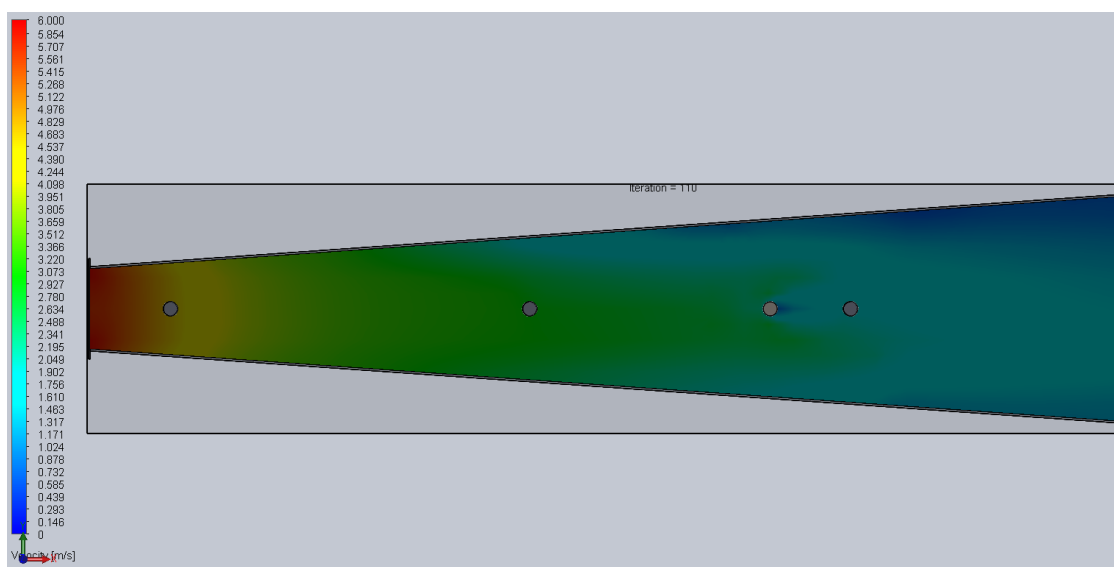


Ilustración 120. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento. Fuente propia.

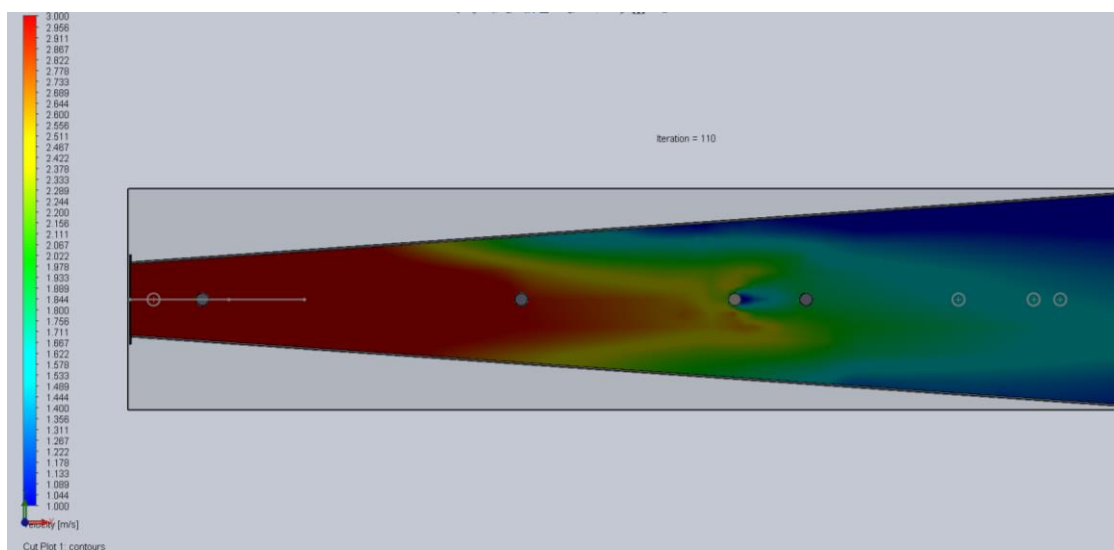


Ilustración 121. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.2876 kg/s (6 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

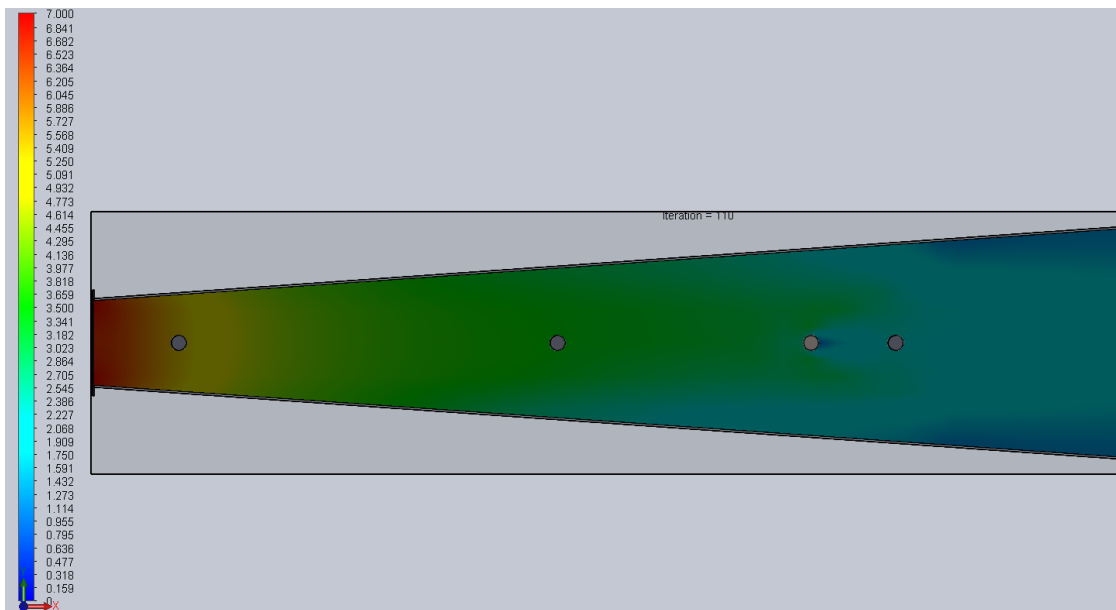


Ilustración 122. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento. Fuente propia.

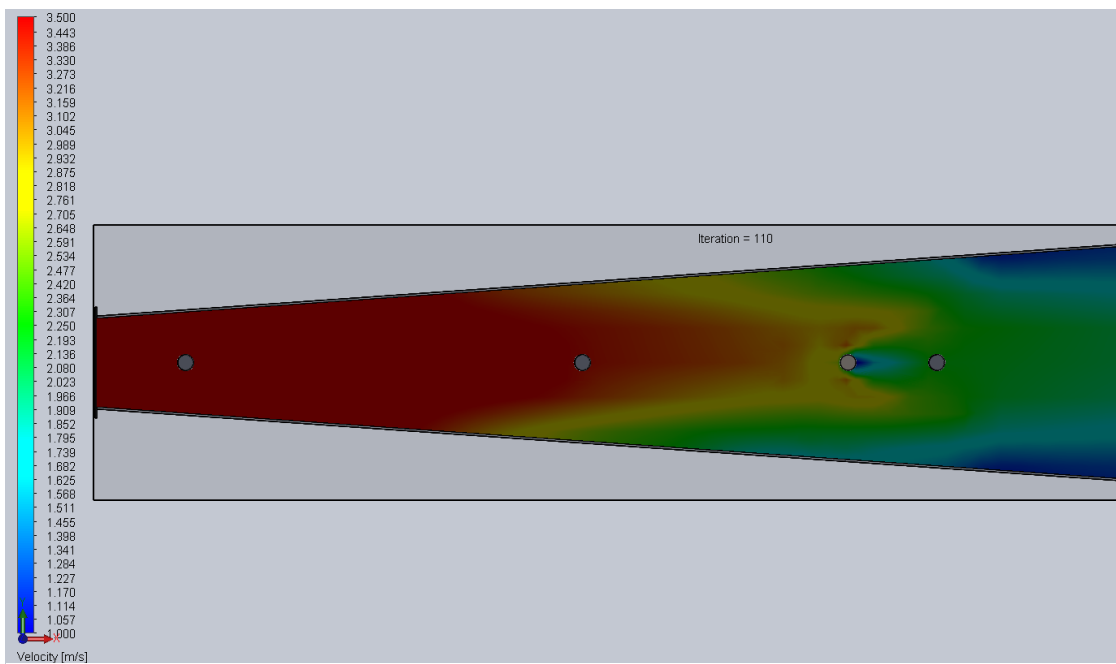


Ilustración 123. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

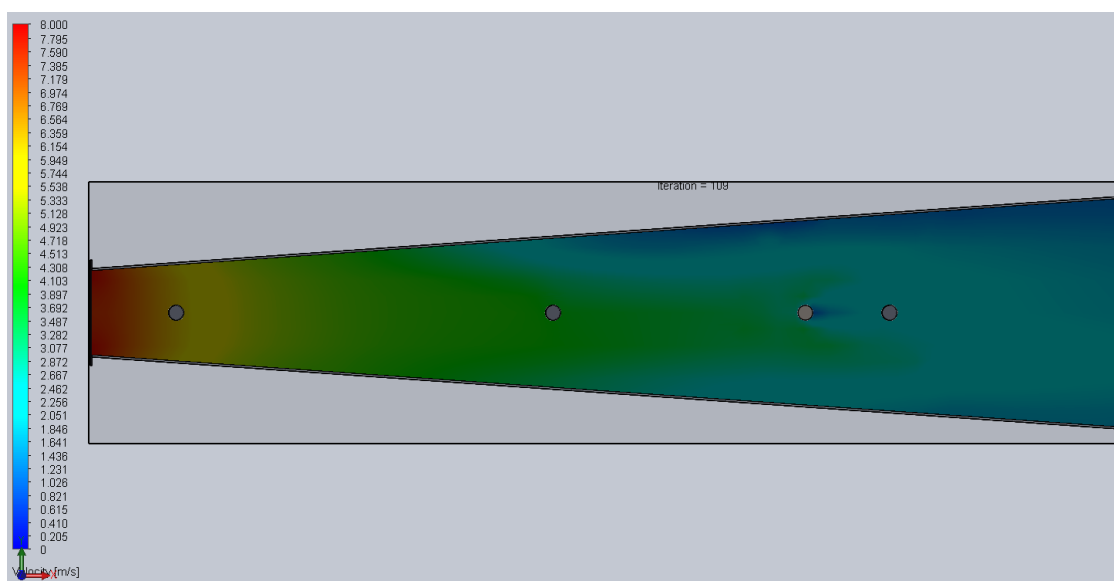


Ilustración 124. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento. Fuente propia.

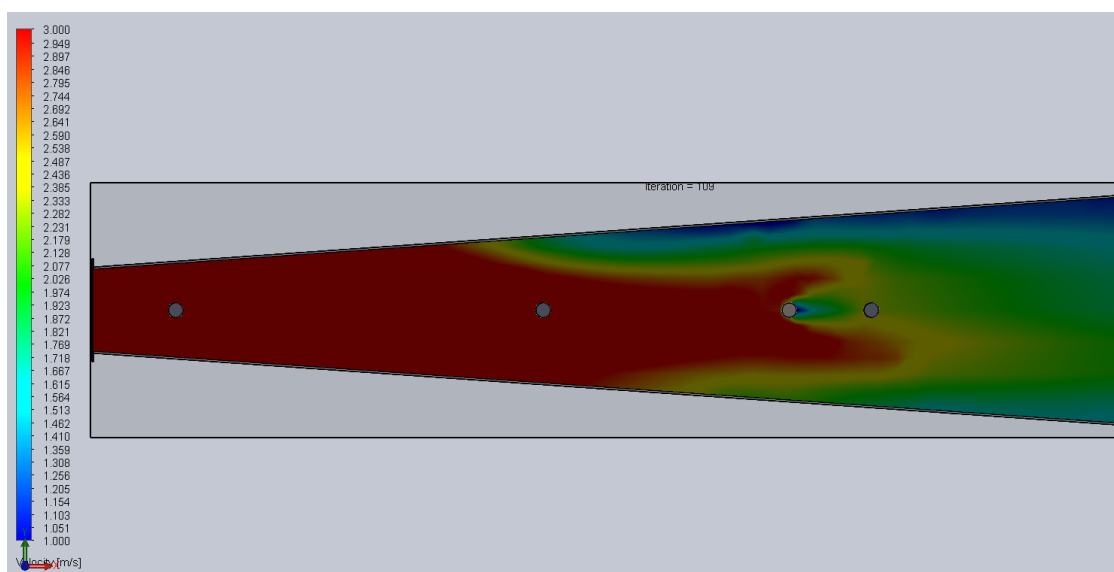


Ilustración 125. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el tercer aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

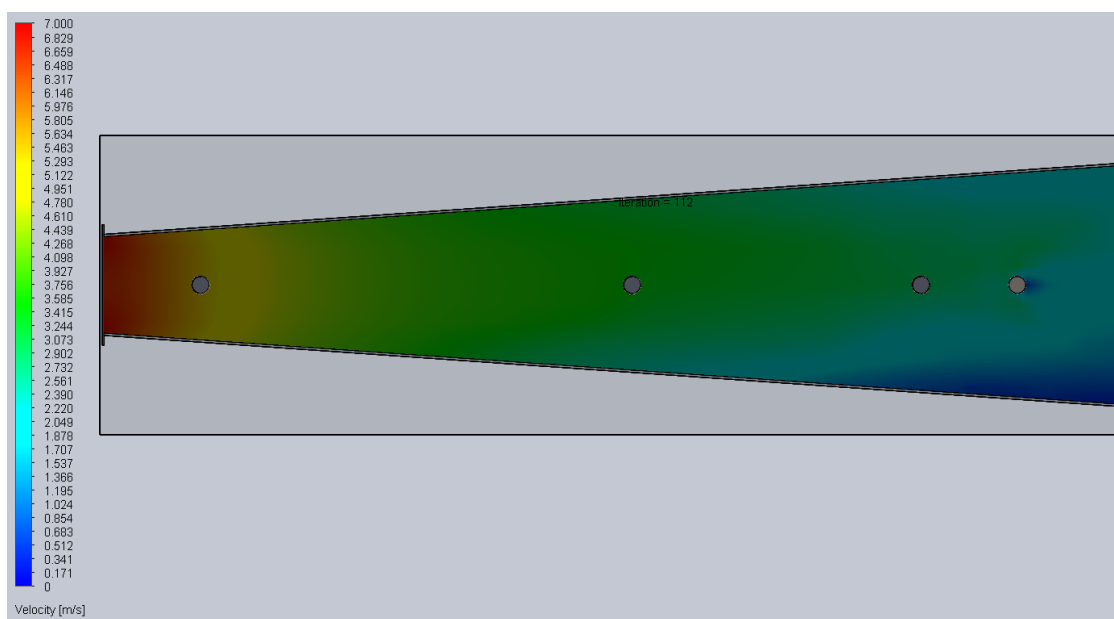


Ilustración 126. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el cuarto aligeramiento. Fuente propia.

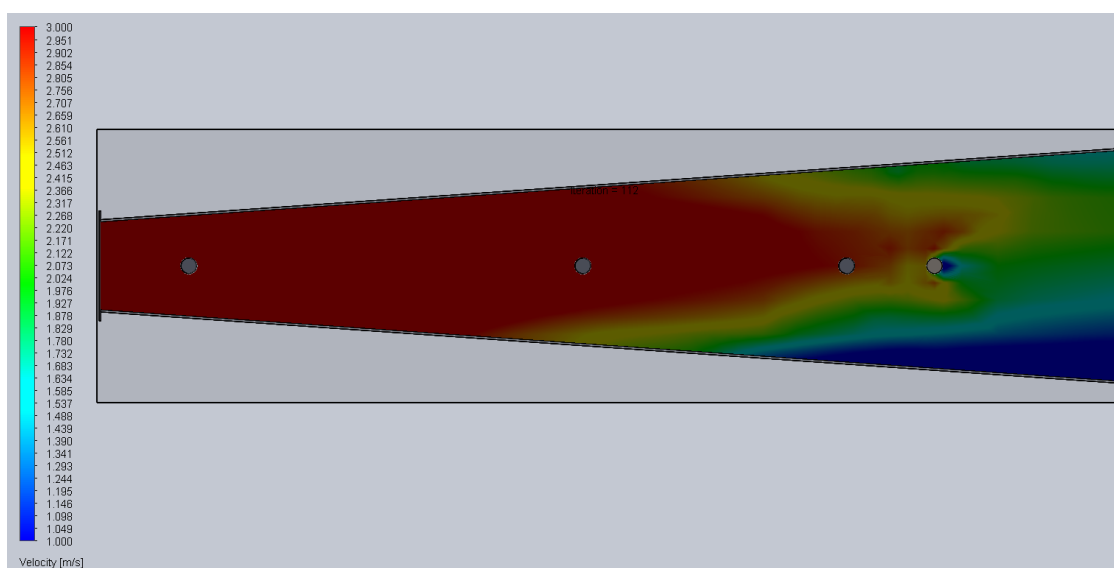


Ilustración 127. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3355 kg/s (7 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el cuarto aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

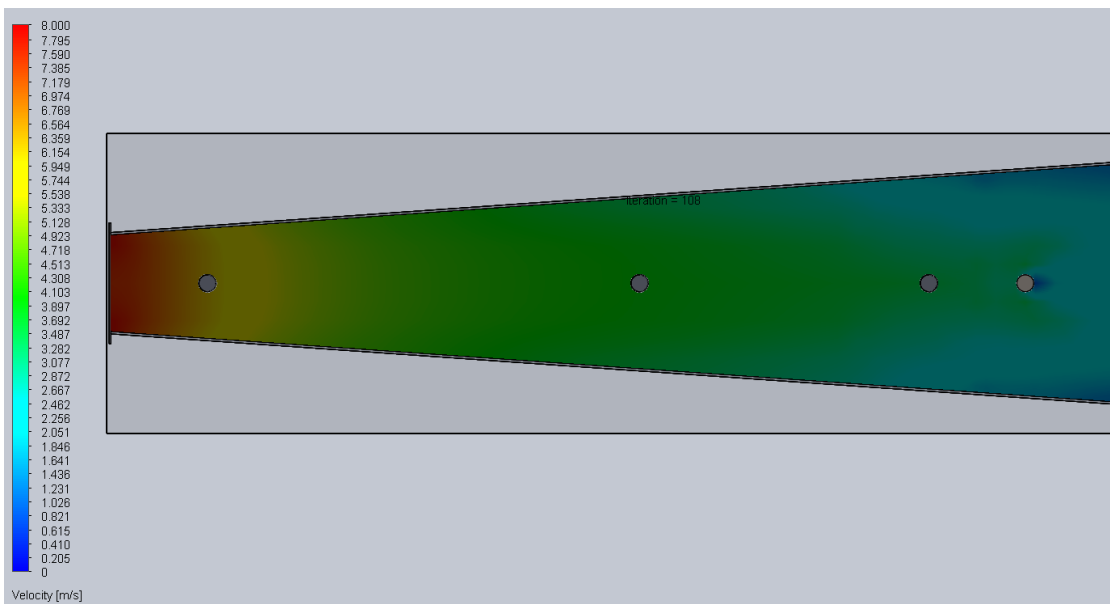


Ilustración 128. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el cuarto aligeramiento. Fuente propia.

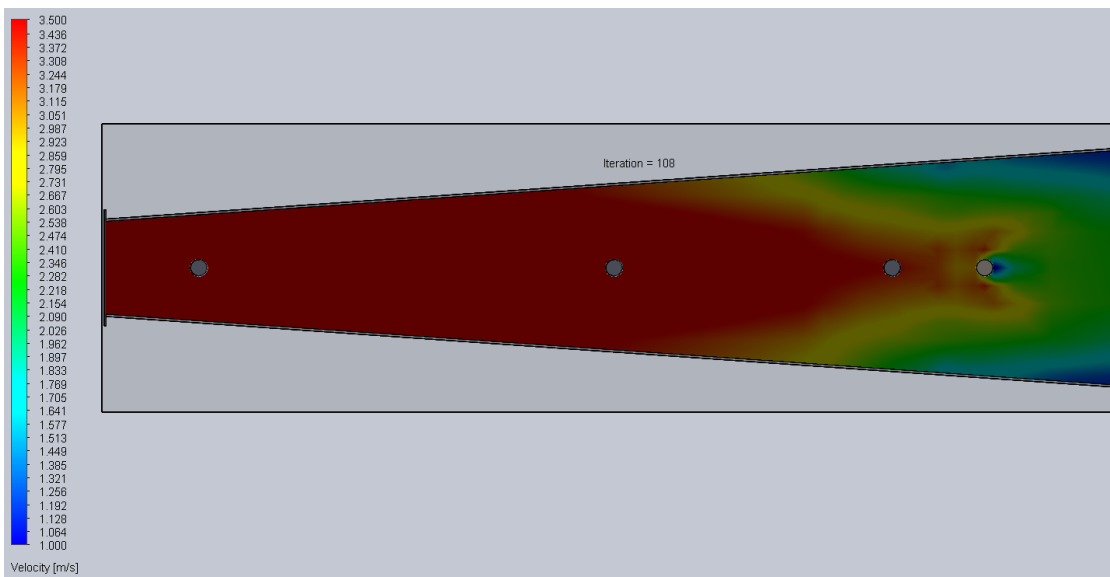


Ilustración 129. Interacción flujo - lanza humectadora para un caudal másico de 0.3835 kg/s (8 m/s en la cámara de ensayos) con la lanza ubicada en el cuarto aligeramiento, variando la escala a los valores límite de velocidad para favorecer la distinción de cambios sutiles cerca de la lanza. Fuente propia.

Una vez se han analizado los perfiles de velocidades para cada caso concreto mostrado entre las ilustraciones 111 y 129, se han llegado a las siguientes conclusiones sobre la colocación final de las lanzas:

- Para los caudales másicos correspondientes a 2 m/s, 3 m/s y 4 m/s en la cámara de ensayos, se colocará la lanza humectadora en el primer aligeramiento. Debido a que la reducción de velocidad del aire tras sobrepasar la lanza ubicada en esta

zona es considerable, se recomienda orientar los orificios de humectación en sentido contrario al flujo.

- Para los caudales máxicos correspondientes a 5 m/s y 6 m/s la lanza se ubicará en el segundo aligeramiento.
- Para los caudales máxicos restantes, la lanza se colocará en el tercer aligeramiento, por lo que el último aligeramiento planteado es posible omitirlo y, de esa forma, ahorrar mecanización innecesaria; sin embargo, sigue siendo una ubicación funcional de cara a posteriores estudios y se seguirá implementando.

2.3. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN CON INSTRUMENTACIÓN

Dado que uno de los objetivos de la instrumentación elegida es tener en todo momento monitorizadas la velocidad y las presiones tanto antes como después de que el flujo de aire circule por las mallas de captación, y que, por tanto, los tubos de Pitot pertenecientes al manómetro diferencial electrónico que se ha escogido deberán estar fijos en la cámara de ensayos, en este apartado se mostrarán aquellos estudios realizados con el objetivo de determinar el lugar idóneo de la puesta en funcionamiento de los tubos de Pitot para que su influencia en el flujo de aire no sea significativo.

Como hipótesis de partida inicial se han planteado las siguientes ubicaciones para los tubos de Pitot (8 mm de diámetro externo), aunque a efectos prácticos sólo se tendrá en cuenta el primer tubo de Pitot:

- Primer tubo de Pitot: Ubicado 70 mm antes del primer orificio para la introducción de mallas. El orificio de entrada de aire queda adelantado 145 mm aproximadamente.
- Segundo tubo de Pitot: Ubicado a 45 mm de la entrada del difusor. El orificio de entrada de aire queda a 150 mm de la última ranura para introducir mallas aproximadamente.

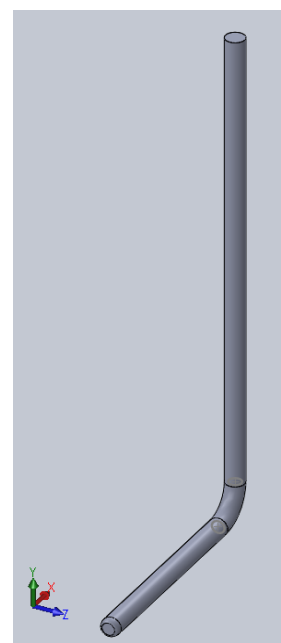


Ilustración 130. Isometría del tubo de pitot modelado para su implementación en los estudios CFD. Fuente propia.

Por otra parte, para poder observar los posibles inconvenientes que pueda causar la instrumentación a la condición de flujo

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

libre del caudal de aire húmedo se realizarán las simulaciones con el caudal másico máximo (0.3835 kg/s).

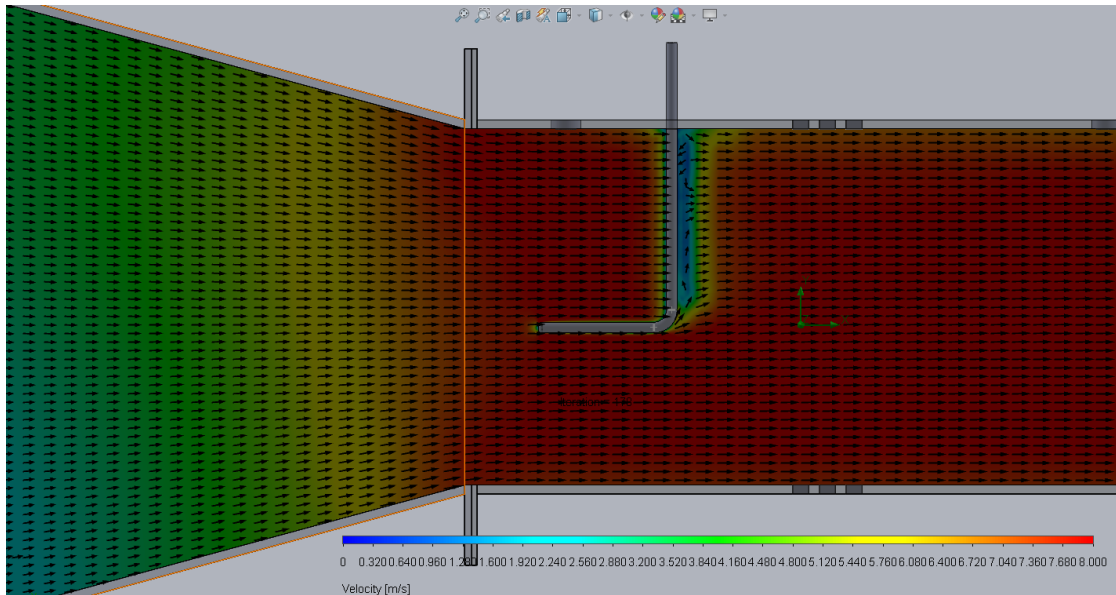


Ilustración 131. Perfil de velocidades alrededor del tubo de Pitot previo a las ranuras de introducción de las mallas. Fuente propia.

Observando la ilustración 128, es notable que la introducción del tubo de Pitot afecta al flujo, aunque las perturbaciones ocasionadas por la forma del instrumental se disipan rápidamente y el flujo vuelve a alcanzar la velocidad nominal esperada durante su paso por la cámara de ensayos (8 m/s). De este modo, se concluye que la distancia propuesta entre instrumentación y mallas es adecuada para la puesta en operación del túnel de viento.

2.4. ESTUDIOS DE VERIFICACIÓN DEL MODELO CON IMPLEMENTACIÓN DE MALLAS DE CAPTACIÓN

El objetivo primordial de este último grupo de simulaciones computarizadas reside en comprobar en qué medida afecta al flujo la inclusión de mallas de captación en la cámara de ensayos, es decir, pretende responder estas preguntas:

- ¿Cómo se comporta el flujo a cuando interacciona con las mallas de captación?
- ¿Cuáles son las pérdidas de carga del fluido al incidir sobre dichas mallas? ¿Se aproximan a los resultados obtenidos mediante ecuaciones empíricas presentes en la bibliografía consultada?

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

De cara a realizar estos estudios, se ha planteado una geometría de malla tipo arpa (hilos verticales) de 200 mm de longitud, 1 mm de diámetro de hilo y 2 mm de separación entre centros de hilo, lo que supone una distancia entre caras de hilos adyacentes de 1 mm.

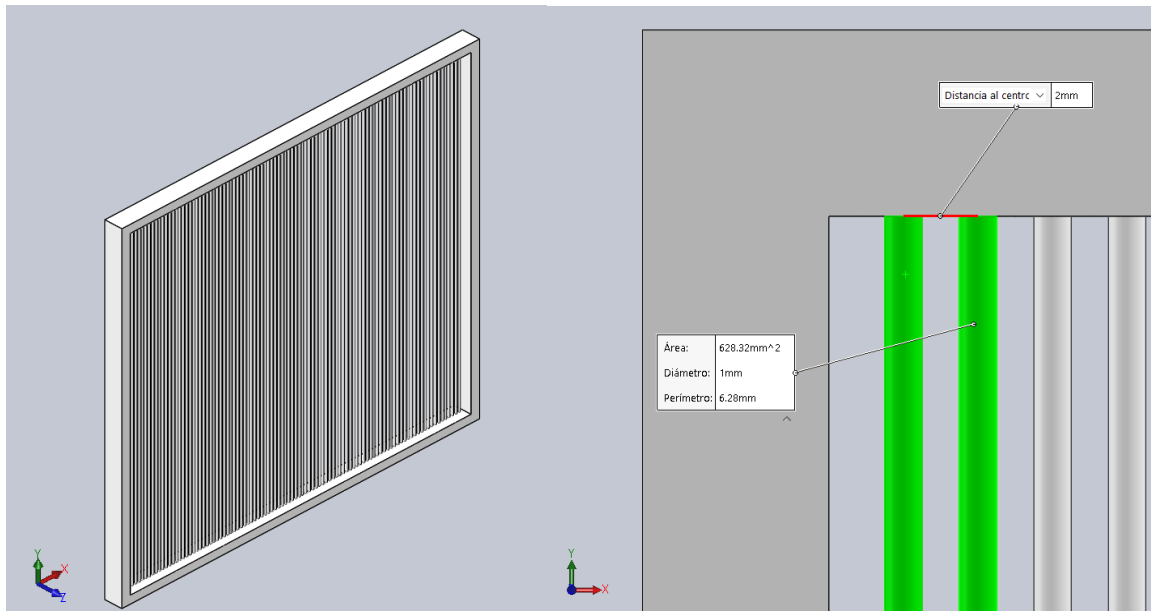


Ilustración 132. Isometría de la geometría de captador plano planteada para los ensayos y su información geométrica. Fuente propia.

Con la geometría de la malla de captación definida, se procede a plantear los ensayos. Para simplificar, se busca conocer la interacción malla – fluido para el caudal másico correspondiente a 8 m/s en la cámara de ensayos (0.3835 kg/s).

El hecho de incluir una geometría tan densa como la malla introducida en el túnel (75% de porcentaje de sombra) requiere crear una malla local específicamente para esta pieza, ya que la malla global propuesta por defecto en los ensayos anteriores no servirá en este caso. Para ello empleamos el comando *Insert local mesh* localizado por defecto en el hemisferio izquierdo de la pantalla, e introducimos los siguientes parámetros:

- Refining cells:
 - *Level of refining fluid cells*: 4
 - *Level of refining cells at fluid – solid boundary*: 4

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

El resto de los parámetros se mantendrán por defecto. Tras finalizar la simulación, que llevará más tiempo que las anteriores (5 horas frente a 45 minutos en promedio) debido al control de malla implementado, se han obtenido los siguientes resultados:

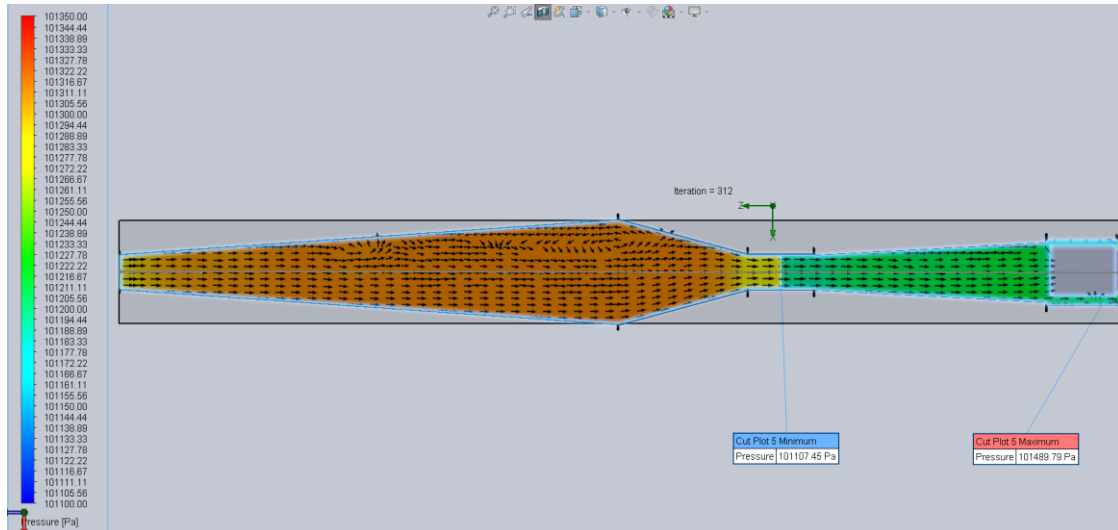


Ilustración 133. Vista en planta del túnel de viento de la evolución del perfil de presiones y trayectorias de flujo. Fuente propia.

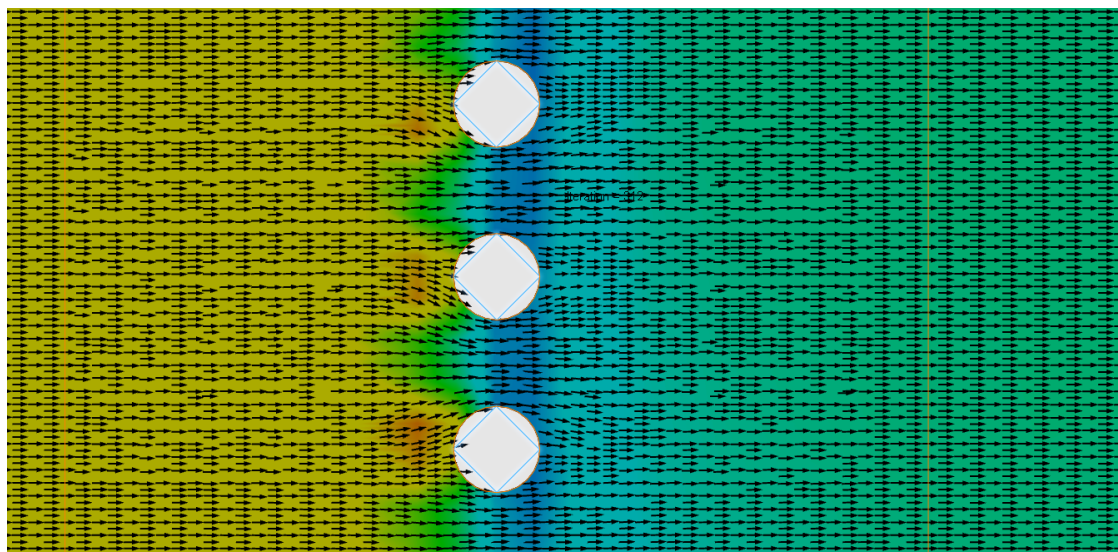


Ilustración 134. Vista en planta ampliada de la evolución del perfil de presiones del flujo de aire húmedo al pasar por la malla de 1 mm de diámetro y 2 mm de separación entre centros de hilos (75% de sombra). Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

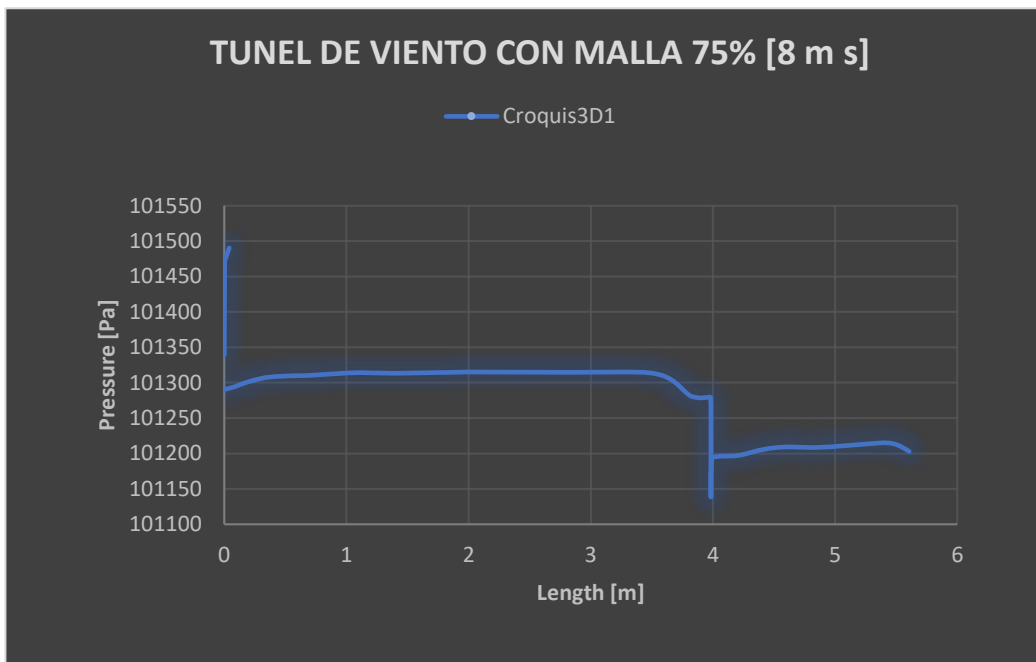


Ilustración 135. Gráfico de evolución de presiones a lo largo del eje de simetría del túnel de viento. Fuente propia.

Analizando las tres ilustraciones superiores, se han realizado las siguientes observaciones:

- El perfil de presiones del flujo sufre una variación previsible a lo largo de toda su trayectoria por el túnel de viento.
- A su paso por las mallas de captación, el aire pasa de tener una presión total de 101315 Pa a 101138 Pa justo después de salvar el obstáculo, estabilizándose la presión en 101196 Pa antes de salir de la cámara de ensayos. Por tanto, se tiene una **caída de presión máxima de 177 Pa** frente a una **caída mínima de 119 Pa**.

Estas lecturas se compararán más adelante con los cálculos de pérdidas de carga teóricos para el caso más desfavorable.

CAPÍTULO IV: CÁLCULOS REFERENTES A LAS PÉRDIDAS EN LA INSTALACIÓN

1. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA, CURVA RESISTENTE DE LA INSTALACIÓN Y PUNTO DE OPERACIÓN DEL VENTILADOR.

Debido a que se ha implementado una pieza que aumenta considerablemente la longitud total del túnel de viento es preciso comprobar en qué medida aumentan las pérdidas de carga del flujo dentro del conducto. Suponiendo una velocidad de 8 m/s en la cámara de ensayos (caso más desfavorable), lo que correspondería al caudal másico máximo (1152 m³/h aproximadamente), calcularemos la pérdida de carga total en el túnel de viento debido a la adición del nuevo componente, y se comprobará la diferencia con las pérdidas de carga del modelo base con el objetivo de determinar si esto afectará en gran medida al funcionamiento del ventilador. Para esto, el procedimiento a seguir se dividirá en las partes mencionadas abajo:

1. Calcular las pérdidas de carga de cada elemento del túnel de viento y obtener las pérdidas de carga máximas para el caso más desfavorable (8 m·s⁻¹).
2. Obtener la curva resistente de la instalación a partir de las curvas resistentes individuales de cada componente.

1.1. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN LOCALES

A efectos de cálculo de los coeficientes de fricción, se empleará la ecuación de **Swamee-Jain** con los siguientes coeficientes de rugosidad relativa: 0.007 mm para el metacrilato (PMMA) y 0.15 para el acero galvanizado.

- Cámara de ensayos:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{(7E-6)/0,2}{3,7} + \frac{5,74}{(1.0506E+5)^{0,9}} \right) \right]^2} = 0.0179$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{promedio} \cdot D_h}{\mu} = \frac{1.1984 \frac{kg}{m^3} \cdot 8 \frac{m}{s} \cdot 0.2m}{(1.825E-5) \frac{kg}{m \cdot s}} = 1.0506E+5$$

- Cono de contracción:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{(15E-5)/0,2}{3,7} + \frac{5,74}{(1.0506E+5)^{0,9}} \right) \right]^2} = 0.02132$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{promedio} \cdot D_h}{\mu} = \frac{1.1984 \frac{kg}{m^3} \cdot 8 \frac{m}{s} \cdot 0.2m}{(1.825 E - 5) \frac{kg}{m \cdot s}} = 1.0506 E + 5$$

- Sección de absorción:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{(15E - 5)/0,2}{3,7} + \frac{5,74}{(105056.44)^{0,9}} \right) \right]^2} = 0.0213$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{promedio} \cdot D_h}{\mu} = \frac{1.1984 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.32 \frac{m^3}{s} \cdot 0.2m}{(1.825 E - 5) \frac{kg}{m \cdot s}} = 105056.44$$

- Difusor:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{(15E - 5)/0,2}{3,7} + \frac{5,74}{(1.0506 E + 5)^{0,9}} \right) \right]^2} = 0.01971$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{promedio} \cdot D_h}{\mu} = \frac{1.1984 \frac{kg}{m^3} \cdot 8 \frac{m}{s} \cdot 0.2m}{(1.825 E - 5) \frac{kg}{m \cdot s}} = 1.0506 E + 5$$

1.2. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA LOCALES

1.2.1. CÁMARA DE ENSAYOS

- Cámara de ensayos (teniendo en cuenta $k= 0.007$ mm y propiedades físicas a 19°C):

$$(22) \quad H_r = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0.0179 \cdot \frac{0.4m}{4 \cdot \frac{0.2m}{4}} \cdot \frac{(8 \frac{m}{s})^2}{2 \cdot (9.81 \frac{m}{s^2})} = 0.1168 m$$

1.2.2. SECCIÓN DE HUMECTACIÓN

Caso 1: Debido a sus características geométricas, se toma la sección de absorción como un difusor.

- En primer lugar, es necesario conocer el ángulo de conicidad de la pieza. Para ello, se usan los radios hidráulicos de las secciones transversales de entrada y salida, así como la longitud total.

$$\theta = \arctg \left(\frac{\frac{620}{2} - \frac{200}{2}}{3000} \right) = 4^\circ$$

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Las pérdidas de carga que se generan a lo largo de un difusor dependen de la siguiente expresión matemática:

$$H_{r\ DIFUSOR} = K_{DIFUSOR} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Siendo:

- $K_{DIFUSOR}$ es un factor adimensional que tiene en cuenta tanto las pérdidas de carga por fricción que se producen en un difusor, como las pérdidas ocasionadas por la expansión del fluido de trabajo a lo largo de la pieza:

$$K_{DIFUSOR} = K_F + K_{EXP} = \left[\left(1 - \frac{1}{A_R^2} \right) \cdot \frac{f}{8 \cdot \sin \theta} \right] + \left[K_E \cdot \left(\frac{A_{RD} - 1}{A_{RD}} \right)^2 \right] \quad (57)$$

Si se desglosa la expresión:

- A_R es la relación de áreas o cociente entre las superficies formadas por las secciones transversales de salida y entrada del difusor, respectivamente.
- θ es el ángulo de conicidad del difusor.
- K_E es un factor adimensional que define las pérdidas de carga en el difusor causadas por el ángulo de conicidad del mismo. En función del ángulo presente en la pieza y de la geometría de la sección transversal (circular o cuadrada), la expresión matemática para determinar este factor varía considerablemente:

$$K_{e(\text{square})} = \begin{cases} 0.09623 - 0.0041520 & \text{for } \theta < \theta < 1.5^\circ \\ 0.1222 - 0.045900 \theta + 0.022030 \theta^2 + 0.003269 \theta^3 \\ -0.00061450 \theta^4 - 0.00002800 \theta^5 + 0.00002337 \theta^6 & \text{for } 1.5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ -0.01322 + 0.058660 & \text{for } 5^\circ < \theta \end{cases} \quad (3.29)$$

Ilustración 136. Ecuación 3.29 de Barlow (1999), en la que se estipula el factor de expansión de un difusor de sección cuadrada en función de su ángulo de conicidad. Fuente: J.B. Barlow (1999). Low-Speed Wind Tunnel Testing.

- Una vez se conoce la expresión para obtener las pérdidas de carga, se calculan el factor de expansión, el factor de fricción y, finalmente, las pérdidas en el difusor:

$$K_F = \left(1 - \frac{1}{A_R^2} \right) \cdot \frac{f}{8 \cdot \sin \theta} = 0.0342$$

Dado que $\theta = 4^\circ \rightarrow K_E = 0.1222 - 0.04590 \cdot \theta + 0.02203 \cdot \theta^2 + 0.003269 \cdot \theta^3 - 0.0006145 \cdot \theta^4 - 0.00002800 \cdot \theta^5 + 0.00002337 \cdot \theta^6 = 0.41$

$$K_{EXP} = K_E \cdot \left(\frac{A_{RD} - 1}{A_{RD}} \right)^2 = 0.41 \cdot \left(\frac{9.61 - 1}{9.61} \right)^2 = 0.329$$

Por tanto, las pérdidas en el difusor para el caso más desfavorable:

$$(31) H_{r\text{DIFUSOR}} = 0.3633 \cdot \frac{8^2}{2 \cdot 9.81} = 1.185 \text{ m}$$

Caso 2: Si la sección de humectación se trata como un accesorio a la hora de realizar los cálculos:

$$(32) K_{SA} = 0.32 \cdot 0.0213 \cdot \frac{3 \text{ m}}{0.2 \text{ m}} = 0.102$$

$$H_{RCC} = 0.102 \cdot \frac{8^2}{2 \cdot 9.81} = 0.334 \text{ m}$$

1.2.3. CONO DE CONTRACCIÓN

$$K_{CC} = 0.32 \cdot 0.02132 \cdot \frac{0.775 \text{ m}}{0.2 \text{ m}} = 0.026$$

$$H_{RCC} = 0.0226 \cdot \frac{8^2}{2 \cdot 9.81} = 0.086 \text{ m}$$

1.2.4. LANZA HUMIDIFICADORA



Ilustración 137. Lanza humectadora del dispositivo Humisonic. Fuente: carel.es

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Hipótesis de trabajo:

1. Se tomará la lanza humidificadora como un cilindro liso y sin imperfecciones en un conducto de sección cuadrada con el flujo paralelo al plano XY.

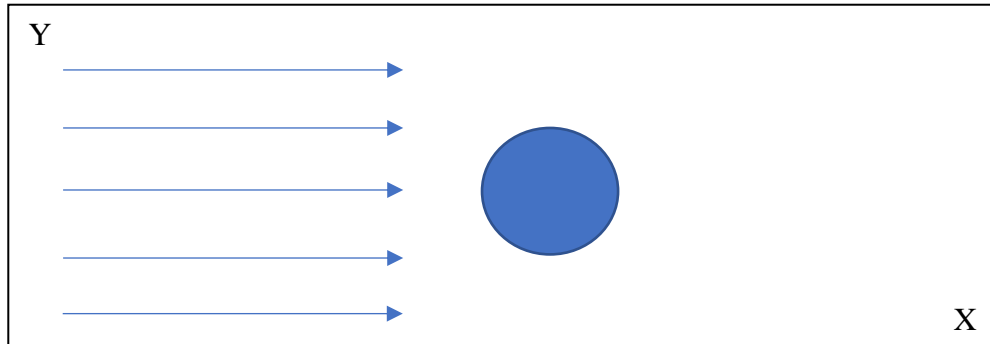


Ilustración 138. Esquematización de la 1ª hipótesis de trabajo empleada para el cálculo de pérdidas de carga debidas a la lanza humectadora. Fuente propia.

2. Aunque la sección del tramo donde se ubica la lanza humidificadora aumenta progresivamente hasta finalizar en la unión con el cono de contracción, a efectos de cálculo se tomarán en consideración aquellas secciones en las que se plantee ubicar la lanza. De ahí la aproximación de sección cuadrada y constante para cada caso.

Cálculo de pérdidas:

$$\zeta = c_x \cdot \frac{S_m/F_o}{\left(1 - 0.5 \cdot \frac{S_m}{F_o}\right)^3} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot y}{D_o}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (58)$$

Donde:

- C_x es el coeficiente de drag o arrastre.
- S_m es el área frontal de la lanza humidificadora.
- F_o es el área de la sección transversal del conducto.
- Y es la distancia vertical entre el eje de la lanza y el eje del conducto.
- D_o es el diámetro interior del conducto, si es circular, o la altura, si es un conducto de sección rectangular o cuadrada.

Calculamos el N° de Reynolds local para la lanza:

$$Re' = \frac{v_0 d_m}{\nu}$$

Donde:

- v_0 es la velocidad libre del fluido en la sección donde se halla la lanza humidificadora, en $m \cdot s^{-1}$. En este caso usaremos la velocidad máxima en esta zona según el caudal másico previsto de aire: para 0.3834 kg/s se tienen 8 m/s (dato obtenido teóricamente y comprobado mediante simulaciones computacionales por el método de Navier Stokes).
- d_m es el diámetro de la lanza humidificadora: en este caso, 35mm.
- ν es la viscosidad cinemática del aire húmedo a la temperatura de estudio (19°C).

- Sección 23 cm x 23 cm:

$$Re' = \frac{v_0 d_m}{\nu} = \frac{\frac{0.3835 \frac{kg}{s}}{1.1983 \frac{kg}{m^3}}}{0.23 m \cdot 0.23 m} \cdot 0.035 m = \frac{13967.32}{0.00001516 \frac{kg}{m \cdot s}} = 13967.32$$

- Sección 35.4 cm x 35.4 cm:

$$Re' = \frac{v_0 d_m}{\nu} = \frac{\frac{0.3835 \frac{kg}{s}}{1.1983 \frac{kg}{m^3}}}{0.354 m \cdot 0.354 m} \cdot 0.035 m = \frac{5896.06}{0.00001516 \frac{kg}{m \cdot s}} = 5896.06$$

- Sección 43.8 cm x 43.8 cm:

$$Re' = \frac{v_0 d_m}{\nu} = \frac{\frac{0.3834 \frac{kg}{s}}{1.1983 \frac{kg}{m^3}}}{0.438 m \cdot 0.438 m} \cdot 0.035 m = \frac{3851.42}{0.00001516 \frac{kg}{m \cdot s}} = 3851.42$$

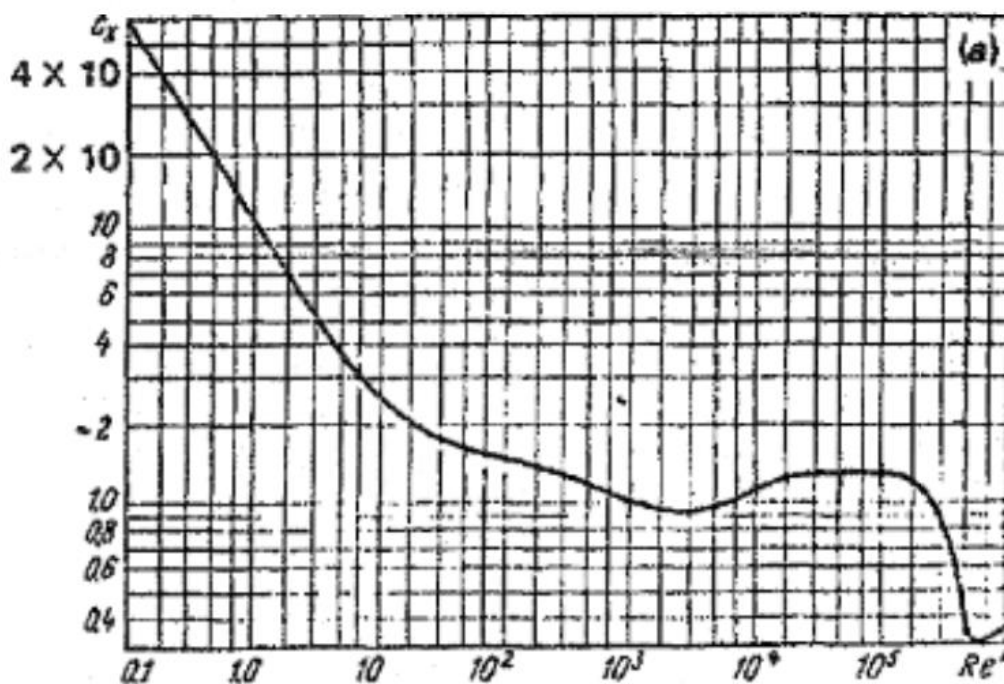
- Sección 46.6 cm x 46.6 cm:

$$Re' = \frac{v_0 d_m}{\nu} = \frac{\frac{0.3834 \frac{kg}{s}}{1.1983 \frac{kg}{m^3}}}{0.466 m \cdot 0.466 m} \cdot 0.035 m = \frac{3402.49}{0.00001516 \frac{kg}{m \cdot s}} = 3402.49$$

Como era de esperar, se observa la clara disminución del número de Reynolds local a medida que se varía la posición de la lanza humectadora en las secciones de mayor tamaño, debido a la reducción de la velocidad de flujo.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

En este caso particular, para determinar el coeficiente de pérdidas de la lanza dentro del sistema tomaremos en cuenta el caso más desfavorable; para ello, tomaremos los casos existentes en los que se pueda emplazar la lanza y se



calculará su coeficiente de arrastre y su pérdida de carga para determinar el peor caso.

Ilustración 139. Gráfico que relaciona la dependencia entre el coeficiente de arrastre y el Número de Reynolds local de un obstáculo cilíndrico que obstruye un conducto de sección cuadrada. Fuente: Idelchik, I (2005). Handbook of Hydraulic Resistance. 4ª Edición.

Con este rango de valores de Reynolds local, se ha decidido optar por calcular las pérdidas a partir de la gráfica de la **ilustración 137**, y podremos conocer el coeficiente de arrastre máximo que posee la lanza humidificadora.

Una vez se tienen todos los datos necesarios para el cálculo del coeficiente de pérdidas, procedemos a calcularlo:

$$\zeta = 1.2 \cdot \frac{\frac{0.035 \text{ m} \cdot 0.23 \text{ m}}{0.23^2}}{\left(1 - 0.5 \cdot \frac{0.035 \text{ m} \cdot 0.2 \text{ m}}{0.2^2}\right)^3} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 0}{0.2}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.193$$

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

$$\zeta = 0.8 \frac{\frac{0.035 \text{ m} \cdot 0.354 \text{ m}}{0.354^2}}{\left(1 - 0.5 \cdot \frac{0.035 \text{ m} \cdot 0.354 \text{ m}}{0.354^2}\right)^3} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 0}{0.354}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.092$$

$$\zeta = 1 \cdot \frac{\frac{0.035 \text{ m} \cdot 0.438 \text{ m}}{0.438^2}}{\left(1 - 0.5 \cdot \frac{0.035 \text{ m} \cdot 0.438 \text{ m}}{0.438^2}\right)^3} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 0}{0.438}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.09$$

$$\zeta = 1 \cdot \frac{\frac{0.035 \text{ m} \cdot 0.466 \text{ m}}{0.466^2}}{\left(1 - 0.5 \cdot \frac{0.035 \text{ m} \cdot 0.466 \text{ m}}{0.466^2}\right)^3} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 0}{0.466}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.084$$

Tabla 10. Factores adimensionales de pérdidas para cada ubicación posible de la lanza humectadora, en función de la sección transversal de emplazamiento, el Número de Reynolds Local y su valor aproximado del coeficiente de arrastre.

Ubicación de emplazamiento	Número de Reynolds Local	Valor aproximado del Coeficiente de arrastre (Cx)	Factor adimensional de pérdidas (ζ)
23 cm x 23 cm	13967.32	1.2	0.24
35.4 cm x 35.4 cm	5896.06	0.8	0.092
43.8 cm x 43.8 cm	3851.42	1	0.09
46.6 cm x 46.6 cm	3402.49	1	0.084

Finalmente, empleamos la expresión de pérdidas secundarias para obtener las pérdidas de carga asociadas a este elemento, tomando como velocidad de referencia la máxima para el fluido en esta zona del conducto para el caudal másico máximo:

$$Hr = \zeta \cdot \frac{(Q/A)^2}{2 \cdot 9.81}$$

Tabla 11. Pérdidas de carga asociadas al caso de colocación de la lanza humectadora más desfavorable.

Ubicación de emplazamiento	Pérdidas de carga (m)
23 cm x 23 cm	0.45

Tal y como se podrá observar más adelante en el cómputo total de pérdidas de carga, la inclusión de la lanza humectadora no supondrá un aumento significativo de las pérdidas de carga, ni siquiera en el caso de funcionamiento más desfavorable.

1.2.5. MALLAS DE CAPTACIÓN

$$Hr_{MALLAS} = n \cdot K_M \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

$$K_M = K_{MALLA} \cdot K_{REYNOLDS} \cdot \sigma_S + \frac{\sigma_S^2}{\beta_S^2}$$

Donde:

- ✓ n es el número de mallas dispuestas de manera adyacente.
- ✓ σ_S es el factor de solidez de la malla, adimensional.
- ✓ β_S es la porosidad de la malla, adimensional.
- ✓ Factor de Reynolds (K_{RN} o $K_{REYNOLDS}$): Es un factor adimensional que depende de la velocidad, del diámetro del hilo, de la densidad del fluido y de la viscosidad dinámica.
- ✓ Factor de malla (K_{malla}): Barlow (1999) distingue tres factores de malla dados por Idel'chik (2005):
 - Para hilos de metal nuevo, 1.0
 - Para hilos circulares de metal promedio, 1.3
 - Para hilos de seda, 2.1

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

The expressions to approximate the local loss coefficient for a screen are

$$K_m = K_{\text{mesh}} K_{Rn} \sigma_s + \frac{\sigma_s^2}{\beta_s^2} \quad (3.37)$$

where the reference¹⁴ gives, for $0 \leq R_{ew} < 400$,

$$K_{Rn} = \left[0.785 \left(1 - \frac{R_{ew}}{354} \right) + 1.01 \right] \quad (3.38)$$

and, for $R_{ew} \geq 400$,

$$K_{Rn} = 1.0 \quad (3.39)$$

Ilustración 140. Cálculo del factor de Reynolds en función del número de Reynolds local existente en un hilo. Fuente: J.B. Barlow (1999). Low-Speed Wind Tunnel Testing

Dado que los hilos empleados en el túnel de viento serán de nylon, se tomará el valor promedio aritmético entre los hilos de metal promedio y los de seda, 1.7, ya que para el túnel de viento se prevé el uso combinado de hilos metálicos y de otros materiales como el nylon.

Por otra parte, puesto que se considera el intervalo de diámetros de hilo como ($0.1 \text{ mm} < d < 5 \text{ mm}$), se considera oportuno tomar un valor de 1 mm de cara a los cálculos posteriores para verificar una malla extremadamente densa con un diámetro de hilo comúnmente usado.

$$R_{EW} = \frac{8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0.001 \text{ m} \cdot 1.1983 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{1.825 \text{ E} - 5 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}} = 525.28$$

Tras obtener el Número de Reynolds para las características de la malla, concluimos que el factor de pérdidas locales es igual a 1, debido a que $R_{EW} > 400$.

Finalmente, calcularemos la porosidad y la densidad de la malla. Supondremos una **distancia entre centros de hilos de 2 mm e hilos de 1 mm** de diámetro, como caso muy desfavorable para simular una malla extremadamente densa:

$$\beta_s = (1 - d_w \cdot \rho_w)^2 = \left(1 - 1\text{mm} \cdot \frac{1}{2\text{mm}} \right)^2 = 0.25$$

$$\sigma_s = 1 - \beta_s = 1 - 0.25 = 0.75$$

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

De este modo obtenemos una malla con un 75% de porcentaje de sombra. Una malla con esta cantidad de porcentaje de sombra es un caso muy desfavorable, dado que en los procesos típicos de captación de niebla el intervalo de porcentaje de sombra oscila entre 40% y 60%, siendo este intervalo el que proporciona mejores eficiencias aerodinámicas y de recolección.

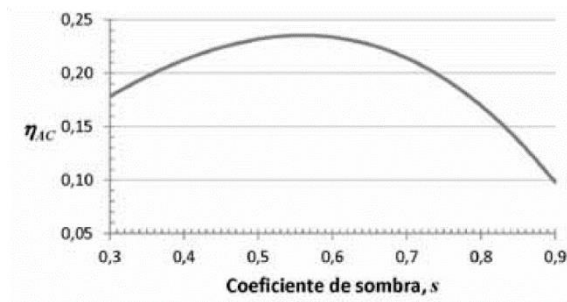


Ilustración 141. Eficiencia aerodinámica de una malla de hilos de sección circular en función del porcentaje de sombra. Fuente: Rivera, 2011

Conociendo estos datos, calculamos el coeficiente de pérdidas secundarias:

- **Para $Re_w > 400$:**

$$K_M = K_{MALLA} \cdot K_{REYNOLDS} \cdot \sigma_S + \frac{\sigma_S^2}{\beta_S^2} = 1,7 \cdot 1 \cdot 0,75 + \frac{0,75^2}{0,25^2} = 10,275$$

Finalmente calculamos las pérdidas de carga:

$$Hr_{MALLAS} = 3 \cdot K_M \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 3 \cdot 10,275 \cdot \frac{8^2}{2 \cdot 9,81} = 100,56 \text{ m}$$

De cara al cómputo final, tomaremos los datos de pérdidas de carga correspondientes a la malla con hilos de 1 mm de diámetro y 2 mm de separación.

Si comparamos estos cálculos teóricos con las simulaciones previas en las que se produce una interacción entre el flujo de aire húmedo y la malla:

- Hilo metálico nuevo: $Hr = \left(1 \cdot 1 \cdot 0,75 + \frac{0,75^2}{0,25^2}\right) \cdot \frac{8^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,1984 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 373,09 \text{ Pa}$
- Hilo metálico promedio: $Hr = \left(1,3 \cdot 1 \cdot 0,75 + \frac{0,75^2}{0,25^2}\right) \cdot \frac{8^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,1984 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 382,53 \text{ Pa}$
- Hilo de nylon: $Hr = \left(1,7 \cdot 1 \cdot 0,75 + \frac{0,75^2}{0,25^2}\right) \cdot \frac{8^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,1984 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 394,03 \text{ Pa}$

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Hilo de seda: $Hr = \left(2.1 \cdot 1 \cdot 0.75 + \frac{0.75^2}{0.25^2}\right) \cdot \frac{8^2}{2 \cdot 9.81} \cdot 1.1984 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} = 405.54 Pa$

Tabla 12. Comparación entre las pérdidas de carga teórica generadas por una malla de 1mm de diámetro de hilo y 2 mm de separación entre centros (distintos materiales) y los resultados de pérdidas obtenidos en simulaciones CFD.

PÉRDIDAS DE CARGA TEÓRICAS (Pa)				RESULTADOS OBTENIDOS EN SIMULACIONES CFD (Pa)	
Para hilo metálico nuevo	Para hilo metálico promedio	Para hilo de nylon	Para hilo de seda	Caída de presión máxima	Caída de presión mínima
372.22	380.81	392.26	403.71	177	109

Para este caso concreto, compararemos las pérdidas de carga teóricas para hilo metálico nuevo y promedio con la caída de presión mínima obtenida en las simulaciones, dado que es el valor en el que se estabiliza la presión tras discurrir por la malla planteada anteriormente. Estas simulaciones han arrojado luz sobre las pérdidas de carga esperables con mallas no estipuladas en bibliografía, y aunque la diferencia es notable entre los cálculos teóricos y los resultados obtenidos en simulaciones CFD, hay que destacar que las ecuaciones teóricas son muy aproximadas y adaptadas y que el Pascal es una unidad de medida muy pequeña. Por tanto, se consideran los resultados obtenidos como válidos, aunque se recomienda contrastarlos experimentalmente una vez el túnel de viento esté completamente operativo.

DIFUSOR

Se sigue el mismo procedimiento que para la sección de humectación.

$$\theta = \arctg \left(\frac{\frac{350}{2} - \frac{200}{2}}{1396} \right) = 3.08^\circ$$

$$K_F = \left(1 - \frac{1}{A_R^2}\right) \cdot \frac{f}{8 \cdot \sin \alpha} = 0.0285$$

Dado que $1.5 < \theta < 5^\circ \Rightarrow K_E = 0.1191$

$$K_{EXP} = K_E \cdot \left(\frac{A_{RD} - 1}{A_{RD}} \right)^2 = 0.1191 \cdot \left(\frac{3 - 1}{3} \right)^2 = 0.0529$$

$$Hr_{DIFUSOR} = K_{DIFUSOR} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 0.2656 \text{ m}$$

1.2.6. CÓMPUTO TOTAL DE PÉRDIDAS DE CARGA. CASO MÁS DESFAVORABLE.

$$Hr_T = 1.185 + 0.45 + 0.086 + 0.1168 + 100.56 + 0.2656 = 102.66 \text{ m}$$

En Pascales:

$$\Delta P = 102.66 \text{ m} \cdot 1.1984 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 1206.94 \text{ Pa}$$

1.3. CÁLCULO DE CURVA RESISTENTE DE LA INSTALACIÓN Y PUNTO DE OPERACIÓN DEL VENTILADOR.

De cara a obtener la curva resistente de la instalación y así calcular los diversos puntos de operación del ventilador en función de los caudales máxicos necesarios y las mallas dispuestas en la cámara de ensayos, se requiere plantear la ecuación de Bernoulli entre la entrada y la salida del túnel de viento:

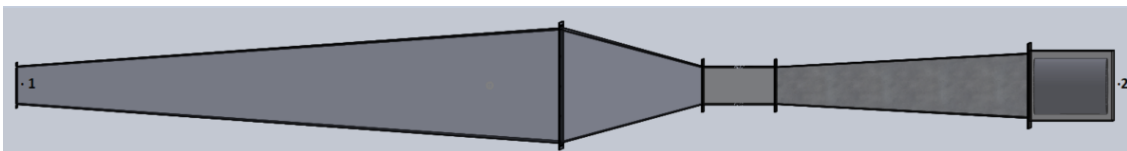


Ilustración 142. Ubicación de los puntos de referencia en el túnel de viento para plantear el cálculo de la curva resistente del sistema y punto de operación del ventilador. Fuente propia.

✓ **Punto 1. Entrada del túnel:**

- **v = Variable en función del caudal máxico (2 m/s – 8 m/s).**
- **P= 101325 Pa**

✓ **Punto 2. Salida del túnel:**

- **v = Variable en función del caudal máxico.**
- **P= 101325 Pa**

Conociendo las condiciones de contorno existentes, procedemos a plantear el Teorema de Bernoulli entre los puntos 1 y 2:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

$$H_1 - H_r + H_v = H_2 \rightarrow \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 - (Hr_{SH} + Hr_{Lanza} + Hr_{CC} + Hr_{CE} + Hr_{Malla} + Hr_{Dif}) + H_v = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2$$

Puesto que la entrada y la salida del túnel están a presión atmosférica y a la misma altura piezométrica, omitimos los términos de presión y cota:

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} - (Hr_{SH} + Hr_{Lanza} + Hr_{CC} + Hr_{CE} + Hr_{Malla} + Hr_{Dif}) + H_v = \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

Si omitimos los términos de velocidad, queda la siguiente igualdad:

$$H_v = \Sigma H_r \tag{60}$$

A partir de aquí se distinguirán dos procedimientos para comprobar que los términos de velocidad son despreciables en este caso para efectuar el cálculo de la curva resistente:

- En el primero se realizará el cálculo de la curva resistente omitiendo las velocidades de entrada y salida.
- El segundo tendrá en cuenta las curvas de carga debidas a la velocidad, que se añadirán al final a la curva resistente más desfavorable.

CURVAS RESISTENTES INDIVIDUALES

- **Cámara de ensayos:**

$$H_{r_{CE}} = f \cdot \frac{L_{CE}}{D_{h_{CE}}} \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 0.0179 \cdot \frac{0.4 \text{ m}}{0.2 \text{ m}} \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2 \cdot (0.2 \cdot 0.2)^2} = 8.8 \times 10^{-8} \cdot Q^2$$

- **Sección de humectación:**

- Si la tomamos como un difusor:

$$Hr_{SH} = K_{SH} \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 0.3633 \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 8.93 \times 10^{-7} \cdot Q^2$$

- Si la tomamos como un accesorio:

$$Hr_{SH} = K_{SH} \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 0.102 \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 2.51 \times 10^{-7} \cdot Q^2$$

- **Cono de Contracción:**

$$H_{RCC} = 0.0226 \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 3600^2} = 5.56 \times 10^{-8} \cdot Q^2$$

- **Difusor:**

$$Hr_{DIFUSOR} = K_{DIFUSOR} \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 0.0814 \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 2 \times 10^{-7} \cdot Q^2$$

- **Lanza humidificadora:** Dado que las pérdidas de carga para la lanza humidificadora se han basado en el coeficiente de arrastre consignado para el peor caso (sección de 23 cm x 23 cm), éstas se supondrán como una constante, y no como una variable dependiente del caudal cuadrático. Por tanto:

$$Hr_{LANZA} = 0.45 \text{ m}$$

- **Mallas:**

$$Hr_{1MALLA} = K_M \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 10.275 \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 2.53 \times 10^{-5} \cdot Q^2$$

$$Hr_{2MALLAS} = 2 \cdot K_M \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 2 \cdot 10.275 \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 5.05 \times 10^{-5} \cdot Q^2$$

$$Hr_{3MALLAS} = K_M \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 3 \cdot 10.275 \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2} = 7.58 \times 10^{-5} \cdot Q^2$$

PÉRDIDAS DE CARGA TOTALES

- **Tomando la sección de absorción como difusor (peor caso):**
 - **Para una malla:**
 - $Hr_T = 0.0000265 \cdot Q^2 + 0.45$ [m]
 - $\Delta P_T = 0.000312 \cdot Q^2 + 5.29$ [Pa]
 - **Para dos mallas**
 - $Hr_T = 0.000052 \cdot Q^2 + 0.45$ [m]
 - $\Delta P_T = 0.00061 \cdot Q^2 + 5.29$ [Pa]
 - **Para tres mallas:**
 - $Hr_T = 0.000077 \cdot Q^2 + 0.45$ [m]
 - $\Delta P_T = 0.00091 \cdot Q^2 + 5.29$ [Pa]

- **Tomando la sección de absorción como accesorio (caso más favorable):**
 - **Para una malla:**
 - $Hr_T = 0.0000259 \cdot Q^2 + 0.45$ [m]
 - $\Delta P_T = 0.0003 \cdot Q^2 + 5.29$ [Pa]
 - **Para dos mallas**
 - $Hr_T = 0.0000512 \cdot Q^2 + 0.45$ [m]
 - $\Delta P_T = 0.0006 \cdot Q^2 + 5.29$ [Pa]
 - **Para tres mallas:**
 - $Hr_T = 0.0000765 \cdot Q^2 + 0.45$ [m]
 - $\Delta P_T = 0.0009 \cdot Q^2 + 5.29$ [Pa]

De cara a los cálculos para la curva resistente y a la obtención del punto de operación del ventilador, emplearemos el caso más desfavorable. Además, tal y como se ha mencionado con anterioridad, se comprobará la aportación de la velocidad a las curvas resistentes:

- **Tomando la sección de absorción como difusor (peor caso) y teniendo en cuenta la aportación de la velocidad del flujo a la entrada (no suponiendo que la velocidad a la entrada es 0 m/s):**
 - **Para una malla:**
 - $Hr_T = (0.0000265 \cdot Q^2 + 0.45) - \frac{(Q/A)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2}$ [m] = $0.000024 \cdot Q^2 + 0.45$
 - **Para dos mallas:**
 - $Hr_T = (0.000052 \cdot Q^2 + 0.45) - \frac{(Q/A)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2}$ [m] = $0.0000495 \cdot Q^2 + 0.45$
 - **Para tres mallas:**
 - $Hr_T = (0.000077 \cdot Q^2 + 0.45) - \frac{(Q/A)^2}{2 \cdot g \cdot 3600^2}$ [m] = $0.0000745 \cdot Q^2 + 0.45$

Comparando las curvas resistentes para cada número de mallas y si se tiene o no en cuenta la aportación de velocidad a la entrada del túnel es notable que su aportación no es significativa, por lo que no se tendrá en cuenta para hallar el punto de operación del ventilador.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Tabla 13. Curva resistente de la instalación en función del número de mallas colocadas.

CURVA RESISTENTE INSTALACIÓN			
CAUDAL (m/h)	PÉRDIDAS CASO DESFAVORABLE (Pa)		
	1 MALLA	2 MALLAS	3 MALLAS
250	26,78	45,405	63,53
300	35,36	62,18	88,28
350	45,5	82,005	117,53
400	57,2	104,88	151,28
450	70,46	130,805	189,53
500	85,28	159,78	232,28
550	101,66	191,805	279,53
600	119,6	226,88	331,28
650	139,1	265,005	387,53
700	160,16	306,18	448,28
750	182,78	350,405	513,53
800	206,96	397,68	583,28
850	232,7	448,005	657,53
900	260	501,38	736,28
950	288,86	557,805	819,53
1000	319,28	617,28	907,28
1050	351,26	679,805	999,53
1100	384,8	745,38	1096,28
1150	419,9	814,005	1197,53
1200	456,56	885,68	1303,28
1250	494,78	960,405	1413,53

Una vez se tienen las curvas resistentes de la instalación para el caso más desfavorable y las curvas características del ventilador para cada frecuencia, mediante la intersección de cada curva resistente para cada frecuencia del ventilador, se podrán obtener los puntos de operación del ventilador. Al igual que para obtener la curva característica del ventilador de cara a su introducción en la base de datos de ventiladores de SolidWorks, se empleará un digitalizador de gráficas:

- Tras convertir la gráfica resultante a formato .png, se introduce en el digitalizador de gráficas, se establecen los puntos máximos y mínimos de la gráfica y a qué valores están asociados.
- A continuación, se seleccionarán los puntos de intersección entre la curva resistente para una malla, dos mallas y tres mallas, con la correspondiente curva del ventilador (20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 45 Hz y 50 Hz). De este modo, se obtendrán 15 puntos de operación.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

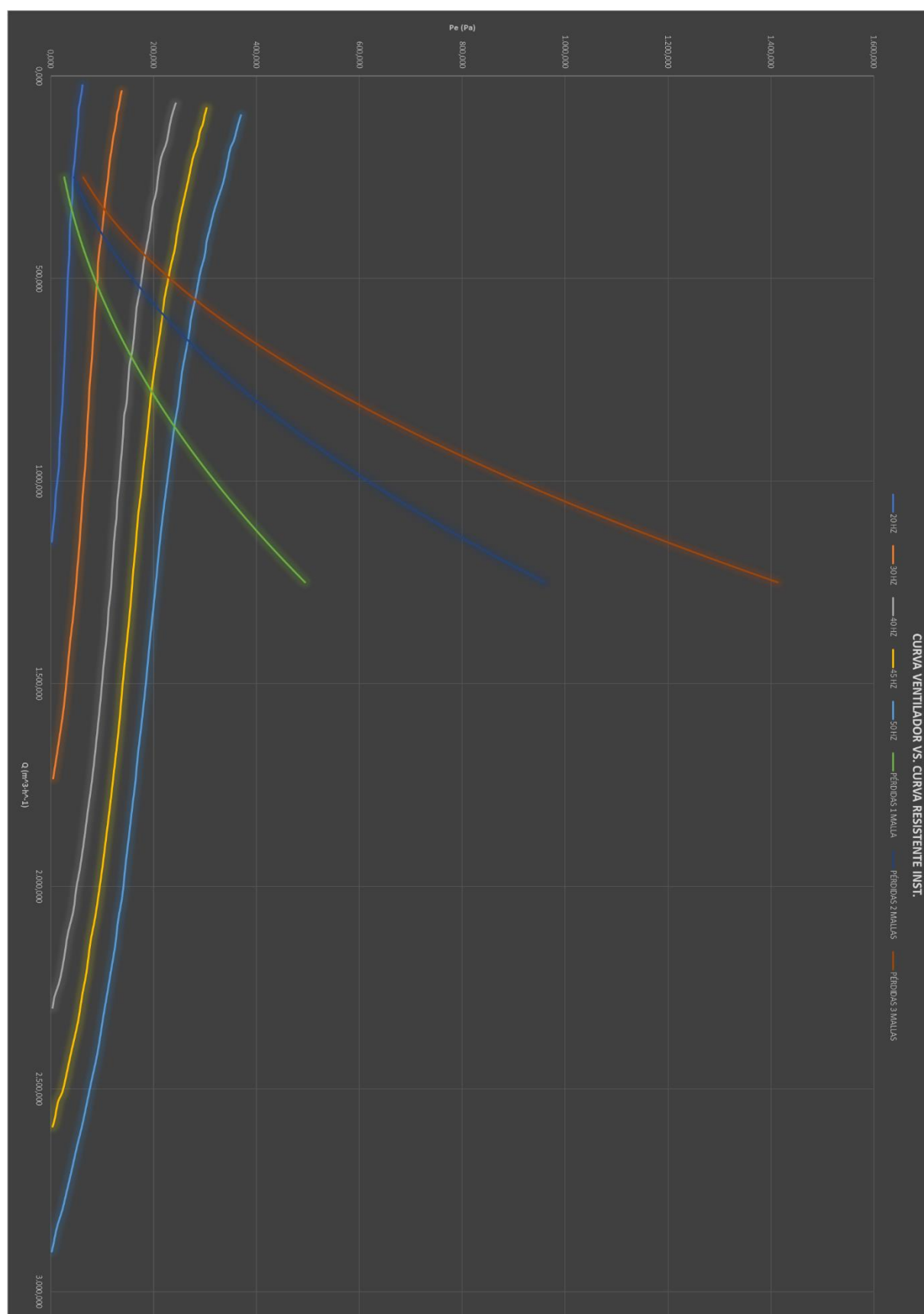


Ilustración 143. Intersección de las curvas resistentes del túnel de viento para los casos de introducción de 1, 2 o 3 mallas y las curvas características del ventilador. Fuente propia.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Tabla 14. Puntos de funcionamiento del ventilador asociados a la introducción de una malla.

Frecuencia (Hz)	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/s)	ΔP (Pa)
20	324.36	2.25	41.03
30	512.86	3.56	89.38
40	691.74	4.8	155.31
45	777.78	5.4	195.85
50	864.95	6	239.81

Tabla 15. Puntos de funcionamiento del ventilador asociados a la introducción de dos mallas.

Frecuencia (Hz)	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/s)	ΔP (Pa)
20	247.94	1.72	42
30	388.32	2.7	98.17
40	521.92	3.62	173.87
45	587.58	4.08	217.83
50	651.55	4.53	266.67

Tabla 16. Puntos de funcionamiento asociados a la introducción de 3 mallas.

Frecuencia (Hz)	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/s)	ΔP (Pa)
20	0	0	0
30	328.32	2.28	103.54
40	440.97	3.06	182.66
45	495.88	3.45	229.55
50	551.92	3.83	278.88

Tal y como se puede apreciar en los puntos de funcionamiento mostrados arriba, el ventilador es capaz de hacer frente a la mayoría de las velocidades comprendidas en el rango de 6 m/s-8 m/s. Sin embargo, no es capaz de hacer frente a las velocidades de 7 m/s y 8 m/s en la cámara de ensayos con las pérdidas actuales generadas en el túnel. Aunque dado que las mallas dispuestas en la cámara de ensayos serán de un porcentaje de sombra menor que la del **caso más desfavorable**, es posible que se vea incrementada la velocidad en la cámara de ensayos en los distintos puntos de operación y se tenga un rendimiento superior al esperado.

CAPÍTULO V: MONTAJE Y DISPOSICIÓN FINAL
DEL TÚNEL DE VIENTO

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Una vez se tiene de forma definitiva el instrumental que se implementará en el túnel de viento, las simulaciones que muestran el comportamiento del flujo a lo largo de éste, y los puntos de operación del ventilador, estamos en posición de proponer una distribución detallada del instrumental, así como de las piezas nuevas que se implementarán debido a la ampliación del túnel. Por ello, en este capítulo se desglosará la distribución del instrumental, y se realizará una justificación de piezas adicionales para el túnel, que no son indispensables para su operación, pero que tienen importancia de cara a desempeñar el propósito para el que fue diseñado.

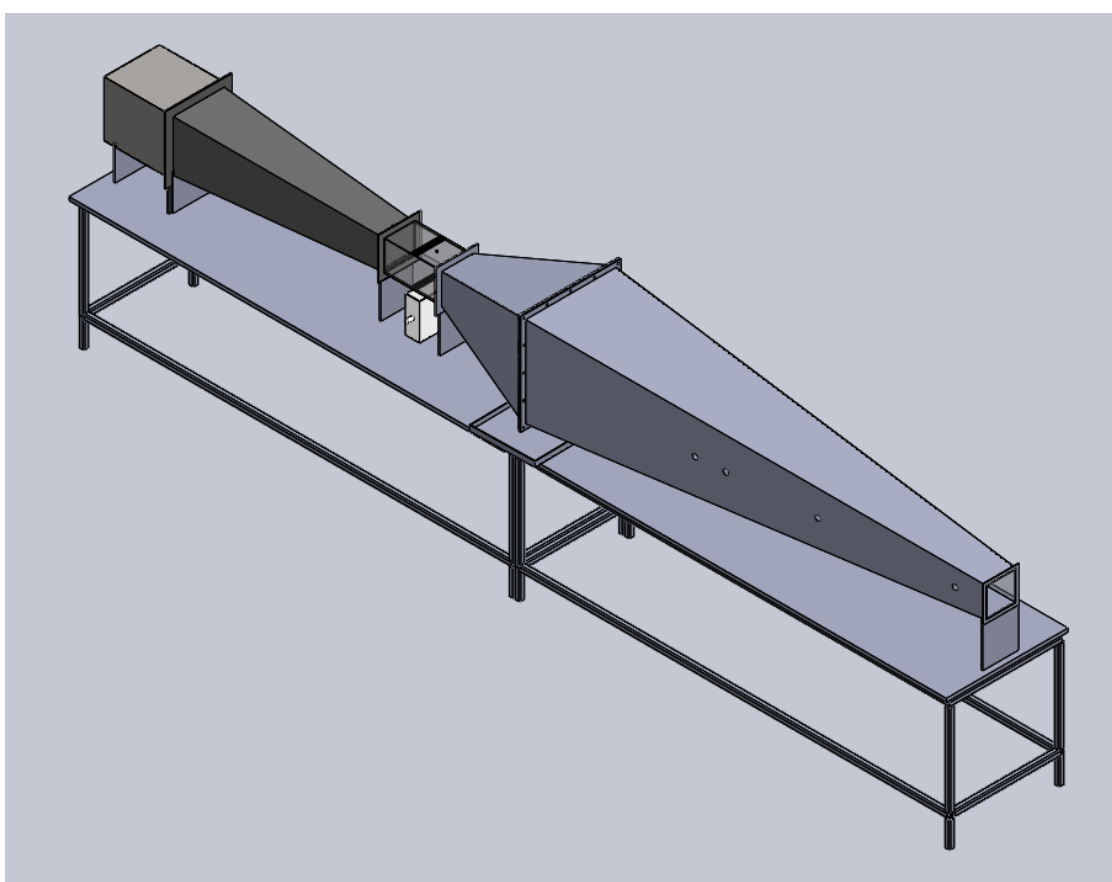


Ilustración 144. Perspectiva isométrica del ensamblaje y disposición final de las piezas del túnel de viento. Fuente propia.

Como complemento a la ilustración previa, en la que se orienta sobre el emplazamiento de las piezas del túnel, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Las lanzas de humidificación del humectador de alta presión emplazarán en el exterior del tramo de absorción, y en sentido contrario al del flujo de aire húmedo. Esto se debe principalmente al hecho de que, al generarse gotas de tamaño más grande en este sistema (35 micras de tamaño promedio) frente al

humidificador ultrasónico (5 micras de tamaño promedio), el tiempo de absorción en el aire circundante aumenta. De este modo se asegura una correcta absorción y se evita una mayor condensación indeseada en zonas posteriores del túnel de viento. Además, debido al hecho de que las boquillas de menor caudal aportan 5 l/h, a la hora de implementar este nuevo sistema en el túnel en un futuro próximo, con objeto de conseguir las condiciones requeridas, se requerirá reducir el caudal.

- Las lanzas del humectador ultrasónico, tal y como se mostró en el Capítulo III, se emplazarán en el interior del tramo de absorción gracias al mecanizado de aligeramientos de 35 mm para su correcta colocación en distintas posiciones, dependiendo de las necesidades de caudal másico, tal y como se ha justificado en el Capítulo III.
- En cuanto al medio para el soporte del humectador ultrasónico, se han barajado dos opciones: en primer lugar, realizar un soporte que resista la carga estática que suponga el peso del dispositivo y que permita desplazarlo en función del aligeramiento de humectación seleccionado para los estudios (ilustración inferior). En segundo lugar, anclarlo a la nueva pieza del túnel de viento a modo de fijación a un fan coil (ver ficha técnica de Humisonic, anexo I). Dado que las instrucciones pertinentes al acople a un fan coil se hallan en el manual, se describirá la primera solución barajada.

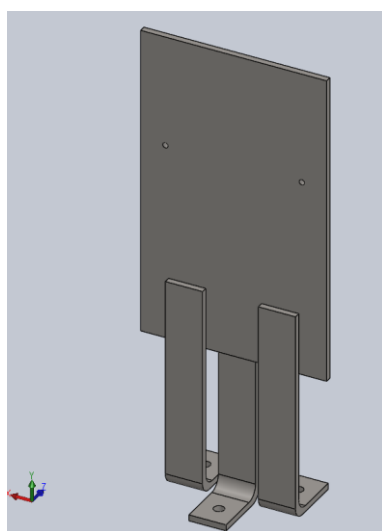


Ilustración 145. Isometría de la propuesta de soporte para el humectador Humisonic. Fuente propia.

Detalles constructivos:

- Material: Acero AISI 1020.
- Espesor de la chapa: 5 mm
- Fijación: Dos taladros para tornillos M4 separados 110 mm destinados a la colocación del Humisonic y tres taladros M8 destinados a fijar el soporte a la bancada y a soportar la flexión positiva y negativa debido al peso en voladizo del dispositivo.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Dado que ésta será una pieza que deba soportar una carga estática (el peso del humidificador ultrasónico), se han realizado estudios de carga con las siguientes condiciones de contorno.

- Sujeciones: Geometría fija en las ubicaciones de los pernos M8.
- Cargas:
 - Acción de la gravedad.
 - En vez de proponer un peso distribuido de manera no uniforme, se propondrá el peso del humidificador con su depósito lleno (8 kg aprox.) concentrado en un punto a 185 mm (profundidad del humidificador y distancia de la acción de la carga al eje de giro) del punto de sujeción.

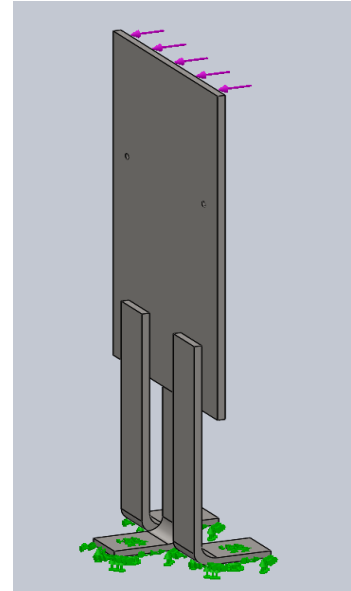


Ilustración 146. Condiciones de contorno propuestas para el estudio de cargas estáticas del soporte del humidificador. Fuente propia.

Observando la ilustración 144, no se ha planteado exactamente la condición de carga como se ha descrito previamente: en este caso se tiene una carga en el vértice superior del soporte ubicada a 372 mm de su eje de giro, que es la base del soporte. En estas condiciones si se aplica la misma carga el momento generado sería distinto, por lo que mediante la igualación de momentos se deberá obtener la carga necesaria para hacer ambas situaciones equiparables:

$$8 \text{ kgf} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.185 \text{ m} = F \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.372 \text{ m} \Rightarrow F = 4 \text{ kgf}$$

Una vez se tiene la carga, procedemos a resolver la simulación y obtener los resultados:

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

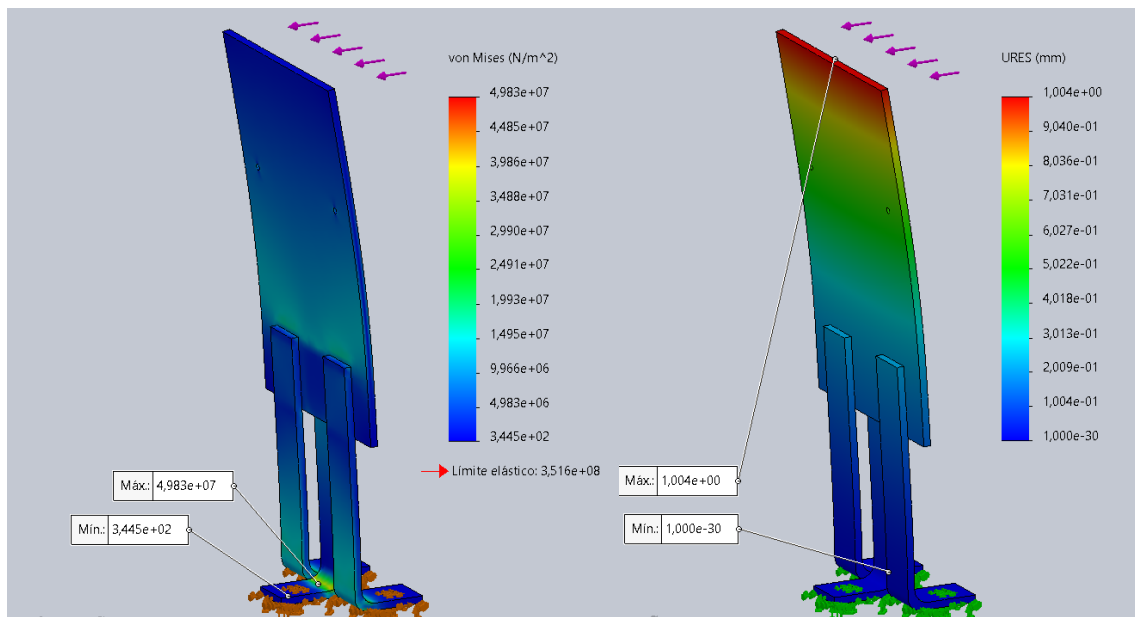


Ilustración 147. Resultados de tensión equivalente de Von Mises (izquierda) y deformada (derecha) de los estudios de carga planteados para el soporte del humidificador ultrasónico en SolidWorks. Fuente propia.

Viendo los resultados obtenidos en las simulaciones de carga estática (ilustración 145), se puede apreciar que la mayor deformación se halla en la parte más externa del soporte, con una magnitud de 1 mm, y el punto de mayor tensión se halla en la curvatura interior de la pata central del soporte, con una cuantía de $4.983E+7 \text{ N/m}^2$, y dado que el límite elástico del acero AISI 1020 es de $3.516E+8 \text{ N/m}^2$, obtenemos un coeficiente de seguridad de 7.06, un resultado más que aceptable y conservador para la integridad estructural del soporte.

- De cara al instrumental de medida se han diseñado orificios en aquellos puntos necesarios del túnel de viento para introducir las sondas de medición. Además, para evitar posibles perturbaciones del flujo debido al mecanizado de aligeramientos y a la posible irrupción de aire exterior en la zona de ensayos, se recomienda la implementación de algún sistema de cierre de los orificios. Esto es posible realizarlo mediante el modelado e impresión 3D.
 - Los aligeramientos planteados en la cámara de ensayos y en el difusor están destinados para los tubos de Pitot del manómetro diferencial.
 - En los aligeramientos destinados a la lanza humectadora ultrasónica, previamente a su introducción pueden realizarse lecturas del perfil de velocidades para verificar que se cumplen las condiciones de flujo determinadas mediante simulación CFD a lo largo de este TFG.

- En cuanto a la visualización del flujo, dado que la cámara de alta velocidad por cuestiones de funcionamiento y espacio debe ir ubicada exteriormente al túnel de viento enfocando hacia la cámara de ensayos, se recomienda impregnar las paredes interiores del túnel con pintura impermeabilizante o sustancias hidrofóbicas, de cara a evitar condensaciones (y, por tanto, pérdida de visibilidad de lo que sucede en la cámara de ensayos) y embolsamientos de agua en cualesquiera de las piezas.
- Los soportes del túnel de viento se han realizado en base a los diseños previos mostrados en *“Diseño y construcción de un túnel de viento de baja velocidad”*, y los soportes planteados a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se han generado de forma esquemática e ilustrativa, dado que se considera que la opción de sustentación de la estructura vista en la [ilustración 53](#) es válida y suficiente. Además, los soportes iniciales (tal y como se percibirá en los planos) se han planteado de tal manera que elevan la estructura sobre la bancada con el objetivo fundamental de poder introducir una bandeja de recogida de condensado entre el cono de contracción y la sección de humectación.
- Finalmente, de cara a la recogida de condensado proyectada para la unión entre la sección de humectación y el cono de contracción se barajan dos opciones:
 - Se construyen los marcos de recogida de condensado comentados en el **Capítulo III**, o los marcos de tanto el cono de contracción como la sección de humectación se fabrican de la misma manera que los marcos de recogida de condensado (abiertos por la zona inferior) y se ahorra en material y horas de taller.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES DEL
PROYECTO

Con el objetivo de cerrar este Trabajo de Fin de Grado, y analizar tanto la perspectiva técnica como la personal a lo largo de los meses de trabajo, este capítulo se dedicará a plasmar las principales conclusiones que han podido extraerse de este proyecto.

1. CONCLUSIONES TÉCNICAS

Revisando los dos objetivos más importantes de este Trabajo de Fin de Grado:

- **Instrumentar un túnel de viento de baja velocidad con los aparatos necesarios para simular estudios de captación de agua de niebla y sus parámetros físicos más influyentes.**
 - Con los conocimientos adquiridos de varias ramas, como la captación de niebla, estudios aerodinámicos en túneles de viento, y la psicrometría, se ha conseguido calcular, investigar, y elegir una instrumentación suficiente y versátil para el desarrollo de los ensayos de captación de niebla que se realizarán en un futuro próximo en el **ICIA (Instituto Canario de Investigaciones Agrarias)**. De este modo, podrán controlarse aspectos clave para las investigaciones, desde el control de la temperatura o de las presiones, hasta el control preciso de la humedad en función de las condiciones requeridas, pasando por la posibilidad de realizar mediante prototipado rápido cualquier pieza necesaria gracias a impresoras 3D, sin incurrir en el uso de instrumental y/o software/hardware de alta complejidad.
 - Asimismo, los conocimientos adquiridos acerca de los procesos de humidificación, y los aspectos de operación derivados del tamaño de gota, han ayudado a dar asesoramiento sobre la implementación de los humidificadores, aparatos que convencionalmente no están concebidos para este uso, pero que se han logrado adaptar.
- **Llevar a cabo una ampliación no convencional en un túnel de viento NPL convencional, con el objetivo de que ayude al túnel a cumplir su propósito: realizar estudios de captación de agua de niebla.**
 - Se ha llevado a cabo un proceso iterativo destinado a escoger la geometría más idónea para el desarrollo del flujo de la pieza que albergará las lanzas humectadoras y transportará la niebla hasta la

cámara de ensayos, finalizando de manera satisfactoria con una pieza funcional a efectos prácticos y que está en proceso de ser fabricada.

- Se han calculado teóricamente y contrastado mediante simulaciones aquellas zonas donde la implementación de una lanza de un humectador ultrasónico, que tiene restricciones de velocidad para poder realizar una operación satisfactoria, sea adecuada para el propósito del túnel. Cada una de estas ubicaciones es apta para un rango de caudales máxicos determinados dentro del rango requerido, además, existe espacio para la inclusión de nuevas ubicaciones para la lanza en caso necesario.

- **Recalcular las pérdidas de carga con respecto a la versión de 2017 de este túnel de viento para el caso más desfavorable, así como recalcular la curva resistente de la instalación para determinar si el ventilador escogido para este túnel sigue siendo factible a nivel técnico. De este modo, se han podido establecer los puntos de operación que puede proporcionar el ventilador para cada frecuencia de giro y número de mallas dispuestas en la cámara de ensayos.**

A pesar de la introducción de una pieza nueva y de las lanzas humectadoras, se ha podido comprobar que las pérdidas en la instalación y, por ende, los puntos de operación han sufrido variaciones inapreciables.

- **Realizar simulaciones para determinar en qué punto/s de la cámara de ensayos son más adecuados la introducción de tubos de Pitot, sin que las perturbaciones causadas al flujo por su geometría influyan de alguna manera en la condición de flujo libre que posee el flujo previamente a la interacción con las mallas de captación de niebla. En las condiciones más exigentes de flujo se ha concluido que la ubicación es aceptable y que las perturbaciones ocasionadas al flujo por la forma del instrumental se disiparán antes de la zona ocupada por las mallas.**
- **Realizar una comparativa entre las pérdidas de carga teóricas causadas por la interacción entre un flujo de aire que circula perpendicularmente a una malla de captación de niebla tipo arpa y su analogía en simulaciones computarizadas. Como se comentó previamente, estos resultados obtenidos son más que aceptables debido a la exactitud del software CFD moderno, lo**

que supondría a efectos prácticos una ligera reducción de las pérdidas de carga en el túnel y una potencial oportunidad para calcular las pérdidas específicas de carga de cualquier geometría planteada por el ICIA con exactitud.

2. CONCLUSIONES PERSONALES

De un modo más personal, y desde el punto de vista ya no como alumno, sino como futuro profesional, he podido extraer las siguientes conclusiones:

- El hecho de abordar un proyecto de un área completamente nueva en la que nunca he trabajado, a pesar de que su base reside en conocimientos ya adquiridos en los estudios de grado, ha supuesto un reto de cara a mejorar como futuro profesional: comprensión de nuevos conceptos, mejorar el enlace entre conocimientos para dar lugar a soluciones coherentes y una mejora de la organización, la gestión del tiempo en cuanto a plazos, contacto con proveedores y resolución de problemas cuyas soluciones tienen cierto carácter novedoso o de no haberse implementado previamente para este problema concreto.
- En cuanto a habilidades, este Trabajo de Fin de Grado me ha supuesto un crecimiento en el uso de software CAD/CAM, como lo es el **SolidWorks**, en términos de fluidez en el modelado, mejora en la rapidez al solucionar problemas con modelos, y ganar algo de experiencia a partir de una necesidad que exige materializarse físicamente (como el sistema colector de agua o el tramo de humidificación). Todo esto gracias a lo aprendido en asignaturas de grado como Ingeniería Fluidomecánica, Modelización Mecánica de los Elementos Estructurales, Instalaciones Hidráulicas, e Ingeniería Gráfica. De igual manera, aplicar el conocimiento previo del programa en un área de estudio completamente nueva ha sido un reto, en el sentido de buscar soluciones factibles a problemas que no se han desarrollado específicamente con este software, lo que ha supuesto una ayuda inestimable al crecimiento como futuro profesional.
- Por último, y personalmente creo que es lo más importante, poder trabajar en un proyecto en el que se haya logrado hacer un pequeño aporte para ayudar en la resolución de uno de los grandes problemas actuales de la humanidad, como lo

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

son las graves y frecuentes sequías y la escasez de agua, mediante la investigación de la captación de niebla, considero muy importante y gratificante, pues quizá sirva de base para que otros organismos de investigación puedan implementar soluciones a su medida.

CAPÍTULO VII: REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

1. LISTADO DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1. Fray Bartolomé de las Casas. Historias de las Indias. Libro I/II/III. Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. Fundación Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. [Internet] [Consultado el 7 de febrero de 2020]. Disponible en: http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/historia-de-las-indias--0/html/d31cc52d-acd9-4776-a069-ee37b963f399_12.html#I_1
2. María Rocés. Árbol fuente, el Garoé. Ciencias. Jot Down Cultural Magazine. [Internet] [Consultado el 7 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.jotdown.es/2016/11/arbOL-fuente-garoe/>
3. Claudio Cerda. Creador del atrapanieblas está vigente a casi 60 años de su hito. Nacional. El Mercurio. Publicado el 30 de octubre de 2017. [Internet] [Consultado el 3 de julio de 2020]. Disponible en: <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=412377>
4. Felipe Abreu y Luiz Felipe Silva. Chile: los atrapanieblas que capturan agua en Atacama, uno de los lugares más secos del mundo. BBC. NEWS/ Mundo. Chile. Publicado el 29 de mayo de 2015. [Internet] [Consultado el 19 de marzo de 2020]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/05/150521_atrapanieblas_chile_de_sierto_lp
5. Historia de los atrapanieblas [Internet] [Consultado el 14 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/atrapaniebla/project-definition>
6. GAROÉ. Agua de las nubes de Canarias. Agualternativa Ingeniería S.L. Santa Cruz de Tenerife. [Internet] [Consultado el 15 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20170616122242/http://agualternativa.com/>
7. Jesús Ruiz Mesa. La captación de agua de niebla. Ventana Verde: Naturaleza, senderismo y medio ambiente. Blogs. Canarias7. Publicado el 17 de noviembre de 2014, Telde. [Internet] [Consultado el 13 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://blogs.canarias7.es/ventanaverde/2014/11/la-captacion-de-agua-de-niebla/?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>
8. Carlos Espinoza. El Pensador 2. Publicado el 9 de agosto de 2017. Carlos Espinoza, el inventor de los Atrapanieblas. Universidad Católica del Norte.

- [Vídeo] [Internet] [Consultado el 3 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Aqw1HecqDQ8>
9. Patricio Alegre A. El “padre” de los atrapanieblas. El Mercurio de Antofagasta. [Internet] [Consultado el 3 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.mercurioantofagasta.cl/site/apg/reportajes/pags/20021217182451.html>
10. Rafael Salgado Garciglia. Atrapanieblas. Sabermás. Revista de Divulgación de la Universidad Michoacan de San Nicolás de Hidalgo. [Internet] [Consultado el 7 agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/270-numero-31/486-atrapanieblas.html>
11. Bicicanarias. Publicado el 11 de noviembre de 2008. Los captanieblas, para recoger agua de las nubes en Tenerife. [Vídeo] [Internet] [Consultado el 9 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=hxztkes3uGc>
12. La ONU premia un proyecto para captar agua con participación de la ULL. Publicado el 21 de octubre de 2016. El Diario. [Internet] [Consultado el 3 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.eldiario.es/canariasahora/tenerifeahora/sociedad/onu-proyecto-captar-participacion-ull_1_3773818.html
13. Atrapanieblas: experimento nubes para captar agua. Twenergy. Publicado el 2 de julio de 2019. [Internet] [Consultado el 1 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/curiosidades/atrapanieblas-exprimiendo-nubes-para-captar-agua-553/>
14. El Cabildo lidera un proyecto para recuperar bosques y acuíferos con atrapanieblas. Telde Actualidad. Gran Canaria. Publicado el 6 julio de 2020. [Internet] [Consultado el 12 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.teldeactualidad.com/hemeroteca/noticia/grancanaria/2020/07/06/7435.html>
15. Life nieblas. Actividad. Proyectos. Instituto Tecnológico de Canarias. Gobierno de Canarias. [Internet] [Consultado el 9 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.itccanarias.org/web/es/actividad/proyectos/life-nieblas>

16. Los captadores de brumas. Aguas de Garoé. Revista de Medio Ambiente 22. Publicado en 2001. [Internet] [Consultado el 13 de abril de 2020]. Disponible en: <http://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/sostenibilidad/apps/revista/2001/22/275/index.html>
17. TEIDAGUA instala mallas para coger agua de nube en Anaga. Econews. Residente Canario. [Internet] [Consultado el 19 de junio de 2020]. Disponible en: http://www.residentecanario.com/index.php?option=com_content&task=view&id=4585&Itemid=242
18. Los nacientes del agua. Senderismo en La Palma. Ruta de Marcos y Cordero. Silvestres Ezcaray. Publicado el 9 de mayo de 2019. [Internet] [Consultado el 23 de abril de 2020]. Disponible en: <https://silvestresezcaray.com/los-nacientes-del-agua/>
19. Listado de especies. *Ocotea foetens*. Arbolapp Canarias. [Internet] [Consultado el 24 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.arbolappcanarias.es/especies/ficha/ocotea-foetens/>

MARCO TEÓRICO

20. Teorema de Bernoulli. Ecu Red. 216-815. [Internet] [Consultado el 9 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Teorema_de_Bernoulli
21. ¿Qué es la ecuación de Bernoulli? Dinámica de fluidos. Khan Academy. [Internet] [Consultado el 9 de enero de 2020]. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation>
22. Ecuación de continuidad. Mecánica de fluidos. You Physics. [Internet] [Consultado el 26 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.youphysics.education/es/ecuacion-de-continuidad/>
23. M Olmo R Nave. Ecuación de Bernoulli. Conceptos sobre Bernoulli. Índice. [Internet] [Consultado el 3 de marzo de 2020]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html>
24. Efecto Venturi. Ecu Red. 216-822. [Internet] [Consultado el 16 de marzo de 2020]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Efecto_Venturi

TUNEL DE VIENTO

25. Máquina de humo: funcionamiento. Efectos especiales. Máquinas FX. [Internet] [Consultado el 1 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://maquinasfx.com/blog/efectos-especiales/maquina-de-humo-funcionamiento>
26. Ensayos en túnel de viento. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables. Cabildo de Tenerife. [Internet] [Consultado el 15 de enero de 2020]. Disponible en: <https://www.iter.es/portfolio-items/ensayos-en-tunel-de-viento/>
27. ¿Qué son los humidificadores y cuáles son sus aplicaciones en la industria?. Noticias. H2O TEK. Publicado el 21 de noviembre de 2017. [Internet] [Consultado el 27 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.humidificadores.mx/noticias/que-son-los-humidificadores-y-cuales-son-sus-aplicaciones-en-la-industria/>
28. Cámaras Alta Velocidad. AOS Technologies AG. [Internet] [Consultado el 11 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.aostechnologies.com/es/>
29. Generador de humo para visualización de flujos de aire. Generador de Humo. Steriltech. [Internet] [Consultado el 20 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://steriltech.net/iberia/generador-de-humo.html>
30. La universidad de Almería patenta un túnel de viento para el estudio de la erosión. Universidad de Almería. Publicado el 12 de febrero de 2013. Idesqbre. [Internet] [Consultado el 6 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://idescubre.fundaciondescubre.es/noticias/investigadores-de-la-universidad-de-almeria-patentan-un-tunel-de-viento-para-el-estudio-de-la-erosion-eolica/>
31. La historia del túnel de viento. Publicado el 16 de febrero de 2017. Hurricane Factory. [Internet] [Consultado el 3 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.hurricanefactory.com/madrid/es/news/more/la-historia-del-tunel-de-viento>
32. Túnel aerodinámico. Ecu Red. 216-822. [Internet] [Consultado el 3 de agosto de 2020]. Disponible en: https://www.ecured.cu/T%C3%BAnel_aerodin%C3%A1mico#Historia

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

33. Whirling Arms and the First Wind Tunnels On the End of a Whirling Arm. Cáp.1. Wind tunnels of Nasa. [Internet] [Consultado el 3 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/SP-440/ch1-2.htm>
34. Osborne Reynolds. Wikipedia. [Internet] [Consultado el 5 de febrero de 2020]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Osborne_Reynolds
35. HM 170 Túnel de viento abierto. Perfiles de presión y de velocidad. Flujo alrededor de cuerpos. Mecánica de fluidos. Gunt Hamburg. [Internet] [Consultado el 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.gunt.de/es/productos/tunel-de-viento-abierto/070.17000/hm170/glct-1:pa-150:pr-769>
36. Variable Density Tunnel. Wikipedia [Internet] [Consultado el 13 de marzo de 2020]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_Density_Tunnel
37. Types of Wind Tunnels. National Aeronautics And Space Administration (NASA). [Internet] [Consultado el 17 de enero de 2020]. Disponible en: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html>
38. Kitty Hawk History. National Aeronautics And Space Administration (NASA). [Internet] [Consultado el 15 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/aerosim/LessonHS97/KittyHawk.html>
39. Niebla de Advección. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).[Internet] [Consultado el 26 de marzo de 2020]. Disponible en: https://meteglosario.aemet.es/es/termino/240_niebla-de-adveccion
40. Elizabeth Rojas Arias. Un túnel para medir resistencia de puentes y edificios. Noticias. Universidad de Costa Rica. Publicado el 15 de julio de 2005. [Internet] [Consultado el 26 de enero de 2020]. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2005/07/15/un-tunel-para-medir-resistencia-de-puentes-y-edificios.html>

TEORÍA DE MALLAS

41. Un manantial en el cielo de Canarias. ABC Desarrollo. Publicado el 24 de agosto de 2016. [Internet] [Consultado el 11 de marzo de 2020]. Disponible en: https://www.abc.es/natural/desarrollorural/abci-manantial-cielo-201603181302_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

42. ¿Qué es la niebla? Muy Interesante. [Internet] [Consultado el 28 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.muyinteresante.es/curiosidades/preguntas-respuestas/ique-es-la-niebla>
43. Linus Uhl. Niebla. Nubes. El tiempo. MeteoScool. Meteoblue. [Internet] [Consultado el 26 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://content.meteoblue.com/es/meteoscool/el-tiempo/nubes/niebla>
44. Niebla. Ecu Red. 216-823. [Internet] [Consultado el 13 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Niebla>
45. Punto de rocío. Wikipedia. [Internet] [Consultado el 7 de febrero de 2020]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Punto_de_roc%C3%ADo
46. Sistema de captación de agua de lluvias. Wikipedia. [Internet] [Consultado el 16 de febrero de 2020]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_captaci%C3%B3n_de_agua_de_lluvas

HISTORIA CAPTACIÓN DE AGUA

47. Jaime J. González González. Captadores de agua de niebla en Gran Canaria función de la cultura correspondiente. Aqualia. Publicado el 14 de mayo de 2018. [Internet] [Consultado el 3 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/jaime-j-gonzalez-gonzalvez/captadores-agua-niebla-gran-canaria-funcion-cultura-correspondiente>
48. Captación de niebla. Urbanarbolismo. [Internet] [Consultado el 26 de febrero 2020]. Disponible en: <https://www.urbanarbolismo.es/blog/captacion-de-niebla/>
49. Welcome to fogquest. FogQuest: Sustainable Water Solutions. [Internet] [Consultado el 11 de abril 2020]. Disponible en: <http://www.fogquest.org/>

TIPOS DE ATRAPANIEBLAS

50. Cómo hacer atrapanieblas para mejorarla humedad de las plantas. Portal Fruticola. Publicado el 11 de octubre de 2017. [Internet] [Consultado el 2 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/10/11/construccion-operacion-y-mantenimiento-de-pantallas-de-captacion-de-aguas-nieblas-tipos-de-atrapanieblas/>

51. Ben Coxworth. Namib Beetle inspires new ‘fog harvesting’ research. New Altas. Publicado el 21 de abril de 2011. [Internet] [Consultado el 29 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://newatlas.com/mit-fog-harvesting-water-collection/18499/>
52. Alta tecnología para el desierto. La fascinante historia del *Onymacris plana*. Ciencia para escuchar. Ciencias. [Internet]. [Consultado el 29 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://ciencias.com/seispatas/2010/07/05/alta-tecnologia-para-el-desierto-la-fascinante-historia-del-onymacris-plana/>
53. *Onymacris unguicularis*. Wikipedia. [Internet] [Consultado el 29 de marzo de 2020]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Onymacris_unguicularis
54. Imke Hoehler: dropnet. Designboom. Publicado el 23 de febrero de 2010. [Internet] [Consultado el 22 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.designboom.com/design/imke-hoehler-dropnet/>
55. Yuka Yoneda. DropNet Fog Collector Harvests the Mist to Create Pure Drinking Water. Inhabitat. Publicado el 19 de febrero de 2010. [Internet] [Consultado el 22 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://inhabitat.com/dropnet-fog-collector-harvests-the-mist-to-create-pure-drinking-water/>
56. Watair. Agua gracias al aire. Gestión eficiente del agua. Eco Inventos, Green Technology. Publicado el 29 de octubre de 2008. [Internet] [Consultado el 22 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://ecoinventos.com/watair-agua-gracias-al-aire/>
57. Yakka, el atrapanieblas que captura 10 litros de agua al día y crea conciencia ambiental. Plataforma de educación y noticias de medio ambiente, Greenteach. Actualizado el 27 de agosto de 2018. [Internet] [Consultado el 16 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.greenteach.es/yakka-atrapanieblas-10-litros-agua-dia/>
58. Warka Tower. Warka Water. [Internet] [Consultado el 7 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.warkawater.org/warka-tower-copy/>
59. Jaime J. González González. Captadores de agua de nieva en Gran Canaria: función de la cultura correspondiente. Aqualia. Publicado el 12 de marzo de 2018. [Internet] [Consultado el 14 de abril de 2020]. Disponible en:

<https://www.iagua.es/blogs/jaime-j-gonzalez-gonzalvez/captadores-agua-niebla-gran-canaria-funcion-cultura-correspondiente>

60. Alex Fernández Muerza. Cinco ingeniosas formas de extraer agua de la niebla. Medio Ambiente y Sostenibilidad. EROSKI Consumer. Publicado el 16 de abril de 2012. [Internet] [Consultado el 27 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.consumer.es/medio-ambiente/cinco-ingeniosas-formas-de-extraer-agua-de-la-niebla.html>
61. Captación de aguas atmosféricas. Nieblagua. [Internet] [Consultado el 16 de abril de 2020]. Disponible en: <http://nieblagua.com/>
62. Watair: Turning Air Into Water. Landscape Architecture. Architecture. Design. Inhabitat. Publicado el 16 de abril de 2007. [Internet] [Consultado el 13 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://inhabitat.com/watair-turning-air-into-water/>
63. Alon Alex Gross. Fog and dew Collector for arid areas. Fog Collector- Portable device. BEHANCE. Publicad el 13 de mayo de 2016. [Internet] [Consultado el 1 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.behance.net/gallery/37147079/Fog-Collector-Portable-device>
64. San Francisco in 2108?- The Hydro- Net Vision of The Future. Education. Parenting. Lifestyle. Inhabitat. Publicado el 3 de marzo de 2008. [Internet] [Consultado el 29 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://inhabitat.com/san-francisco-in-2108-the-hydro-net-vision-of-future/>
65. Diseñador chileno crea atrapanieblas tridimensional para enfrentar la escasez de agua. Campus Creativo. Universidad Andrés Bello. [Internet] [Consultado el 15 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://campuscreativo.cl/disenador-chileno-crea-atrapanieblas-tridimensional-para-enfrentar-la-escasez-de-agua/>

INSTRUMENTACIÓN

66. Balanza electrónica. Femto Instruments. [Internet] [Consultado el 16 de julio 2020]. Disponible en: <https://www.femto.es/balanza-electronica-de-precision>
67. Anemómetro. Wikipedia. [Internet] [Consultado el 9 de junio de 2020]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Anemómetro>
68. Humedad. Tipos de Higrómetros. Funcionamiento. Gisiberica. [Internet] [Consultado el 7 de junio de 2020]. Disponible en: <http://www.gisiberica.com/higrometros/funcionamiento.htm>

69. Termómetro. Wikipedia. [Internet] [Consultado el 6 de junio de 2020]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Term%C3%B3metro#Tipos_de_term%C3%B3metros
70. La evolución del termómetro. Iberomed. Publicado el 4 de septiembre de 2019. [Internet] [Consultado el 14 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.iberomed.es/blog/2019/09/04/tipos-de-termometros-caracteristicas-funciones-y-usos/>
71. Sistema de adquisición de datos. Omega. [Internet] [Consultado el 12 de julio de 2020]. Disponible en: <https://es.omega.com/prodinfo/adquisicion-de-datos.html>
72. Ensayo en túnel de viento. Sensores de medida, SENSING. [Internet] [Consultado el 24 de enero de 2020]. Disponible en: <https://sensores-de-medida.es/medicion/aplicaciones-de-instrumentacion-electronica/instrumentacion-para-ensayos-en-el-automovil/ensayo-en-tunel-de-viento/>
73. Instrumento medida. PCE instruments. [Internet] [Consultado el 13 de junio 2020]. Disponible en: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida-kat_70010.htm
74. Criterios de selección Instrumentos de medición. Inmetrology. [Internet] [Consultado el 11 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.inmetrology.com/seleccion-instrumentos>
75. Características Estáticas. Instrumentación Electrónica I. [Internet] [Consultado el 16 de junio de 2020]. Disponible en: <https://instrumentacionelectronica1.wordpress.com/tag/histeresis/>
76. Cámara de alta velocidad PCE- HSC 1660, Cámara de alta velocidad, instrumento medida. PCE instruments. [Internet] [Consultado el 16 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-de-alta-velocidad-kat_71085.htm
77. Manómetro PCE-P15-ICA incl. certificado de calibración ISO. PCE instruments. [Internet] [Consultado el 12 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento->

[medida/medidor/man_metro-pce-instruments-man_metro-pce-p15-ica-incl.-certificado-de-calibraci_n-iso-det_5889241.htm?list=qr.art&listpos=16](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/higrometro-pce-instruments-higr_metro-pce-wms-1-det_5931351.htm?list=qr.art&listpos=1)

78. Higrómetro PCE-WMS 1. PCE instruments. [Internet] [Consultado el 7 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/higrometro-pce-instruments-higr_metro-pce-wms-1-det_5931351.htm?list=qr.art&listpos=1
79. Módulos CompactDAQ. NI. [Internet] [Consultado el 30 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.ni.com/es-es/shop/hardware/compactdaq-modules-category.html#>

IMPRESORAS 3D

80. HP Jet Fusion 5200 Series Industrial 3D Printing Solution. Products. 3D Printers. HP. [Internet] [Consultado el 8 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-5200.html>
81. Motion System and ToolChanger. E3D-Online. [Internet] [Consultado el 12 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://e3d-online.com/>
82. Taulman Nylon 645 Natural. Nylon. Filamentos. Filament2print. [Internet] [Consultado el 15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/nylon-pa/962-nylon-taulman-645-natural.html>
83. Impresora 3D, CEL, RoboxPRO. RS. [Internet] [Consultado el 15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/p/impresoras-3d/1682852/>
84. Bulent Yusuf. CEL RoboxPRO 3D Printer: Review the Specs. All3DP. Publicado el 24 de enero de 2018. [Internet] [Consultado el 15 de agosto de 2020]. Disponible en: <https://all3dp.com/1/cel-roboxpro-3d-printer-review/>
85. Colors. Pantone Authorized Partner. Fiberforce. [Internet] [Consultado el 6 de agosto de 2020]. Disponible en: <http://www.fiberforce.it/>
86. Anycubic 3D Printing. Photon Mono X. Anycubic. [Internet] [Consultado el 15 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.anycubic.com/collections/anycubic-photon-3d-printers/products/photon-mono-x-resin-printerc>

VÍDEOS

87. Zabalketa. Reforestación en los Valles Cruceños con agua de niebla. Publicado el 5 de junio de 2013. [Vídeo] [Internet] [Consultado el 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=k25vCmuFHcY>
88. Josefinaheppcastillo. Diseños Atrapanieblas proyecto Explora. Publicado el 8 de noviembre de 2011. [Vídeo] [Internet] [Consultado el 2 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=3uT5lwbT-bI>
89. Canarias Under 35- Captadores de Niebla. Ashoka España. Publicado el 15 de junio de 2017. [Vídeo] [Internet] [Consultado el 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.facebook.com/127651847299963/videos/1421884244543377/>
90. Erin Elliot. Using SOLIDWORKS Flow Simulation to design a safe face shield. Publicado el 21 de julio de 2020. [Vídeo] [Internet] [Consultado el 2 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.javelin-tech.com/blog/2020/07/using-solidworks-flow-simulation-to-design-a-safe-face-shield/>

HUMIDIFICADORES

91. Humidificación a alta presión MERLIN. Atomización alta presión MERLIN. Atomización. Humidificadores. Arimex Dos. [Internet] [Consultado el 29 de junio de 2020]. Disponible en: http://arimex.es/product/show/atomizacion_alta_presion_merlin/368
92. Sistemas de humidificación: todo lo que tienes que saber. Multidronet. Publicado el 16 de octubre de 2017. [Internet] [Consultado el 10 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.multidronet.com/noticias/sistemas-de-humidificacion>
93. Humidificador de aire directo y alta presión ML Flex. Spray Humidifiers. CONDAIR. [Internet] [Consultado el 12 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.condair.com.sv/spray-humidifiers/ml-flex-humidificador-de-aire-directo-y-alta-presion>
94. Humidificadores de agua a presión. Humidificadores adiabáticos de bajo consumo energético. [Internet] [Consultado el 1 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.carel.es/pressurised-water-humidifiers>

SIMULACIÓN Y ESTUDIOS COMPUTARIZADOS

95. Usman Akhtar. SolidWorks Flow Simulation Tutorial on Kaplan Turbine. Publicado el 4 de julio de 2018. [Vídeo] [Internet] [Consultado el 20 de junio de 2020]. Disponible en: <https://grabcad.com/tutorials/solidworks-flow-simulation-tutorial-on-kaplan-turbine>
96. Soluciones de SOLIDWORKS Simulation. [Internet] [Consultado el 17 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.solidworks.es/sw/resources/videos/solidworks-simulation-solutions.htm>

LIBROS, ARTÍCULOS Y OTROS TRABAJOS DE REFERENCIA

97. Eduardo Baeza Gómez. Publicado el 27 de marzo de 2018. Sequía y Escasez Hídrica: conceptos relacionados, situación actual y experiencia comparada en varios países para abordar el problema. Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/ BCN. [Internet] [Consultado el 17 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=128268&prmTIPO=DOCUMENTO>
98. ASHRAE. 1997. HVAC Fundamentals Handbook. Chapter 6. Psychrometrics [Internet] [Consultado el 9 de junio de 2020]. Disponible en: <https://idoc.pub/documents/ashrae-1997-hvac-fundamentals-handbookpdf-1430rdg6o94j>
99. Poveda Lancheros, Julián y Sanabria Infante, Juan Carlos. Ing. Jorge Armando Fonseca Carreño. 2017. Evaluación de la eficiencia de cinco materiales de malla para el sistema de atrapanieblas en el Municipio de Siachoque. Departamento de Boyacá. Tunja. [Internet] [Consultado el 4 de julio de 2020]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13661/74339247.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
100. José Meseguer, Ángel Sanz, José M. Perales y Santiago Pindado. 2002. Túneles aerodinámicos para aplicaciones de ingeniería civil. [Internet] [Consultado el 31 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/27966674/Túneles_aerodinámicos_para_aplicaciones_de_ingenier%C3%ADa_civil

101. Jesús David Bernal Castro y Fernando Enrique Cardenas Contreras. 2017. Diseño de invernadero que captura y utiliza la lluvia horizontal como fuente de abastecimiento del recurso hídrico en la producción de material vegetal, para proyectos de recuperación y restauración en zonas de compensación de áreas degradadas ambientalmente, en el municipio de mosquera. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería. Bogotá, D.C. [Internet] [Consultado el 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7784/1/Trabajo%20de%20grado%20final.pdf>
102. Andrés Camilo Arias Riveros y Cristhian Andrés Peña Pardo. 2017. Diseño de un túnel de viento, con monitoreo por telemetría, para pruebas de estructuras de ingeniería y arquitectura. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica. Bogotá. [Internet] [Consultado el 29 de enero de 2020]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6500/1/4132737-2017-2-IM.pdf>
103. Juan Antonio Pascual- Aguilar, María Francisca Naranjo, Reynaldo Payaso y Ojilve Ramón Medrano Pérez. 2011. Tecnología para la recolección de agua de niebla. México. [Internet] [Consultado el 30 de abril de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257199788_TECNOLOGIA_PARA_LA_RECOLECCION_DE_AGUA_DE_NIEBLA
104. Nigel Howorth y Michael Coxall. 2011. Tackling Water Scarcity- Water Trading Concepts and Possibilities. Clifford Chance. [Internet] [Consultado el 6 de mayo de 2020]. Disponible en: https://www.cliffordchance.com/briefings/2011/10/tackling_water_scarcity-watertradingconcept.html
105. Alejandro López Vázquez y Enrique Trillas Gay. 2016. Elementos y dispositivos aerodinámicos en el automovilismo. Grado en Tecnologías Industriales. [Internet] [Consultado el 14 de enero de 2020]. Disponible en:

<https://docplayer.es/31632559-Elementos-y-dispositivos-aerodinamicos-en-el-automovilismo.html>

106. Luis Manuel Santana Pérez. 2010. La precipitación de niebla en la provincia de Santa Cruz de Tenerife. [Internet] [Consultado el 1 de abril 2020]. Disponible en: <https://www.divulgameteo.es/uploads/Precipitación-niebla-Tenerife.pdf>
107. Luis Manuel Santana Pérez. 2010. La precipitación de niebla en Tenerife. [Internet] [Consultado el 22 de marzo de 2020]. Disponible en: http://www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/precipitacion_en_niebla.pdf
108. A. Ritter, C.M. Regalado, G. Aschan y L.A. Gómez. 2005. Contribución hídrica de la captación de niebla al balance de un bosque de laurisilva en el Parque Nacional de Garajonay. [Internet] [Consultado el 16 de abril de 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6445748>
109. Marco Antonio Álvarez Valenzuela y Alberto Muñoz Mejías. 2012. Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica. [Internet] [Consultado el 26 de enero de 2020]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/15901>
110. Rosa María Rodríguez Jiménez, Águeda Benito Capa, Adelaida Portela Lozano, Francisco Martín León, José Antonio Quirantes y Florenci Rey Benadero. 2004. Meteorología y Climatología. FECYT. [Internet] [Consultado el 5 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
111. Robert L. Mott. 2006. Mecánica de fluidos. 6ª edición. PEARSON. [Internet] [Consultado el 12 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/39253205/Mecanica_de_fluidos_Sexta_edicion_Robert_L_Mott_Original
112. José Agüera Soriano. 1996. Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas. 5ª Edición Revisada. Editorial CIENCIA 3, S.L. Córdoba. [Internet] [Consultado el 12 de enero de 2020]. Disponible en: <http://www.uco.es/termodinamica/>

113. Yunus A. Çengel y John M. Cimbala. Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones, 1ª edición. Editorial Mc Graw Hill. [Internet] [Consultado el 12 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/25669790/Mecanica_de_Fluidos_Fundamentos_y_Aplicaciones_Yunus_Cengel_y_John_Cimbala_Primer_Edicion
114. María Victoria Marzol Jaén. 64 (2002) 239-250. Fog water collection in a rural park in the Canary Islands (Spain). Editorial Elsevier. La Laguna, Islas Canarias, España. [Internet] [Consultado el 11 de abril de 2020]. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002AtmRe..64..239M/abstract>
115. Pablo Moreno Garibaldi, Barbarela Dávila Carmona, Arnulfo Sánchez Cortés, José Manuel Cervantes Vázquez, Miguel Ángel Munive Rojas y Noemi Corro Valdez. (2014). Diseño y manufactura de túnel de viento subsónico de circuito abierto. Cinética, vol. 18, núm. 3, pp. 107-111. Instituto Politécnico Nacional México. [Internet] [Consultado el 21 de enero de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/614/61448036004.pdf>
116. Pilar Cereceda, Pedro Hernández, Jorge Leiva y Juan de Dios Rivera. 2014. Agua de Niebla. Nuevas Tecnologías para el Desarrollo sustentable en Zonas Áridas y Semiáridas. Comunidad Agrícola Majada Blanca. Región de Coquimbo. [Internet] [Consultado el 9 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://www.cda.uc.cl/wp-content/uploads/2015/12/Libro-Agua-de-Niebla-1.pdf>
117. Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr., Alan Pope. 1999. Low-Speed Wind Tunnel Testing. 3ª edición. A wiley-mtersciencie publication. [Internet] [Consultado el 12 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/35129053/LOW_SPEED_WIND_TUNNEL_TESTING_THIRD_EDITION_A_WILEY_MTERSCIENCE_PUBLICATION
118. Oswaldo Mariño, Alexander Ibarra, Benalcázar Venegas y Jaime Fernando. 2015. Diseño y construcción de un túnel de viento cerrado para calibración de sensores e instrumentos de medición del instituto nacional de meteorología e hidrología (INAMHI). Sangolquí. [Internet] [Consultado el 3 de agosto de 2020]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/10712/T-ESPE-049248.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

119. José Luis Hernández Neira, German Carro Fernández, Manuel Blázquez, Manuel Castro. 2012. Integración Instrumental y de Software como Equipamiento de un Túnel de Viento. [Internet] [Consultado el 16 de mayo de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/258343752_Integracion_Instrumental_y_de_Software_como_Equipamiento_de_un_Tunel_de_Viento
120. Antonio Viedma Robles, Daniel Bautista Salinas. 2015. Medida de fuerzas en túnel aerodinámico sobre perfiles fabricados mediante impresora 3D. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena. [Internet] [Consultado el 23 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/60433997.pdf>
121. Manuel Aparicio Razo. 2017. Instrumentación túnel de viento. Volumen 30, pp. 63-75. [Internet] [Consultado el 28 de marzo de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Manuel_Razo3/publication/321492687_instrumentacion_tunel_de_viento/links/5a2598da4585155dd421506d/instrumentacion-tunel-de-viento.pdf
122. Claudio Mataix. 1982. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. 2ª edición. Ediciones del Casrillo, S.A. Madrid. [Internet] [Consultado el 16 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/43191075/MECÁNICA_DE_FLUIDOS_Y_MÁQUINAS_HIDRÁULICAS_CLAUDIO_MATAIX_SEGUNDA_EDICIÓN
123. The Importance of Wind Tunnel Testing in the Lab. 2018. Omega. [internet] [Consultado el 16 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.omega.com/en-us/resources/importance-of-wind-tunnel-testing-in-the-lab>
124. Ignacio Da Riva, Amable Liñán y Joaquín García Siso. 1960. Visualización de fenómenos aerodinámicos a bajas velocidades. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Instituto Nacional de Técnica Aeronáutica Esteban Terradas. [Internet] [Consultado el 11 de febrero de 2020]. Disponible en: <http://oa.upm.es/1997/>
125. Gerhard A. Holzappel. 2000. Nonlinear Solid Mechanics. A continuum Approach for Engineering. Technical University Graz, Austria. [Internet]

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- [Consultado el 18 de abril de 2020]. Disponible en: <https://1lib.eu/book/3426467/b24102?regionChanged=&redirect=9320716>
126. María José Estrela Navarro, David Corell Custardoy, Amparo Montesinos Guillot. 2014. Estudio estadístico de la potencialidad de uso del agua de niebla como recurso hídrico en el litoral mediterráneo de la península ibérica. Departamento de Estadística e Investigación. Valencia. [Internet] [Consultado el 5 de mayo de 2020]. Disponible en: http://www.ceam.es/GVAceam/ceam_en/paginas/actualidad/PDFs/2015/ene15_01.pdf
127. Dionisio Sánchez. 2017. Conceptos básicos de filtración. [Internet] [Consultado el 7 de agosto de 2020]. Disponible en: <http://www.bdcint.com.do/wp-content/uploads/2017/06/Conceptos-basicos-de-filtracion-Pharm-vDS-Junio-2016.pdf>
128. Juan E. López M., Waldo Canto V., Raúl Meneses R. 1989. Construcción de atrapanieblas. La Platina N°56. [Internet] [Consultado el 12 de marzo de 2020]. Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/IPA/NR08655.pdf>
129. David Corell, M^a José Estrela, José Antonio Valiente. Obtención de agua a partir de la niebla en el Montnegre y en otros lugares del litoral Mediterráneo. Valencia, España. [Internet] [Consultado el 5 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.divulgameteo.es/uploads/Captación-niebla-Mediterráneo.pdf>
130. Theo Hernando Olmo. 2005. Captación de agua de la niebla en el sector central de la vertiente norte de Tenerife (Islas Canarias). Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, Universidad de La Laguna. Tenerife, España. [Internet] [Consultado el 25 de julio de 2020]. Disponible en: <https://aritter.webs.ull.es/PTFC/TFC-THO.pdf>
131. Virginia Carter Gamberini, Jorge Carrasco Jiménez, David Mora López Y José Olguín Rubio. 2016. Captación de aguas lluvias mediante uso de tecnología de “atrapanieblas” (Chapter 3: Rainwater catchment through the use of “Atrapanieblas”) Ghent University. [Internet] [Consultado el 14 de abril de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/322138282_CAPTACION_DE_AG

[UAS LLUVIAS MEDIANTE USO DE TECNOLOGIA DE ATRAPANIEBLAS Chapter 3 Rainwater catchment through the use of Atrapanieblas](#)

132. Blanca Cecilia Mendoza Palacios y Fredy Rolando Castañeda Álvarez. 2014. Criterios metodológicos para la definición de sistemas de captación de aguas con base en lluvia horizontal. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C. [Internet] [Consultado el 27 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1748/1/Atrapanieblas%20B.%20Mendoza%20F.%20Castañeda.pdf>
133. Lourdes Céspedes Sandoval. Captura de agua de niebla, para consumo familiar. [Internet] [Consultado el 19 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://docplayer.es/76601381-Captura-de-agua-de-niebla-para-consumo-familiar.html>
134. Agustín Martín Domingo. 1997-2011. Apuntes de Mecánica de Fluidos. [Internet] [Consultado el 29 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/7023922/Apuntes_de_Mecanica_de_Fluidos_Agust_in_Domingo
135. Francisco Tapia C., Francisco Meza A., Pedro Hernández P., Rubén Alfaro P., Carlos Muñoz M. 2019. Estrategia de riesgo para mitigar el estrés hídrico en olivos cultivados en Taltal, Desierto de Atacama. INIA INTIHUASI. La Serena, Chile. Boletín INIA N° 32. [Internet] [Consultado el 16 de julio de 2020]. Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR41557.pdf>
136. Experiencia de captación de agua de niebla y reforestación. Investigación de campo en territorios con escasez pluvial de Bolivia y Perú. 2004. Zabalketa. [Internet] [Consultado el 3 de julio de 2020]. Disponible en: <http://zabalketa.org/wp-content/uploads/2016/02/Agudeniebla.pdf>
137. Howard A. Bridgman, John L. Walmsley, Robert S. Schemenauer. 1996. A method for estimating the hydrologic input from Fog in Mountainous Terrain. University Newcastle. [Internet] [Consultado el 8 de julio de 2020]. Disponible en:

- https://www.researchgate.net/publication/244958538_A_Method_for_Estimating_the_Hydrologic_Input_from_Fog_in_Mountainous_Terrain
138. Omar Cornejo Luna, Luis Mogollón, Humberto Álvarez. 2019. Diseño preliminar parte I, de un túnel de viento de circuito abierto (tipo Eiffel) para números de Reynolds de $3.3 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$. Revista I+D Tecnológico. Vol. 15, N°1. [Internet] [Consultado el 13 de enero de 2020]. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2091/3042>
139. A. Ritter, C.M. Regalado, G. Aschan. 2008. Fog Water Collection in a Subtropical Elfin Laurel Forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): A Combined Approach Using Artificial Fog Catchers and a Physically Based Impaction Model. Journal of hydrometeorology. Vol.9. [Internet] [Consultado el 3 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/jhm/article/9/5/920/5870/Fog-Water-Collection-in-a-Subtropical-Elfin-Laurel>
140. Carolina Madolet Pinto, Edison Gerardo Granados Avellaneda, Carlos Eduardo García Sánchez. 2018. Cuantificación del efecto de obstrucciones en el área transversal de un túnel de viento sobre los resultados de la calibración de anemómetros. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. [Internet] [Consultado el 8 de junio de 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6574643>
141. Isaac Prada y Nogueira. 2006. El túnel de viento como herramienta de ensayo aerodinámico en la Fórmula 1. [Internet] [Consultado el 17 de enero de 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2189905>
142. Capítulo 8. Humectadores. [Internet] [Consultado el 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://fddocuments.es/document/capitulo-8-humectadores.html>
143. Carlos M. Regalado, Axel Ritter. The design of an optimal fog water collector: a theoretical analysis. Tenerife, España. ELSEVIER. Atmospheric Research 178-179. Pp. 45-54 [Internet] [Consultado el 20 de febrero de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/298724708_The_design_of_an_optimal_fog_water_collector_A_theoretical_analysis

144. Carlos M. Regalado, Axel Ritter. 2019. On the estimation of potential fog water collection from meteorological variables. *Agricultural and Forest Meteorology*. 276-277. [Internet] [Consultado el 26 de febrero de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/336183764_On_the_estimation_of_potential_fog_water_collection_from_meteorological_variables
145. Carlos M., Ritter Axel. 2016. 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. [Internet] [Consultado el 10 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AgFM..233...80R/abstract>
146. NACA. 1955. Report 1215. [Internet] [Consultado el 30 de agosto de 2020]. Disponible en: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1955/naca-report-1215.pdf>
147. Rodríguez Sacramento, Adrián; Sánchez Tapia, Jorge. 2017. Diseño y construcción de un túnel de viento de baja velocidad para estudios relacionados con la captación de agua de niebla. [Internet] [Consultado el 10 de enero de 2020]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/5111>
148. I. Prada y Nogueira. Noviembre – diciembre 2006. El túnel de viento como herramienta de ensayo aerodinámico en la Fórmula 1. [Internet] [Consultado el 17 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.icaei.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=1383
149. I.E. Idel’chik. 1960. *Handbook of Hydraulic Resistance*. 3rd Edition. Editorial Jaico Publishing House. [Internet] [Consultado el 9 de diciembre de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/34052675/HANDBOOK_OF_HYDRAULIC_RESISTANCE_3rd_Edition

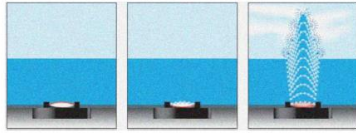
ANEXOS

ANEXO I: FICHAS TÉCNICAS Y DE USO DE LA INSTRUMENTACIÓN ESCOGIDA

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

humiSonic 1.0 l/h

humiSonic is an adiabatic humidifier that utilizes the ultrasonic technology.



Very fine drops ($\varnothing = 5 \mu\text{m}$).

Low energy consumption (**100 W**).

Water flow: **1,0 l/h (230 V)**.

Water flow: **0,8 l/h (115 V)**.

Continuous capacity modulation 10-100%.

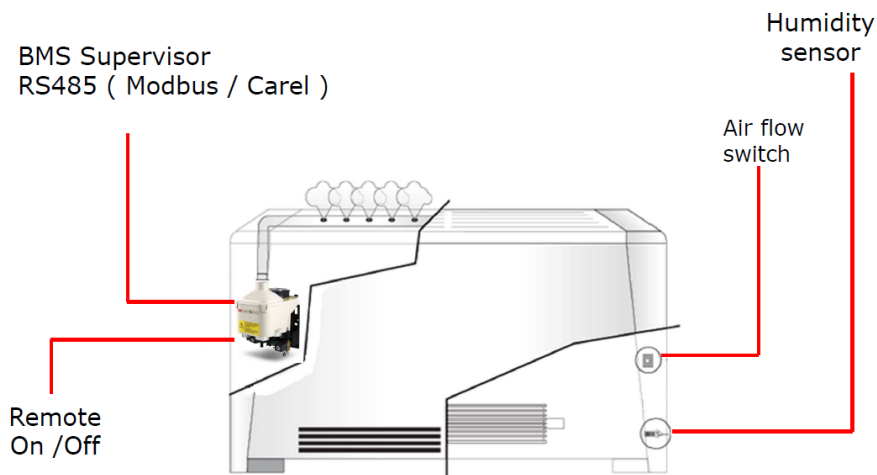


High
Efficiency
Solutions

CAREL

Fan coil application

BMS Supervisor
RS485 (Modbus / Carel)

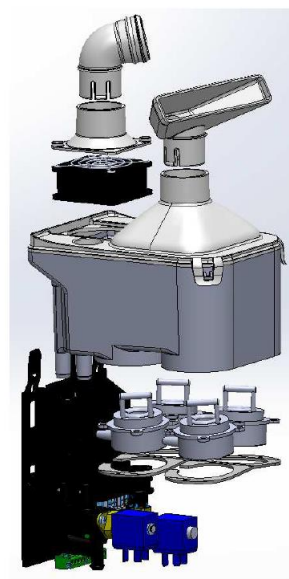


High
Efficiency
Solutions

CAREL

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

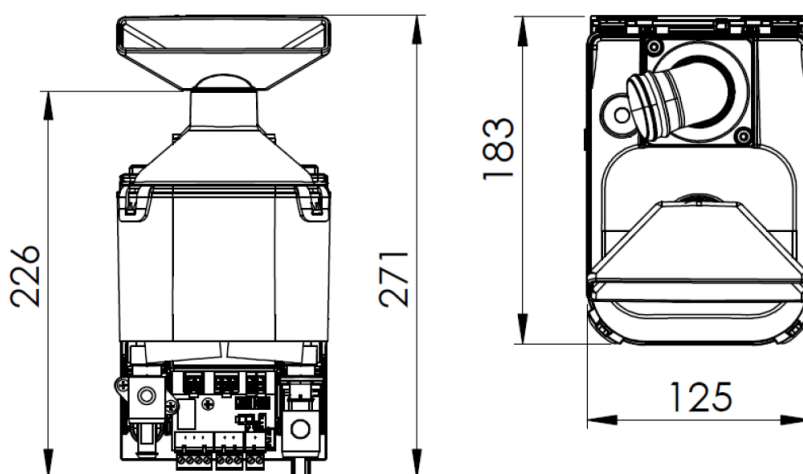
Components



High
Efficiency
Solutions

CAREL

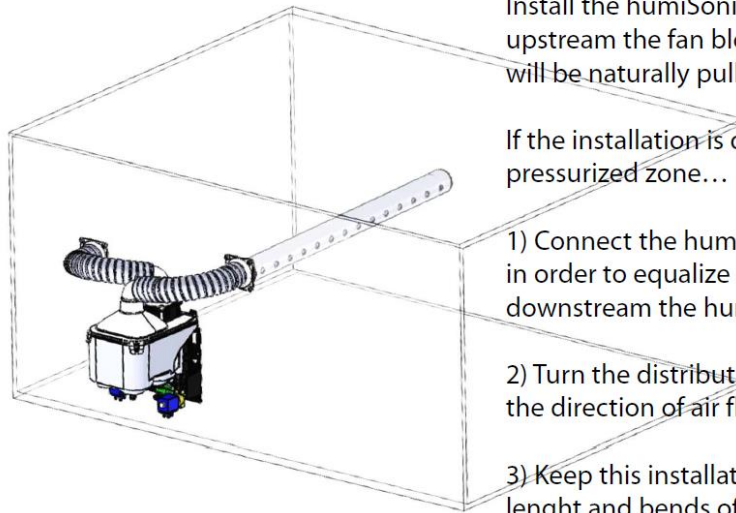
Dimensions (mm)



High
Efficiency
Solutions

CAREL

Application in air duct



Install the humiSonic + distribution system upstream the fan blower. In this way, the mist will be naturally pulled by the air flow.

If the installation is downstream the fan or in a pressurized zone...

1) Connect the humiSonic fan inlet to the duct, in order to equalize the pressure upstream and downstream the humidifier.

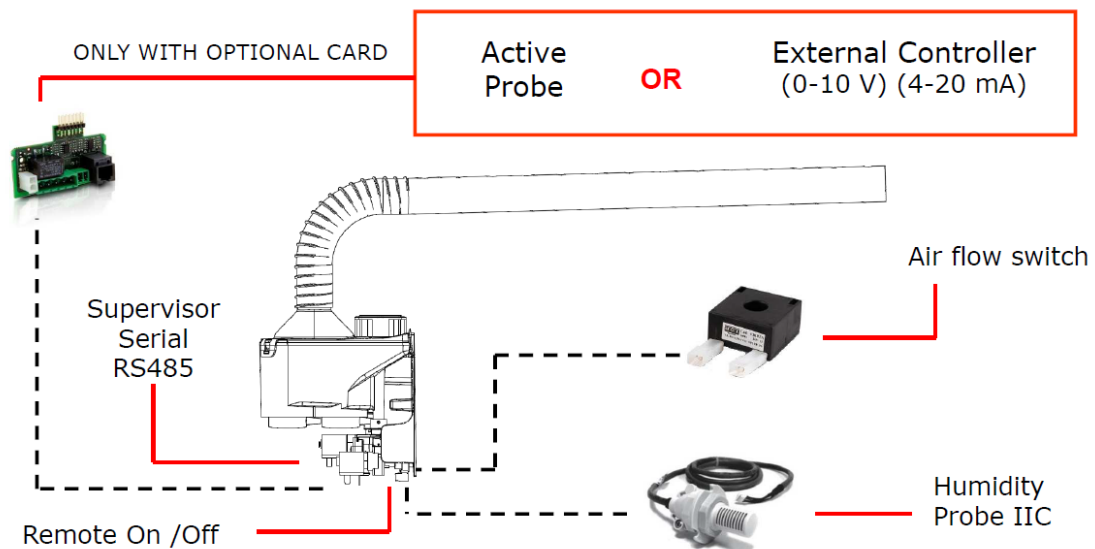
2) Turn the distribution so that the holes are in the direction of air flow.

3) Keep this installation compact and minimize length and bends of the flexible hoses.

High
Efficiency
Solutions.

CAREL

Schematic of a typical configuration



High
Efficiency
Solutions.

CAREL

New accessories

UUKHS00000 → Elbow connection

UUKCY00000 → Fan conveyor

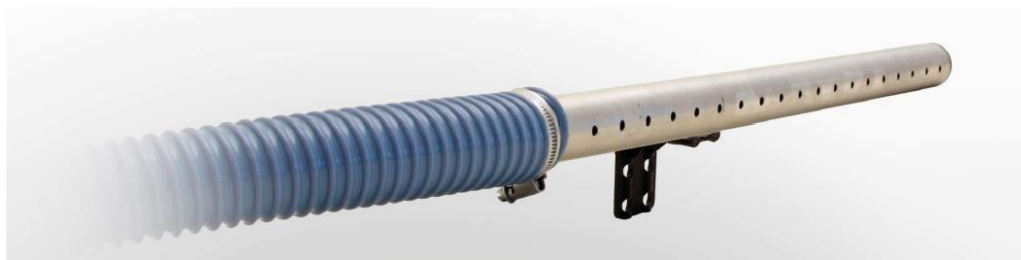
UUKDF00000 → Diffuser



High
Efficiency
Solutions.

CAREL

Accessories



Distribution system

UUKDP02500 flexible hose with stainless steel pipe L = 250 mm

UUKDP05300 flexible hose with stainless steel pipe L = 530 mm

UUKDP06100 flexible hose with stainless steel pipe L = 610 mm

UUKDP08500 flexible hose with stainless steel pipe L = 850 mm

High
Efficiency
Solutions.

CAREL

Accessories

Small humidity sensor HYHU00000

This probe is suitable only for humiSonic.
The set point is then established by dip switches (default = 50%).



High
Efficiency
Solutions.

CAREL

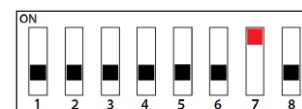
Accessories

Air flow switch: it is an current sensor UUKTA00000

The power supply neutral wire of the fan has to pass through the hole of TAM.

humiSonic will only work when the fan is running (powered).

To enable the TAM, dip switches have to be configured as in the figure.



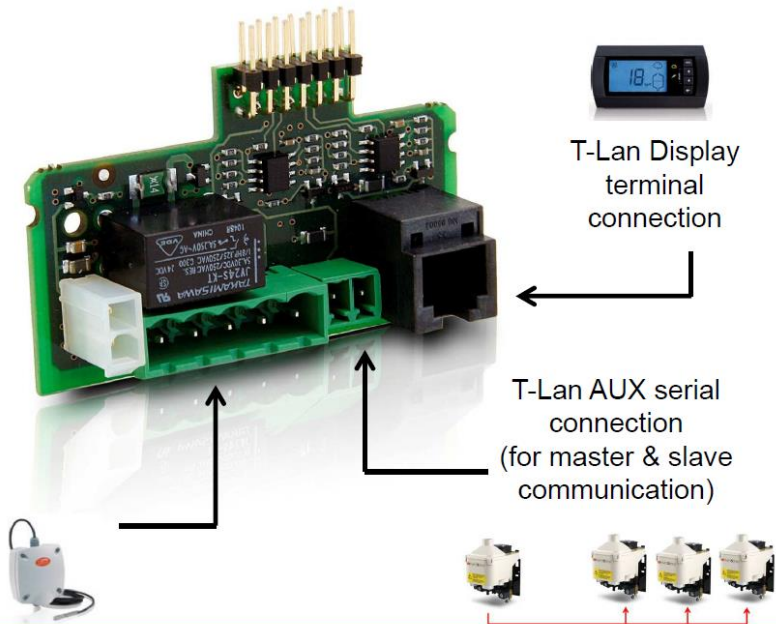
High
Efficiency
Solutions.

CAREL

Accessories

Optional card UUKAX00000

Active probe or
External proportional
controller
(0-10 V) (4-20 mA)



High
Efficiency
Solutions.

CAREL

Accessories

Display UUKDI00000

It allows the read and modify the parameters in order to optimize the configuration of humiSonic.

Through display, it is possible to set the humidity set point.



You need the optional card to connect a display.

High
Efficiency
Solutions.

CAREL

Accessories

Reverse Osmosis system

ROC0120000
12l/h without pump

ROC0200000
20 l/h without pump

ROC0255000
25 l/h with pump (line P<1bar)

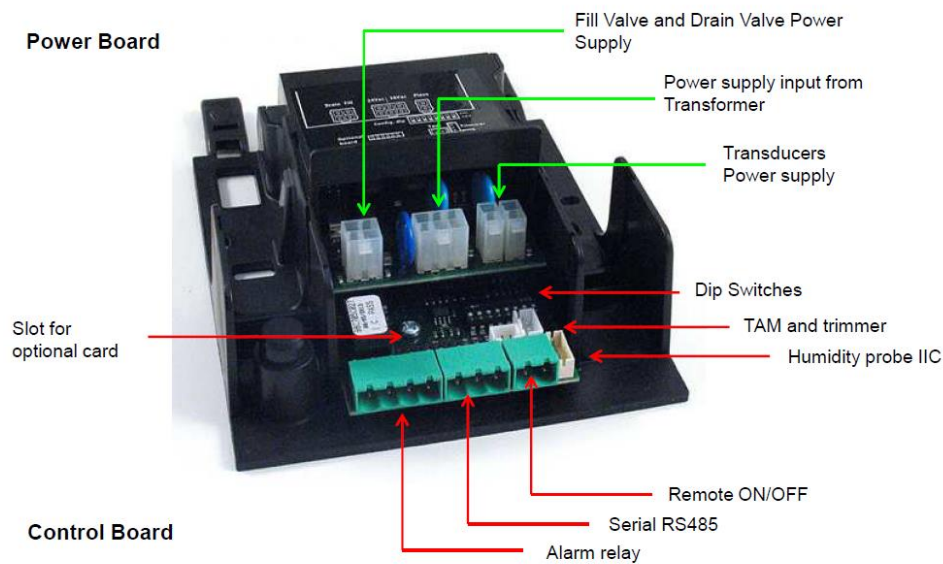
ROC0405000
40 l/h with pump (line P<1bar)



High
Efficiency
Solutions.

CAREL

Integrated electronic card



High
Efficiency
Solutions.

CAREL

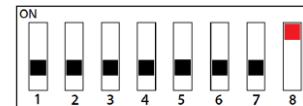
Functioning - Modulation

Modulation is obtained through on/off short intervals (**PWM**), 10-100%

If request is less than 50%, humiSonic activates **only one couple** of piezoelectric transducers.

Rotation of piezoelectric transducers is managed in order to level their working hours.

This additional modulation is only for humiSonic 1,0 l/h, it has to be enabled by 8th dip switch.



Hygiene

- 1 Periodic washing to prevent water stagnation.
- 2 Drain solenoid valve to empty the tank every time the humidifier stops/reach set-point or after long inactivity periods.
- 3 Tank plastic material contains silver ion, a bacteriostatic material against bacteria proliferation.

ChillBooster: refrigeración evaporativa

Un refrigerador evaporativo que, atomizando el agua en gotitas finísimas, induce la evaporación espontánea sustrayendo calor al aire, humectándolo y refrigerándolo. Utiliza una bomba de paletas para presurizar el agua, atomizándola sucesivamente a través de boquillas especiales.

- Ahorro energético en chillers y drycoolers gracias a la refrigeración evaporativa.
- El ChillBooster es una marcha más para afrontar el pico de demanda que se presenta en los días más cálidos del año.

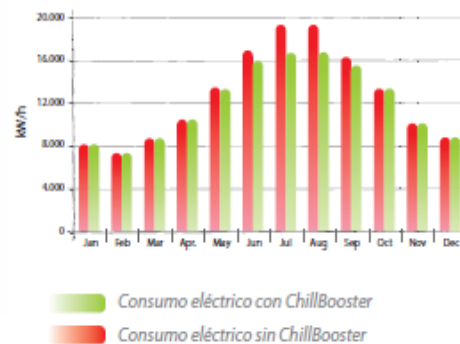


El ChillBooster es un refrigerador evaporativo utilizado para aumentar la potencia de chillers, drycoolers, pero no sólo eso.

El Chillbooster enfría el aire antes de su paso por la batería, consiguiendo una disminución de su presión media de condensación.

El ChillBooster atomiza el agua en gotitas finísimas que se evaporan espontáneamente enfriando el aire. La batería es, pues, acometida por un flujo de aire y gotitas más frías, permitiendo condiciones de trabajo más favorables. Esto permite a los refrigeradores de líquido y a los condensadores poder suministrar las potencias nominales incluso en los periodos con temperaturas ambientales elevadas, que a menudo coinciden con las de máxima carga. Todo sin costosos sobredimensionados de las instalaciones

Ejemplo de refrigeración evaporativa de un chiller en una ciudad del sur de Europa



Bajísimo consumo de energía

El ChillBooster tiene un reducidísimo consumo eléctrico: un sistema para drycooler con caudal de aire de 200.000 m³/h atomiza 1.000 l/h con un consumo eléctrico inferior a 0,7 kW!



Ideal también para reformas

La estación de bombeo IP55 y el sistema modular de fácil instalación hacen al ChillBooster ideal para las reformas de chiller, drycooler y refrigeradores de líquido.

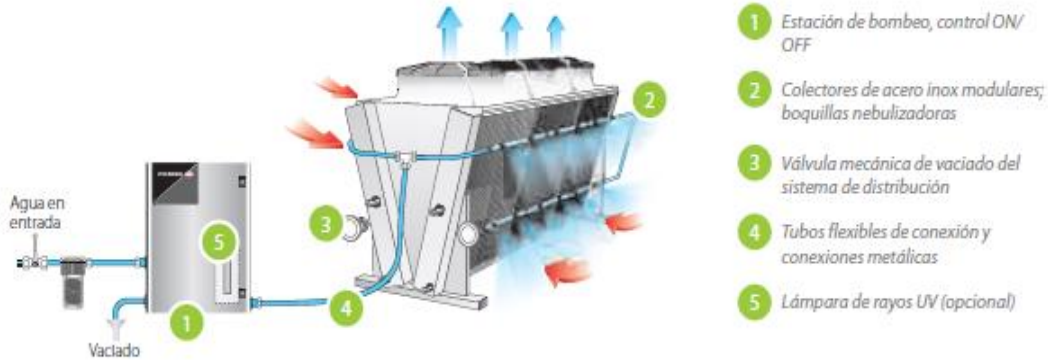


Fácil de instalar

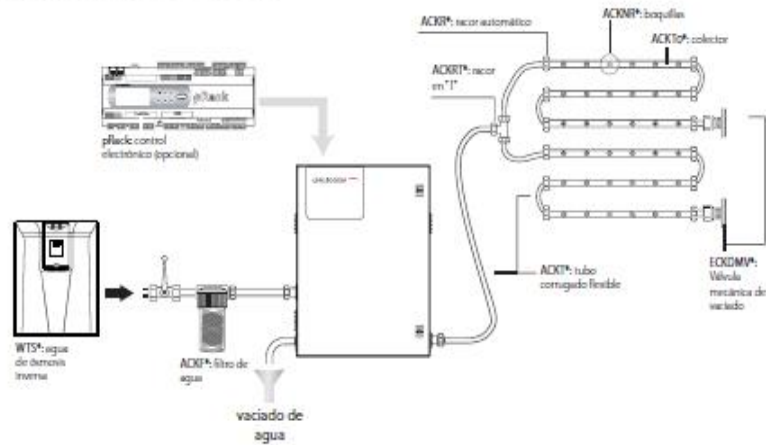
El sistema de distribución del agua, gracias a tubos portaboquillas de distintas longitudes, conexiones rápidas, tubos de conexión flexibles, hace al ChillBooster fácilmente instalable sin utilizar utensilios especiales o sistemas de soldadura.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Ejemplo de esquema para chiller o drycooler



OVERVIEW DRAWING ChillBooster



CHILLERS



Residencial

Ideal en combinación con chiller para el acondicionamiento de ambientes tales como oficinas, apartamentos y zonas residenciales.



Hospitalario

Sobre todo en el sector sanitario, donde son fundamentales la continuidad de servicio, ahorro e higiene, el ChillBooster ayuda a garantizar todo esto.



Gran distribución

En el sector del acondicionamiento de supermercados, centros comerciales y grandes almacenes aumenta sus prestaciones generando ahorro.



Datacenter

En el acondicionamiento o en procesos en los que se requiere la refrigeración de agua de mezclas de fluidos, aumenta la potencia y las prestaciones garantizando el funcionamiento continuo de los aparatos.

DRYCOOLERS

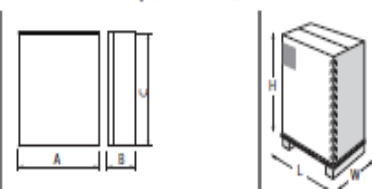
“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Tabla de ChillBooster

Características	AC010****	AC050D****	AC100D****
Caudal (l/h)	100	500	1000
Consumo eléctrico	0,4	0,5	0,6
Temperatura del cuadro	5T40 °C (40-104 °F)		
Conexión de vaciado de termo válvula	Tubo Ø exterior 10, Ø interior 5		
Características eléctricas	230V, 50/60 Hz (según el modelo)		
Certificación	CE		
Duración de la lámpara UV (opcional)	4.000 h		
Grado de protección	IP55		
Llenado de agua			
Conexión	1/2" G hembra		
Presión (mín.-máx.)	3-8 Bar, 0,3-0,8 Mpa, 40-115 Psi		
Vaciado de agua			
Conexión	1/2" G hembra		
Salida			
Conexión	1/2" G hembra		
Agua de alimentación *			
Tipo	Potable y desmineralizada		
Conductibilidad eléctrica	<100 µS/cm		
Dureza total	<5 °H (50 ppm CaCO ₃)		

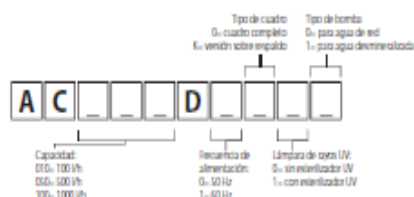
* se aconseja el uso de agua desmineralizada para limitar la formación de incrustaciones y las intervenciones de mantenimiento

Dimensiones (mm(inch)) y pesos (kg(lb))



Mod.	AxBxC	Peso	LxWxH	Peso
AC****0**	600x300x800 (23.62x11.82x31.50)	49 (108)	720x410x1020 (28.5x16x40)	52 (115)
AC****01*	600x300x800 (23.62x11.82x31.50)	53 (115)	720x410x1020 (28.5x16x40)	56 (125)
AC****K**	550x210x750 (21.65x8.30x29.53)	27 (60)	860x660x360 (34x26x14)	32 (70)
AC****K1*	550x210x750 (21.65x8.30x29.53)	32 (70)	860x660x360 (34x26x14)	37 (82)

Código de la máquina



Componentes



Válvula de fin de línea

Válvula de vaciado mecánica de latón M1/2" GAS para el vaciado del agua por inactividad.



Colector

Collectores de acero Inox AISI304, Ø20 mm, con taladros roscados para boquillas; disponibles con 7 taladros (1.052 mm), 13 taladros (1.964 mm) o 19 taladros (2.876 mm).



Conexiones rápidas

Racores de compresión para tubos Ø20mm no roscados; de latón o de acero Inox.



Tubo flexible

Tubos flexibles corrugados de acero Inox AISI304.



Boquillas

Boquillas con capacidades 5, 7,5 o 15 kg/h a 10 bar.

+3000057ES - 2.0 - 16.05.2013

© CAREL INDUSTRIES 2013. All rights reserved. CAREL INDUSTRIES se reserva la posibilidad de modificar o cambiar las características de sus productos, sin previo aviso.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

PCE Instruments

PCE Instruments Chile SA
RUT 76.423.459-6
Calle Santos Dumont N° 738, Local 4
Comuna de Recoleta – Santiago de Chile
Chile
Telf. +56 2 24053238
Fax: +56 2 2873 3777
info@pce-instruments.cl
www.pce-instruments.com/chile

PCE Ibérica S.L.
C/ Mayor, 53 – Bajo
02500 – Tobarra
Albacete
España
Tel. nacional: 902 044 604
Fax: +34 967 543 548
info@pce-iberica.es
www.pce-instruments.com/lespanol
www.pce-instruments.com

Manómetro PCE-PDA 10L

Manómetro para presión relativa y diferencial / Apto para gases y líquidos / Posibilidad de adaptar un tubo de pitot / Funciones mín. y máx. / Registro de datos

El manómetro de presión diferencial serie PCE-PDA es un dispositivo fiable para medir la presión de gases y líquidos (>100 Pa) no inflamables ni corrosivos en un rango de ± 200 Pa, ± 2 kPa o 20 kPa, según el modelo. El manómetro de presión diferencial dispone de diferentes funciones. Por ejemplo, el usuario puede seleccionar entre 16 diferentes unidades. El manómetro de presión diferencial mide, además de la presión, la temperatura, la velocidad de flujo y el caudal. La pantalla gráfica indica los valores de presión diferencial mínimos y máximos. También puede cambiar la resolución de la presión diferencial. El manómetro integra un modo de alta precisión, que aumenta la resolución por 10.

El manómetro de presión diferencial serie PCE-PDA dispone de la función de registro de datos. Gracias a ella puede, además de almacenar los valores, realizar una prueba de fuga en tuberías de presión. El modo de registro de datos del manómetro de presión diferencial permite indicar la duración y la cuota de registro. En el modo de detección de fuga es necesario que el usuario indique la duración de medición y el nivel de la diferencia de presión. Una vez haya finalizado la medición, el manómetro de presión diferencial le indicará la diferencia entre el valor real y el nominal. Además de estas funciones es posible medir con el manómetro de presión diferencial la velocidad de flujo y el caudal. Para ello deberá adquirir el tubo de pitot opcional.



- Pantalla gráfica retroiluminada
- Memoria para valores mín. y máx.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

- Registro de datos y prueba de fugas
- Conexión para acoplamiento rápido
- Medición de temperatura, caudal y fugas
- Modo de alta precisión
- Manejo sencillo
- Selección de unidades (Pa, kPa, hPa, etc.)

Especificaciones técnicas

Rango de temperatura 0 ... +50 °C

Resolución 0,1 °C

Precisión ± 1 °C

Rango de presión ± 20 kPa

Resolución 0,1/ 1 Pa

Precisión $\pm 0,5$ % v. E.

Presión nominal 20kPa

Sobrepresión 40 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

Funciones 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

Contenido del envío

1 x Manómetro PCE-PDA 10L

2 x Acumuladores de 1,2 V AA NiMh

1 x Adaptador de red USB

1 x Cable micro USB

1 x Software

1 x Manual de instrucciones

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



TMA-21HW Hot Wire Anemometer

Highly accurate and precise measurements

The Hot Wire anemometer technology eliminates the use of bearings and rotating parts. Because of this fact the meter is durable and provides good and stable accuracy of the measurements. It is used for indoor air quality and HVAC / R technicians measuring Heat / Ventilation, / Air conditioning / Refrigeration, wind flow and temperature in residential, commercial and industrial air conditioning systems.



- Highly accurate thermometer with 0.1% basic accuracy for precise measurements
- Fast response telescopic probe for use in hard to reach places
- Air Flow Volume (CFM, CMM)
- Instant, Avg, 2/3 Vmax Flow Measurements
- Velocity m / s, ft / min, knots, km / hr, mph
- Relative Humidity and Temperature Measurement
- Data hold & Maximum / Minimum with Time stamp
- Data Memory and Real function (99 sets)
- 512KB auto data-logging capacity
- Large backlit LCD display with 5 parameters
- Auto Power ON / OFF setting
- USB interface
- Simple and safe to use

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%F5
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.

Beha-Amprobe®
In den Engematten 14,
79286 Glottertal, Germany
Tel.: +49 (0) 7684 8009 - 0

©2014 Beha-Amprobe. All rights reserved.

For detailed specifications and ordering info go to www.beha-amprobe.com

Pub ID: 13100-eng

Termo-igrometri di precisione a risposta rapida.

Serie RH80/90



- ✓ Compatti e tascabili.
- ✓ La copertura protegge il sensore e serve da molletta (RH81/RH83).
- ✓ Coperchio con chiusura a vite su RH92.
- ✓ Il RH81 misura l'UR e la temperatura.
- ✓ Il RH83 ed il RH92 misurano l'UR, la temperatura, il punto di rugiada e di bulbo umido.
- ✓ RH92 ricalibrabile (disponibile con soluzioni saline).
- ✓ Sonda per la temperatura esterna sostituibile (solo RH92).
- ✓ Commutazione tra °C e °F, mantenimento dati, archiviazione valori min/maxe spegnimento automatico.

Applicazioni.

- ✓ Laboratori.
- ✓ Lavorazione di stampe/carta.
- ✓ HVAC.
- ✓ Sale computer.
- ✓ Camere bianche.
- ✓ Camere per neonati/Serre.

I termo-igrometri delle serie RH80 e RH90 hanno dimensioni compatte e possono stare comodamente in una tasca. Il coperchio delle unità RH81 e



Entrambi i modelli appaiono più piccoli delle dimensioni reali.

RH83, protegge il sensore e funziona anche da comoda molletta da tasca. Il modello RH81 è un termo-igrometro digitale con funzioni di archiviazione dei valori min/max, mantenimento dei dati e di spegnimento automatico. I modelli RH83 e RH92 dispongono di tutte le funzionalità del modello RH81 ed inoltre misurano anche il punto di rugiada e la temperatura del bulbo umido. Per il modello RH92 sono disponibili la sonda opzionale per la temperatura esterna (P8706) ed i sali di test (CS338706 e CS758706).

Specifiche tecniche.

Sensore di umidità: sensore elettronico di capacitanza a film di polimeri.
Sensore di temperatura: termistore.
Display: LCD.

Precisione.

Temperatura:
 RH81/RH83: ± 1 °C ($\pm 1,8$ °F).
 RH92: $\pm 0,6$ °C ($\pm 1,0$ °F).

Umidità relativa:

RH81: $\pm 4\%$ a 25 °C da 10 a 90%, $\pm 5\%$ altri intervalli.
 RH83: $\pm 3\%$ a 25 °C da 10 a 90%, $\pm 4\%$ altri intervalli.
 RH92: $\pm 3\%$ da 0 a 100% senza condensa.

Risoluzione:

Temperatura: 0,1 °C (0,1 °F).
Umidità relativa: 0,1% di UR.

Tempo di risposta: 60 sec (80 sec per RH81).

Alimentazione: 2 batterie alcaline "AAA" (incluse).

Durata della batteria: 500 ore (tipica).

Dimensioni: 17 A x 4,9 L x 1,65 P cm (6,7 x 1,9 x 0,65").

Per ordinare, visitare il sito it.omega.com/rh80 per prezzi e dettagli.

Codice prodotto	Punto di rugiada	Bulbo umido	Intervallo di UR	Intervallo temp.
RH81	No	No	da 5 a 95%	da -10 a 50 °C (da 14 a 122 °F)
RH83	Si	Si	da 0 a 100%	da -20 a 50 °C (da -4 a 122 °F)
RH92	Si	Si	da 0 a 100%	da -20 a 50 °C (da -4 a 122 °F)
P8706 (RH92)	—	—	—	da -20 a 70 °C (da -4 a 158 °F)
CS338706	—	—	33% 33%	—
CS758706	—	—	75% 75%	—

Viene fornito con due batterie "AAA" e manuale utente.

Esempio di ordine: RH81, termo-igrometro, intervallo UR da 5 a 95%, intervallo di temperatura da -10 a 50 °C (da 14 a 122 °F).

Hu-45



PCE Ibérica S.L.
C/ Mayor 53, bajo
02500 Tobarra (Albacete)
España
Telf.: +34 967 543 548
Fax: +34 967 543 542
Info@pce-iberica.es
www.pce-iberica.es
www.pce-instruments.com/vespanol

Balanza resistente al agua serie PCE-SD ... SST C (M clase III)

balanza de acero inoxidable resistente al agua verificada hasta 300 kg / acero inoxidable / protección IP67
- IP65 / Funciones: suma, de valores límite, de estadística / Interfaz RS-232, USB, LAN, analógica de
4-20 mA, 0-10V, OC opcional

La balanza de acero inoxidable resistente al agua, con pantalla desplazada, es verificable según MIII y se envía verificada. Las células de carga de la balanza de acero inoxidable resistente al agua tienen protección IP67, mientras que la pantalla de acero inoxidable tiene IP65. Es por este motivo que la balanza de acero inoxidable resistente al agua es ideal para zonas con un alto nivel de humedad o para áreas con exigencias higiénicas elevadas. Con una función opcional podrá utilizar esta balanza de acero inoxidable resistente al agua en barcos. Las funciones estándar de las balanzas de acero inoxidable resistentes al agua son las siguientes: suma, cómputo de piezas, estadística, recetas, pesaje porcentual, pesaje de animales, valores límite con alarma, etc. Debido a su elevada clase de protección IP, la balanza de acero inoxidable resistente al agua no incorpora ninguna interfaz. No obstante, ofrecemos interfaces opcionales para la balanza de acero inoxidable resistente al agua como RS-232, USB, LAN, contacto de mando OC, interfaces analógicas 4-20 mA o 0-10 V.



- Verificada según la clase de verificación MIII
- Fabricada completamente en acero inoxidable IP67 - IP65
- Función de cómputo de unidades
- Función de suma
- Indicador de peso Máx. / Mín.
- Pesaje porcentual
- Función estadística
- Función de pesaje de animales
- Indicador de peso Bruto / Neto
- Memoria de tara
- Pesaje de niveles límite MÍN / MÁX / OK
- 3 contactos libres de potencial opcionales
- Salida analógica opcional de 4-20 mA / 0-10V

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



- Pesaje para recetas

Especificaciones técnicas

Modelo	Rango de pesaje	Resolución	Valor de verificación	Peso mínimo	Dimensiones plataforma
PCE-SD 30 SST C	30 kg	10 g	10 g	200 g	400 x 500 mm
PCE-SD 60 SST C	60 kg	20 g	20 g	400 g	400 x 500 mm
PCE-SD 150 SST C	150 kg	50 g	50 g	1 kg	600 x 500 mm
PCE-SD 300 SST C	300 kg	100 g	100 g	2 kg	600 x 500 mm

* La carga mínima es la carga a partir de la cual las oficinas de homologación verifican la precisión. La balanza de acero inoxidable resistente al agua también puede mostrar pesos inferiores. No obstante, estos pesos inferiores no deberían usarse en metrología legal.

Clase de verificación	M III (se entrega verificada)
Cómputo de piezas	mediante un número de piezas de referencia
Función de tara	Tara múltiple en todo el rango de medición
Interfaz	RS-232 bidireccional, USB, LAN y salida analógica 4-20 mA, 0-10, OC opcionales Descripción de interfaz
Pantalla	LED con dígitos de 20 mm de altura
Longitud de cable	aprox. 1m desde la plataforma hasta la pantalla
Alimentación	~230V, 50 Hz, 8 VA
Clase de protección	Células de carga IP67 / Pantalla IP65
Temperatura de aplicación	-10 ... +40 °C
Peso	Plataforma 400 x 500 x 120 mm / 17 kg Plataforma 600 x 500 x 135 mm / 25 kg
Contenido del envío	1 x Balanza de acero inoxidable resistente al agua, 1 x Pantalla, 1 x Instrucciones de uso



Contents

1. Technical Specification	1
2. Packing List	3
3. Product Overview	4

Technical Specification

Printing

System	ANYCUBIC Photon Mono X
Operation	3.5-inch Color TFT Screen
Software	ANYCUBIC Photon workshop
Connectivity	USB memory stick

Specifications

Technique	LCD Shadow Masking
Light source	UV-LED (wavelength 405nm)
XY Resolution	0.050mm 3840*2400 (4K)
Z axis Accuracy	0.01mm
Suggested Layer Thickness	0.01 ~ 0.15mm
Suggested Print Speed	MAX 60mm/h
Rated power	120W

Physical Dimensions

Dimension	270mm (L) *290mm (W) 475*mm (H)
Build volume	192mm (L) *120mm (W) *245mm (H)
Materials	405nm UV-resin
Net weight	~10.75 kg

Technical Specification

Recommended Printing Parameters

Layer Thickness	0.05 mm
Normal Exposure Time	2 (for the transparent color resin, it is 2s; for others, such as grey, black, white and skin color resin, it is 1.5s)
UV power	50%(for the transparent color resin, it is 50%; for others, such as grey, black, white and skin color resin, it is 80%)
Off Time	0.5 s
Bottom Exposure Time	40 s
Bottom Layers	6
Z Lift Distance	8 mm
Z Lift Speed	2 mm/s
Z Retract Speed	3 mm/s
Anti-alias	1

Note:





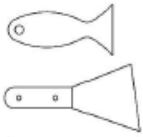
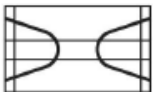








1.The recommended printing parameters above is for reference only, which is more suitable for Anycubic resin. If you use other resin, please refer to the recommended printing parameters supplied by its manufacturer or print “R_E_R_F” to test.

2. The UV power of the machine is high. If there are solid residue in the resin vat or on the printing platform frequently, please decrease the UV power and increase the normal exposure time.

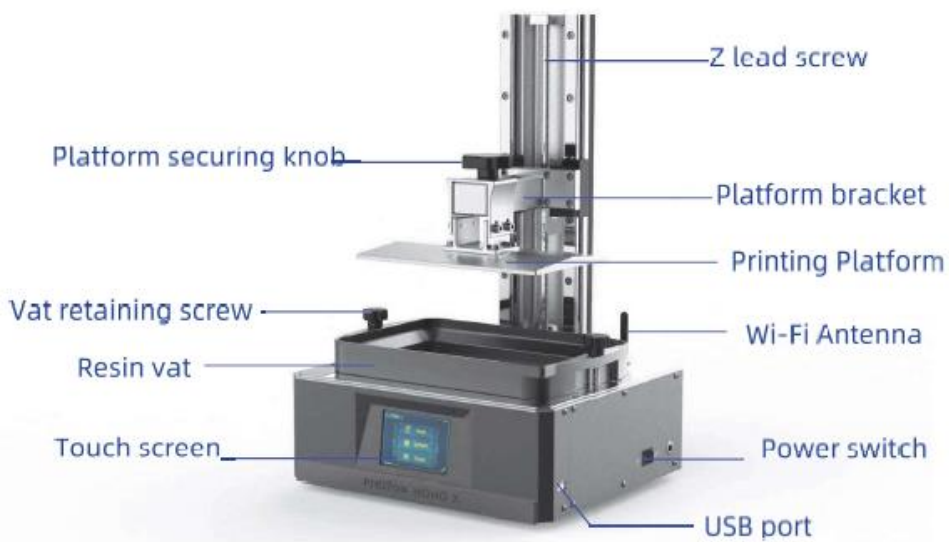


“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Packing List

		
	Print platform 1PCS	Resin vat 1PCS
Photon Mono X		
	USB memory 1PCS	Scrapers 2PCS
		
Mask 1PCS	Gloves 3Pairs	Funnel 5PCS
		
Assembly Instruction 1PCS	Power adaptor / Power cord 1PCS	
		
After-sale service card 1PCS	Tool kit	WIFI Antenna 1PCS
		
Leveling paper 1PCS		

Product Overview



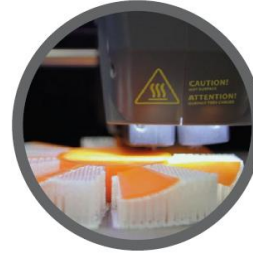
“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



Designed for professionals with engineering applications in mind.



Prototype and manufacture with soluble or breakaway support.



Robox needle valve nozzle control technology for reduced print times.

roboxpro additive manufacturing platform

Specifications

Technology	Fused Filament Fabrication (FFF)
Build Size (L x W x H)	210 x 300 x 400 mm
Total Size (L x W x H)	510 x 510 x 610 mm
Layer Resolutions	50 to 500 microns / 0.05 to 0.5 mm
Presets:	Professional - 100 microns / 0.1 mm Standard - 200 microns / 0.2 mm Fast - 300 microns / 0.3 mm
Temperatures	Nozzles - up to 300°C Bed - up to 150°C
Filament Diameter	1.75 mm +/- 0.05 mm
Head Nozzle Diameters	QuickFill™ - 0.3 mm & 0.8 mm DualMaterial™ - 0.4 mm & 0.4 mm Single™ - 0.6 mm (Olsson Ruby) Coming soon: Fine DualMaterial™ - 0.2 mm & 0.4 mm Rapid - 1.2 mm
Model Materials	ABS, PETG, PC, TPU, nylon & carbon-filled
Support Materials	Soluble & breakaway
Interface	Desktop/laptop, mobile & onboard
File Types	.stl & .obj
Connectivity	Wi-Fi, USB stick & Ethernet
Air Purification	HEPA & active charcoal air filtration
Software Bundle	Robox® AutoMaker™
Software Compatibility	Windows 7+, MacOS X 10.6+ & Ubuntu Linux 12.04+

www.cel-robox.com

roboxpro additive manufacturing platform

Patented needle valve nozzle control technology makes RoboxPRO the most efficient high quality dual extrusion machine for prosumers and professionals.

Create high quality models, full-size prototypes and end-use parts up to 30% faster with the new RoboxPRO 3D printing system from CEL.



- Needle valve nozzle technology for superior dual extrusion printing
- Professional build volume of 210 x 300 x 400 mm
- Upgradeable printheads for extended and enhanced capabilities
- Integrated 5" touchscreen interface with wireless connectivity
- HEPA filter and active charcoal air purification system
- Climate-controlled build chamber with locking door
- Interchangeable, hassle-free build plate - no glue or tape required
- Web access with real-time monitoring and alerts
- SmartReel™ technology for automatic print settings and costings
- Streamlined workflow with intuitive AutoMaker™ software
- Adaptive bed levelling and fully automatic hardware calibrations
- Flexible build plate with magnetic fittings for easy removal of parts

CEL



MADE IN BRITAIN

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



PCE Ibérica S.L.
C/ Mayor 53, bajo
02500 Tobarra (Albacete)
España
Tel. nacional: 902 044 604
Tel. Internacional: +34 967 543 695
Fax: +34 967 543 548
Info@pce-iberica.es
www.pce-iberica.es
www.pce-instruments.com/espanol

Hasta 2420 imágenes por segundo / Manejo sencillo / USB 3.0 / Software incluíd / Plug and Play / Compacto y robusto

La cámara de alta velocidad PCE-HSC 1660 es ideal para grabaciones sencillas de movimientos lentos en la industria y la investigación. La cámara de alta velocidad permite grabar con una frecuencia de hasta 2420 imágenes por segundo. La cámara de alta velocidad destaca por su construcción compacta y su manejo sencillo. La conexión al ordenador o portátil se realiza a través de una conexión USB 3.0. El software que se incluye en el envío detecta automáticamente la cámara de alta velocidad, y una vez instalado los drivers correspondientes podrá empezar a grabar imágenes. La cámara de alta velocidad PCE-HSC 1660 usa un sensor de imagen CMOS con una profundidad de memoria de 10 bit. Esto permite realizar grabaciones en blanco y negro con una resolución de 1280 x 1024. Puede montar la cámara de alta velocidad PCE-HSC 1660 sobre un trípode.

- Conexión USB 3.0
- 1,3 Megapíxeles
- Máximo 2420 FPS (imágenes por segundo)
- 10 Bit CMOS
- Plug and Play
- Control a través del PC
- Conexión de disparo (Trigger)
- Rosca para montaje sobre trípode

Especificaciones técnicas de la cámara de alta velocidad PCE-HSC 1600

CMOS	1,3 Megapíxeles
Resolución máxima	1280 x 1024
Cuota de grabación máxima	2420 FPS
Resolución / Cuota de grabación	1280 x 1024 / 210 FPS 1024 / 1024 / 260 FPS 1024 x 2768 / 346 FPS 640 x 480 / 825 FPS 512 x 512 / 950 FPS 256 x 256 / 2420 FPS
Profundidad de píxeles	10 Bit CMOS
Tamaño píxeles	4.8 µm por píxel
Memoria	A través del ordenador conectado
Alimentación	A través del puerto USB 3.0
Interfaz	USB 3.0
Trigger	Externo
Conexión del objetivo	C-Mount
Material de la carcasa	Aluminio
Dimensiones	80 x 74 x 40 mm
Peso	180 g (sin objetivo)
Condiciones ambientales	0 ... +40 °C máx. 80 % H.r.

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



Condiciones de almacenaje	-20 ... +60 °C máx. 95 % H.r.
Especificaciones técnicas de la lámpara LED para la cámara de alta velocidad PCE-HSC 1660	
Potencia	6 x 3 W LED
Filtro	5800 K Filtro anticongelante 3200 K Filtro Amber
Función graduación de luz	Sí
Alimentación	Fuente de alimentación 100 ... 240 V AC Salida 12 V / 2 A
Acumulador	7.4 V @ 6000 mAh
Duración del acumulador con una carga	Aprox. 150 minutos
Contenido de envío	
1 x Cámara de alta velocidad PCE-HSC 1660	
1 x Lámpara LED	
1 x Cable USB 3.0	
1 x Disparador	
1 x Maletín	
1 x Software	
2 x Mini trípodes	
1 x Instrucciones de uso	

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



CURVA CARACTERÍSTICA

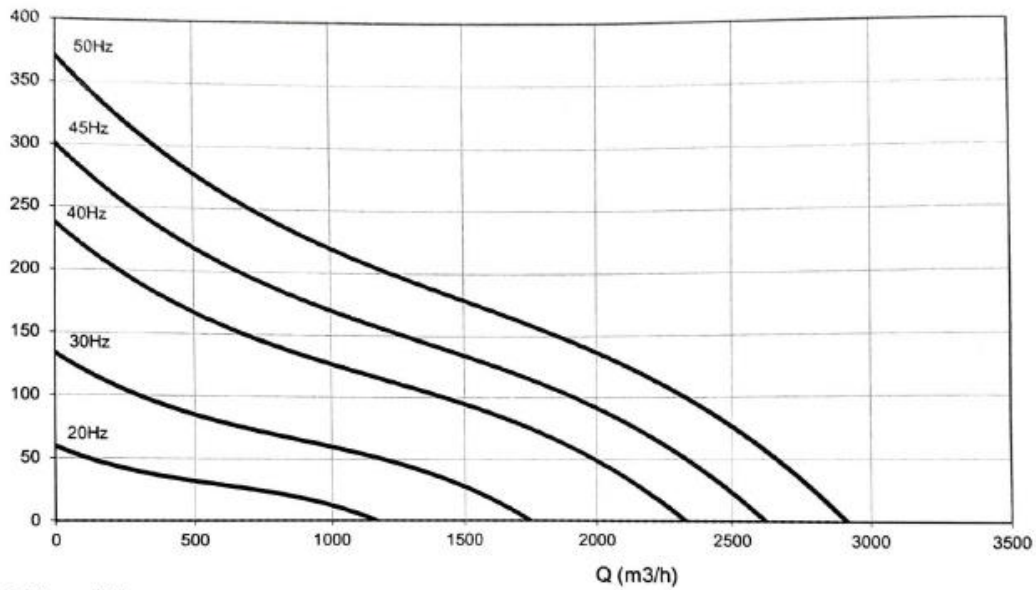
PROYECTO

REFERENCIA

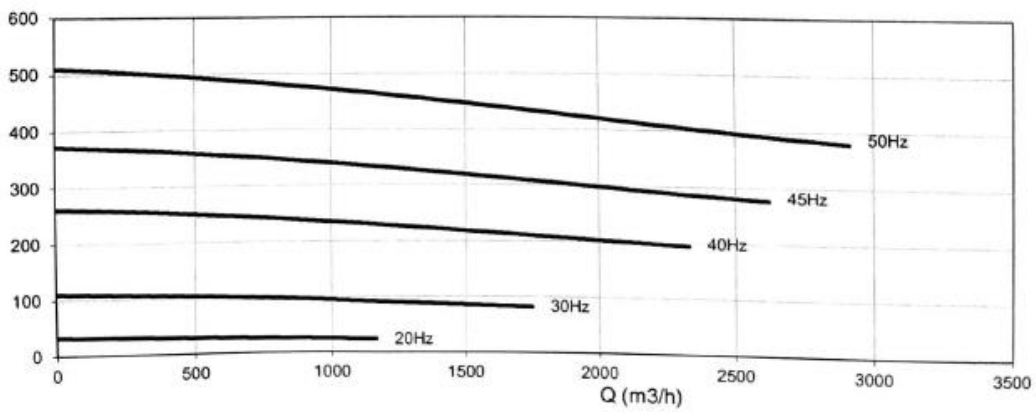
PRODUCTO HBA-31-2T

CURVAS CARACTERÍSTICAS

Pe (Pa)



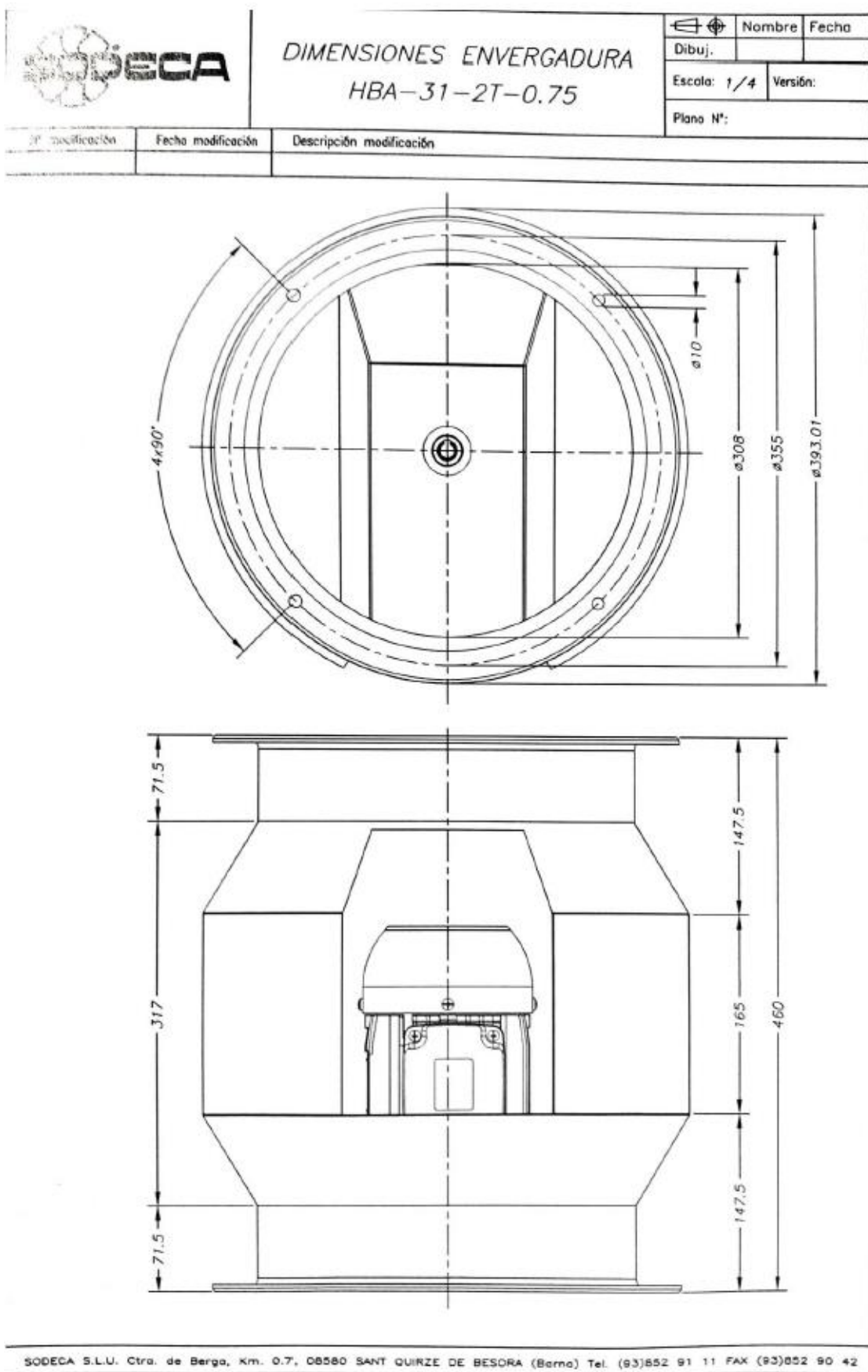
P.Abs.m (W)



v. 19/05/2017

SODECA, S.A. Ctra. de Berga, Km. 0,7 08580-Sant Quirze de Besora (Barcelona - Spain) · Tel. +34 93 8529111
Fax +34 93 8529042 E-mail: tojal@sodeca.com - http://www.sodeca.com

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



ANEXO II: PRESUPUESTO DE INSTRUMENTACIÓN Y FACTURAS DE COMPRA

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

PRESUPUESTO Y ENLACES DE COMPRA

Tabla 17. Presupuesto de instrumentación.

INSTRUMENTOS	FABRICANTE	MODELO	COSTE		COSTE TOTAL (€)
			UNITARIO (€) – Con IVA o VAT	CANTIDAD	
MEDICIÓN DE PRESIÓN Y VELOCIDAD					
Manómetro con tubo de pitot	PCE Instruments	PCE-PDA 10L	580.68	1	580.68
Tubos de pitot	PCE Instruments	SR-305	125.00	2	250.00
Tubos de PVC para manómetro: 1 x 2m	PCE Instruments	SS-AZ	24.08	2	48.16
MEDICIÓN DE VELOCIDAD					
Anemómetro, Medición de Caudal de aire, Velocidad de aire, Humedad, Temperatura	Beha-Amprobe	TMA-21HW	467,18	2	467,18
MEDICIÓN DE HUMEDAD Y TEMPERATURA					
Termohigrómetro de precisión*	OMEGA™	RH92	104.00	2	208.00
VISUALIZACIÓN DE FLUJO					
Cámara de Alta Velocidad	PCE Instruments	PCE-HSC 1660	5142.38	1	5142.38*
Objetivo 8.5 mm distancia focal	PCE Instruments	OBJ-HSC-8,5	190.90	1	190.90*
Objetivo 50 mm distancia focal	PCE Instruments	OBJ-HSC-50	180.90	1	180.90*

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Objetivo 4 mm distancia focal	PCE Instruments	OBJ-HSC-4	409.90	1	409.90*
Objetivo 25 mm distancia focal	PCE Instruments	OBJ-HSC-25	180.90	1	180.90*
SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE AGUA					
Balanza de laboratorio	PCE Instruments	PCE-SD 60 SST C	1197.78	1	1197.78**
Balanza de laboratorio	PCE Instruments	PCE-SD 30 SST C	1197.78	1	1197.78**
Recipiente	DENIOS Online Shop	Volumen de 30 litros	78.05	1	78.05*
Aspiradora de líquidos	Cecotec	Conga WET&DR Y	63.99	1	63.99
Tuberías	Leroy Merlín	Tubería para riego y agrícola 25mm (3/4") 25 m	11.49	2	22.98*
GENERADORES DE NIEBLA					
Humidificador ultrasónico	Carel	Humisonic	455.00	1	455.00
Humidificador de alta presión	Carel	Chillbooster	1507.03	1	1507.03
Accesorios	Carel	Varios	524.37	1	524.37
Envío y tramitación	Sieltec Canarias S.L.	-	150.00	1	150.00
IGIC	-	7%	184.55	1	184.55
IMPRESIÓN 3D					

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

Impresora 3D	CEL-Distribuido en RS Componentes	RoboxPRO™	5453.55	1	5453.55
Impresora 3D	Photon Mono X	ANYCUBIC	637.15	1	637.15
Filamentos de Nylon	TALUMAN 3D	Nylon 645 Natural (1kg)	72.54	2	145.08*
Filamentos de Nylon reforzados con fibra de carbono	TALUMAN 3D	Filamento de Nylon-Fibra de Carbono (CF15) (600g)	64.07	2	128.14*
Filamentos de Nylon reforzados con fibra de vidrio	TALUMAN 3D	XSTRAND GF30-PA6 (500g)	91.90	2	183.80*
Filamentos de PETG	TALUMAN 3D	Taulman TECH-G (1kg)	54.39	2	108.78*

FABRICACIÓN DE LAS MODIFICACIONES ESTRUCTURALES DEL TÚNEL

Mano de obra de taller	ICIA	Horas	10	30	300
Tabla Bancada	Ferretería Chávez S.L.	Tablero	33.60	1	33.60
Planchas acero galvanizado	Ferretería Chávez S.L.	Plancha de 3 m x 1.5 m	40	2	80
TOTAL					12141.04 €

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

* Elementos de selección opcional. Para el total del presupuesto se han tenido en cuenta todos aquellos elementos no considerados como opcionales.

** Se considera la elección de un solo modelo.

Enlaces de compra:

- Medición de presión:
 - https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/anemometro-pce-instruments-anemometro-de-tubo-de-pitot-pce-pda-10l-det_5885715.htm?list=qr.art&listpos=3
 - https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/anemometro-pce-instruments-tubo-de-pitot-de-acero-305-x-4-mm-det_96655.htm
 - https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-presion-goerdes-pneumatik-gmbh-co.-kg-tubo-de-pvc-para-el-manometro-det_5855092.htm
- Medición de temperatura / humedad: <https://es.omega.com/pptst/RH80.html#description>
- Medición de velocidad: <https://www.testex.co.uk/amprobe-tma-21hw-hot-wire-anemometer>
- Recolección de agua:
 - Balanza de laboratorio: https://www.pce-instruments.com/espanol/balanza/balanza-laboratorio-pce-instruments-balanza-de-laboratorio-pce-sd-30sst-c-det_2154312.htm?list=qr.art&listpos=5
 - Tubería: <https://www.leroymerlin.es/fp/17063263/tuberia-para-riego-y-agricola-25mm-3-4-25-m>
 - Depósito de almacenamiento: <https://www.denios.es/shop/bidon-de-plastico-blanco-con-asas-y-grifo-de-vaciado-volumen-30-litros-aptopara-alimentacion/#>
 - Aspiradora de líquidos: <https://www.mediamarkt.es/es/product/aspirador-sin-bolsa-cecotec-conga-wet-dry-1400-w-15-1-soplador-verde->

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

[1434680.html?tduid=4b2d6f4b38f0dc0086fd1da09f2ebd60&utm_source=tradedoubler&utm_medium=affiliate&utm_content=3051493&utm_campaign=affiliate_es_es_mm_conversion_online_mediemarkt_2021-01-01&utm_term=affiliate_es_es_mm_2021-01-01_conversion_tradedoubler_tradedoubler_content_mediemarkt_all_multidevice_3051493_multisize_all_all_all](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-de-alta-velocidad-kat_71085.htm)

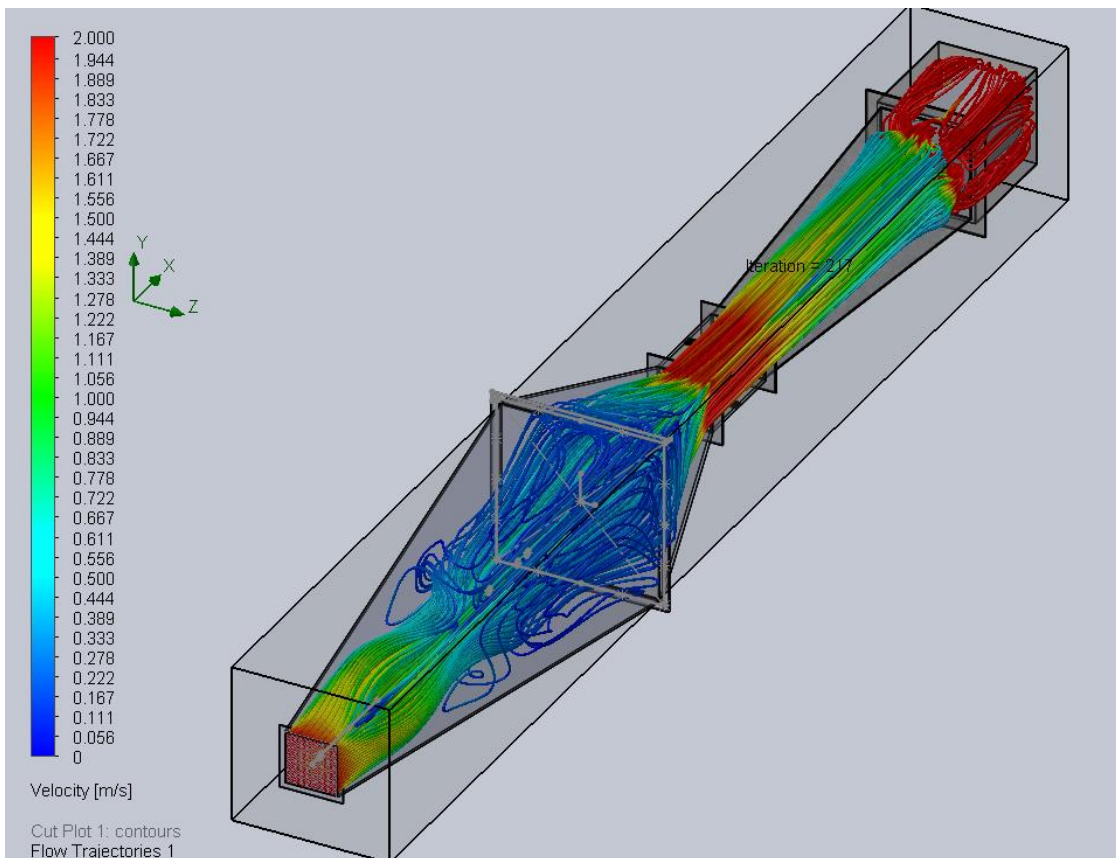
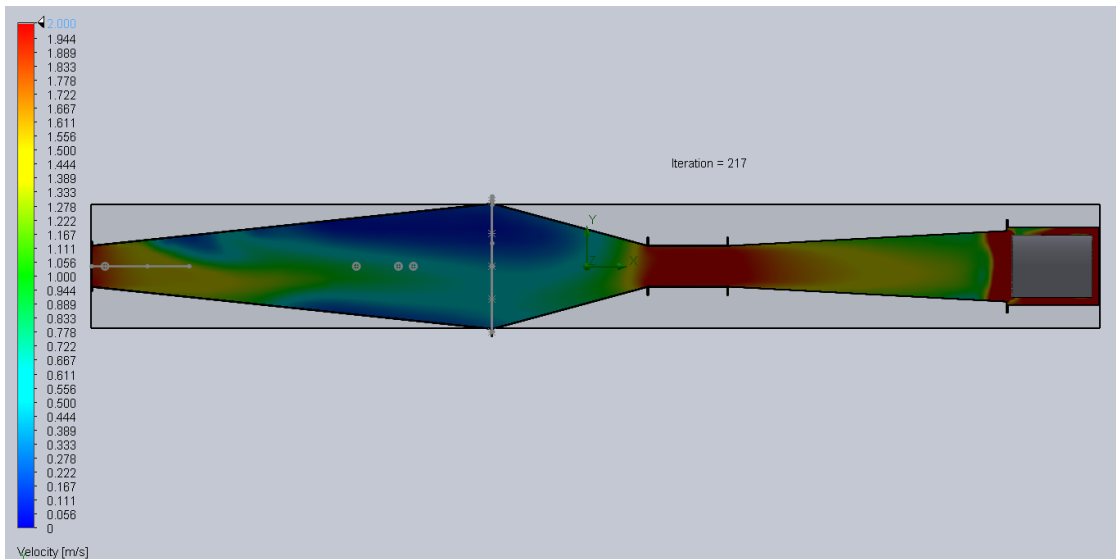
- Visualización de flujo:
 - Cámara de alta velocidad: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-de-alta-velocidad-kat_71085.htm
 - Accesorios:
 - https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-de-inspeccion-pce-instruments-distancia-focal-del-objetivo-8-5-mm-det_5886496.htm
 - https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-de-inspeccion-pce-instruments-distancia-focal-del-objetivo-50-mm-det_5886498.htm
 - https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-de-inspeccion-pce-instruments-distancia-focal-del-objetivo-4-mm-det_5886484.htm
 - https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-de-inspeccion-pce-instruments-distancia-focal-del-objetivo-25-mm-det_5886497.htm
- Impresión 3D:
 - Impresora: <https://es.rs-online.com/web/p/impresoras-3d/1682852/>
 - Filamentos:
 - https://filament2print.com/es/nylon-pa/797-nylon-fibra-carbono-cf15.html#/217-diametro-175_mm/292-formato-bobina_600_g
 - https://filament2print.com/es/copoliesteres-pet/662-taulman-tech-g.html#/217-diametro-175_mm/265-formato-bobina_1_kg

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

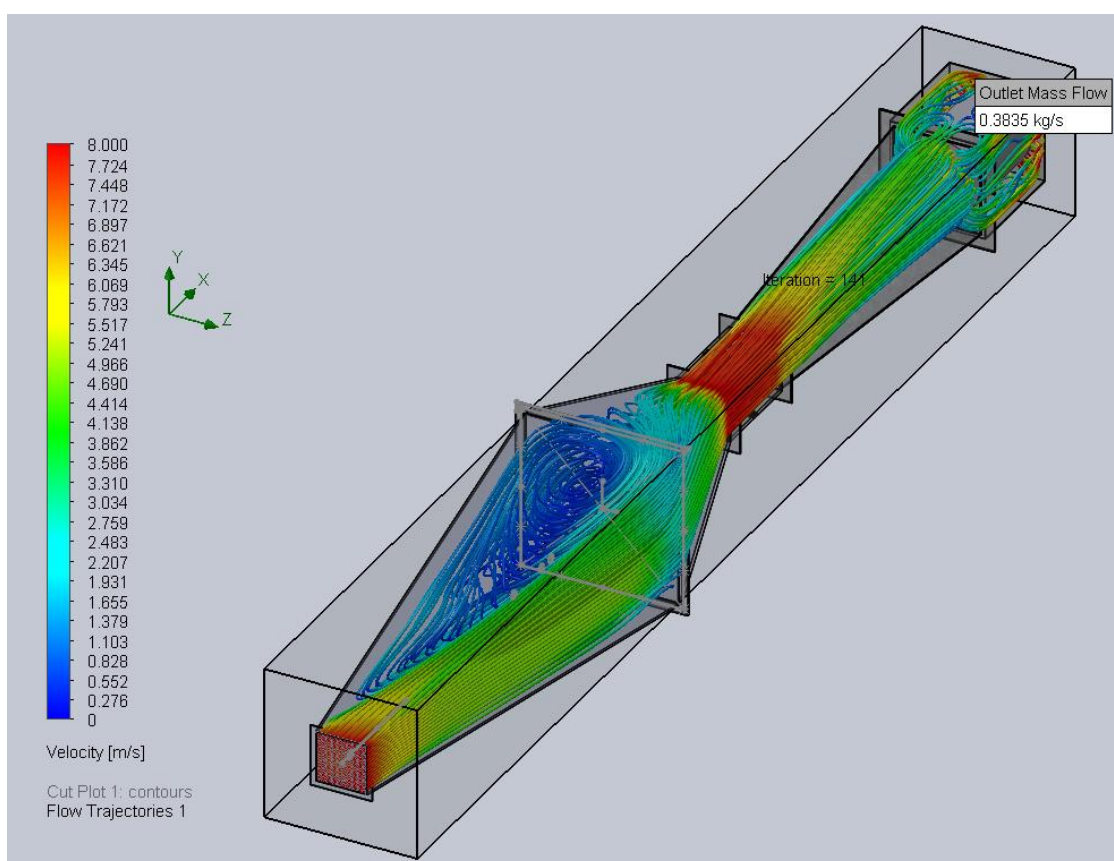
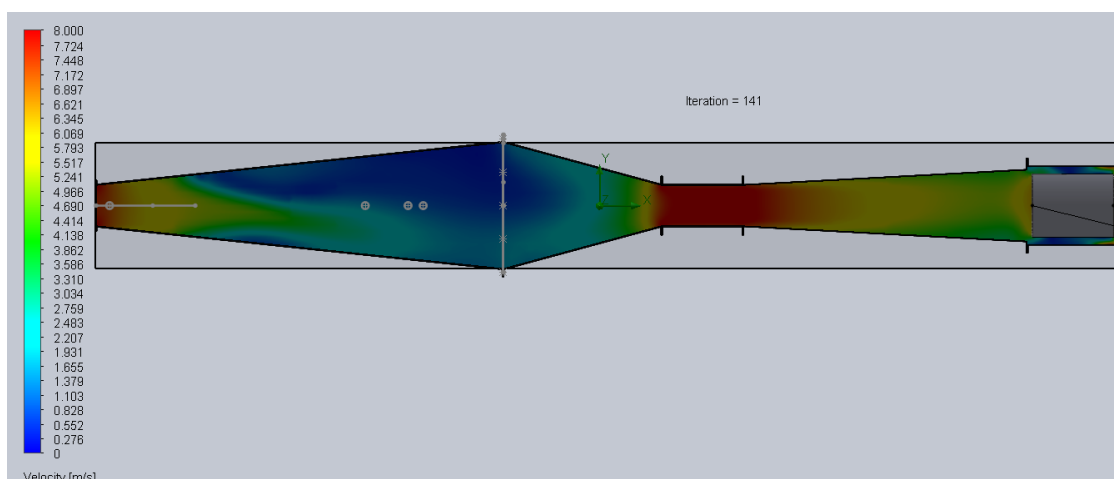
- <https://filament2print.com/es/avanzados/897-xstrand-gf30-pa6.html>
- https://filament2print.com/es/nylon-pa/962-nylon-taulman-645-natural.html#/257-color-natural/217-diametro-175_mm/265-formato-bobina_1_kg

**ANEXO III: RESULTADOS OBTENIDOS EN
SIMULACIONES**

SIMULACIONES REALIZADAS CON LA SECCIÓN DE HUMECTACIÓN DE 2 M DE LONGITUD

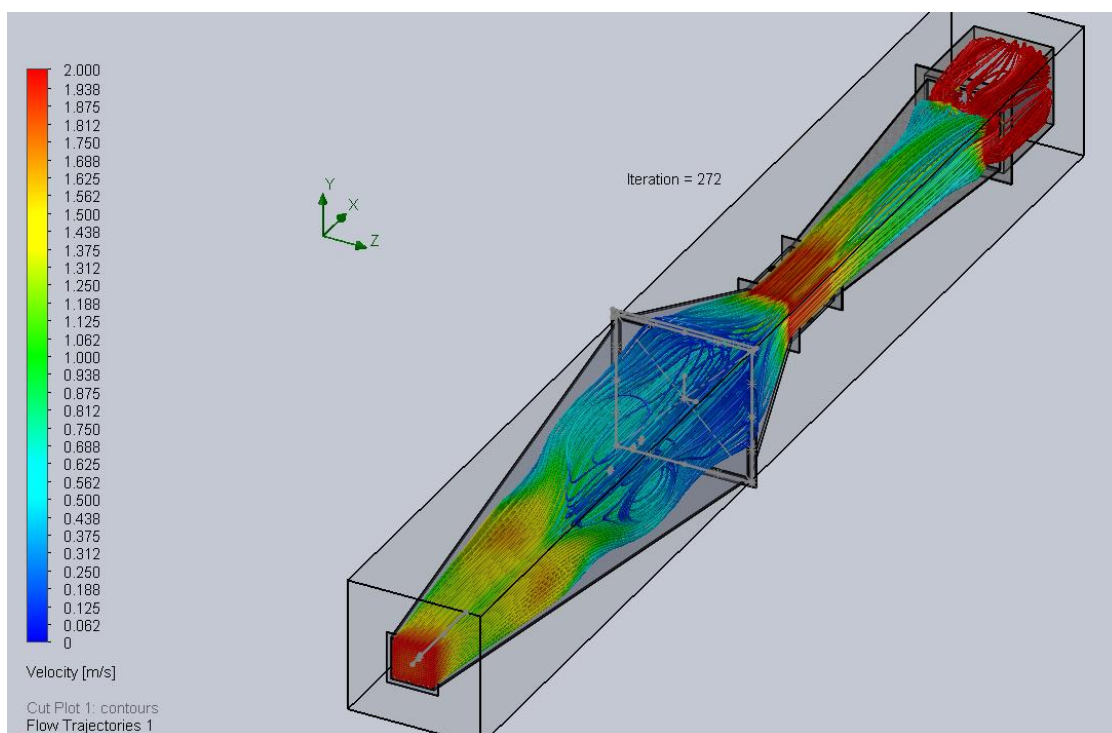
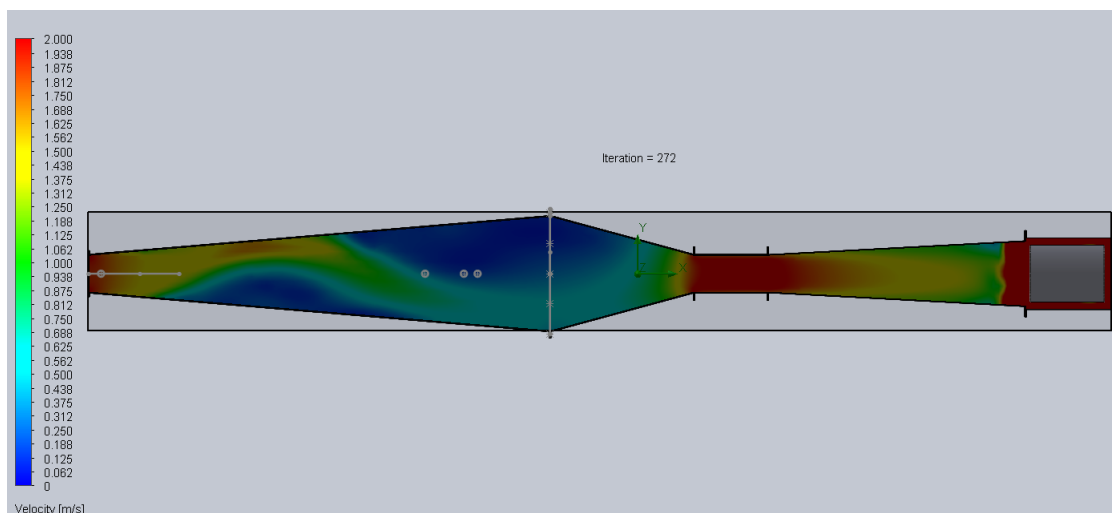


“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



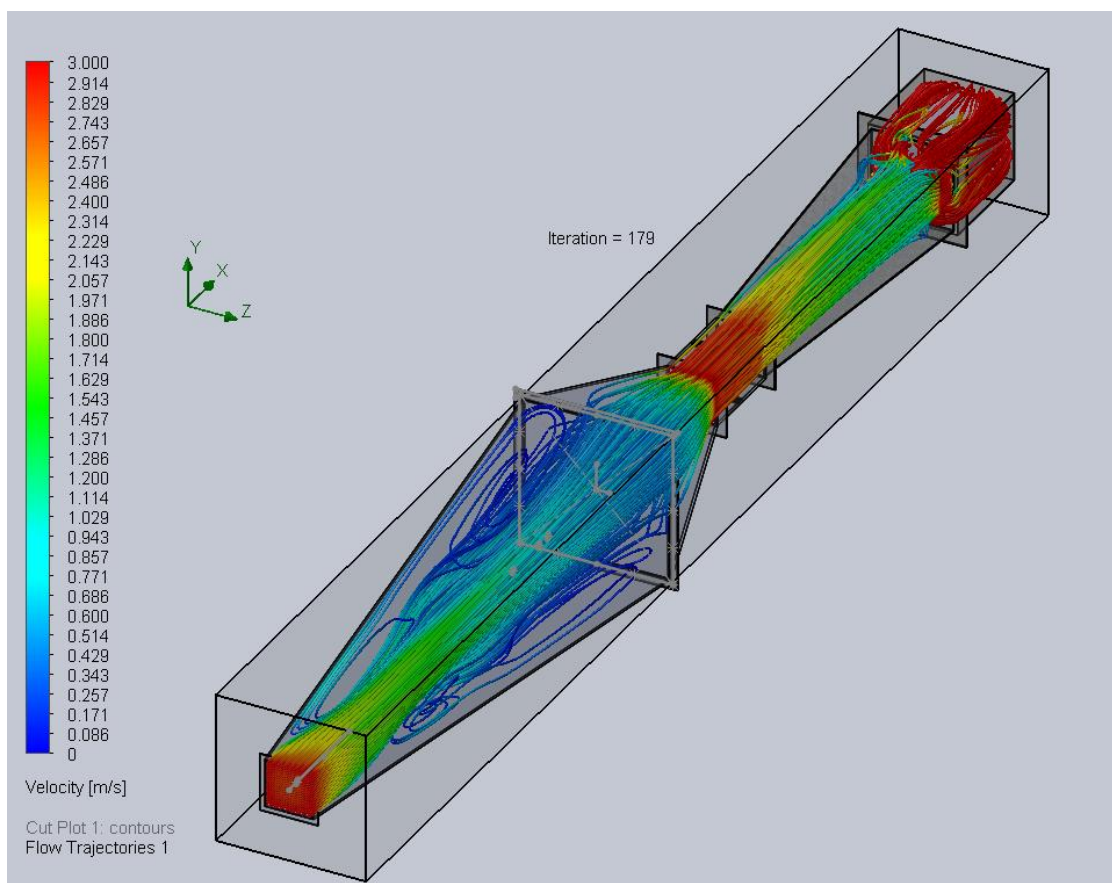
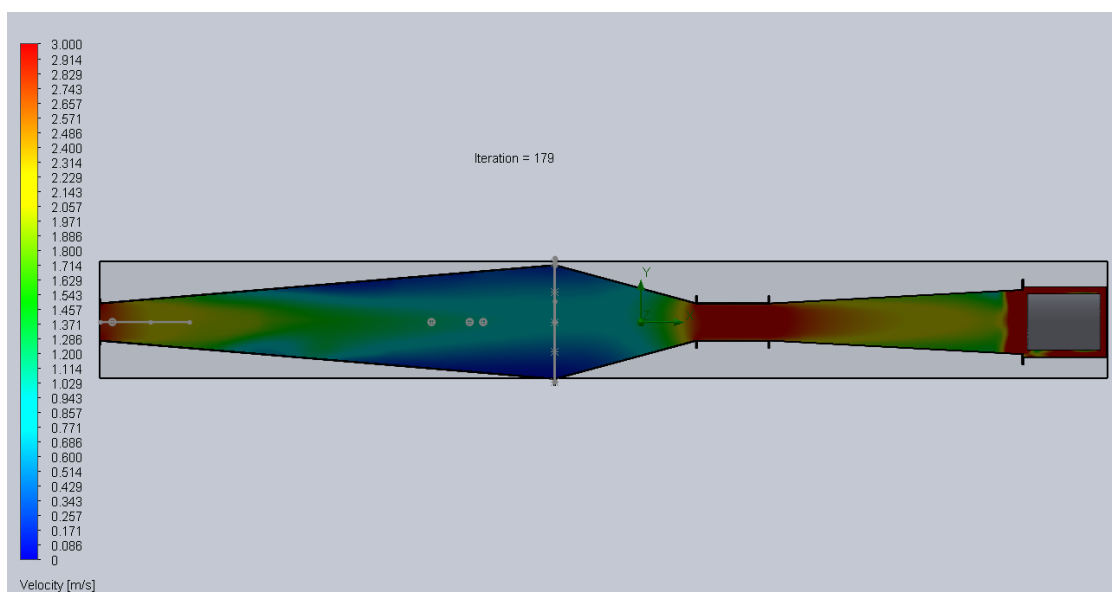
SIMULACIONES REALIZADAS CON LA SECCIÓN DE HUMECTACIÓN DE 2.5 M DE LONGITUD

Caso 1: 2 m/s en la cámara de ensayos



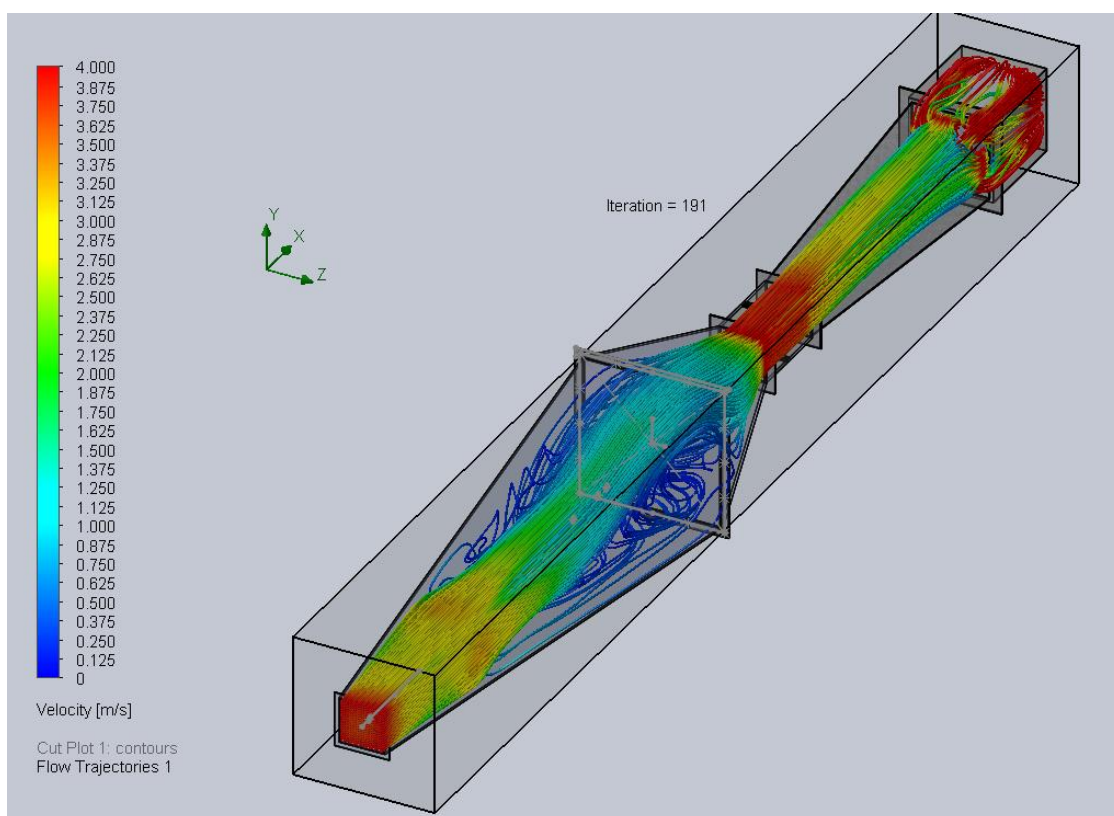
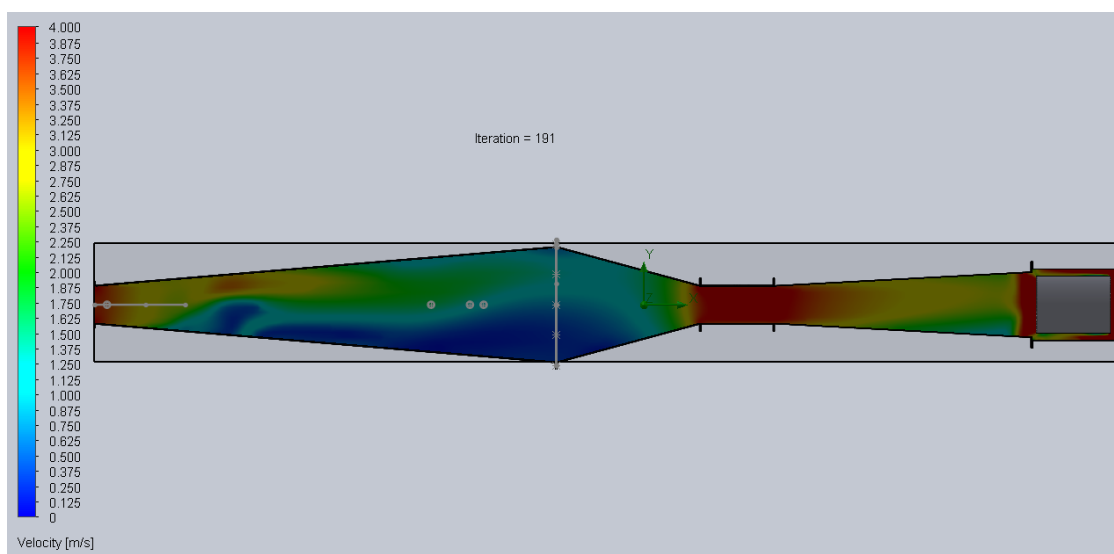
Caso 2: 3 m/s en la cámara de ensayos

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



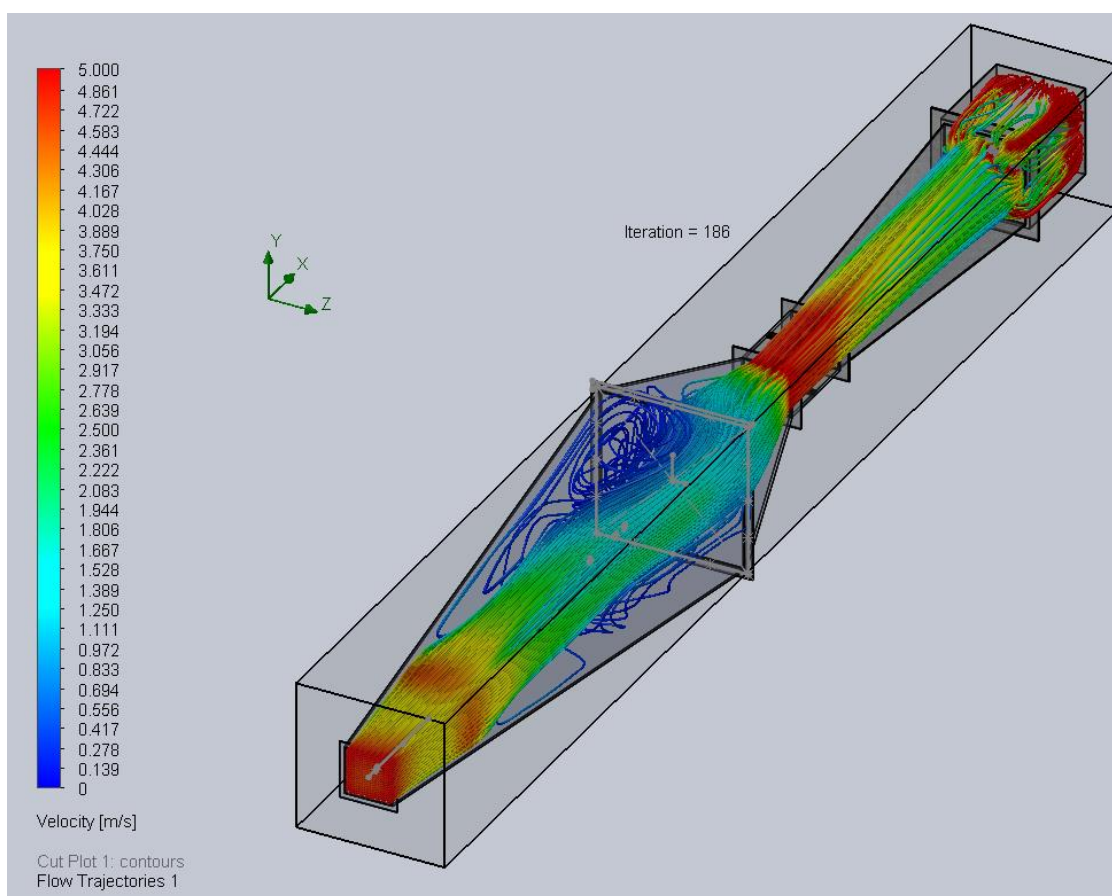
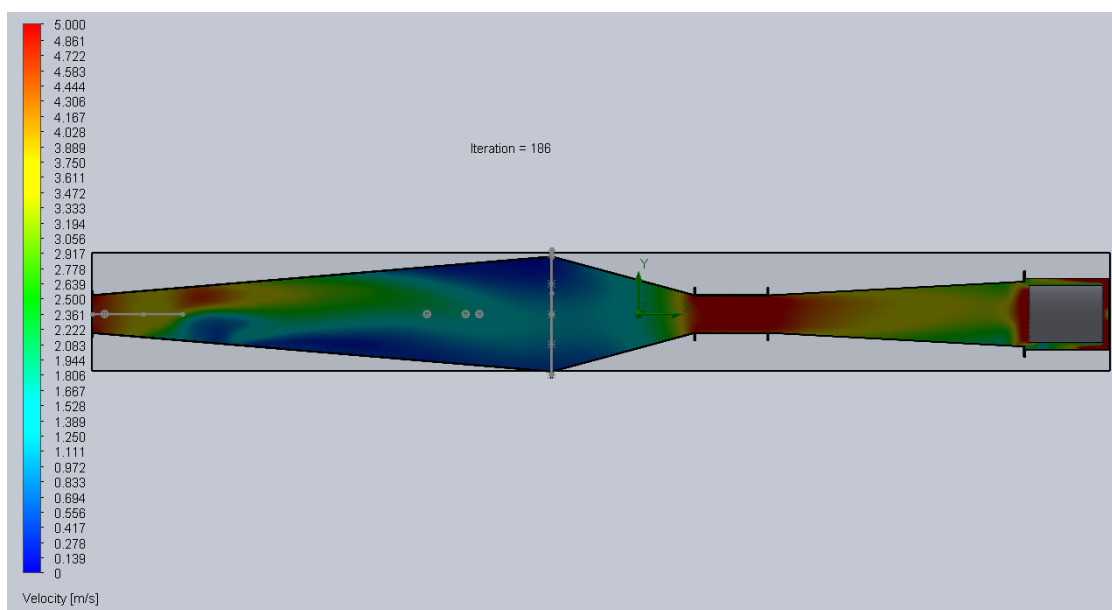
Caso 3: 4 m/s en la cámara de ensayos

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



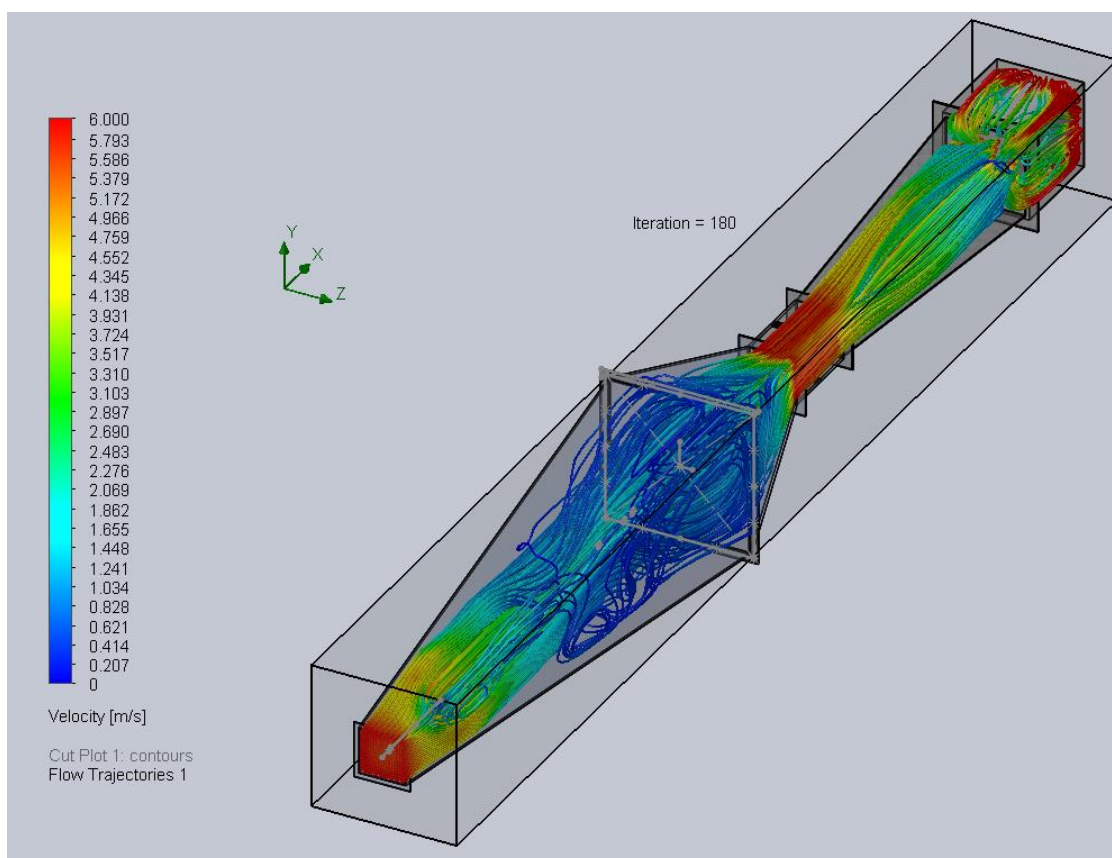
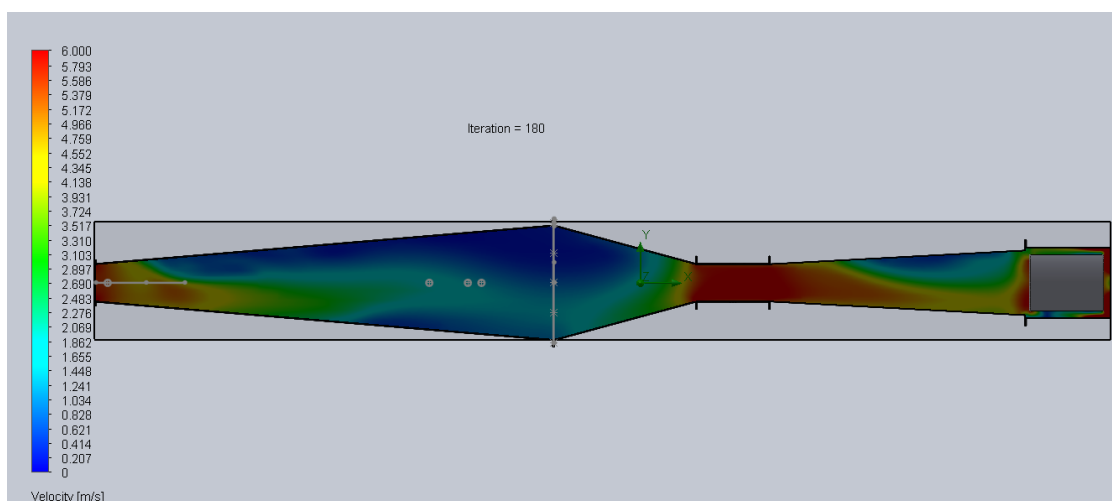
Caso 4: 5 m/s en la cámara de ensayos

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



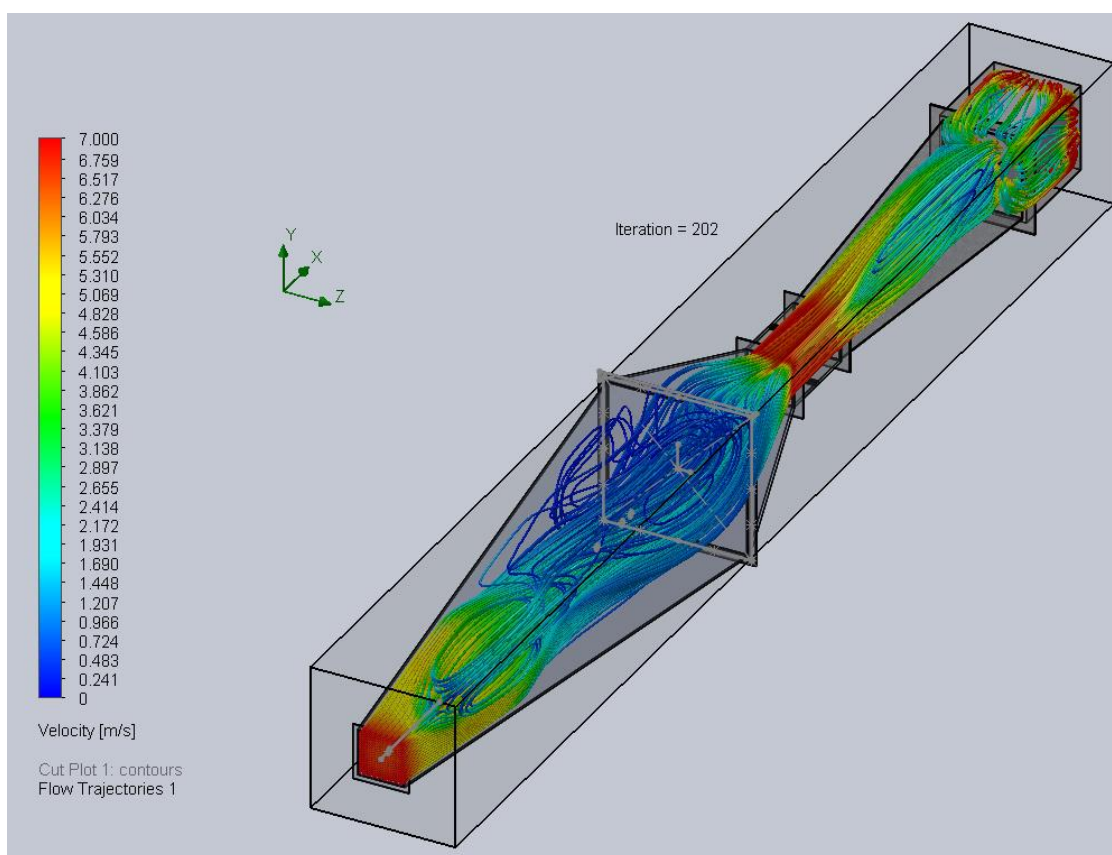
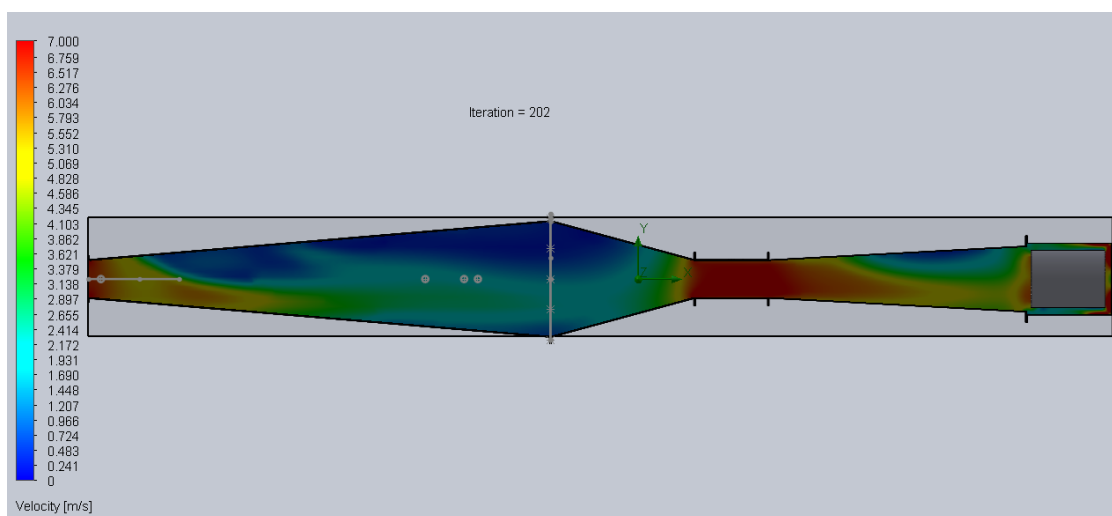
Caso 5: 6 m/s en la cámara de ensayos

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



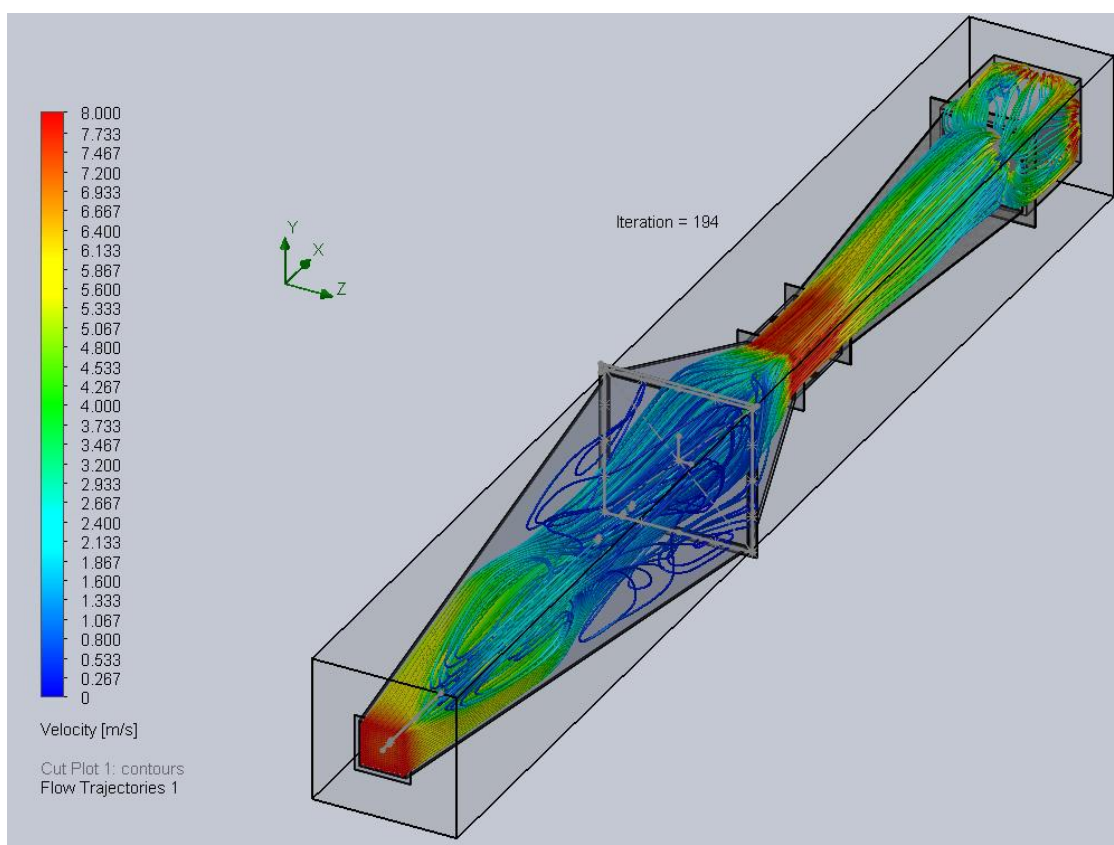
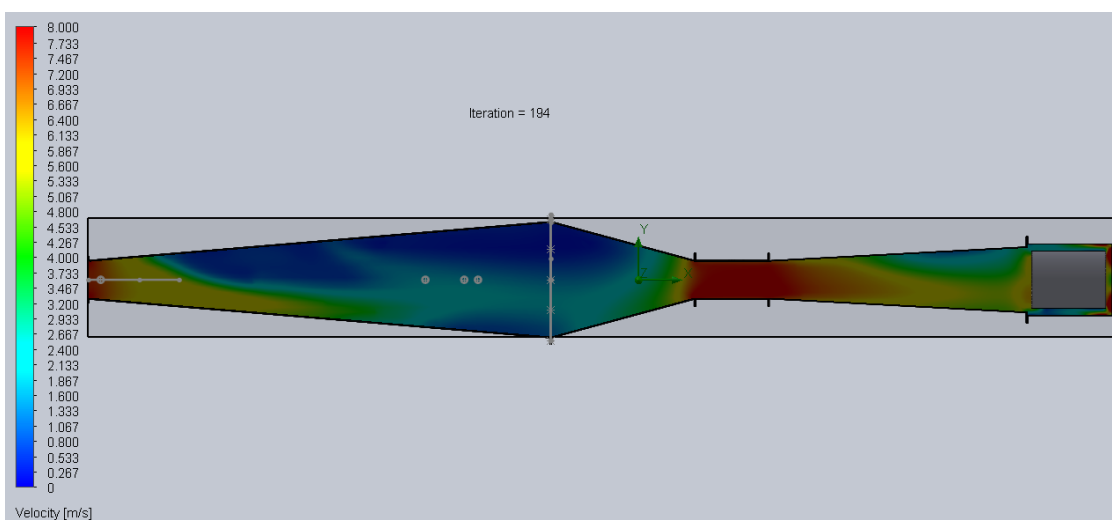
Caso 6: 7 m/s en la cámara de ensayos

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



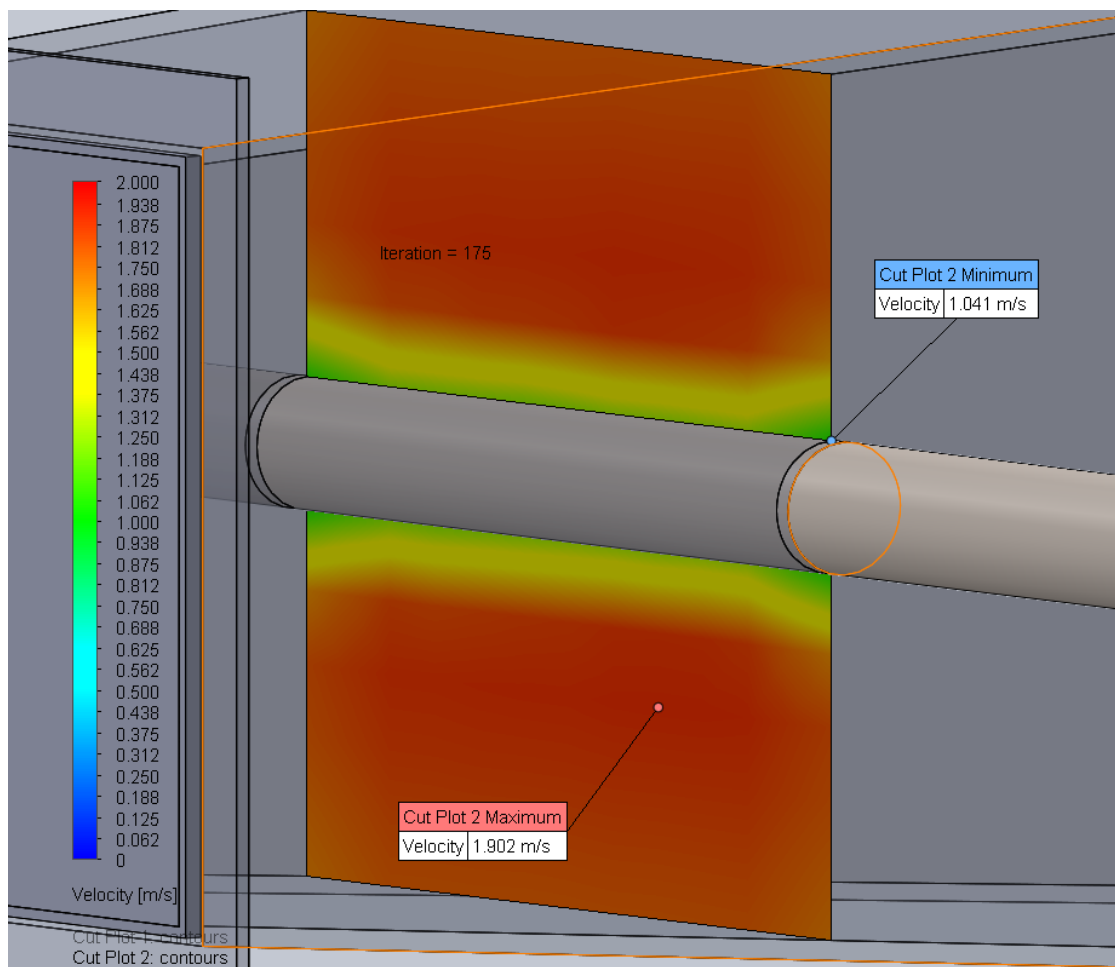
Caso 7: 8 m/s en la cámara de ensayos

“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

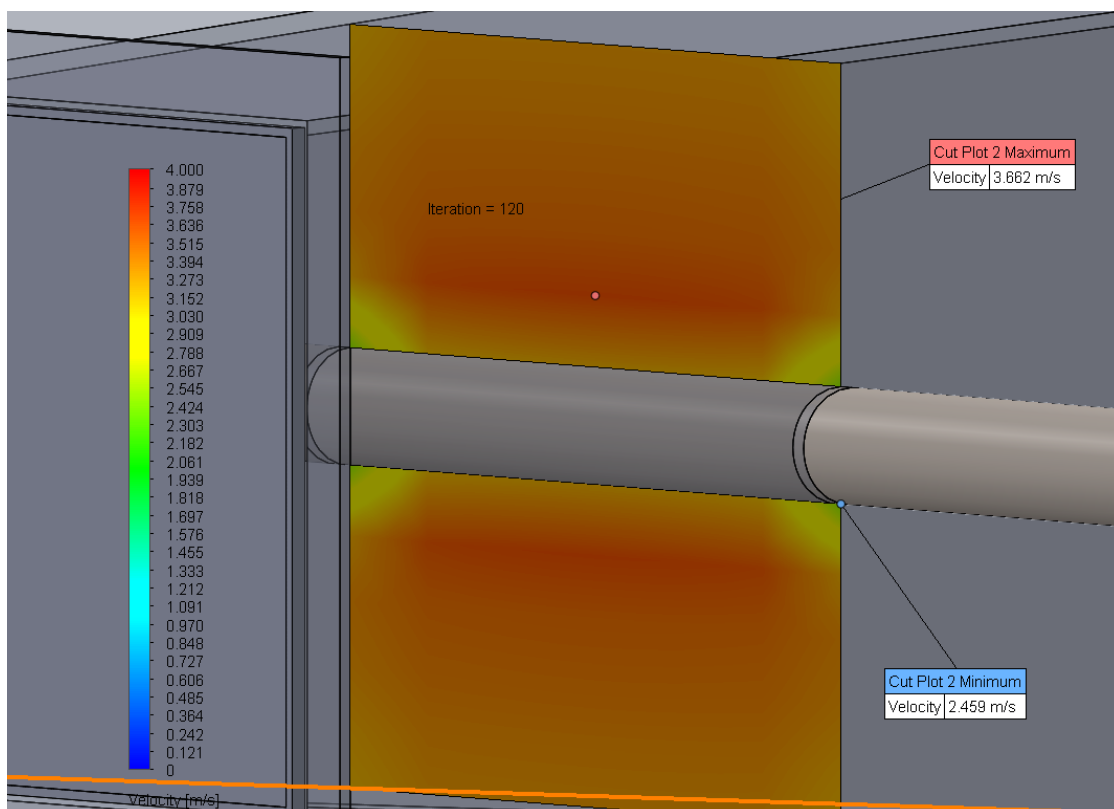
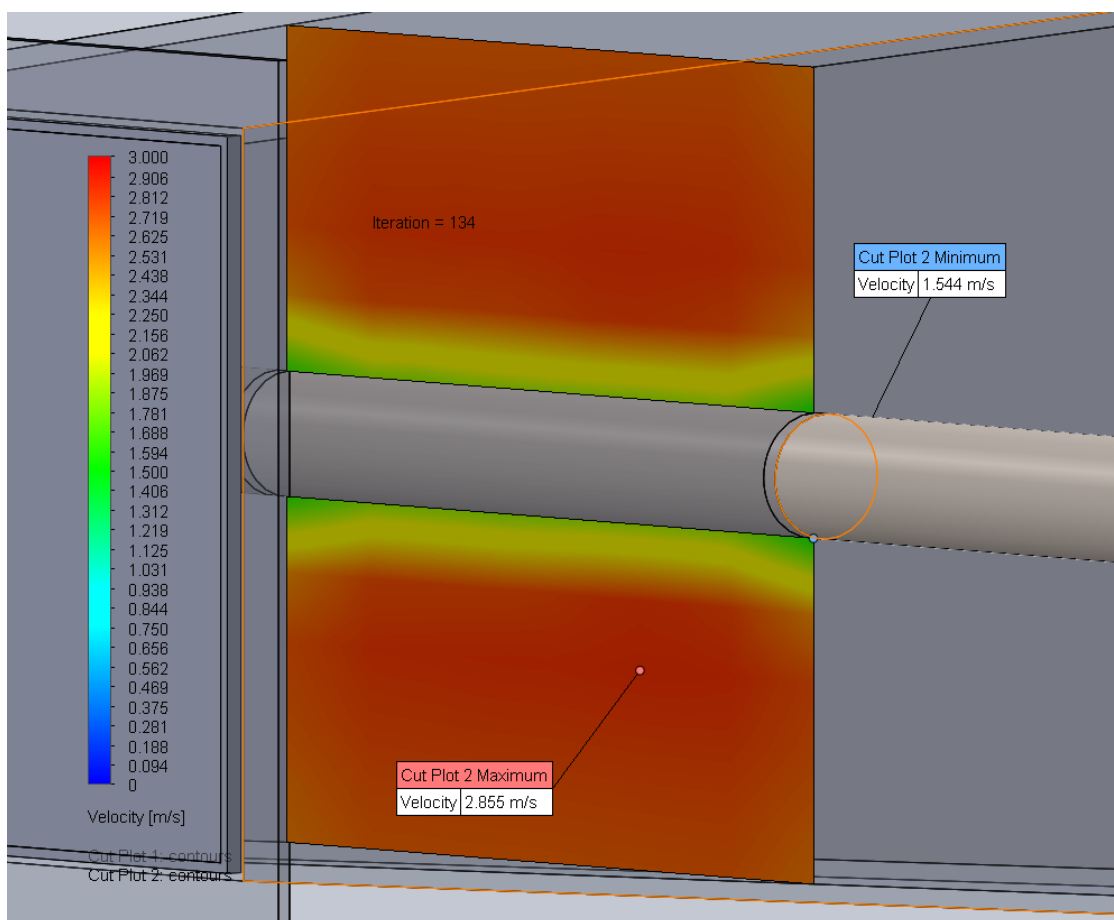


OTROS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS CON LA SECCIÓN DE HUMECTACIÓN DE 3 M DE LONGITUD

LANZA EN POSICIÓN 1: Ensayos para 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s respectivamente.

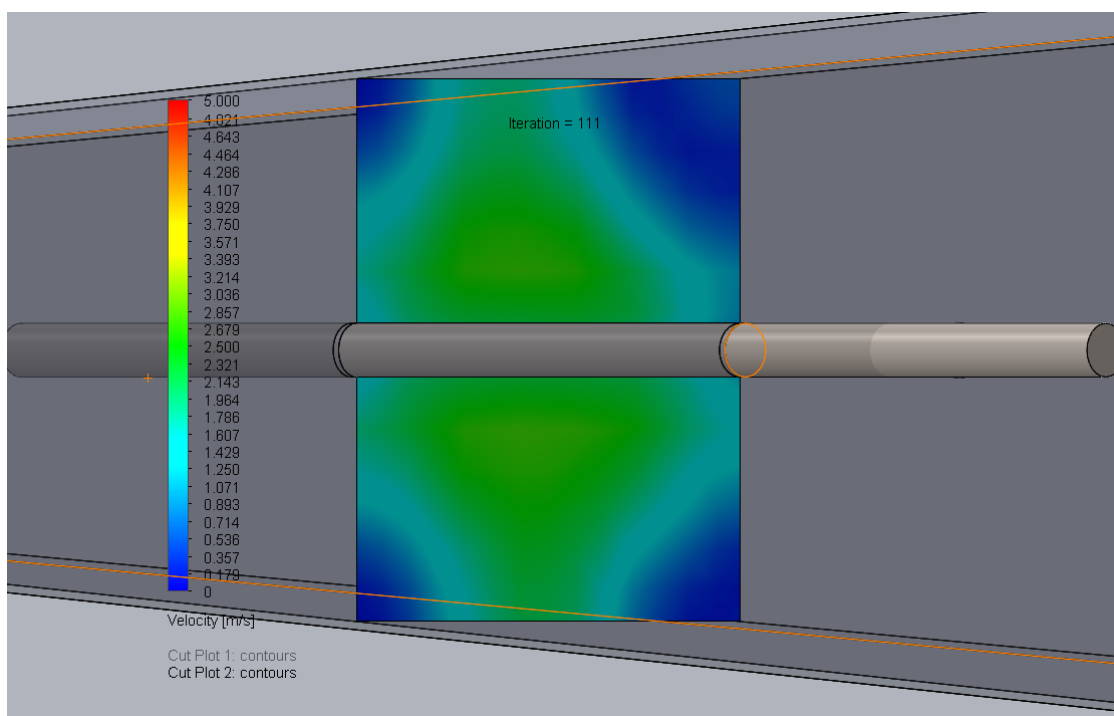
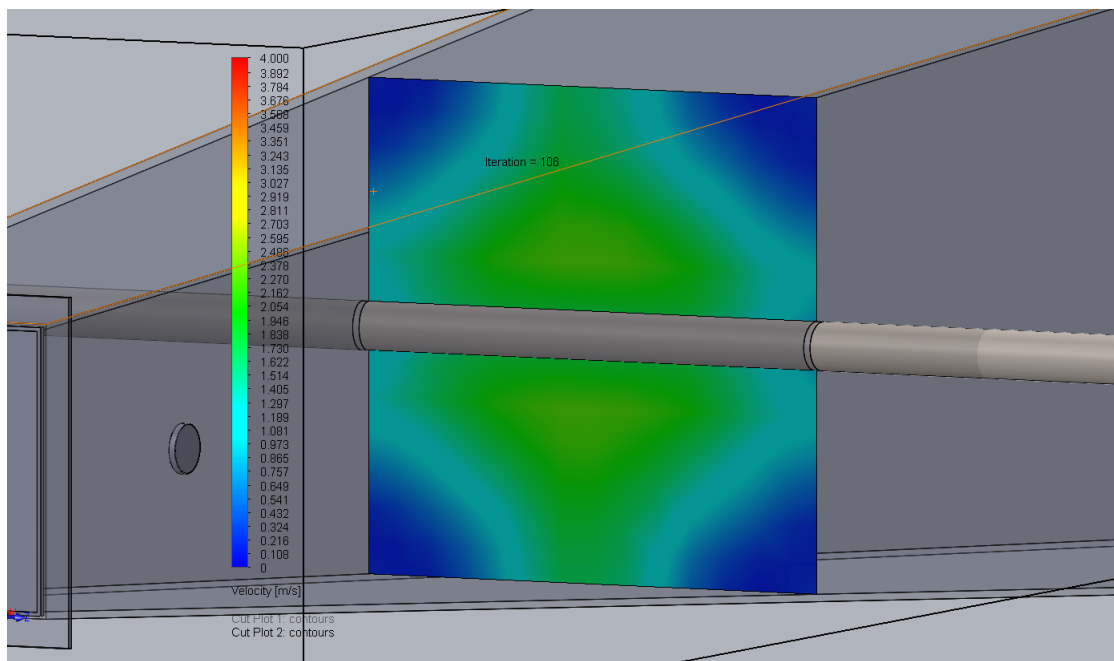


“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

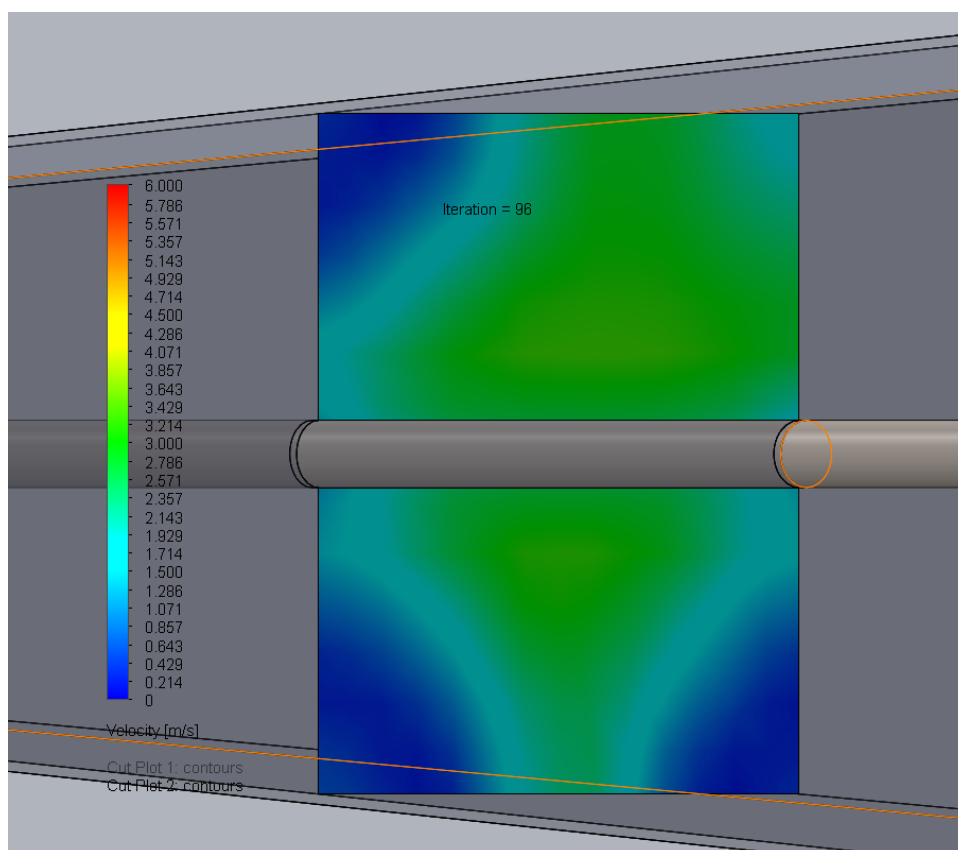


“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

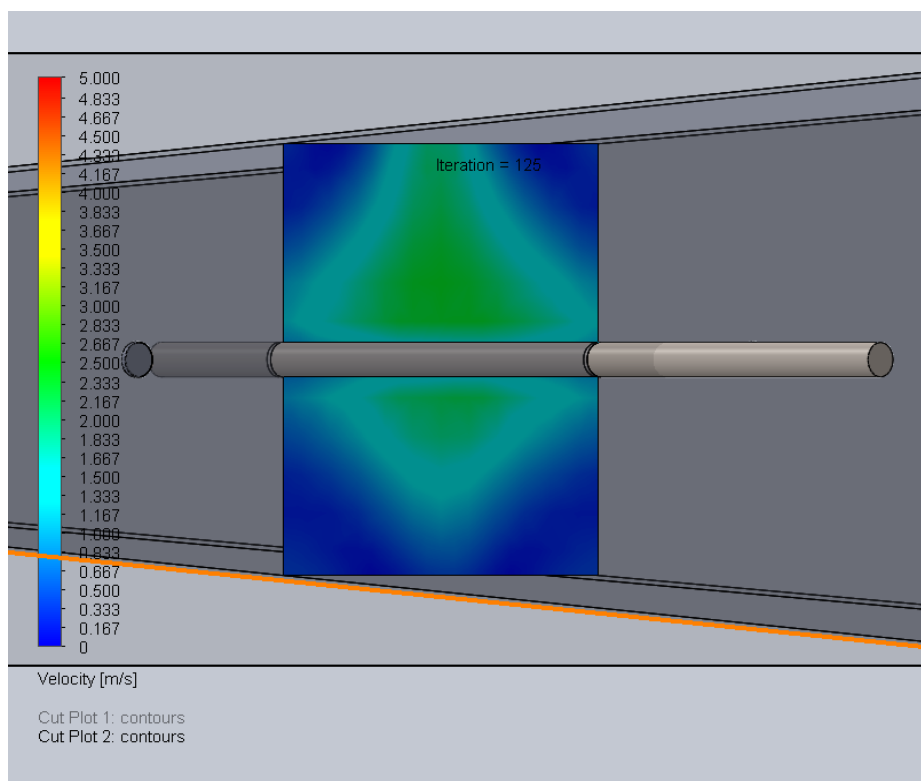
LANZA EN POSICIÓN 2: Ensayos para 4 m/s, 5 m/s y 6 m/s respectivamente.



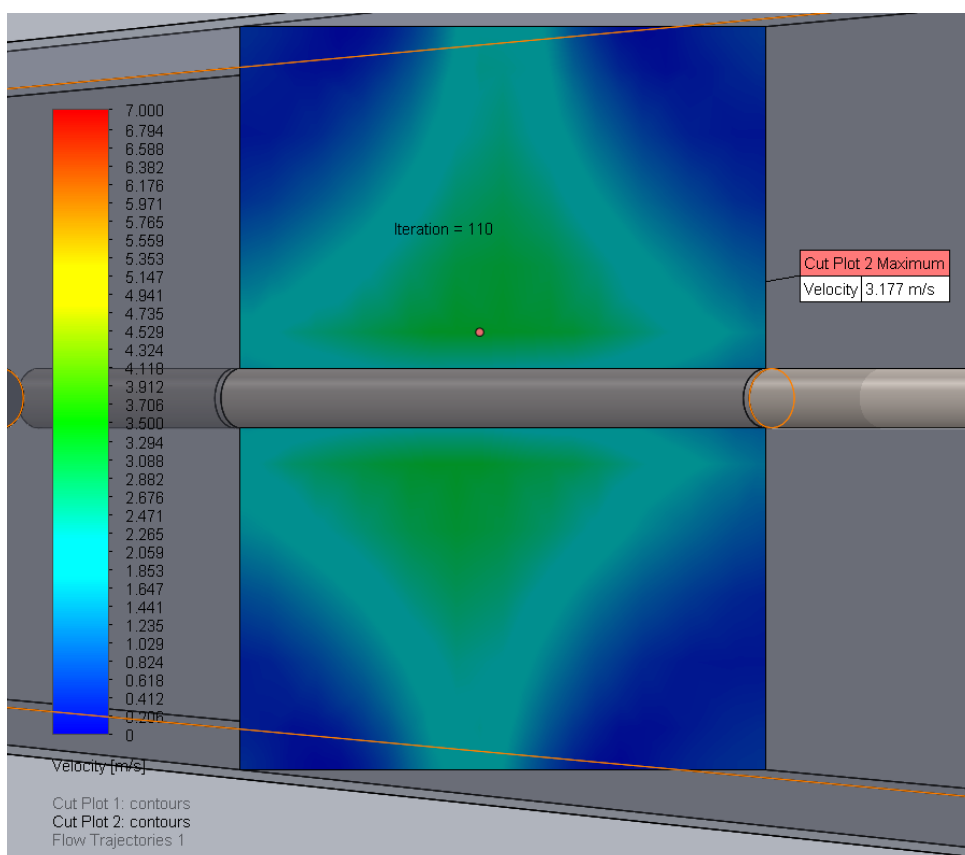
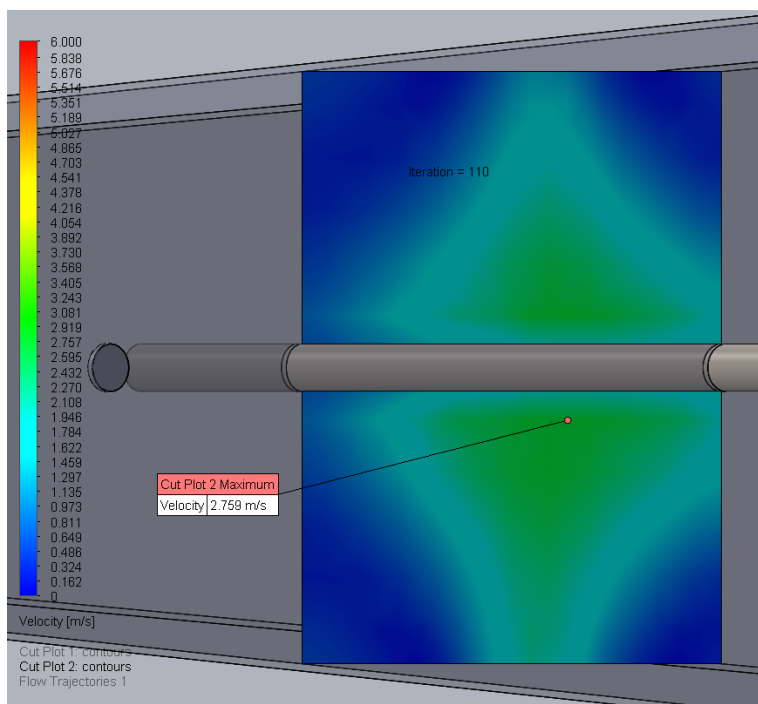
“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



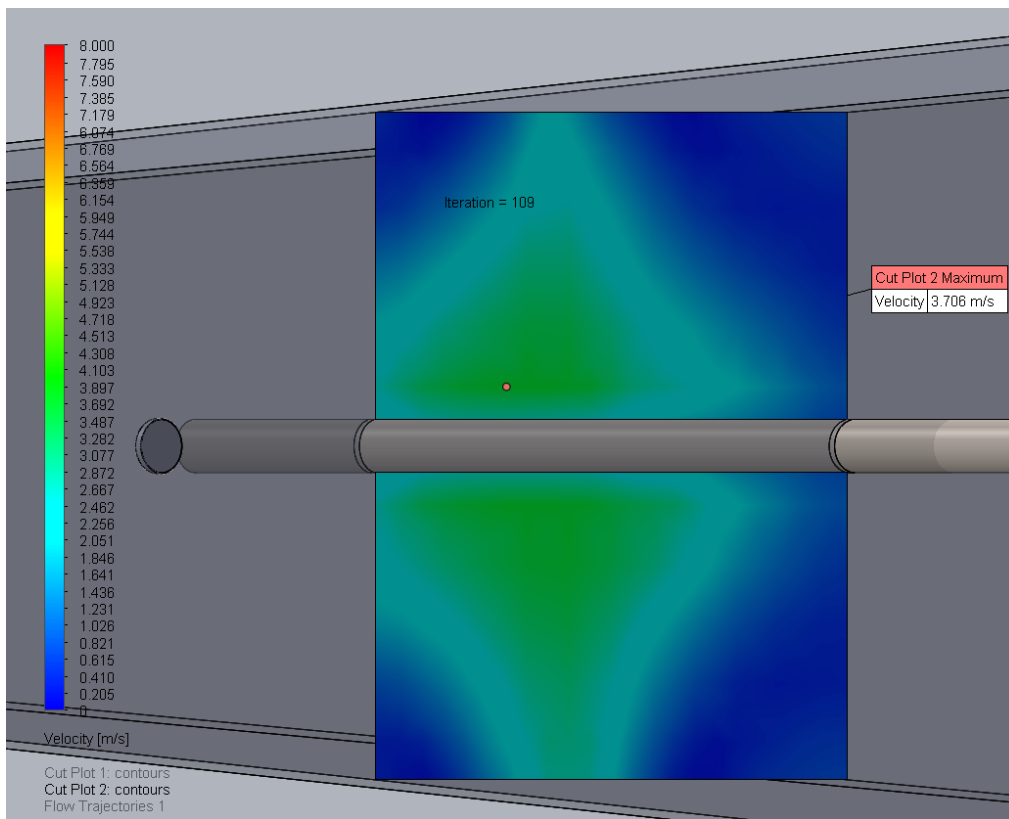
LANZA EN POSICIÓN 3: Ensayos para 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s y 8 m/s respectivamente.



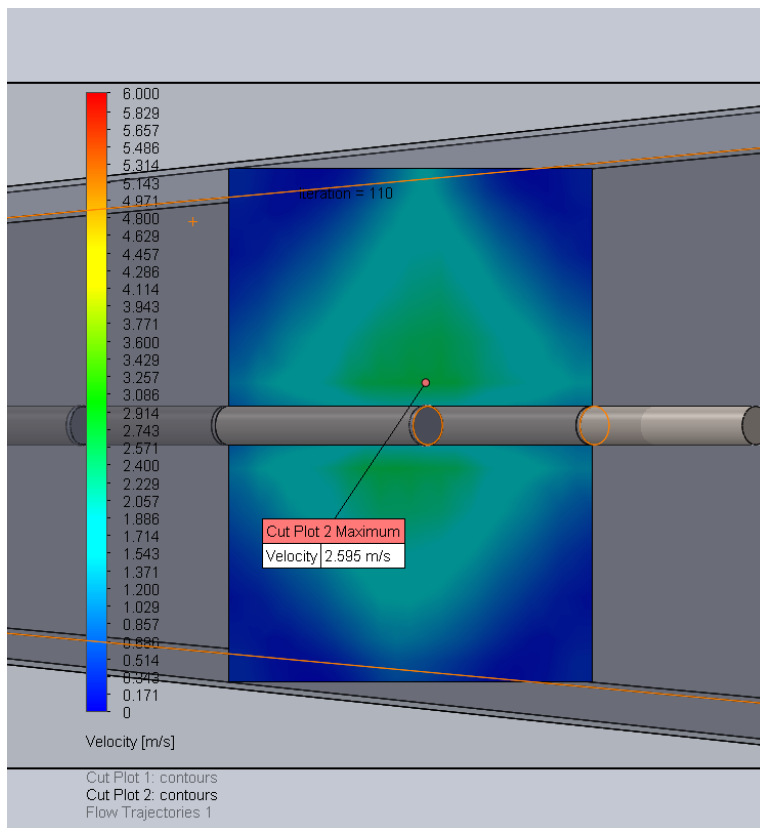
“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



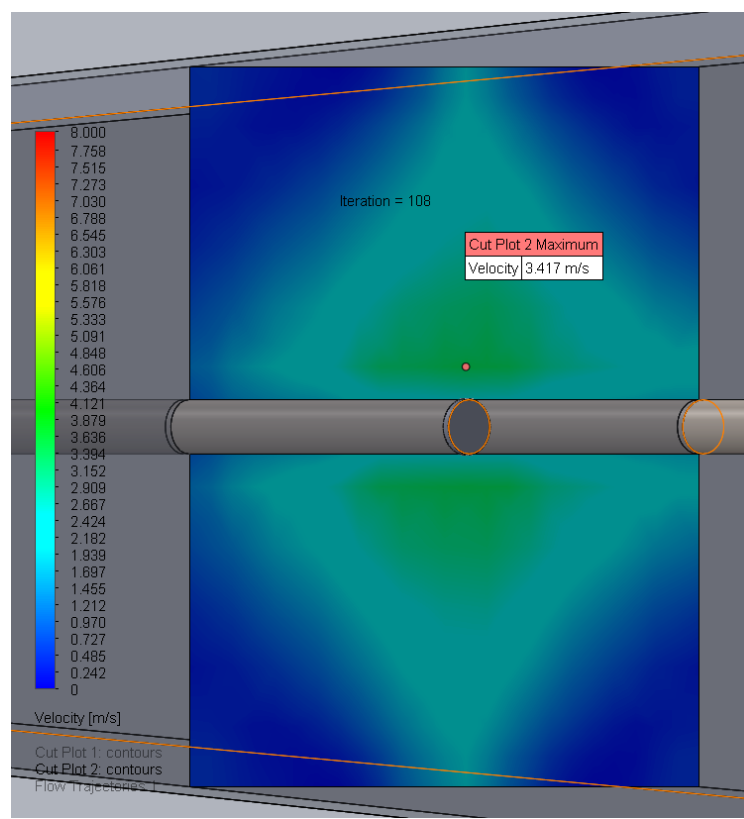
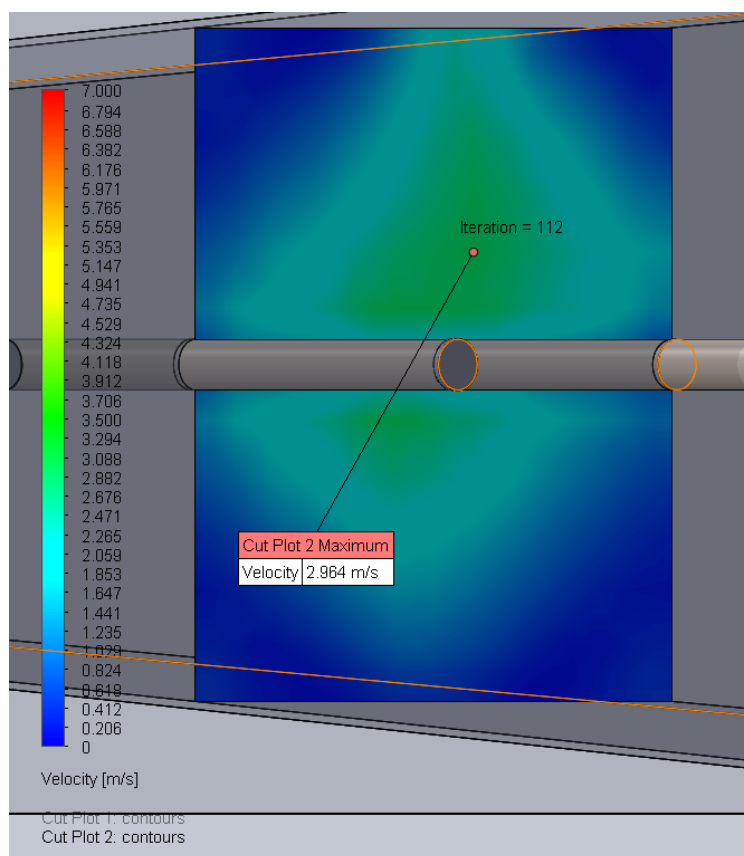
“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”



LANZA EN POSICIÓN 4: Ensayos para 6 m/s, 7 m/s y 8 m/s respectivamente.

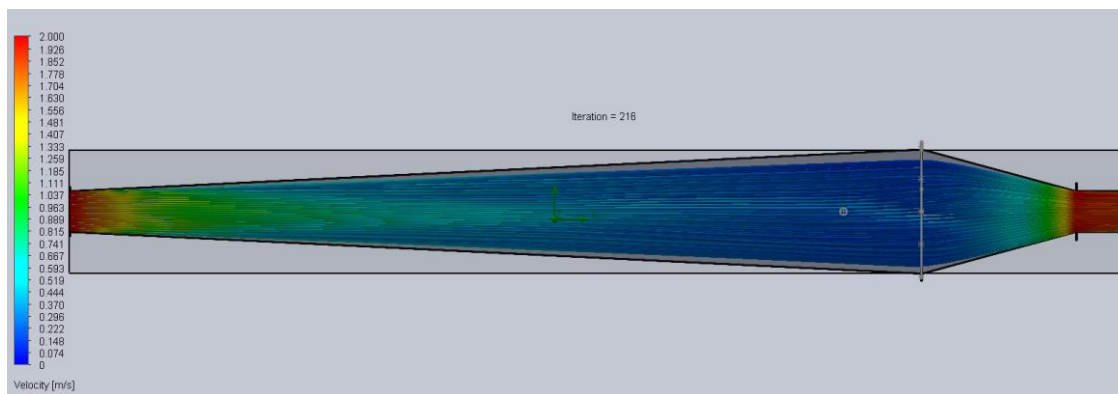
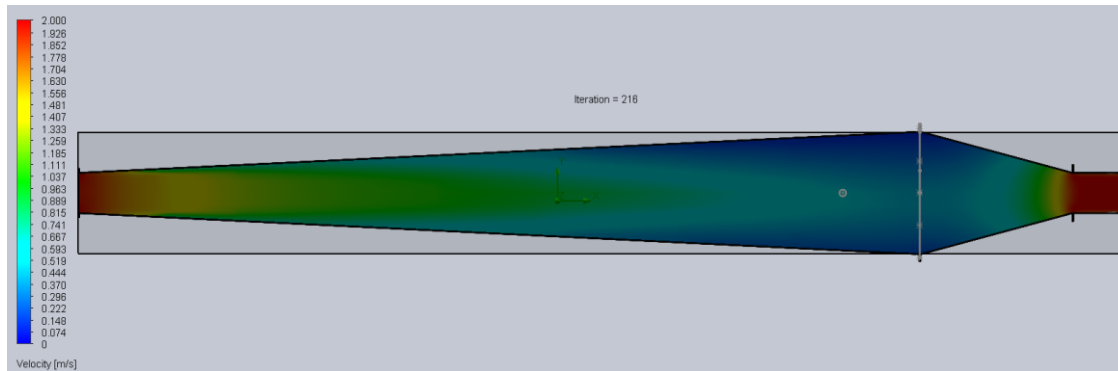


“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

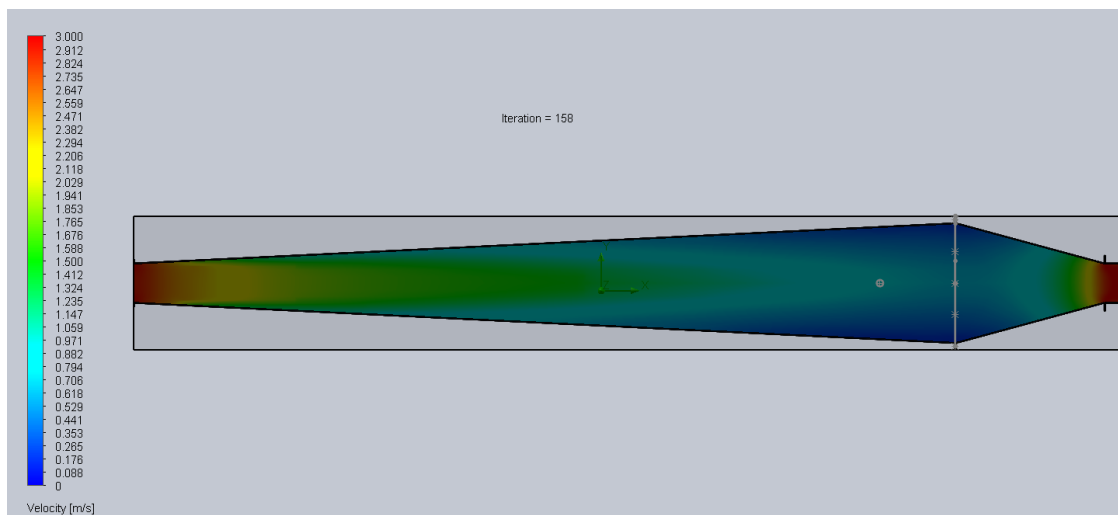


SIMULACIONES REALIZADAS CON LA SECCIÓN DE HUMECTACIÓN DE 4 M DE LONGITUD

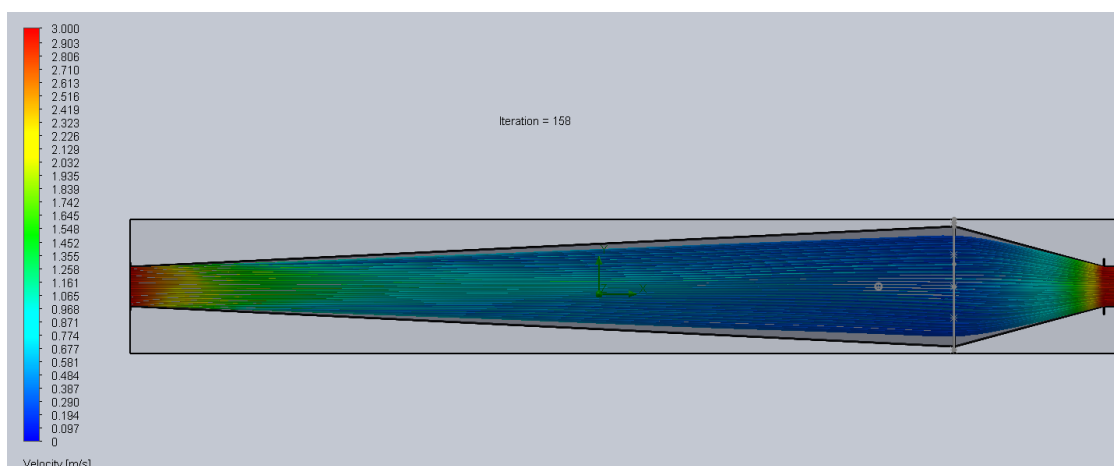
Caso 1: 2 m/s en la cámara de ensayos



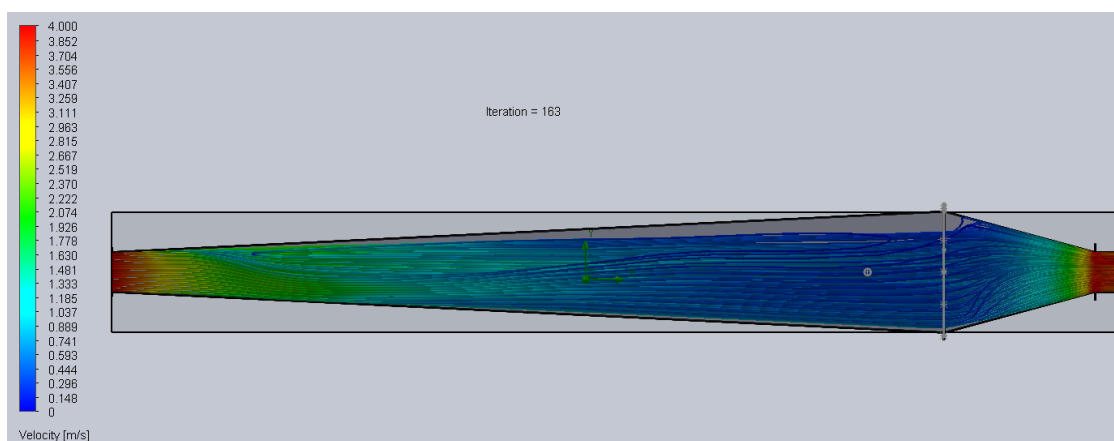
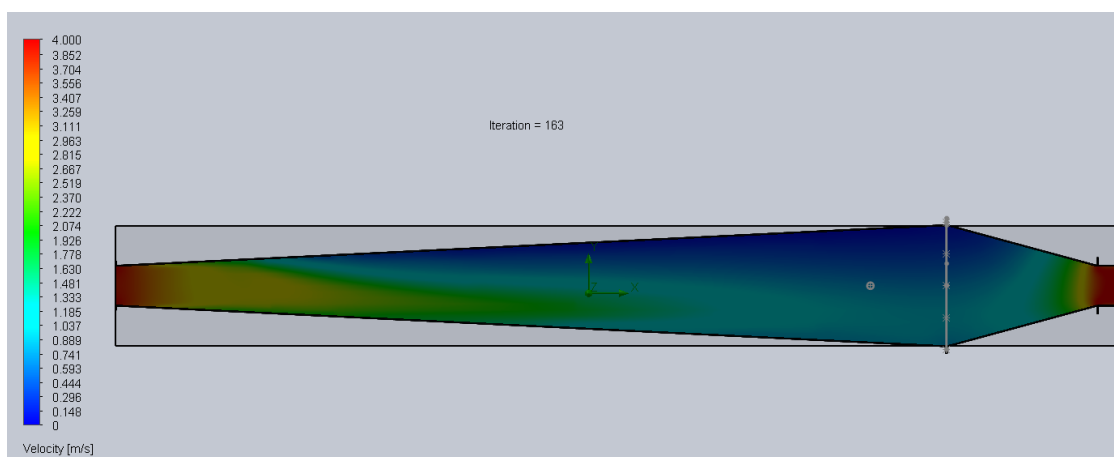
Caso 2: 3 m/s en la cámara de ensayos



“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

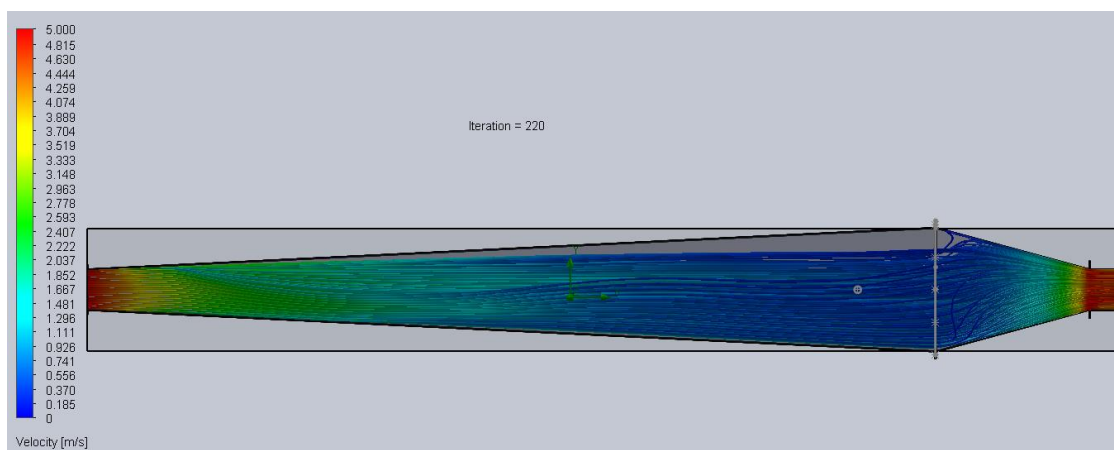
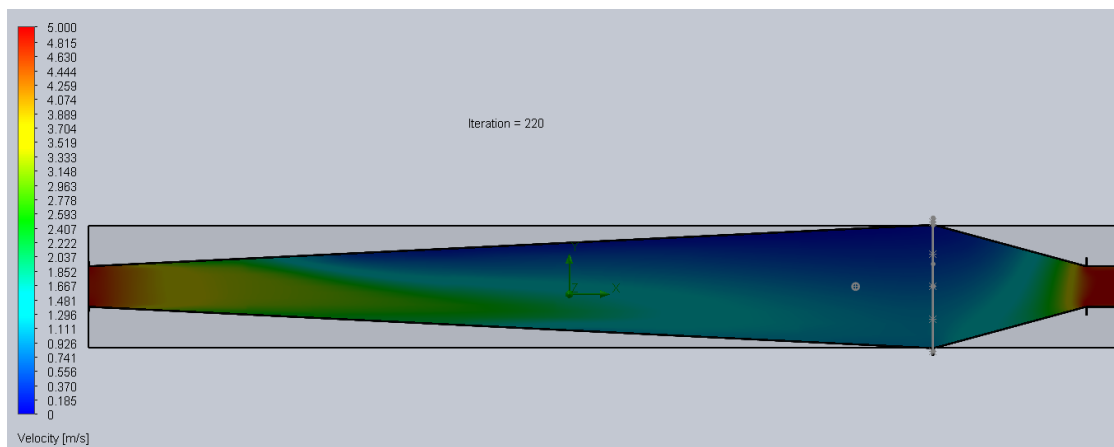


Caso 3: 4 m/s en la cámara de ensayos

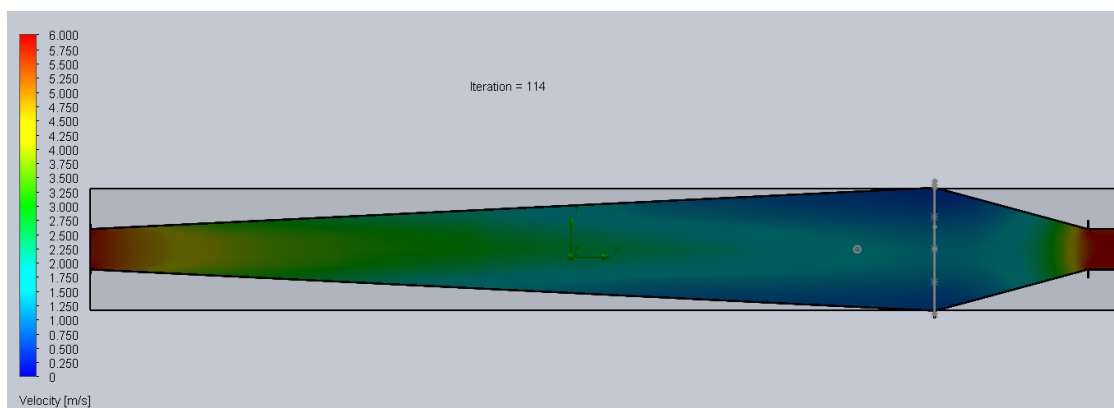


“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

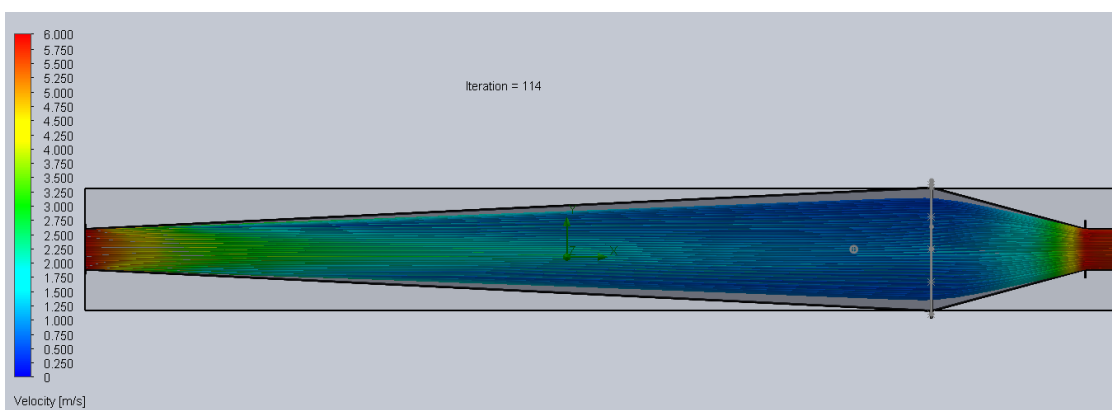
Caso 4: 5 m/s en la cámara de ensayos



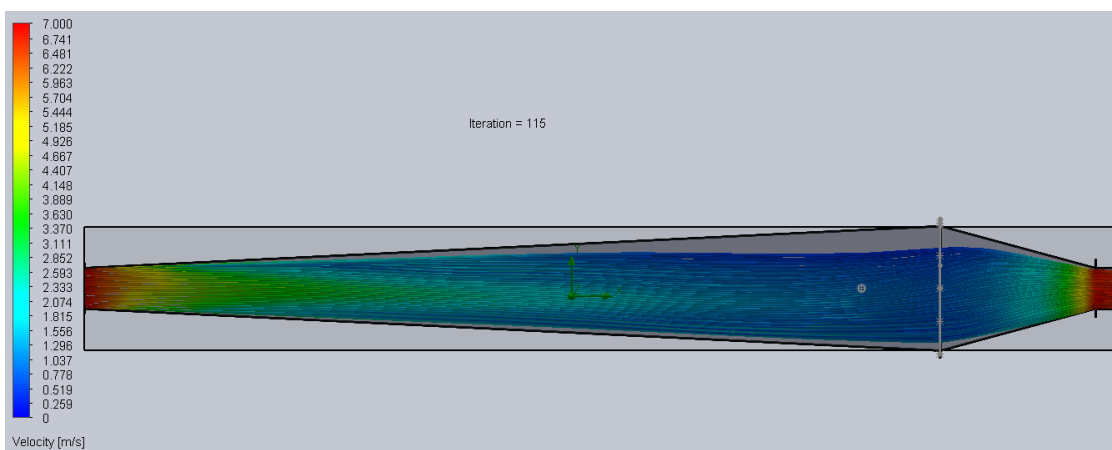
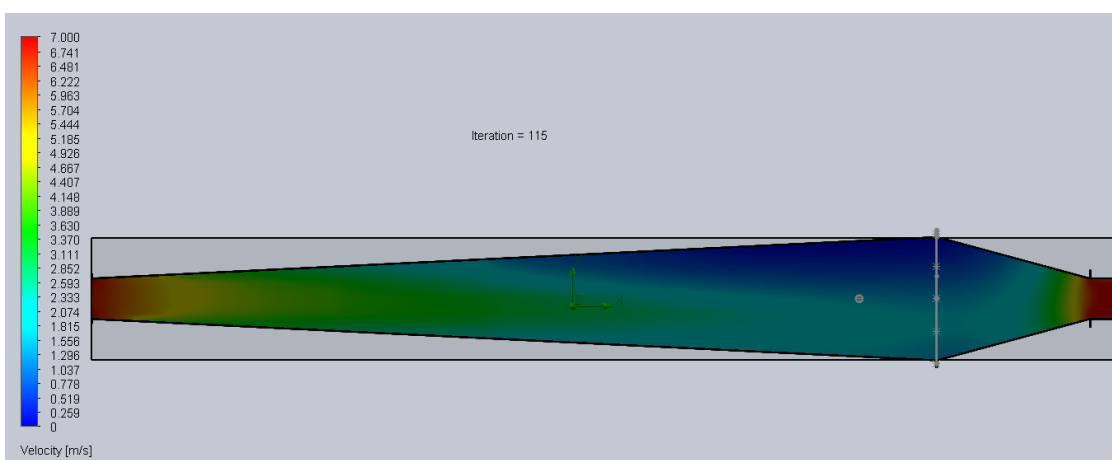
Caso 5: 6 m/s en la cámara de ensayos



“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”

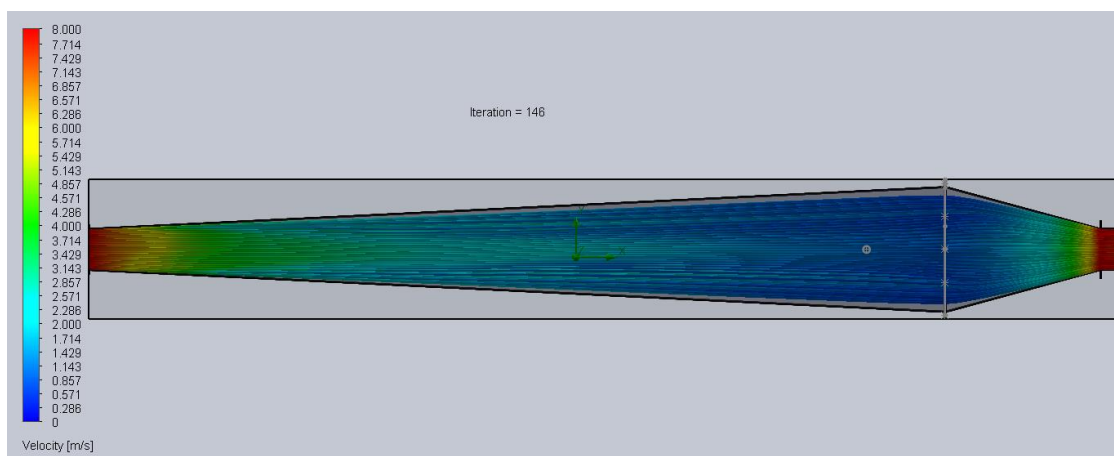
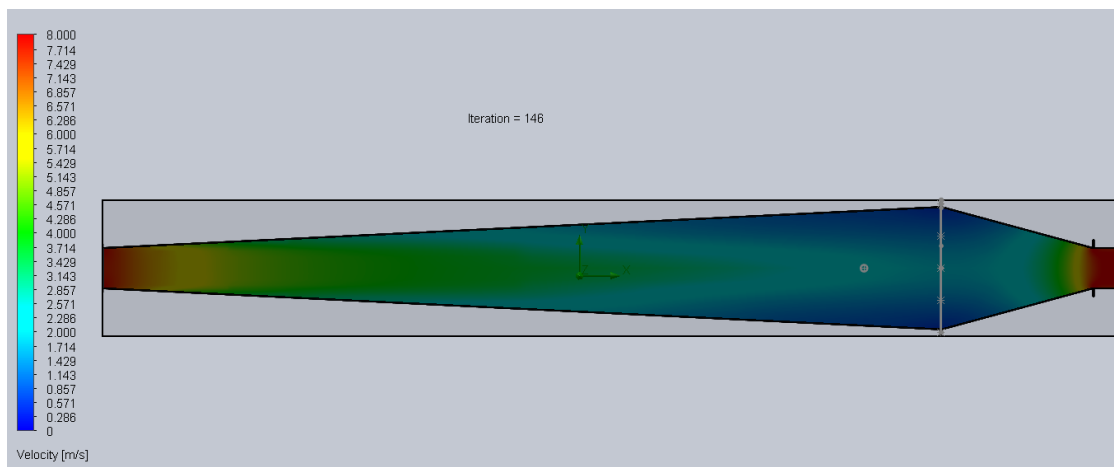


Caso 6: 7 m/s en la cámara de ensayos

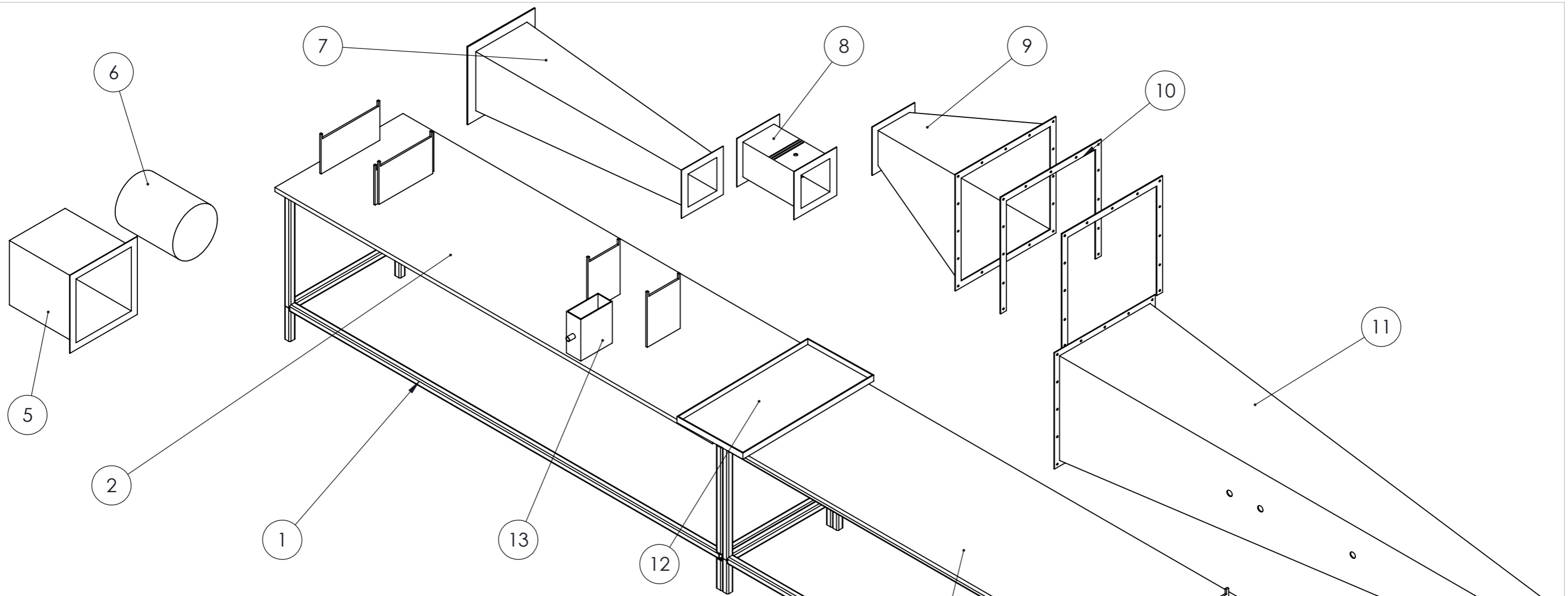


“Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento de Baja Velocidad para Estudios de Eficiencia de Captación de Agua de Niebla mediante Mallas”


Caso 7: 8 m/s en la cámara de ensayos

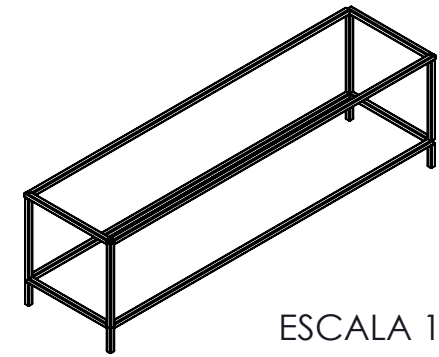
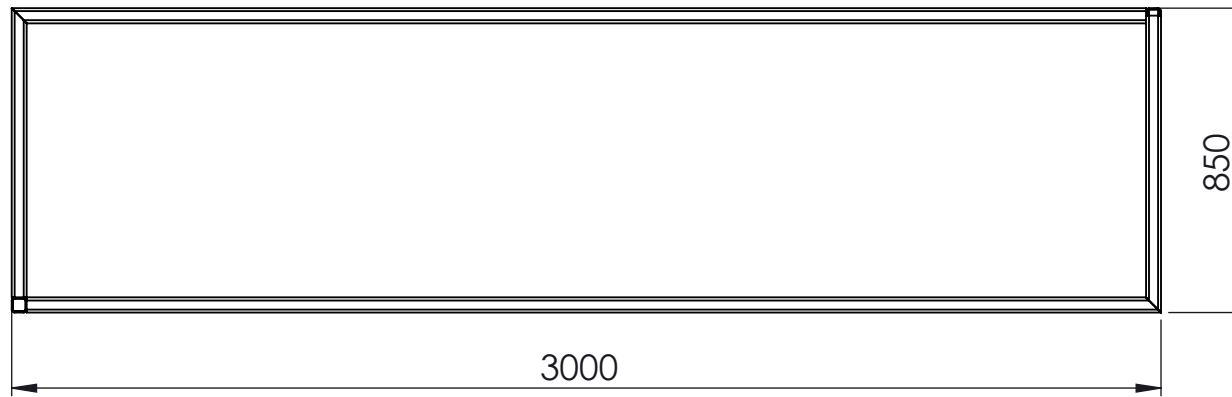


ANEXO IV: PLANOS

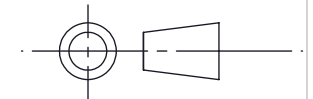
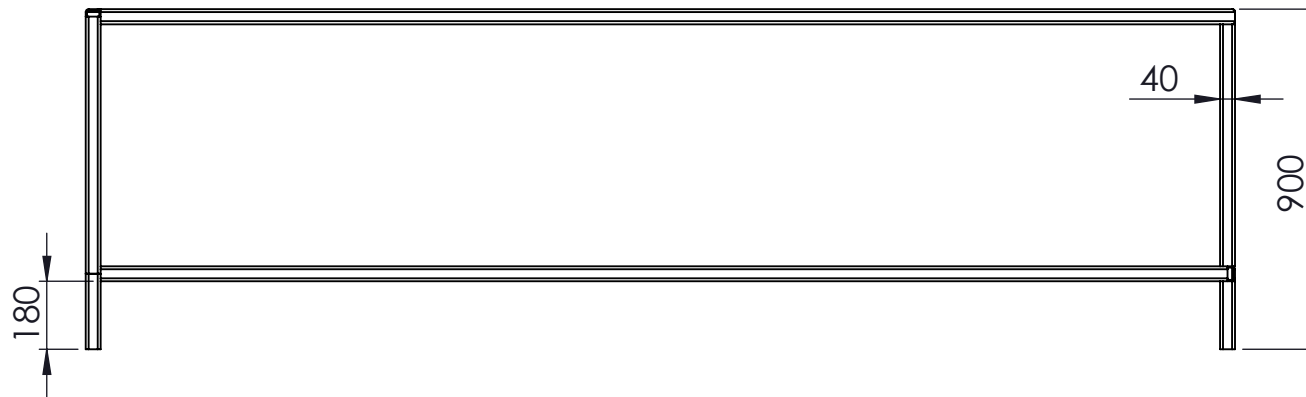


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BANCADA		2
2	TABLA BANCADA		1
3	TABLA BANCADA AUX		1
4	SUJECIÓN SECCIÓN DE HUMECTACIÓN		1
5	SECCIÓN DE ASPIRACIÓN		1
6	VENTILADOR AXIAL		1
7	DIFUSOR		1
8	CÁMARA DE ENSAYOS		1
9	CONO DE CONTRACCIÓN		1
10	MARCO PARA PRECIPITACIÓN DE CONDENSADO		2
11	SECCIÓN DE HUMIDIFICACIÓN - 3 M		1
12	BANDEJA DE CONDENSADO 1		1
13	COLECTOR DE AGUA		1

Instrumentación y simulación de un túnel de viento de baja velocidad para estudios de eficiencia de captación de agua de niebla mediante mallas			
Fecha	Marzo 2021	 ULL Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	1:20	PERSPECTIVA DE CONJUNTO EXPLOSIONADA	Nº P.: 1

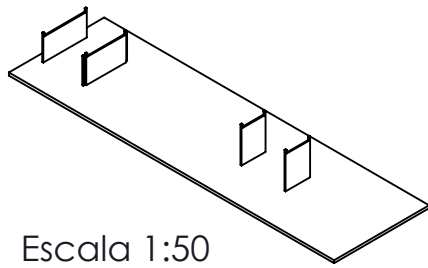


ESCALA 1:50

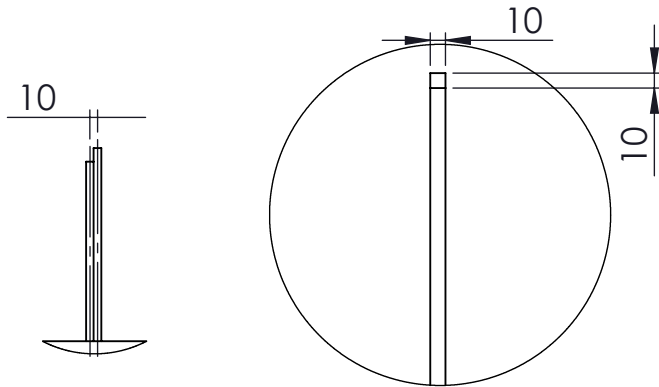
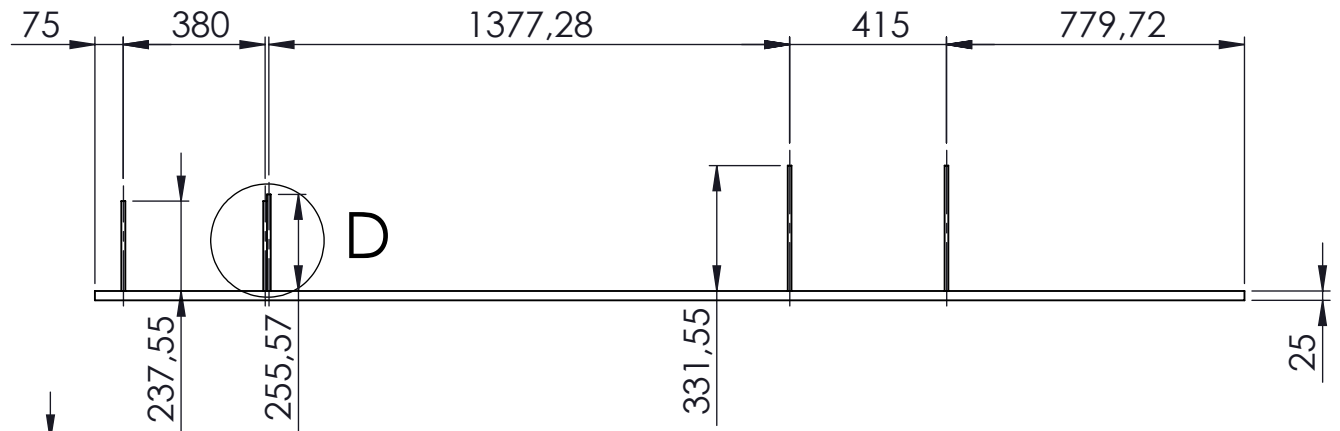
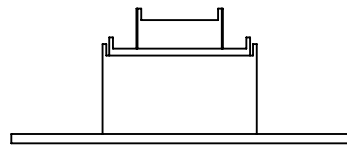
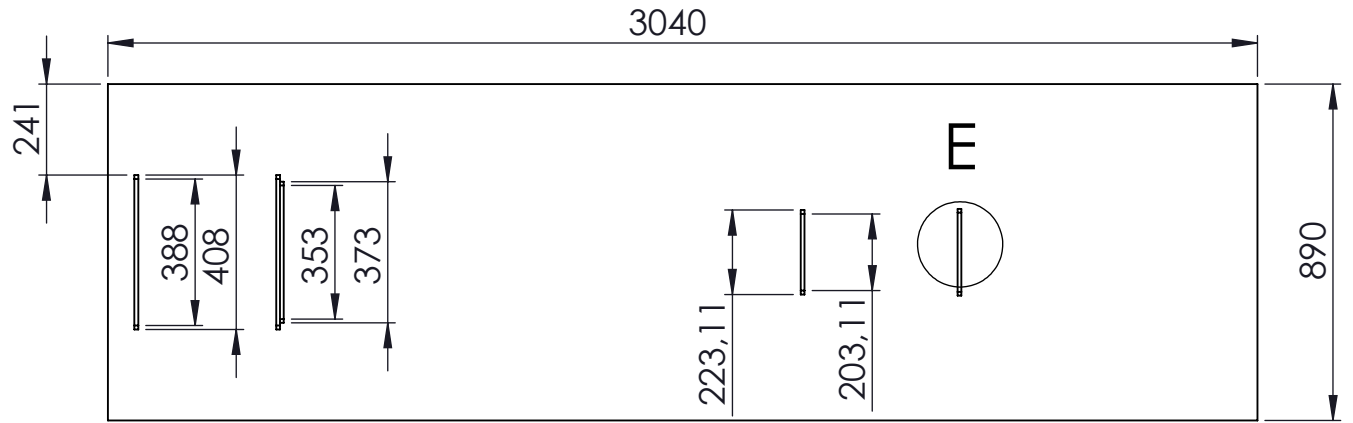


INSTRUMENTACIÓN Y SIMUACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:			
1:20	BANCADA		Nº P. : 2



Escala 1:50

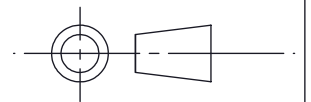


DETALLE D

ESCALA 1 : 10

DETALLE E

ESCALA 1 : 5



INSTRUMENTACIÓN Y SIMUACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		

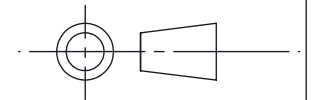
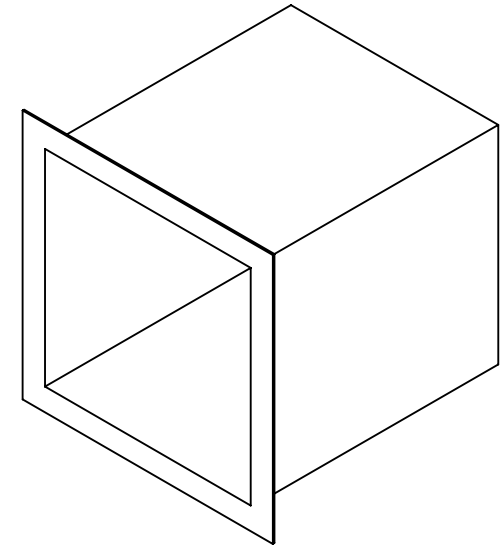
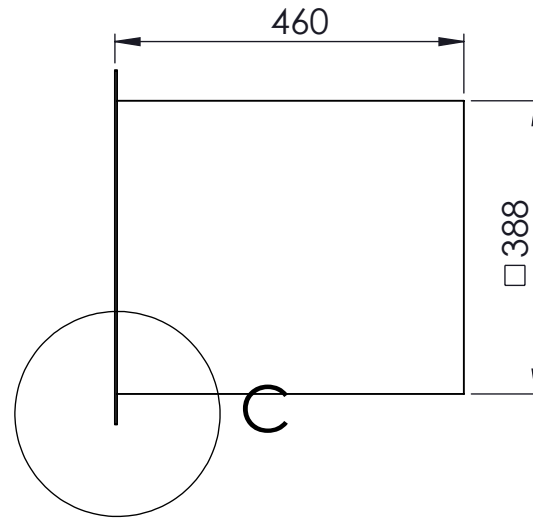
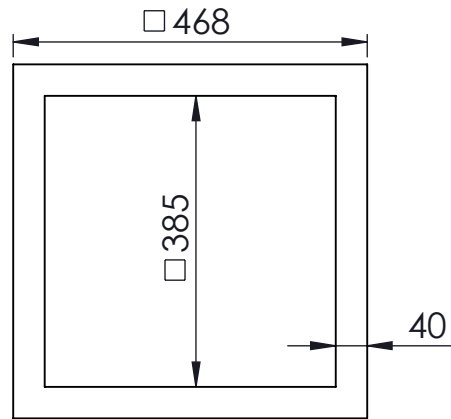
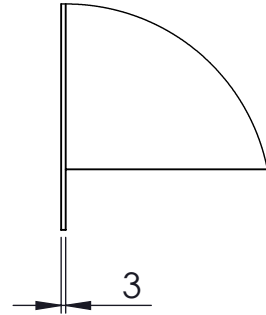
ESCALA:
1:20

TABLA BANCADA

Nº P. : 3

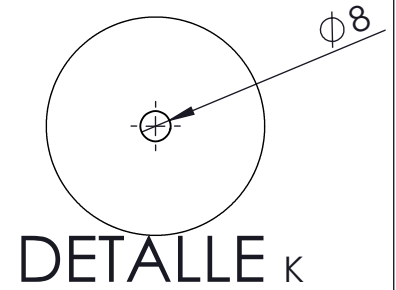
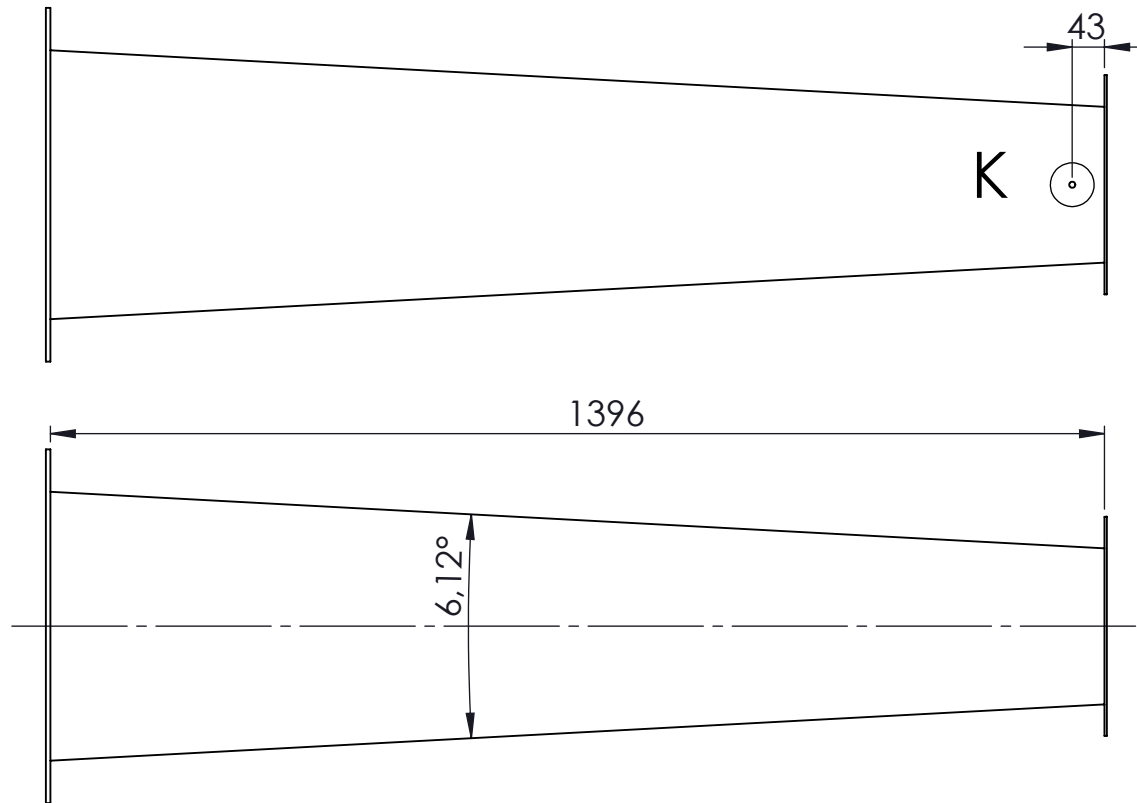
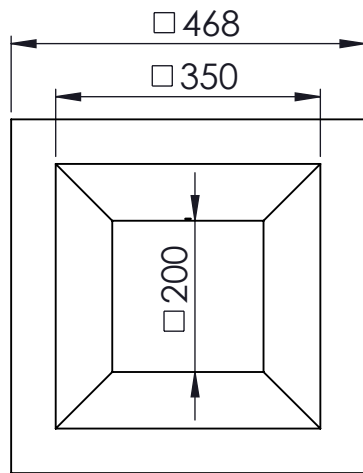
DETALLE C

ESCALA 1 : 5



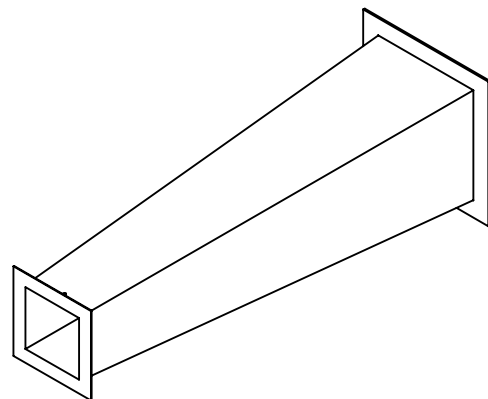
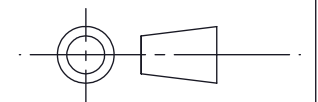
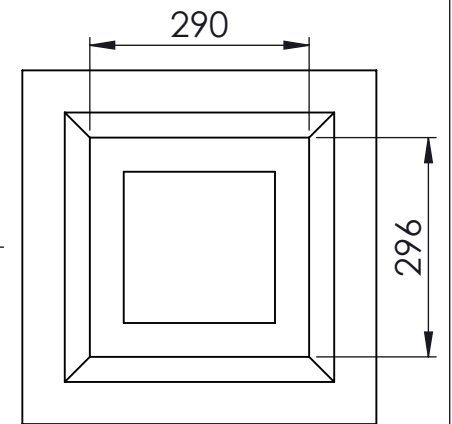
INSTRUMENTACIÓN Y SIMUACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	SECCIÓN DE ASPIRACIÓN		Nº P. : 4
1:10			




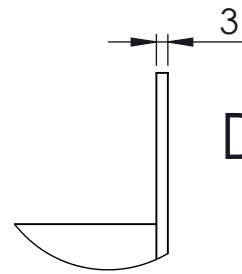
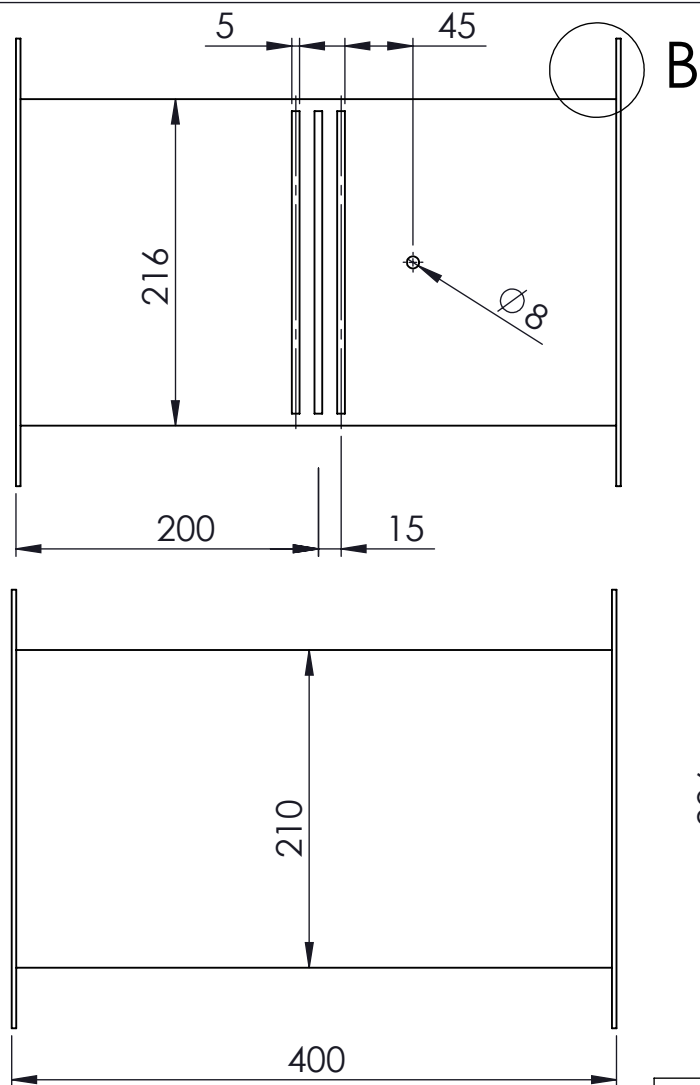
DETALLE K

ESCALA 1 : 2



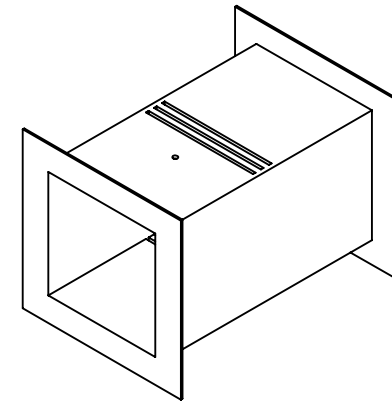
INSTRUMENTACIÓN Y SIMUACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:			
1:10	DIFUSOR		Nº P. : 5

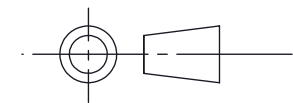
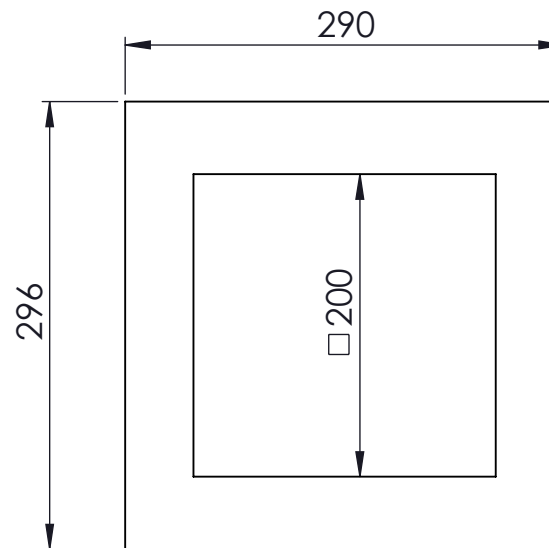


DETALLE B

ESCALA 1 : 2



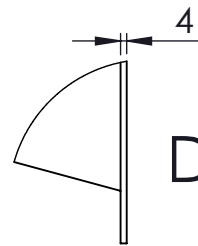
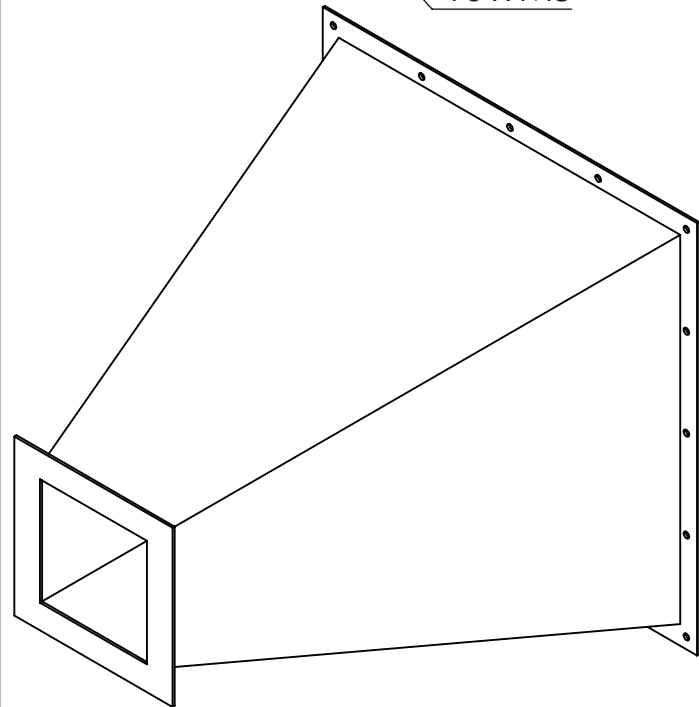
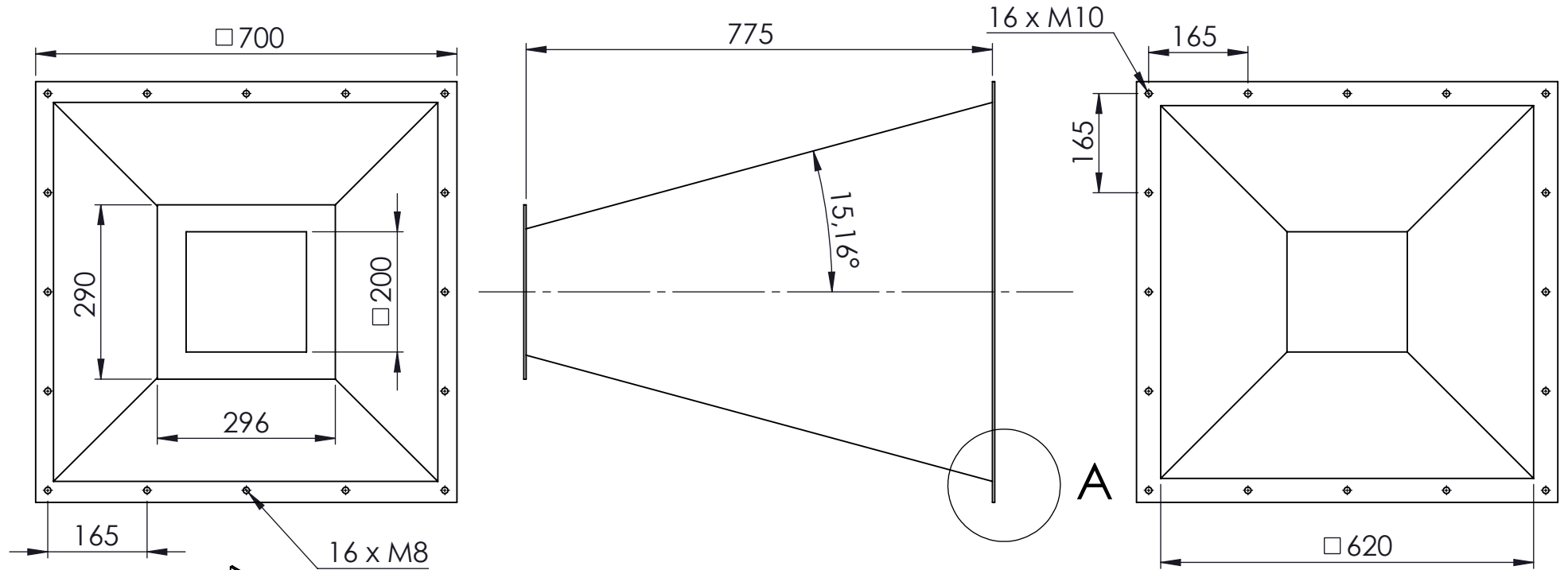
ESCALA 1:10



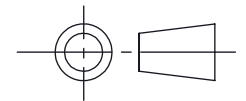
INSTRUMENTACIÓN Y SIMUACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		

ESCALA: 1:5	CÁMARA DE ENSAYOS	Nº P. : 6
----------------	-------------------	-----------

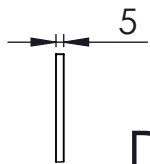
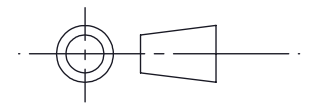
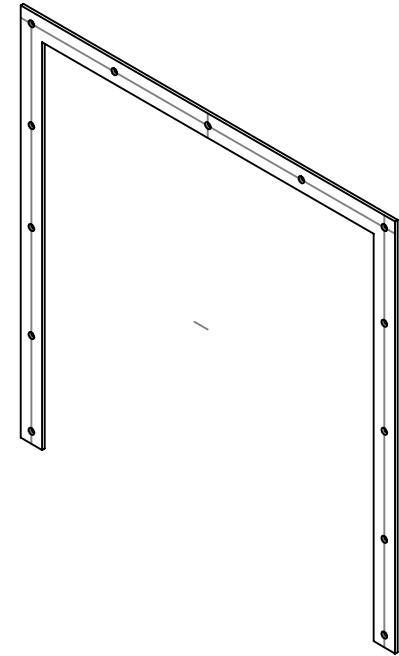
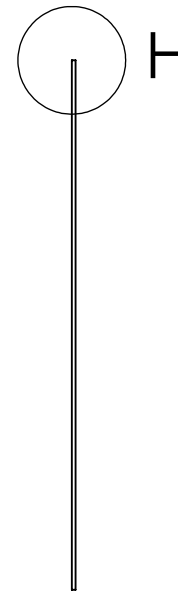
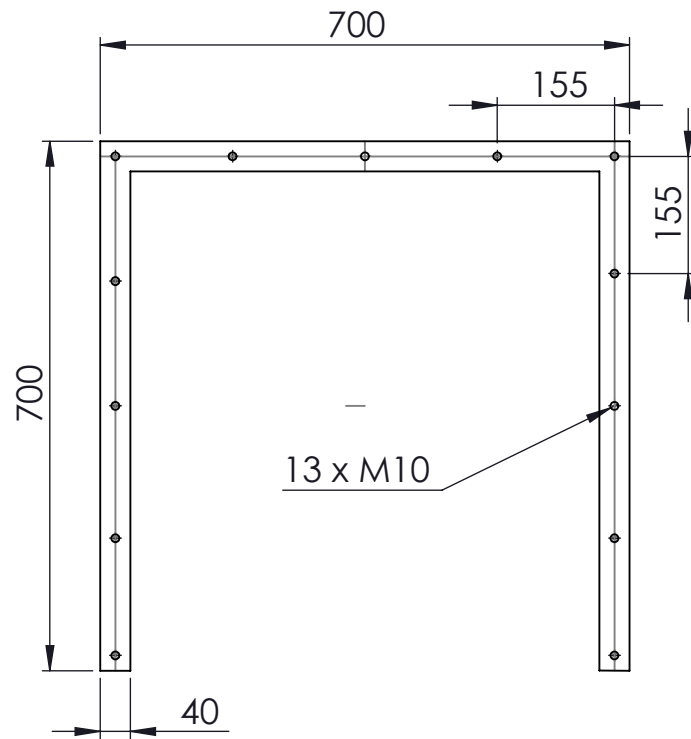


DETALLE A
ESCALA 1 : 5



INSTRUMENTACIÓN Y SIMUACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Autor	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA: 1:10	CONO DE CONTRACCIÓN		Nº P. : 7

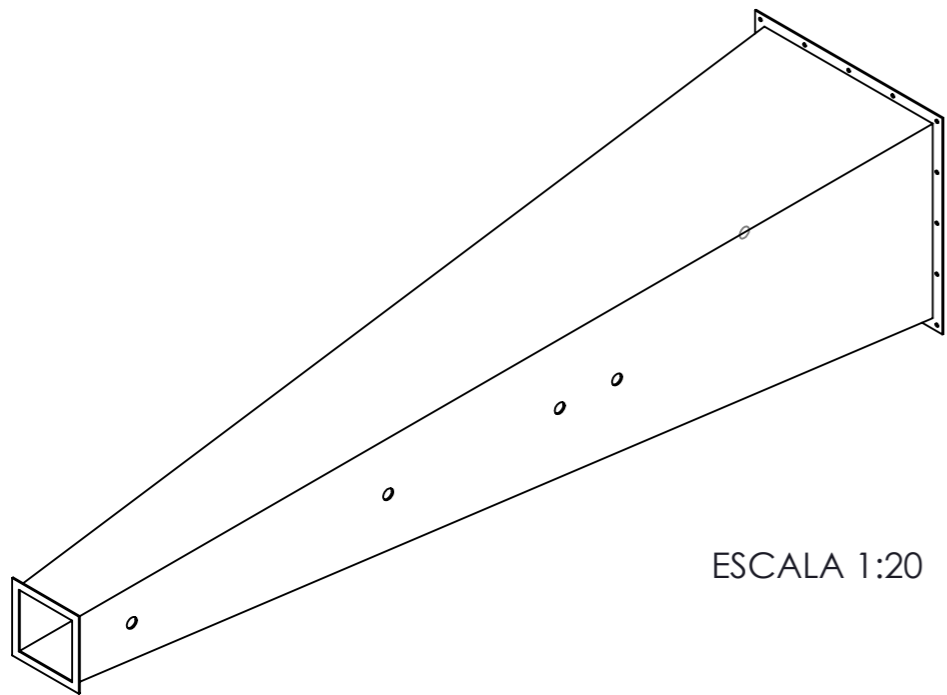


DETALLE H

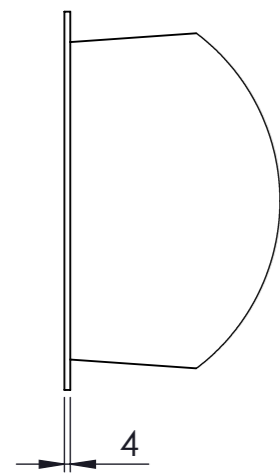
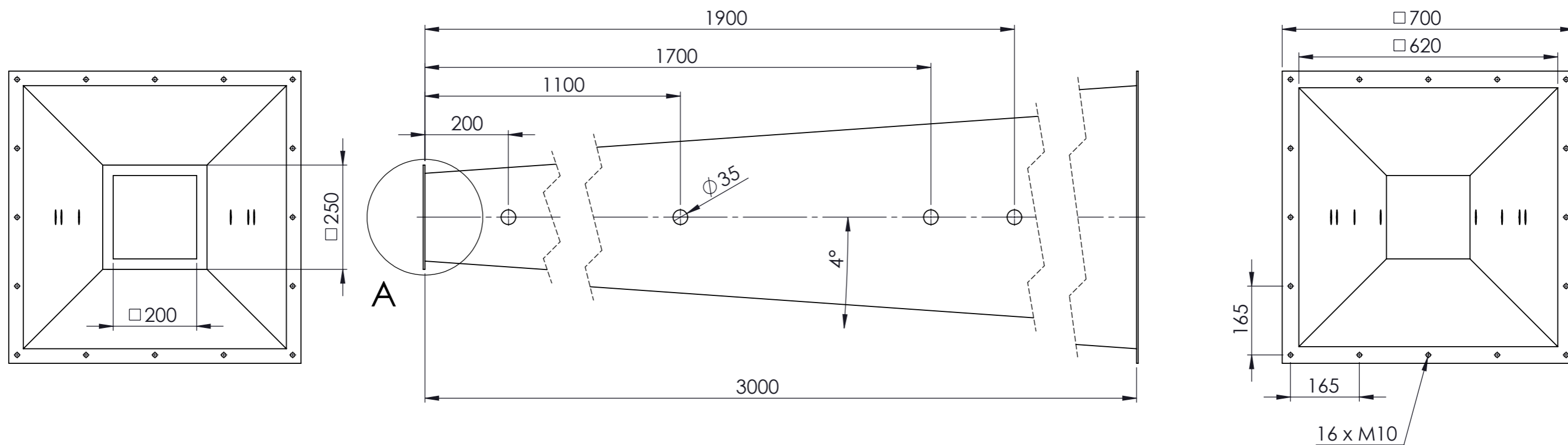
ESCALA 1:5

INSTRUMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

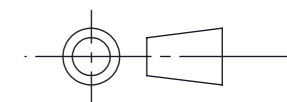
Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA: 1:10	MARCO PARA RECOGIDA DE CONDENSADO	Nº P. : 8	




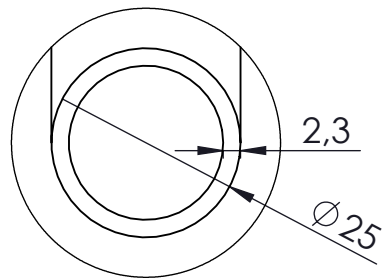
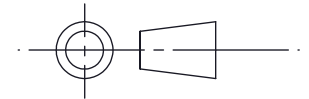
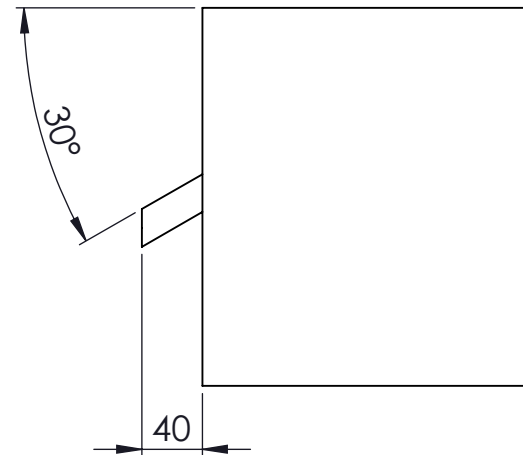
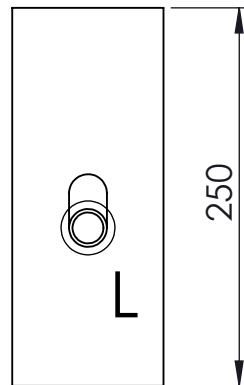
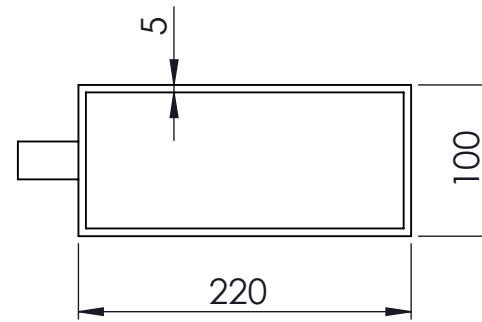
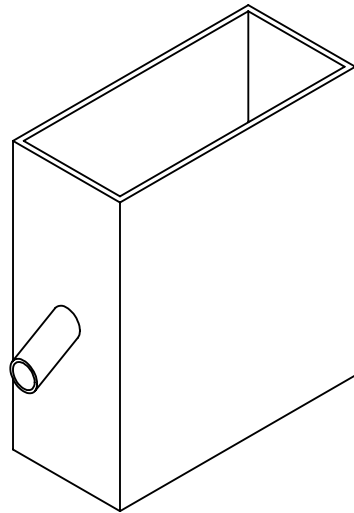
ESCALA 1:20




DETALLE A
ESCALA 1:5

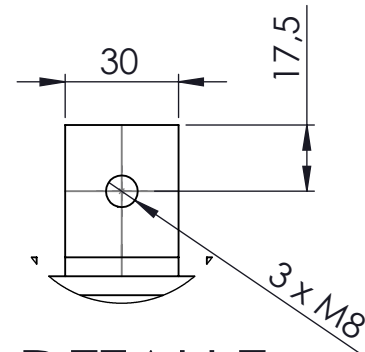
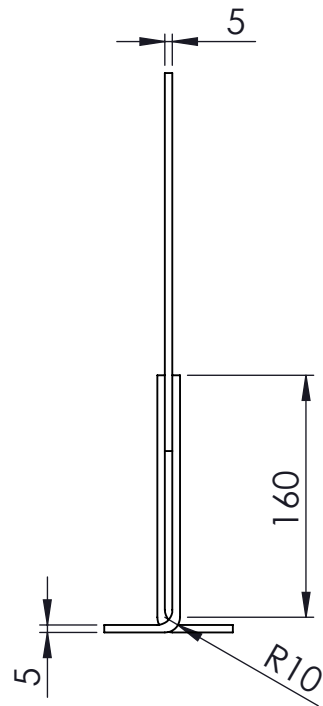
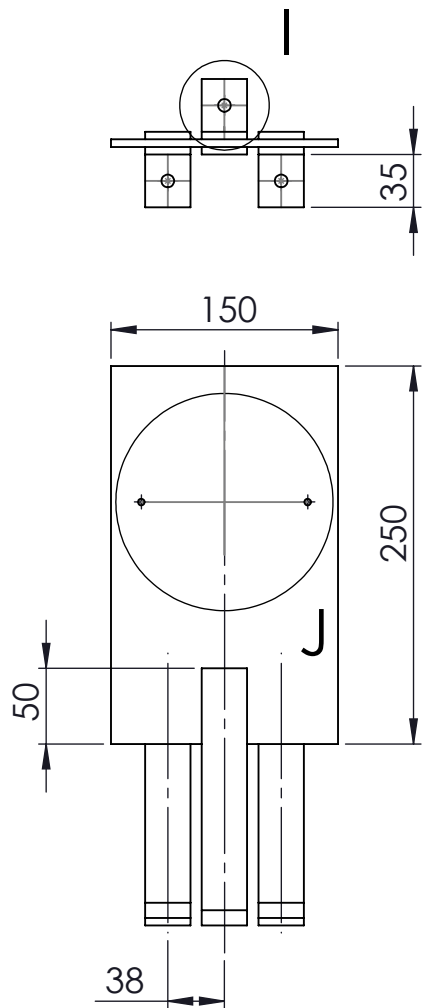


"Instrumentación y simulación de un túnel de viento de baja velocidad para estudios de eficiencia de captación de agua de niebla mediante mallas"			
Fecha	Marzo 2021	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	1:10	SECCIÓN DE HUMECTACIÓN	Nº P.: 9

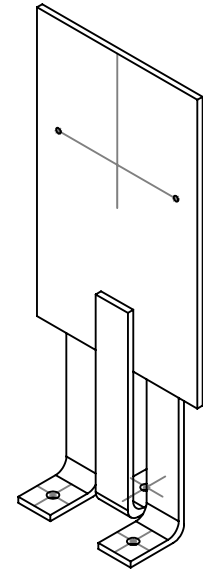
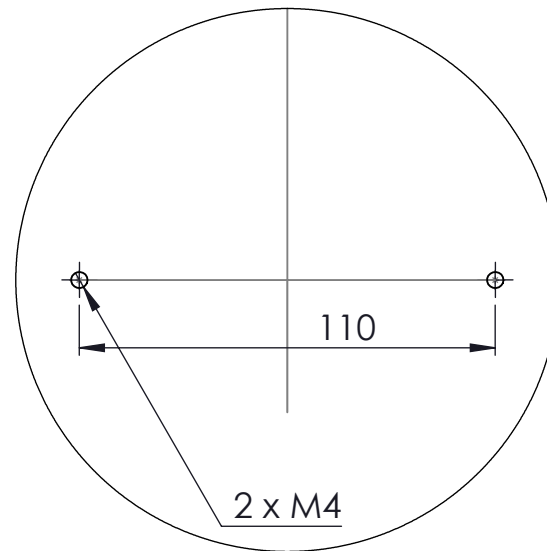


DETALLE L
ESCALA 1 : 1

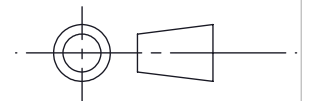
INSTRUMENTACIÓN Y SIMUACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS			
Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	1:5	COLECTOR DE AGUA	Nº P: 10



DETALLE I
ESCALA 1 : 2



DETALLE J
ESCALA 1 : 2



INSTRUMENTACIÓN Y SIMUACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD PARA ESTUDIOS DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA MEDIANTE MALLAS

Fecha	Marzo 2021		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	Carlos Fariña Carballo		
Peticionario	ICIA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA: 1:5	SOPORTE HUMECTADOR ULTRASÓNICO		Nº P. : 11