

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE MECÁNICA

TEMA:

"Análisis experimental del comportamiento del flujo de fluidos en perfiles aerodinámicos mediante un dispositivo de HELE-SHAW"

Trabajo de titulación, Modalidad proyecto experimental, presentado previo a la obtención del Título de Tercer Nivel de Ingeniero Mecánico

AUTORES:

- Guaman Laica Kevin Omar
- Tipantasig Cunalata Jean Carlos

TUTOR: Ing. Mg. Diego Fernando Núñez Núñez.

AMBATO-ECUADOR

Junio 2025

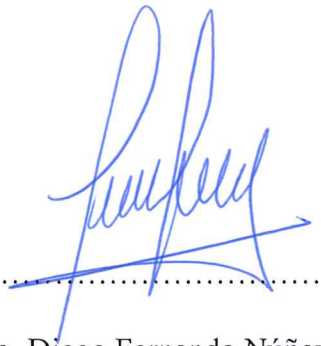
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE FLUIDOS EN PERFILES AERODINÁMICOS MEDIANTE UN DISPOSITIVO DE HELE-SHAW",** elaborado por los Sres. Kevin Omar Guaman Laica, portador de la cédula de ciudadanía: C.C. 0504442070 y Jean Carlos Tipantasig Cunalata, portador de la cédula de ciudadanía: C.C. 1805203419, estudiantes de la Carrera de Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente Proyecto Experimental es original de sus autores.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos competentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, junio 2025



.....

Ing. Diego Fernando Núñez Núñez Mg.

C.C. 1803367729

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Kevin Omar Guaman Laica, con C.C. 0504442070 y Jean Carlos Tipantasig Cunalata, con C.C. 1805203419, declaramos que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente Trabajo de Titulación, Modalidad experimental con el tema: **"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE FLUIDOS EN PERFILES AERODINÁMICOS MEDIANTE UN DISPOSITIVO DE HELE-SHAW",** así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprendan del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, junio 2025

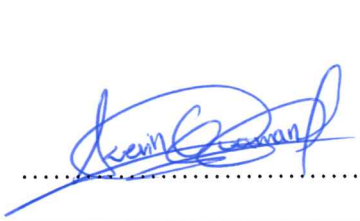
.....	.....
Kevin Omar Guaman Laica	Jean Carlos Tipantasig Cunalata
C.C. 0504442070	C.C. 1805203419
AUTOR	**AUTOR**

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental, o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedemos los Derechos en línea patrimoniales de nuestro Proyecto Experimental, con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando nuestros derechos de autor.

Ambato, junio 2025





Kevin Omar Guaman Laica	Jean Carlos Tipantasig Cunalata
C.C. 0504442070	C.C. 1805203419
AUTOR	**AUTOR**

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe de Proyecto Experimental, realizado por los estudiantes Kevin Omar Guaman Laica y Jean Carlos Tipantasig Cunalata, de la Carrera de Mecánica bajo el tema: **"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE FLUIDOS EN PERFILES AERODINÁMICOS MEDIANTE UN DISPOSITIVO DE HELE-SHAW".**

Ambato, junio 2025

Por constancia firma:

.....	.....
Ing. Wilson Henry Vaca Ortega Mg.	Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza Mg.
C.C. 1803729126	C.C. 1803828266
MIEMBRO CALIFICADOR	**MIEMBRO CALIFICADOR**

DEDICATORIA

A mi madre, Nancy Laica, mi viejita, mi compañera de vida, a ti madre te dedico está parte de mi felicidad, tú me apoyaste, me levantaste y me guiaste día a día para cumplir está meta. Tu amor incondicional me alentaba a dar lo mejor de mí, tus abrazos en los momentos menos esperado fueron refugio y fortaleza. Gracias por enseñarme a no rendirme y gracias por ser un ejemplo de superación.

A mi padre, Segundo Guamán, quien ha sido un pilar muy fuerte en mi vida, su amor de padre, su apoyo incondicional y su bendición han estado siempre presentes a lo largo de esta travesía. Sus palabras, su compañía han sido fortaleza en los buenos y en los malos momentos.

A mis hermanos, Jeferson y Roberto, cuyo cariño y confianza han sido una fuente de motivación diaria. Cada palabra suya en mis buenos y malos actos han sido de gran ayuda para mi superación personal. Gracias por ser un ejemplo de perseverancia y esfuerzo que siempre me ha inspirado a dar lo mejor de mí.

A mi grupo de amigos los “kks” y mi TEAM XXIV, personas especiales para mí, su apoyo, sus locuras, su solidaridad, sus palabras y esencialmente su compañía en este camino a sido primordial, cuando las cosas no iban nada bien supieron estar con una palabra de aliento o con una de sus bromas. Cada vivencia a su lado las llevare siempre guardadas en mi corazón.

En memoria de Emily Guamán Laica, mi pequeña me cuidaste, acompañaste y guiaste desde el cielo para ayudarme a cumplir está meta. Nunca me desampares, sigue siendo mi luz para cumplir el resto de metas que tenemos por delante.

Jenny Toaquiza, mi pequeño ser de luz, mi apoyo emocional y fundamental cuando estuve a punto de rendirme, gracias por el tiempo que compartiste conmigo, por tus sabias palabras, por tus locuras y por cada vivencia a tu lado. Siempre te recordare por cada experiencia compartida juntos. Hoy cumplí mi meta, mi promesa contigo.

Para ti que estas leyendo esto: recuerda que la vida no es fácil, que los sueños si se cumplen, ten fe, confianza y seguridad en cada paso que das si te caes se fuerte y levante. Nunca te rindas y cumple cada una de tus metas. Nada es imposible.

Kevin Guaman

DEDICATORIA

Dedico este logro, antes que, a nadie, a Dios y a la Virgen de Agua Santa, por permitirme el regalo más valioso: la vida. Gracias por brindarme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para seguir adelante, incluso cuando las fuerzas parecían desvanecerse. En cada paso, sentí su presencia guiándome con luz y esperanza.

A mis padres, Juan Tipantasig y María Cunalata, quienes han sido mi pilar más firme. Su amor incondicional, su fe en mí y su esfuerzo constante me han enseñado el verdadero significado del sacrificio y la perseverancia. Gracias por ser mi ejemplo de vida, por enseñarme a nunca rendirme y por estar siempre, incluso en silencio, sosteniéndome.

A mi hermano Alex Tipantasig, que más que hermano fue como un segundo padre. Su protección, sus consejos y su forma única de enseñarme la vida han sido fundamentales en mi crecimiento. Gracias por estar cuando más lo necesité, por cuidarme con esa mezcla perfecta de firmeza y ternura.

A mis sobrinos, Marie y Nicolás, cuya ternura iluminó mis días más difíciles. Son mi inspiración para seguir creciendo, y les prometo estar siempre para ustedes, con todo mi corazón, como guía, apoyo y refugio.

A mis abuelitos: “Papalucho”, que descansa en paz, y “Mamachole”, aún presente en mi vida. Su amor, sabiduría y fortaleza dejaron una huella imborrable en mí. Cada palabra y abrazo los guardo como un tesoro. Siempre vivirán en mi corazón.

A mi pareja, que estuvo a mi lado cuando sentí que no podía más. Gracias por tu paciencia, tu compañía y por sostenerme en mis momentos más frágiles. Tu presencia fue alivio en los días de lucha y un impulso cuando más lo necesité.

A mis amigos y familiares, compañeros de camino, que me regalaron sonrisas en medio del cansancio y apoyo sincero en los momentos difíciles. Gracias por compartir esta etapa, por cada conversación, cada risa y cada recuerdo que guardo con profundo cariño.

Finalmente, a todas las personas que, de alguna manera, fueron parte de este camino: gracias. Cada palabra, gesto o presencia fue una chispa que me ayudó a encender esta meta. Este logro no es solo mío, es también de ustedes.

Jean Tipantasig

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, y a la Virgen de Agua Santa, por regalarme el don de la vida, por concederme salud y fortaleza para seguir adelante día tras día, me han guiado para cumplir mi meta más anhelada.

Agradezco a mi tutor de tesis, Ing. Diego Núñez, por confiar en mí y brindarme su guía, su conocimiento y la oportunidad de desarrollar este trabajo de titulación bajo su dirección.

Un agradecimiento muy especial a mis padres, Segundo Guamán y Nancy Laica, quienes día a día han confiado en mí, han estado pendientes de cada paso que doy y han estado presentes en cada momento de mi vida, sean estos buenos o malos nunca me han dejado solo. Gracias a ustedes por ser personas ejemplares, por ser los pilares fundamentales en mi vida y por enseñarme a ser una persona sencilla y humilde.

A mis hermanos, mis cuñadas y mis sobrinos, personas que día a día han compartido su vida y su tiempo conmigo, que me han enseñado que el que persevera alcanza. Gracias por ser parte de mi familia y gracias por ser motivo de inspiración para esta meta.

A mis amigos de mi lugar de residencia, en especial a mi mejor amigo Lenin Toapanta, gracias por escucharme, por apoyarme y por estar acompañándome en cada momento de mi vida, has sido un hermano para mí y la persona con la que sé que siempre poder contar. Gracias por dejarme ser parte de tu familia y por todo el apoyo puesto en mi para cumplir este logro.

A mi pareja, que supo estar conmigo en las buenas y malas, que me alentó día tras día para lograr esta meta. Gracias por compartir un pedacito de tu vida con la mía.

Agradezco a cada una de las personas que estuvieron acompañándome en este arduo camino de estudio, cada una de sus palabras y acciones las llevare presente.

Kevin Guaman

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios y a la Virgen de Agua Santa por el don de la vida, por darme la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta etapa. Su presencia ha sido mi refugio y guía en cada momento de este camino.

A Universidad Técnica de Ambato y a la carrera de Ingeniería Mecánica por haberme formado académica y personalmente a lo largo de este camino. A los docentes que compartieron sus conocimientos con dedicación y vocación, les expreso mi respeto y gratitud.

Al Ing. Diego Núñez, tutor de esta tesis, por su orientación, paciencia y confianza. Su acompañamiento fue clave para el desarrollo de este trabajo, y valoro cada aporte que enriqueció este proceso.

A mis padres, Juan Tipantasig y María Cunalata quienes, con esfuerzo, sacrificio y un amor incondicional me guiaron y me sostuvieron en cada etapa de mi vida. Gracias por enseñarme el valor del trabajo honesto, la humildad y la perseverancia. Cada logro que hoy alcanzo es reflejo de los principios que me inculcaron y del ejemplo que me han dado. Esta meta es también suya, porque sin su apoyo constante, este camino no habría sido posible.

A mi hermano, Alex Tipantasig, que fue más que un hermano: un segundo padre. Su apoyo, ejemplo y compañía incondicional me sostuvieron en los momentos más difíciles. A mis sobrinos, Marie y Nicolás, por llenar mis días de alegría y ser una gran motivación para seguir adelante. A mis abuelitos: “Papalucho”, que vive en mi memoria, y “Mamachole”, que aún me acompaña con su ternura. Gracias por su amor, enseñanzas y fortaleza. Siempre los llevaré en mi corazón.

A mi pareja, por estar a mi lado cuando las fuerzas flaqueaban. Tu apoyo, tu paciencia y tu sentimiento hacia mí, me acompañaron en los momentos más duros, y fueron impulso cuando creí rendirme. Gracias por caminar conmigo.

Finalmente, a todas las personas que de alguna manera fueron parte de este proceso: gracias. Cada gesto, por pequeño que parezca, fue un aporte valioso que me ayudó a alcanzar esta meta. Este logro también es suyo.

Jean Tipantasig

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA i
APROBACIÓN DEL TUTOR ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii
DERECHOS DE AUTOR iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO v
DEDICATORIA vi
DEDICATORIA vii
AGRADECIMIENTO viii
AGRADECIMIENTO ix
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS x
ÍNDICE DE ANEXOS xiv
ÍNDICE DE TABLAS xv
ÍNDICE DE FIGURAS xix
RESUMEN EJECUTIVO xxii
ABSTRACT xxiii
CAPÍTULO I 24
MARCO TEÓRICO 24
1.1 Antecedentes investigativos 24
1.1.1 Antecedentes 24
1.1.2 Justificación 26
1.2 Hipótesis 27
1.2.1 Señalamiento de variables de la hipótesis 27
1.3 Fundamentación Teórica 27
1.3.1 Conceptos básicos de mecánica de fluidos 27
1.3.2 Clasificación de los movimientos de un fluido 28

1.3.3 Fundamentos de visualización del flujo 30
1.3.4 Técnicas y dispositivos de visualización del flujo 31
1.3.5 Representaciones gráficas del flujo de fluidos 36
1.3.6 Fundamentales de la dinámica de fluidos 37
1.3.7 Flujo entre dos placas paralelas 39
1.3.8 Introducción al estudio del flujo en perfiles aerodinámicos 43
1.3.9 Herramientas especializadas simulación por CFD 46
1.4 Objetivos 48
1.4.1 Objetivo General 48
1.4.2 Objetivos Específicos 49
CAPÍTULO II 50
METODOLOGÍA 50
2.1 Descripción de metodología 50
2.1.1 Revisión bibliográfica 50
2.1.2 Diseño y construcción del prototipo de Hele-Shaw 50
2.1.3 Realización de pruebas experimentales 50
2.1.4 Simulaciones de CFD para validación 50
2.1.5 Análisis de los resultados 51
2.2 Criterios de diseño y construcción 51
2.3 Diseño y construcción del primer prototipo Hele-Shaw 52
2.3.1 Consideraciones de diseño y construcción del primer prototipo 52
2.3.2 Determinación del Número de Reynolds para Flujo entre Placas 54
2.3.3 Problemáticas y Soluciones 57
2.3.4 Distribución similar del caudal 63
2.3.5 Velocidad de la tinta 76
2.3.6 Altura del recipiente de tinta 78
2.4 Diseño y construcción del dispositivo de Hele-Shaw 79

2.4.1 Criterios de diseño del dispositivo Hele-Shaw 79
2.4.2 Construcción del dispositivo Helle-Shaw 81
2.4.3 Selección de flujo de inyección 85
2.5 Selección de perfiles aerodinámicos 89
2.5.1 Razonamiento técnico de la selección 89
2.6 Diseño de experimentos 91
2.6.1 Condiciones de operación 91
2.6.2 Registro visual del flujo 93
2.6.3 Identificación y codificación 94
2.7 Simulación CFD 94
2.8 Criterios de comparación cualitativa 99
2.8.1 Criterios cualitativos 99
2.8.2 Escala de comparación cualitativa 100
2.8.3 Matriz de evaluación cualitativa 101
2.8.4 Hipótesis nula (H_0): 101
2.8.1 Hipótesis alternativa (H_1): 102
2.9 Operacionalización de variables 102
2.9.1 Variable Dependiente 102
2.9.2 Variable Independiente 103
CAPITULO III 105
RESULTADOS Y DISCUCIONES 105
3.1 Resultados experimentales 105
3.1.1 Líneas de corriente (streamlines) resultados experimentales 105
3.2 Resultados de simulaciones CFD 108
3.2.1 Discretización del Dominio Computacional y Análisis de Calidad 108
3.2.2 Líneas de corriente (streamlines) resultados CFD 110
3.3 Análisis comparativo de resultados 111

3.3.1 Análisis comparativo de resultados del perfil NACA 0024 111
3.3.2 Análisis comparativo de resultados del perfil NACA 2412 113
3.3.3 Análisis comparativo de resultados del perfil NACA 6142 115
3.4 Verificación de hipótesis 118
3.4.1 Discrepancias 120
3.5 Análisis crítico 121
3.5.1 Resultados cualitativos observados a través del dispositivo Hele-Shaw 121
3.5.2 Valor pedagógico y técnico del experimento 121
3.6 Cuadro de Materiales Análisis de Costos y Viabilidad Económica 122
3.6.1 Costos Directos 122
3.6.2 Análisis de Viabilidad Económica y Comparativa Internacional 125
CAPÍTULO IV 127
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 127
4.1 Conclusiones 127
4.2 Recomendaciones 128
Referencias Bibliográficas 130
Anexos 133

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Evidencia fotográfica de pruebas prácticas..... 133

Anexo 2. Planos técnicos del dispositivo 134

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I DATOS TÉCNICOS DEL PROTOTIPO HELLE-SHAW 53

TABLA II CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIAL DE PLACAS 54

TABLA III TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA LINEAL 64

TABLA IV TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA DE T 67

TABLA V TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA DE ANILLO 71

TABLA VI CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE CAUDAL 74

TABLA VII COMPARATIVA DE SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN 75

TABLA VIII PROPIEDADES DE TINTA DE COLORANTE 85

TABLA IX PROPIEDADES DE COLORANTES ALIMENTARIOS 86

TABLA X PROPIEDADES DE TINTA FLUORESCENTE. 87

TABLA XI PROPIEDADES DE PSP/TSP. 87

TABLA XII PROPIEDADES DE TINTA A BASE DE NANOPARTÍCULAS 88

TABLA XIII PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE TINTA TRAZADORA 89

TABLA XIV PARÁMETROS DE CONDICIONES DE OPERACIÓN 92

TABLA XV REGISTRO VISUAL DEL FLUJO 93

TABLA XVI CRITERIOS DE EVALUACIÓN – LÍNEAS DE CORRIENTE (STREAMLINES) 99

TABLA XVII CRITERIOS DE EVALUACIÓN – ZONAS DE RECIRCULACIÓN 100

TABLA XVIII CRITERIOS DE EVALUACIÓN – TRANSICIÓN DE RÉGIMEN DE FLUJO 100

TABLA XIX ESCALA DE COMPARACIÓN CUALITATIVA 101

TABLA XX MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA 101

TABLA XXI VARIABLES DEPENDIENTES 102

TABLA XXII VARIABLES INDEPENDIENTES 103

TABLA XXIII RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 1 - 0024 105

TABLA XXIV RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 1 - 2412 106

TABLA XXV RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 1 - 6142 106

TABLA XXVI RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 2 - 0024 107

TABLA XXVII RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 2 - 2412 107

TABLA XXVIII RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 2 - 6142 108

TABLA XXIX DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO COMPUTACIONAL DEL PERFIL NACA 0024 109

TABLA XXX DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO COMPUTACIONAL DEL PERFIL NACA 2412 109

TABLA XXXI DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO COMPUTACIONAL DEL PERFIL NACA 6142 109

TABLA XXXII RESULTADOS LÍNEAS DE CORRIENTE (STREAMLINES) CFD 110

TABLA XXXIII ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 0024 0° 111

TABLA XXXIV MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 0024 0° 111

TABLA XXXV ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 0024 15° 112

TABLA XXXVI MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 0024 15° 112

TABLA XXXVII ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 0024 30° 112

TABLA XXXVIII MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 0024 30° 113

TABLA XXXIX ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 2412 0° 113

TABLA XL MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 2412 0° 113

TABLA XLI ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 2412 15° 114

TABLA XLII MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 2412 15° 114

TABLA XLIII ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 2412 30° 115

TABLA XLIV MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 2412 30° 115

TABLA XLV ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 6142 0° 116

TABLA XLVI MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 6142 0° 116

TABLA XLVII ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 6142 15° 116

TABLA XLVIII MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 6142 15° 117

TABLA XLIX ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 6142 30° 117

TABLA L MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 6142 30° 117

TABLA LI ANÁLISIS DE SIMILITUD DE RESULTADOS FL 1 118

TABLA LII ANÁLISIS DE SIMILITUD DE RESULTADOS FL 2..... 119

TABLA LIII COSTOS DIRECTOS (MATERIALES Y COMPONENTES) 122

TABLA LIV COSTOS DIRECTOS (MANO DE OBRA) 124

TABLA LV COSTOS TOTALES..... 125

TABLA LVI COMPARATIVA CON MODELOS INTERNACIONALES..... 125

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1. Líneas de traza. 31

Fig 2. Representación gráfica, arriba sin Schlieren y abajo con Schlieren. 32

Fig 3. Representación gráfica de resultados de un interferómetro. 32

Fig 4. Representación gráfica de pintura Sensible a la Presión y Temperatura. 33

Fig 5. Cámara de alta velocidad. 33

Fig 6. Fotografía de humo que muestra el flujo alrededor de una pelota. 34

Fig 7. PIV aplicada a un modelo de automóvil en un túnel de viento. 35

Fig 8. Principio de medición de la anemometría láser-Doppler. 35

Fig 9. Demostración del túnel de viento. 35

Fig 10. Líneas de corriente. 36

Fig 11. Vectores de velocidad. 36

Fig 12. Contornos a escala rellenos en gris. 37

Fig 13. Flujo entre dos placas paralelas. 39

Fig 14. Diagrama de supuestos fundamentales del modelo de Stokes-Leibenzon. 40

Fig 15. Composición general de los perfiles aerodinámicos NACA. 45

Fig 16. Composición general de los perfiles aerodinámicos NACA. 46

Fig 17. Diagrama de proceso de simulación en ANSYS CFD. 48

Fig 18. Diagrama de criterios específicos. 51

Fig 19. Diagrama de criterios secundarios. 52

Fig 20. Diseño del primer prototipo Hele Shaw. 52

Fig 21. Fotografía del control de la salida del fluido. 57

Fig 22. Fotografía de la inyección de tinta en distribución abierta. 58

Fig 23. Fotografía de la inyección de tinta en distribución cerrada. 59

Fig 24. Fotografía de empaque en papel victoria. 60

Fig 25. Fotografía de la estabilización del ángulo de inclinación. 61

Fig 26. Experimentación de distribución de caudal del sistema lineal. 63

Fig 27. Análisis con asistente computacional de la distribución de caudal del sistema lineal. 66

Fig 28. Resultados del análisis de la distribución de caudal del sistema lineal. 66

Fig 29. Experimentación de distribución de caudal del sistema de T. 67

Fig 30. Análisis con asistente computacional de la distribución de caudal del sistema de T. 70

Fig 31. Resultados del análisis de la distribución de caudal del sistema de T. 70

Fig 32. Experimentación de distribución de caudal del sistema de anillo. 71

Fig 33. Análisis con asistente computacional de la distribución de caudal del sistema de anillo. 73

Fig 34. Resultados del análisis de la distribución de caudal del sistema de anillo. 74

Fig 35. Diagrama de comparativa de sistema de distribución. 75

Fig 36. Diagrama de Flujo de numero de Reynolds. 77

Fig 37. Diseño del dispositivo Helle-Shaw mediante software CAD. 81

Fig 38. Proceso constructivo del dispositivo. 81

Fig 39. Sistema de ajuste de inclinación. 82

Fig 40. Mecanismo de fijación rápida. 82

Fig 41. Sistema de apertura del dispositivo. 83

Fig 42. Sistema distribución principal de caudal. 84

Fig 43. Empaque del sistema de sellado. 85

Fig 44. Perfil NACA 0024. 90

Fig 45. Perfil NACA 2412. 90

Fig 46. Perfil NACA 6142. 91

Fig 47. Curvatura Media de Perfiles NACA: 0024 vs 2412 vs 6142 91

Fig 48. Explicación de la codificación para experimentación. 94

Fig 49. Diagrama Procedimiento General de Simulación CFD en ANSYS Fluent..... 94

Fig 50. Geometría de volumen del fluido del dispositivo Helle-Shaw. 95

Fig 51. Denominación de superficies (Named Selections). 96

Fig 52. Configuración de la mallado. 96

Fig 53. Métricas de espectros de calidad de Skewness y Orthogonal Quality. 97

Fig 54. Flujograma de variables independientes y dependientes del estudio. 104

Fig 64. Diagrama conceptual de posibles causas de discrepancias. 120

Fig 65. Comparativa de costos con modelos internacionales. 126

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto experimental analiza el comportamiento del flujo de fluidos en perfiles aerodinámicos utilizando un dispositivo de Hele-Shaw, con el objetivo de obtener visualizaciones cualitativas y validarlas mediante simulación numérica. La metodología se centró en el diseño y construcción de una celda de Hele-Shaw con una separación de 2 mm para asegurar un régimen de flujo laminar ($Re < 1$). Se evaluaron los perfiles NACA 0024 (simétrico), 2412 (curvatura media) y 6142 (alta curvatura) bajo ángulos de ataque de 0°, 15° y 30°. La visualización del flujo se logró mediante la inyección de colorante alimentario, y los resultados se compararon con simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) realizadas en ANSYS Fluent.

Los resultados experimentales permitieron visualizar con claridad fenómenos clave como las líneas de corriente, los puntos de estancamiento y la separación del flujo. Sin embargo, se encontraron discrepancias significativas entre los resultados experimentales y los modelos CFD idealizados, particularmente en cuanto a la estabilidad de las estructuras de flujo y la difusión del trazador. Se determinó que estas desviaciones fueron causadas principalmente por limitaciones constructivas del prototipo artesanal, como micro-imperfecciones en el paralelismo de las placas e inestabilidades en el caudal, que introdujeron efectos tridimensionales no considerados en las simulaciones 2D.

El estudio concluye que el dispositivo Hele-Shaw es una valiosa herramienta pedagógica para el análisis cualitativo, pero requiere una precisión de fabricación extrema para la validación cuantitativa. La investigación resalta la importancia crítica de controlar las variables experimentales y proporciona un diagnóstico robusto de los desafíos inherentes a cerrar la brecha entre los modelos teóricos y las implementaciones físicas reales.

PALABRAS CLAVES: HELE-SHAW, PERFILES AERODINÁMICOS, VISUALIZACIÓN DEL FLUJO, SIMULACIÓN CFD, SEPARACIÓN LAMINAR.

ABSTRACT

This experimental project analyzes the behavior of fluid flow around aerodynamic profiles using a Hele-Shaw apparatus, with the goal of obtaining qualitative visualizations and validating them through numerical simulation. The methodology focused on the design and construction of a Hele-Shaw cell with a 2 mm separation to ensure a laminar flow regime (Re < 1). The NACA 0024 (symmetric), 2412 (medium camber), and 6142 (high camber) airfoils were evaluated at angles of attack of 0°, 15°, and 30°. Flow visualization was achieved by injecting methylene blue dye, and the results were compared with Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations performed in ANSYS Fluent.

The experimental results allowed for the clear visualization of key phenomena such as streamlines, stagnation points, and flow separation. However, significant discrepancies were found between the experimental results and the idealized CFD models, particularly regarding the stability of flow structures and the diffusion of the tracer. It was determined that these deviations were primarily caused by constructive limitations of the artisanal prototype, such as micro-imperfections in the parallelism of the plates and flow rate instabilities, which introduced three-dimensional effects not considered in the 2D simulations.

The study concludes that the Hele-Shaw apparatus is a valuable pedagogical tool for qualitative analysis but requires extreme manufacturing precision for quantitative validation. The research highlights the critical importance of controlling experimental variables and provides a robust diagnosis of the challenges inherent in bridging the gap between theoretical models and real-world physical implementations.

KEYWORDS: HELE-SHAW, AERODYNAMIC PROFILES, FLOW VISUALIZATION, CFD SIMULATION, LAMINAR SEPARATION.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

1.1.1 Antecedentes

Dentro del ámbito de la mecánica de fluidos, los análisis empíricos han constituido una herramienta primordial para la comprensión del comportamiento del flujo alrededor de cuerpos sumergidos en un fluido. Desde los inicios del siglo XX, se elaboraron metodologías de visualización que facilitaban la observación de las trayectorias del flujo, tales como el uso de humo, colorantes o partículas. Sin embargo, fue con la invención del dispositivo de Hele-Shaw que se logró representar de manera más clara y bidimensional la conducta de un fluido viscoso entre dos láminas cercanas, lo cual simplificó la observación de líneas de corriente y fenómenos como la separación del flujo y la formación de estelas, de acuerdo a [1].

El dispositivo fue nombrado en honor a Henry Selby Hele-Shaw (1854–1941), quien en 1898 propuso un sistema para examinar el movimiento de un fluido entre dos planchas paralelas muy próximas. Su configuración permite que el flujo adquiera un comportamiento casi bidimensional, lo cual facilita su modelado mediante las ecuaciones del flujo potencial. Este enfoque fue posteriormente respaldado por trabajos como los de Saffman y Taylor (1958), quienes lo utilizaron para estudiar la inestabilidad en flujos viscosos [2].

A partir de mediados del siglo XX, se introdujo de manera sistemática la aplicación de este tipo de dispositivos que fue extendida al estudio de geometrías complejas, incluyendo cuerpos aerodinámicos. Se reconoció que, aunque el dispositivo no representa un flujo real tridimensional como en el caso de flujos sobre alas reales, sí permite estudiar patrones de flujo representativos y compararlos con soluciones numéricas obtenidas por métodos como el de elementos finitos o el método de volúmenes finitos en dinámica de fluidos computacional (CFD) [3].

Con el inicio de la era digital y el desarrollo de técnicas avanzadas de análisis computacional, el dispositivo de Hele-Shaw se convirtió en una herramienta de validación. Investigadores como Homsy [4], establecieron su utilidad para simular

flujos en medios porosos y visualizar soluciones de ecuaciones como la de Laplace o la de Poisson, que también gobiernan el flujo potencial. Esto fue crucial para trasladar observaciones experimentales a modelos matemáticos y viceversa.

Este estudio es relevante debido a la creciente necesidad de complementar y validar los modelos teóricos y computacionales de dinámica de fluidos mediante métodos experimentales. Como lo señala Homsy [4], aunque los avances en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) han incrementado la capacidad de predecir fenómenos complejos, la experimentación sigue siendo fundamental para corroborar estos resultados. Esto es especialmente importante en configuraciones aerodinámicas, donde los patrones de flujo son difíciles de predecir con precisión teórica o numérica debido a la naturaleza caótica y compleja del movimiento de los fluidos.

El dispositivo de Hele-Shaw, como se menciona en estudios de Acheson [5], proporciona una plataforma ideal para visualizar el flujo de fluidos en configuraciones bidimensionales, permitiendo capturar con claridad las líneas de corriente. En el contexto aerodinámico, las predicciones teóricas y simulaciones a menudo se encuentran con dificultades para modelar fenómenos como la separación y recirculación del flujo en perfiles complejos. Esto hace que el estudio experimental, con un dispositivo como el de Hele-Shaw, sea crucial para comprender mejor estas limitaciones y aportar una representación visual accesible que complemente los estudios computacionales.

Además, este dispositivo es particularmente útil para identificar zonas de separación, recirculación y turbulencia en perfiles aerodinámicos, factores cruciales en el diseño mecánico y la optimización aerodinámica en industrias como la automotriz y aeronáutica. Al facilitar la identificación de estas zonas críticas, el dispositivo contribuye a mejorar la precisión en estudios aerodinámicos experimentales. Como resultado, su uso podría generar un impacto positivo en el desarrollo de diseños más eficientes y optimizados, como lo señala Anderson [6].

Es importante resaltar que, según autores como Çengel y Cimbala [7], el aprendizaje efectivo de la mecánica de fluidos no debe limitarse al análisis teórico o numérico, sino que debe complementarse con métodos experimentales accesibles, que permitan observar directamente los fenómenos estudiados. En ese sentido, el dispositivo de

Hele-Shaw se presenta como una herramienta pedagógica y de investigación valiosa dentro del ámbito de la ingeniería mecánica, al facilitar la observación directa de fenómenos fluidodinámicos fundamentales.

1.1.2 Justificación

Una de las principales limitaciones que enfrentan las instituciones de educación superior en Ecuador es la escasa disponibilidad de infraestructura especializada para la enseñanza e investigación en dinámica de fluidos. Según datos de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) [8], aproximadamente el 84% de las universidades públicas del país no cuenta con túneles de viento, debido al elevado costo de adquisición e implementación de estos equipos, cuyo precio oscila entre los USD 50,000 y USD 500,000. Esta limitación reduce significativamente las oportunidades para la experimentación directa y la validación de teorías en el campo de la aerodinámica.

En este contexto, el dispositivo de Hele-Shaw se presenta como una alternativa viable y altamente accesible para fines académicos. Este tipo de dispositivo puede construirse con un presupuesto menor a USD 2,000, utilizando materiales de bajo costo y técnicas de fabricación sencillas, sin comprometer su funcionalidad como herramienta de visualización de flujos bidimensionales. De acuerdo a [9], esta alternativa resulta especialmente adecuada para instituciones de educación superior que enfrentan limitaciones financieras, ya que facilita la realización de experimentos de visualización de flujo sin requerir infraestructura de alto costo por parte de estudiantes e investigadores.

La implementación de dispositivos como el Hele-Shaw no solo democratiza el acceso a la experimentación en aerodinámica, sino que también fomenta la innovación didáctica, brindando a los futuros ingenieros una comprensión más intuitiva de los fenómenos de separación, recirculación y comportamiento de líneas de corriente alrededor de perfiles aerodinámicos. Su bajo costo, portabilidad y facilidad de operación lo hacen especialmente adecuado para ser incorporado en prácticas de laboratorio, proyectos de titulación y procesos de desarrollo de competencias formativas dentro del ámbito de mecánica de fluidos.

1.2 Hipótesis

El análisis experimental del flujo de fluidos mediante un dispositivo de Hele-Shaw permitirá analizar cualitativamente el comportamiento del flujo alrededor de perfiles aerodinámicos, identificando fenómenos como la formación de líneas de corriente, zonas de recirculación, y cambios en el régimen de flujo en función de la geometría del perfil y las condiciones iniciales del fluido.

1.2.1 Señalamiento de variables de la hipótesis

1.2.1.1 Variable dependiente

Comportamiento del flujo visualizado (patrones de líneas de corriente, formación de zonas de recirculación y transición de régimen de flujo) y su correspondencia con resultados de simulación CFD.

1.2.1.2 Variable independiente

Geometría del perfil aerodinámico (tipo NACA), ángulo de ataque y condiciones de operación del flujo (tipo de tinta trazadora).

1.3 Fundamentación Teórica

1.3.1 Conceptos básicos de mecánica de fluidos

Fluido

De acuerdo a [5], se entiende por fluido a toda sustancia que presenta una deformación continua cuando se le aplica una fuerza tangencial, independientemente de la magnitud de dicha fuerza. Este comportamiento es característico tanto en medios líquidos como gaseosos.

Flujo

El flujo hace referencia al desplazamiento de un fluido entre distintos puntos en el espacio, y su naturaleza puede variar según el régimen o las condiciones del entorno, clasificándose como laminar, turbulento, compresible, incompresible, entre otros, esto según [5].

Viscosidad

Según estudios de Acheson [5], la viscosidad representa una medida de la oposición interna que un fluido ofrece al desplazamiento dentro de su masa. Esta propiedad puede expresarse como viscosidad dinámica (μ) o cinemática (ν).

Perfil (de velocidad)

De acuerdo a [7], el perfil de velocidad hace referencia a cómo varía la magnitud del flujo en diferentes puntos de una sección transversal. Es una característica observable tanto en regímenes laminares como turbulentos.

Capa límite

Como menciona el estudio [7], la capa límite se define como la franja próxima a una superficie sólida en la cual los efectos viscosos son dominantes, generando una variación abrupta de la velocidad entre la pared (donde es nula) y el flujo externo.

Separación del flujo

De acuerdo a [7], la separación del flujo se produce cuando la corriente de fluido ya no sigue el contorno de la superficie debido a la pérdida de energía cinética, generando zonas de recirculación o vórtices.

1.3.2 Clasificación de los movimientos de un fluido

Como lo mencionan los estudios [7], [3] y [10], el comportamiento del flujo varía considerablemente según las condiciones físicas y geométricas en que ocurre. Por ello, su análisis suele partir de una clasificación que permite entender mejor sus características y facilita la elección de modelos adecuados para su estudio.

Según el régimen de flujo

- **Flujo laminar:** caracterizado por trayectorias suaves y paralelas entre las partículas del fluido. Es típico en velocidades reducidas y con un número de Reynolds inferior a 2000.
- **Flujo turbulento:** el movimiento es caótico e irregular, con remolinos y mezclas intensas. Ocurre a velocidades altas, generalmente cuando $Re > 4000$.

- **Flujo de transición:** se presenta entre los valores críticos de Reynolds (2000 – 4000), donde el flujo alterna entre comportamiento laminar y turbulento.

Según la compresibilidad

- **Flujo incompresible:** se asume que la densidad del fluido permanece constante durante su desplazamiento, lo cual es válido para la mayoría de los líquidos y gases a bajas velocidades.
- **Flujo compresible:** la densidad cambia significativamente en función de la presión y la temperatura. Es habitual en gases cuando la velocidad del flujo es elevada y los efectos de compresibilidad no pueden ignorarse.

Según la viscosidad

- **Fluido viscoso:** en este caso, se consideran las fuerzas de fricción internas, que influyen directamente en la formación de la capa límite y en la resistencia que el fluido opone al movimiento.
- **Fluido no viscoso (ideal):** por el contrario, se desprecia la viscosidad, lo que permite simplificaciones teóricas como el uso del flujo potencial [11].

Según la dimensionalidad

- **Flujo unidimensional:** se supone que las propiedades del flujo varían en una sola dirección.
- **Flujo bidimensional (2D):** las propiedades varían en dos coordenadas (x, y), común en análisis de flujo sobre perfiles aerodinámicos.
- **Flujo tridimensional (3D):** las propiedades varían en las tres direcciones espaciales, característico de flujos reales complejos [12].

Según el estado del flujo

- **Estacionario:** las propiedades del flujo no cambian con el tiempo en un punto dado.
- **No estacionario (transitorio):** las propiedades varían con el tiempo, como ocurre en arranques o paradas de equipos hidráulicos.

Según la rotacionalidad:

- **Flujo irrotacional:** el vorticidad del fluido es cero, típico en modelos de flujo potencial.
- **Flujo rotacional:** el fluido posee vorticidad, común en zonas cercanas a superficies sólidas y en flujos turbulentos.

1.3.3 Fundamentos de visualización del flujo

Para analizar y entender cómo se comporta un fluido en movimiento, es fundamental disponer entender conceptos clave como:

Líneas de corriente: que muestra la orientación del flujo en un momento determinado. En cualquier punto de esta curva, la tangente coincide con el vector velocidad del fluido en ese lugar, lo que implica que señala el camino que una partícula tomaría en ese instante. De acuerdo a [7], la ecuación para una línea de corriente está dada por:

$$\frac{dr}{V} = \frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \tag{1}$$

Donde:

$dr = magnitud\ de\ \overrightarrow{dr}$

$V = velocidad, magnitud\ de\ \vec{V}$

También se explica de igual manera que en una línea de corriente en el plano de dos dimensiones (x, y), (u, v), se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{a\ lo\ largo\ de\ una\ línea\ de\ corriente} = \frac{v}{u} \tag{2}$$

Donde:

$v = es\ la\ componente\ de\ la\ velocidad\ en\ la\ dirección\ del\ eje\ x$

$u = es\ la\ componente\ de\ la\ velocidad\ en\ la\ dirección\ del\ eje\ y$

Líneas de trayectoria: Describe el recorrido real que sigue una partícula de fluido a lo largo del tiempo. Se obtiene observando el desplazamiento completo de una partícula individual.

Líneas de traza: Corresponde al conjunto de posiciones que han ocupado de forma secuencial diferentes partículas de fluido al pasar por un punto fijo, como se muestra en la Fig 1.

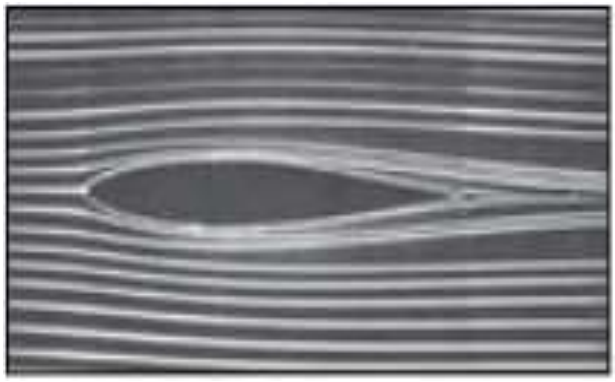


Fig 1. Líneas de traza [7].

Como se muestra Fig 1., se observa que cuando el flujo es constante en el tiempo, las líneas de corriente, las líneas de corriente, trayectoria y traza coinciden perfectamente.

Líneas fluidas: se definen como un grupo de partículas de un fluido que fueron marcadas simultáneamente en un mismo momento, lo que permite visualizar cómo estas partículas cambian de forma y se desplazan con el transcurso del tiempo.

1.3.4 Técnicas y dispositivos de visualización del flujo

Para el análisis experimental en dinámica de fluidos, el uso de técnicas de visualización es fundamental. Estas técnicas ayudan a captar de manera clara y detallada los flujos de aire o agua alrededor de objetos, como los perfiles aerodinámicos, lo cual es clave para comprender la interacción del fluido con la superficie del objeto.

Técnicas y dispositivos de visualización cualitativas

Aquellos que permiten observar la estructura o forma del flujo sin medir con precisión numérica, proporcionando una representación visual o descriptiva de los fenómenos.

Sistema Schlieren

El sistema Schlieren es una técnica óptica que permite visualizar variaciones de densidad en un flujo, lo cual es útil en flujos compresibles, como aquellos alrededor de objetos a altas velocidades.

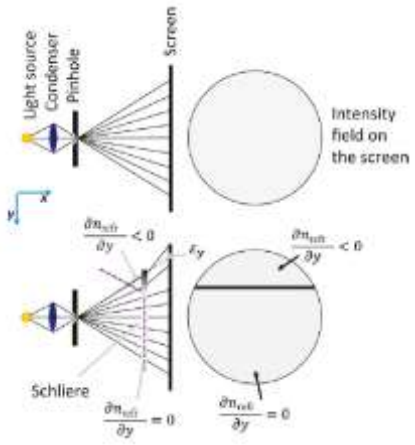


Fig 2. Representación gráfica, arriba sin Schlieren y abajo con Schlieren [13].

Como se muestra Fig 2., este dispositivo utiliza lentes y espejos para detectar cambios en la densidad del aire, lo cual provoca desviaciones en la luz que atraviesa el fluido. El sistema puede capturar ondas de choque y variaciones térmicas en el flujo alrededor de un objeto.

Interferómetro

El interferómetro es un dispositivo óptico que utiliza la interferencia de la luz para medir variaciones en el índice de refracción del flujo, lo que está relacionado con cambios de densidad o temperatura, como lo muestra en la Fig 3.



Fig 3. Representación gráfica de resultados de un interferómetro [14].

Este dispositivo es especialmente útil en el estudio de flujos compresibles y para visualizar ondas de choque en túneles de viento.

Pintura Sensible a la Presión y Temperatura (PSP/TSP)

Estas pinturas cambian de color en respuesta a la presión y temperatura sobre la superficie de un objeto. Son útiles para medir distribuciones de presión y temperatura en tiempo real sobre perfiles aerodinámicos, proporcionando una forma visual y cuantitativa de observar los cambios en el flujo alrededor de un objeto, como lo muestra en la Fig 4.

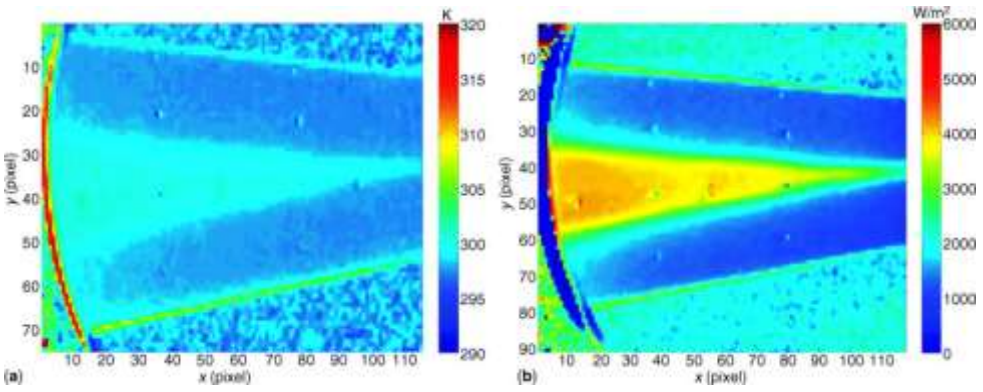


Fig 4. Representación gráfica de pintura Sensible a la Presión y Temperatura [15].

Cámaras de Alta Velocidad

Las cámaras de alta velocidad son utilizadas para capturar movimientos rápidos en flujos de fluidos. Estas cámaras permiten observar fenómenos transitorios, como la formación de vórtices, la separación de flujo, y otros efectos aerodinámicos complejos, como lo muestra en la Fig 5.



Fig 5. Cámara de alta velocidad [16].

Estas cámaras pueden emplearse en combinación con técnicas como la inyección de humo o el PIV para capturar en detalle el comportamiento del flujo [15].

Dispositivos de Visualización con Trazadores (como Inyección de Humo)

Como se muestra Fig 6., la inyección de humo y otros trazadores es una técnica común para visualizar flujos de aire en túneles de viento o en otros experimentos de fluidos. El humo se inyecta en el flujo para que sea visible y así se puedan observar patrones de flujo como la dirección, la separación y la turbulencia.

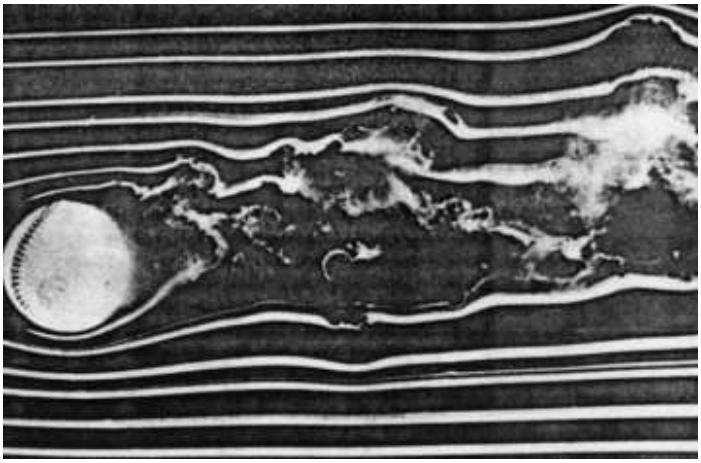


Fig 6. Fotografía de humo que muestra el flujo alrededor de una pelota [10].

Técnicas o dispositivos de visualización Cuantitativa

Aquellos que permiten obtener datos numéricos precisos sobre el flujo, como la velocidad, presión o temperatura.

Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV)

El sistema PIV permite capturar campos de velocidad completos en una sección del flujo, utilizando partículas trazadoras y una cámara de alta velocidad. Se iluminan partículas dispersas en el fluido, y se registra su movimiento para calcular la velocidad del flujo, como lo muestra en la Fig 7.



Fig 7. PIV aplicada a un modelo de automóvil en un túnel de viento [7].

Anemómetro Láser Doppler (LDA)

Como se muestra Fig 8., este dispositivo permite medir la velocidad de las partículas en un flujo utilizando la técnica Doppler. Un rayo láser es dividido en dos, y el cruce de ambos crea un patrón de interferencia. Cuando una partícula atraviesa este patrón, se produce un cambio en la frecuencia que se utiliza para calcular la velocidad.

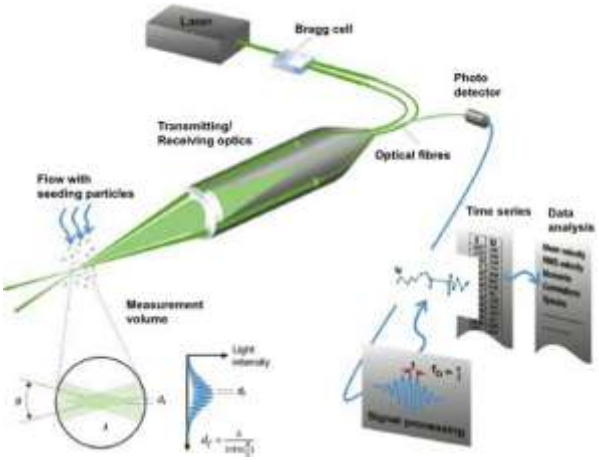


Fig 8. Principio de medición de la anemometría láser-Doppler [17].

Técnicas o dispositivos de visualización Cualitativo y Cuantitativo

Túnel de Viento

Un túnel de viento es una herramienta fundamental en la aerodinámica experimental. Consiste en una estructura en la que se genera un flujo de aire controlado que pasa sobre un modelo (como un perfil aerodinámico) para estudiar el comportamiento del flujo alrededor de este Fig 9.



Fig 9. Demostración del túnel de viento [11].

1.3.5 Representaciones gráficas del flujo de fluidos

Una vez que se obtiene información del flujo, ya sea experimental o por simulación, es crucial representarla de forma clara y visual para su análisis. Estas representaciones gráficas incluyen:

Gráficas de perfiles: Estas gráficas relacionadas con el flujo de fluidos ilustran cómo una propiedad escalar cambia a lo largo de una dirección determinada Fig 10.

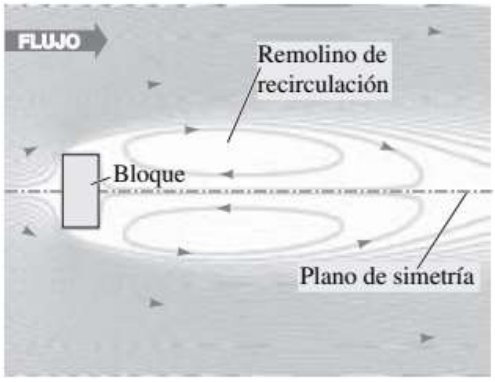


Fig 10. Líneas de corriente [7].

Gráficas vectoriales: Se utilizan para representar propiedades vectoriales, como el campo de velocidades. En cada punto del campo de flujo, se utiliza una flecha para indicar tanto la dirección como la intensidad (longitud) del flujo. Este tipo de visualización resulta especialmente útil para analizar patrones y comportamientos específicos del fluido Fig 11.

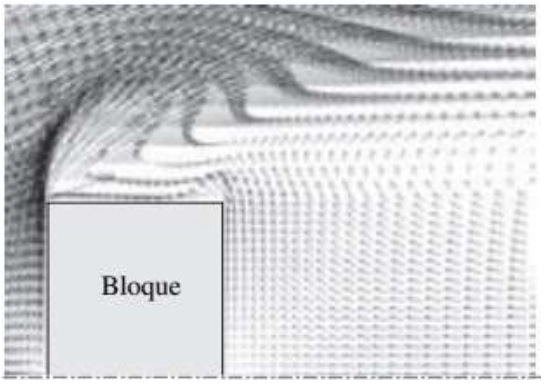


Fig 11. Vectores de velocidad [7].

Gráficas de contornos: Este tipo de gráfico representa superficies o líneas donde una determinada propiedad escalar (la presión, la temperatura, la velocidad) mantiene un

mismo valor. Así, se pueden identificar zonas con igual intensidad dentro del campo de flujo, lo que facilita el análisis de patrones, gradientes o regiones críticas Fig 12.

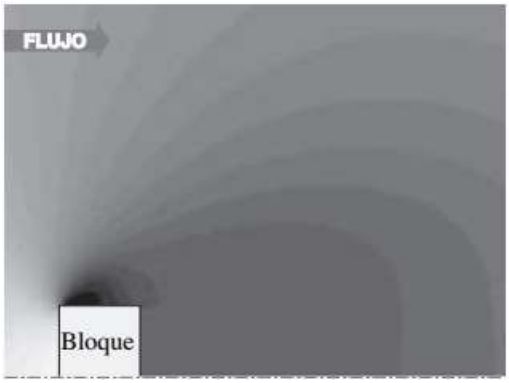


Fig 12. Contornos a escala rellenos en gris [7].

1.3.6 Fundamentales de la dinámica de fluidos

Modelado Matemático del Flujo de Fluidos

El análisis del movimiento de los fluidos se fundamenta en varias ecuaciones diferenciales que reflejan la conservación de masa, momento lineal y energía. Estas relaciones matemáticas constituyen la base fundamental de la mecánica de fluidos y se expresan en términos del campo de velocidades y demás características propias del fluido [11].

Ecuación de continuidad

Esta ecuación matemática representa el principio de conservación de masa dentro de un fluido en movimiento. La ecuación diferencial general se expresa de la siguiente manera, de acuerdo [11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{V}\right) = 0 \tag{3}$$

Sin embargo, partiendo desde la forma general podemos entender que para un fluido incomprensible se describe como:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{4}$$

donde:

$\vec{V} =$ campo de velocidades del fluido

Esta ecuación asegura que la masa que entra a un volumen de control sea igual a la masa que sale, es decir, no hay acumulación de masa en ningún punto del dominio de flujo [7].

Ecuaciones de Navier – Stokes

Las ecuaciones de Navier–Stokes modelan el comportamiento de fluidos con viscosidad, basándose en una expresión matemática derivada de la segunda ley de Newton aplicada a sistemas fluidos. Estas ecuaciones representan la conservación del momento lineal dentro del fluido.

La formulación general de las ecuaciones de Navier–Stokes para un fluido newtoniano se puede expresar de la siguiente manera, de acuerdo a [3] :

$$\rho\left(\frac{\partial\vec{V}}{\partial t}+\vec{V}\cdot\nabla\vec{V}\right)=-\nabla p+\mu\nabla^2\vec{V}+\vec{f} \tag{5}$$

donde:

$\rho =$ densidad del fluido $\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right]$

$\vec{V} =$ vector de velocidad $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$

$p =$ presión [Pa]

$\mu =$ viscosidad dinámica [Pa · s]

$\vec{f} =$ representa el vector de fuerzas volumétricas externas [gravedad]

Principio de Bernoulli

Este principio expresa la conservación de la energía mecánica en un fluido ideal, es decir, un fluido sin viscosidad y con densidad constante. Resulta fundamental para comprender cómo se comporta el flujo cuando interactúa con objetos sumergidos en él.

De forma general para un fluido en régimen estable, incomprensible y sin pérdidas de energía, el principio indica que, a lo largo de una línea de corriente, la suma de las energías cinética, potencial y de presión permanece constante, expresándose matemáticamente de la siguiente forma, como lo mencionan los estudios de [7]:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = constante \tag{6}$$

donde:

$v =$ velocidad del fluido [m/s]

$p =$ presión estática [Pa]

$p =$ densidad del fluido $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$g =$ aceleración gravitacional $[\text{m/s}^2]$

$z =$ altura respecto a un plano de referencia [m]

1.3.7 Flujo entre dos placas paralelas

En [18] se prueba que consta de dos placas paralelas muy próximas entre sí, separadas por una distancia pequeña (altura h), de modo que el flujo que se genera en el espacio entre las placas es bidimensional. Esto significa que el flujo se desarrolla principalmente en el plano x−y, mientras que la variación en la dirección z (perpendicular a las placas) es mínima, debido a la estrecha separación Fig 13.

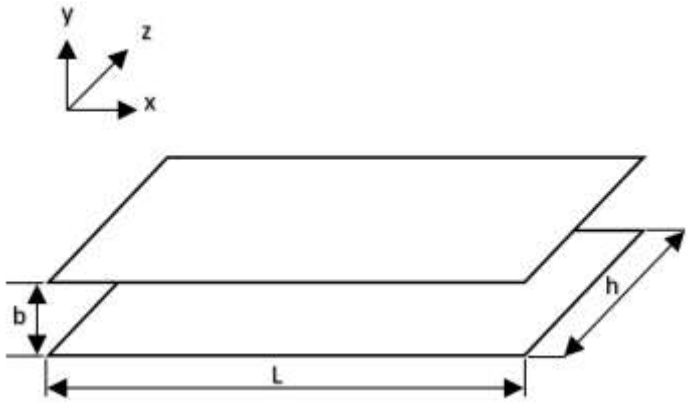


Fig 13. Flujo entre dos placas paralelas.

El modelo de Stokes-Leibenzon

El modelo de Stokes-Leibenzon describe el flujo viscoso lento entre dos placas paralelas muy cercanas bajo ciertas suposiciones coma las ecuaciones de Navier – Stokes se simplifican y el flujo se comporta como si fuera potencial lo cual facilita su análisis teórico experimental.

Este modelo se basa en los siguientes supuestos, como se muestra en la Fig 14.:

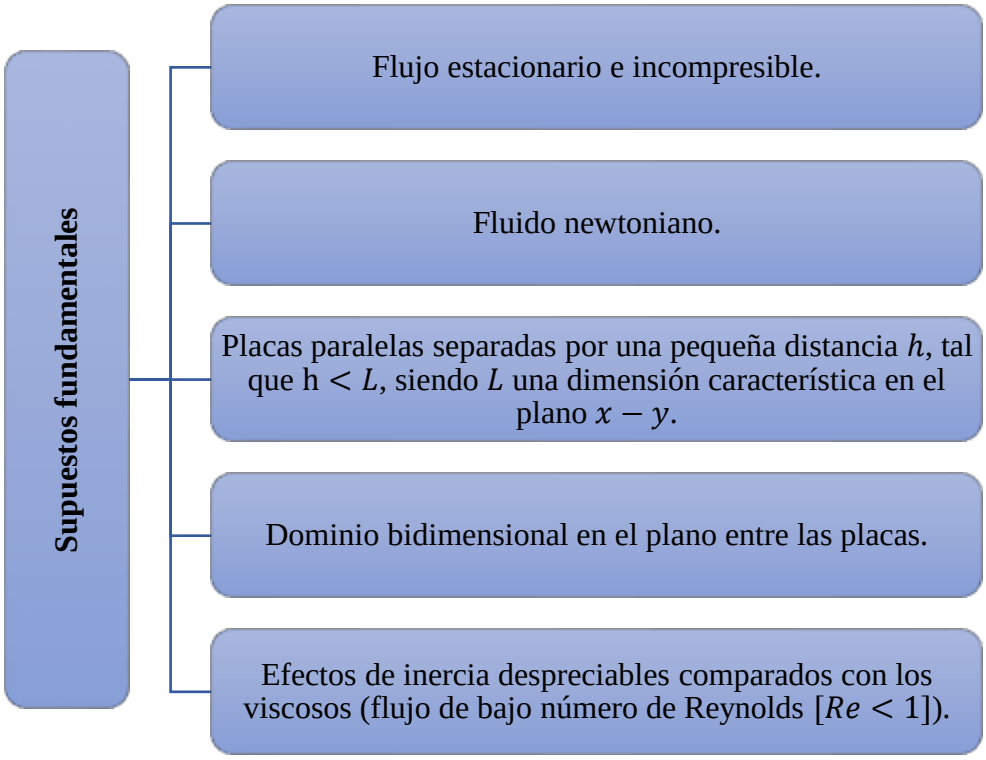


Fig 14. Diagrama de supuestos fundamentales del modelo de Stokes-Leibenzon.

Respetando estas condiciones, se puede demostrar que la velocidad media en el plano entre las placas sigue una ley análoga a la ley de Darcy, y está dada por la siguiente ecuación, como lo demuestra Acheson [5]:

$$\vec{V} = -\frac{h^2}{12\mu}\nabla p \tag{7}$$

donde:

$\vec{V}$ = vector velocidad promediado sobre la altura entre las placas $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$

h = separación entre las placas [m]

μ = viscosidad dinámica del fluido [Pa · s]

p = presión [Pa]

Esta expresión es análoga a la ley de Darcy en medios porosos y justifica el uso del término flujo potencial promedio porque, bajo estas condiciones, el flujo

bidimensional en la celda puede describirse por un campo potencial de presión que satisface la ecuación de Laplace.

Flujo de un fluido ideal

El flujo de fluido ideal es un modelo teórico sin pérdidas, útil como punto de partida para análisis básicos, pero no aplicable a condiciones reales con viscosidad.

Se caracteriza por:

- Ser incompresible: su densidad ρ permanece constante.
- Ser no viscoso: la viscosidad dinámica $\mu = 0$, por lo tanto, no ocurre pérdida de energía mecánica debido a la fricción interna del fluido.
- Tener flujo irrotacional: el campo de velocidades satisface $\nabla \times \vec{V} = 0$, lo cual permite describir el flujo mediante una función potencial ϕ, tal que $\vec{V} = \nabla\phi$

Este modelo es útil para establecer soluciones analíticas en regiones del flujo alejadas de superficies sólidas o cuando se desea obtener una primera aproximación del comportamiento del fluido [7].

Flujo potencial

El flujo potencial es una simplificación matemática válida cuando el flujo es irrotacional y sin viscosidad comúnmente usado en aerodinámica teórica.

Se caracteriza por:

- Ser irrotacional: cumple con $\nabla \times \vec{V} = 0$, permitiendo definir una función potencial de velocidad ϕ, tal que $\vec{V} = \nabla\phi$.
- Ser incompresible: la continuidad del flujo exige que $\nabla \cdot \vec{V} = 0$, por lo tanto, la función potencial satisface la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2\phi = 0 \tag{8}$$

Este tipo de flujo se emplea frecuentemente en aerodinámica, en el estudio de perfiles aerodinámicos y en modelos de celdas Hele-Shaw con condiciones ideales [6].

Creeping Motion

El Creeping Motion se refiere al flujo de fluidos muy viscosos o de velocidades extremadamente bajas.

Se caracteriza por:

- Tener un número de Reynolds muy bajo: $Re < 1$, lo que indica que los efectos viscosos dominan sobre los inerciales.
- Ser gobernado por las ecuaciones de Stokes: al despreciarse los términos de inercia, las ecuaciones de Navier–Stokes se reducen a:

$$-\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{f} = 0 \tag{9}$$

  Donde:

  ∇p: Gradiente de presión

  μ: Viscosidad dinámica del fluido

  $\nabla^2 \vec{V}$: Operador diferencial de la divergencia del gradiente de velocidad

  $\vec{f}$: Fuerza externa por unidad de volumen que actúa sobre el fluido

- Ser típicamente estacionario y lineal: no depende del tiempo ni presenta turbulencias.

Este modelo es fundamental para la caracterización de flujos en dominios confinados donde las velocidades son bajas [11].

Perfil de velocidades

Para el flujo laminar entre las placas, se tiene la siguiente ecuación para la velocidad u en función de la posición y, como lo demuestra White [3]:

$$u = u_{max}\left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right) \tag{10}$$

Donde u_{max} representa la velocidad máxima, y se define también por la siguiente expresión en función de la caída de presión ΔP, la altura h entre las placas, la viscosidad dinámica μ, y la longitud L, como lo demuestra Castrellón [19]:

$$u_{max} = \frac{h^2 * \Delta P}{2 * \mu * L} \tag{11}$$

Otra forma de expresar la velocidad u es:

$$u = \frac{\Delta P * (h^2 - y^2)}{2 * \mu * L} \tag{12}$$

- Teniendo en cuenta que el largo L y el ancho b de las placas debería ser mayor a la altura $2h$ que separa las placas.
- La velocidad presentada en la dirección y, v, se podría analizarlas como nulas mientras que las demás u y w, no.

Caída de presión

En condiciones de flujo laminar entre dos superficies planas y paralelas, la caída de presión (ΔP) a lo largo de una distancia L se calcula con la ecuación, como lo demuestra White [3]:

$$\Delta P = \frac{12 * \mu * Q * L}{h^3} \tag{13}$$

Numero de Reynolds

Para el cálculo del número de Reynolds entre dos placas, es suficiente utilizar el diámetro hidráulico. En el caso de placas paralelas donde $L > h$ y $b > h$, el diámetro hidráulico D_h se define como:

$$D_h = 4h \tag{14}$$

El número de Reynolds, Re, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho * u_{max} * D_h}{\mu} \tag{15}$$

1.3.8 Introducción al estudio del flujo en perfiles aerodinámicos

l análisis del flujo alrededor de perfiles aerodinámicos tiene una gran relevancia dentro de la ingeniería mecánica, ya que permite estudiar fenómenos clave como la generación de sustentación y arrastre, la evolución de la capa límite, y la estabilidad del flujo. Un perfil aerodinámico es una forma diseñada para generar una distribución de presiones específica cuando un fluido fluye a su alrededor, generando fuerza útil, como la sustentación en las alas de una aeronave, como mencionan los estudios [6].

Desde el enfoque teórico, el flujo alrededor de un perfil puede ser descrito por el flujo potencial, una simplificación válida en fluidos incompresibles e irrotacionales, donde las ecuaciones de Navier–Stokes o Euler se simplifican a la ecuación de Laplace hasta convertirse en la ecuación de Laplace para el potencial de velocidad, de acuerdo a [3]. Este modelo permite obtener soluciones analíticas aproximadas.

El rendimiento aerodinámico del perfil está fuertemente influenciado por el ángulo de ataque, definido como la inclinación entre la cuerda del perfil y la dirección del flujo incidente. Esta inclinación modifica la forma en que el fluido circula sobre el perfil, alterando la distribución de presiones en su superficie. se genera una fuerza de sustentación, cuya explicación se puede fundamentar en el principio de Bernoulli: en un flujo ideal sin viscosidad, un aumento en la velocidad del fluido implica una disminución de presión, y viceversa. Así, en la cara superior del perfil (extradós), donde el flujo es más rápido, la presión es más baja; mientras que en la inferior (intradós), con menor velocidad, la presión es mayor. Esta diferencia de presiones es la que produce la sustentación, como mencionan los estudios [6].

Para complementar el análisis teórico, se han desarrollado métodos experimentales y numéricos. Los dispositivos como la celda de Hele-Shaw permiten visualizar el flujo en configuraciones bidimensionales, por otro lado, herramientas numéricas como la dinámica de fluidos computacional (CFD) permiten simular con precisión el comportamiento del flujo resolviendo las ecuaciones de Navier–Stokes en geometrías complejas. Estas metodologías, combinadas, son fundamentales para evaluar cómo la forma del perfil, la viscosidad del fluido, la velocidad del flujo y el ángulo de ataque influyen en su desempeño aerodinámico, de acuerdo a [7].

- **Perfiles aerodinámicos**

Los perfiles NACA (del Comité Nacional de Asesoría para la Aeronáutica de Estados Unidos) se diseñaron para estandarizar las formas de los perfiles alares y facilitar la selección de un perfil adecuado para aplicaciones específicas. La composición de estos perfiles aerodinámicos se constituye de la siguiente manera, como mencionan los estudios [20] y como se muestra en la Fig 15.:

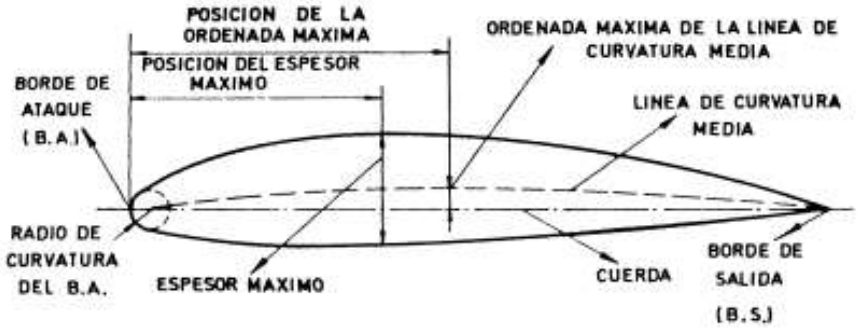


Fig 15. Composición general de los perfiles aerodinámicos NACA [20].

Cuerda: Segmento recto que une el borde de ataque con el de salida. Es una medida clave en la geometría del perfil [20].

Línea de curvatura media: Línea equidistante entre extradós e intradós. Define la curvatura del perfil: positiva si va por encima de la cuerda, negativa si va por debajo [20].

Ordenada máxima: Máxima distancia entre la cuerda y la línea de curvatura media. Su valor y posición influyen en la forma del perfil [20].

Extradós: Es la cara superior de un perfil aerodinámico o de una estructura curva, como un ala o un arco. Es la parte que está expuesta al flujo de aire superior [20].

Espesor y su distribución: Determinan el grosor del perfil. El espesor máximo y su ubicación se expresan en % de la cuerda, variando entre 3% y 24% [20].

Radio del borde de ataque: Define la curvatura en la zona frontal del perfil mediante un círculo tangente a extradós e intradós [20].

Ángulo de ataque: Ángulo entre la cuerda y el flujo libre. Afecta directamente la generación de sustentación Fig 16. y según [20].

Sustentación: Fuerza perpendicular al flujo libre que mantiene al perfil en vuelo [20].

Resistencia: Fuerza paralela al flujo libre que se opone al movimiento del perfil, como se muestra en la Fig 16. y según [20].



Fig 16. Composición general de los perfiles aerodinámicos NACA [20].

Los perfiles NACA se clasifican en varias series según sus características geométricas y aplicaciones típicas:

- **Serie 4 dígitos:** Representa perfiles con geometría sencilla y curvatura suave. Son apropiados para aplicaciones de baja velocidad, donde no se requiere un diseño aerodinámico complejo, según [20].
- **Serie 5 dígitos:** Están diseñados para mantener una buena capacidad de sustentación en un rango más amplio de ángulos de ataque, lo que los hace adecuados para condiciones operativas más exigentes, según [20].
- **Serie 6 dígitos y superiores:** Estas series incorporan mejoras significativas en el diseño, como la optimización de la distribución de presión a lo largo del perfil, permitiendo un mejor rendimiento aerodinámico, especialmente en aplicaciones donde se busca reducir la resistencia y controlar el flujo laminar según, [20].

1.3.9 Herramientas especializadas simulación por CFD

Para la validación numérica de los resultados experimentales se recurrió a la simulación por Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). En este campo, existen diversas herramientas especializadas, entre las que destacan:

- **OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation)**

De acuerdo a [21], OpenFOAM es la principal plataforma de CFD de código abierto (open-source). Se distribuye como una librería en C++, lo que le otorga una flexibilidad y capacidad de personalización inigualables. Permite a los investigadores implementar modelos y solucionadores propios, siendo una herramienta sumamente poderosa para la investigación y el desarrollo de nuevas metodologías en CFD sin costos de licencia.

- **STAR-CCM+ (Siemens)**

Como lo demuestran [22], STAR-CCM es el software comercial de Siemens que se distingue por su flujo de trabajo totalmente integrado en una única interfaz, desde el CAD hasta el análisis. Es especialmente reconocido por sus potentes y automatizadas capacidades de mallado, como el uso de mallas poliédricas, y su enfoque en la simulación multifísica, permitiendo explorar sistemáticamente variantes de diseño.

- **COMSOL Multiphysics**

Plataforma de simulación cuyo principal diferenciador es su capacidad nativa para acoplar fenómenos físicos diversos. Aunque incluye un módulo de CFD, su fortaleza radica en resolver de manera simultánea la interacción del flujo de fluidos con análisis estructural, electromagnético o transferencia de calor, todo dentro de un mismo entorno unificado, esto de acuerdo a [23].

- **Autodesk CFD**

Software de simulación de fluidos y análisis térmico enfocado en la accesibilidad y la integración directa con herramientas de diseño CAD como Inventor y Fusion 360. Está orientado a ingenieros y diseñadores para realizar análisis rápidos y comparativos durante las primeras etapas del desarrollo de un producto, facilitando la toma de decisiones de diseño, eso según [24].

- **ANSYS Fluent**

Como lo demuestra [24], ANSYS Fluent es una herramienta de simulación numérica ampliamente utilizada en ingeniería para simular el comportamiento de los fluidos a través del método de volúmenes finitos. Esta plataforma permite resolver, con alta precisión, las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos, incluyendo las de Navier-Stokes, continuidad, energía y otras ecuaciones de transporte, lo que la convierte en una aliada clave en el estudio de fenómenos como el flujo sobre perfiles aerodinámicos.

El proceso de simulación en ANSYS CFD involucra varias etapas como se muestra la siguiente figura:

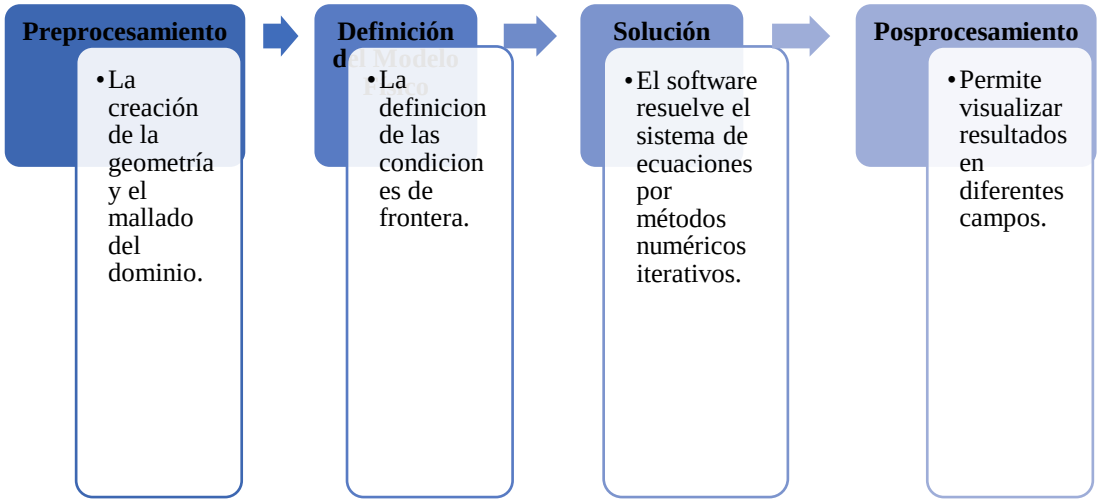


Fig 17. Diagrama de proceso de simulación en ANSYS CFD.

Una de las ventajas principales de ANSYS Fluent, el módulo especializado en dinámica de fluidos, es su capacidad de adaptarse a distintas escalas y condiciones de simulación, desde flujos internos en tuberías hasta análisis externos sobre alas y cuerpos sumergidos. En aplicaciones aerodinámicas, ANSYS ofrece la capacidad de calcular de forma detallada la distribución de presión en un perfil, además de determinar los coeficientes asociados a la sustentación y al arrastre. También permite identificar zonas importantes del flujo como áreas de recirculación o la formación de estelas detrás del cuerpo, de acuerdo a [24].

Además, como lo menciona en el estudio de [24] el contraste entre los resultados obtenidos por simulación en ANSYS y los datos recolectados de manera experimental (por ejemplo, mediante el uso del dispositivo de Hele-Shaw) permite validar modelos y afinar los parámetros de simulación. Esta sinergia entre simulación y experimentación fortalece la confiabilidad de los resultados en aplicaciones reales de diseño y análisis en ingeniería mecánica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Analizar el comportamiento del flujo de fluidos en perfiles aerodinámicos utilizando un dispositivo de Hele-Shaw, con la finalidad de obtener visualizaciones experimentales que permitan una mejor comprensión de los fenómenos asociados al flujo.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar técnicas y dispositivos de visualización de fluidos para el análisis experimental de perfiles aerodinámicos.
- Diseñar y construir un dispositivo de Hele-Shaw que facilite la visualización del flujo de fluidos en diferentes configuraciones de perfiles aerodinámicos.
- Realizar pruebas experimentales para visualizar el flujo de fluidos en perfiles aerodinámicos, con el fin de evaluar su comportamiento y comparar los resultados obtenidos con simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD).

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Descripción de metodología

2.1.1 Revisión bibliográfica

Se realizará una investigación documental para identificar las mejores técnicas y dispositivos de visualización de flujo, centrándose en el uso del dispositivo de Hele-Shaw en perfiles aerodinámicos.

Tipo de investigación: **Investigación documental.**

2.1.2 Diseño y construcción del prototipo de Hele-Shaw

Con base en la información obtenida en la revisión bibliográfica, se diseñará un prototipo específico de dispositivo Hele-Shaw adaptado para el análisis de perfiles aerodinámicos. Este diseño incluirá la selección de materiales y configuraciones de perfiles aerodinámicos representativos.

Tipo de investigación: **Investigación experimental.**

2.1.3 Realización de pruebas experimentales

Se realizarán experimentos con diferentes configuraciones de perfiles aerodinámicos utilizando el dispositivo de Hele-Shaw. Estas pruebas permitirán observar y analizar los patrones de flujo.

Tipo de investigación: **Investigación experimental.**

2.1.4 Simulaciones de CFD para validación

Paralelamente, se llevarán a cabo simulaciones CFD de los perfiles aerodinámicos experimentados. Los resultados obtenidos en las simulaciones se compararán con los datos experimentales para validar y ajustar los modelos.

Tipo de investigación: **Investigación comparativa.**

2.1.5 Análisis de los resultados

Se analizarán los datos obtenidos en las pruebas experimentales y simulaciones, comparando los comportamientos observados para mejorar la comprensión de los fenómenos de flujo en perfiles aerodinámicos.

Tipo de investigación: **Investigación analítica.**

2.2 Criterios de diseño y construcción

- **Criterios específicos**

El diseño y la construcción del dispositivo Hele-Shaw sugirieron criterios específicos para garantizar su funcionalidad y su precisión en este análisis experimental, teniendo en cuenta las condiciones necesarias para representar de manera adecuada el flujo de fluidos en un entorno controlado, como se muestra en la Fig 18.:

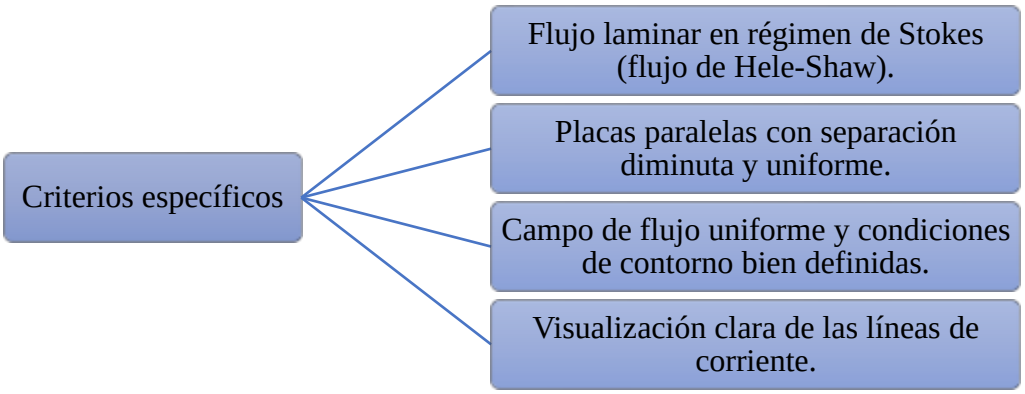


Fig 18. Diagrama de criterios específicos.

En síntesis, los criterios específicos aseguran que el dispositivo opere en las condiciones físicas ideales (flujo laminar, bidimensional y estacionario) y cuente con los medios necesarios de observación. Solo cumpliendo estos criterios primordiales es posible que la celda de Hele-Shaw reproduzca fielmente el comportamiento teórico de un flujo potencial alrededor de cuerpos aerodinámicos, proporcionando resultados experimentales confiables.

- **Criterios secundarios**

Además de los criterios primarios anteriores, se definieron criterios secundarios orientados a aspectos de seguridad, economía, ergonomía y flexibilidad del diseño.

Estos criterios, si bien no afectan directamente la física fundamental del experimento, son importantes para asegurar que el dispositivo sea práctico, seguro y capaz de cumplir múltiples propósitos en el laboratorio. A continuación, en la Fig 19. se enumeran los criterios secundarios más relevantes:

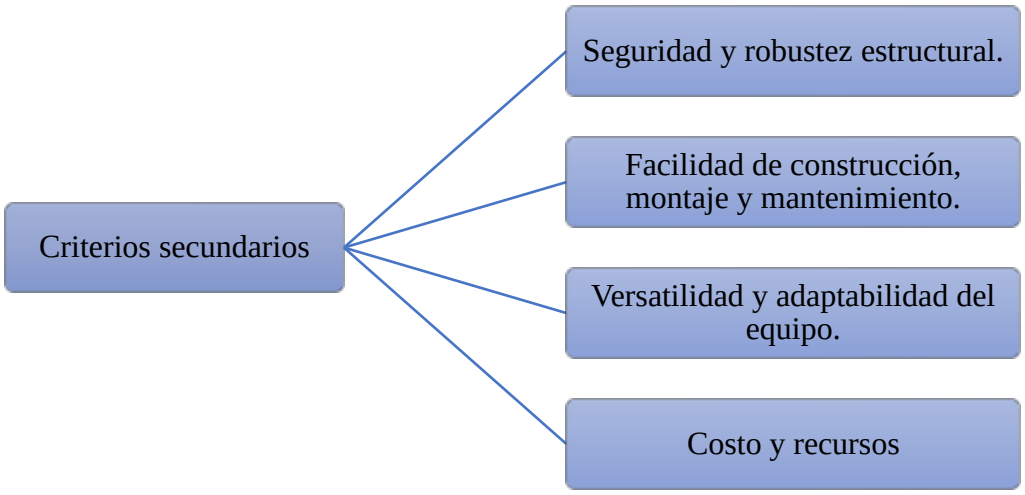


Fig 19. Diagrama de criterios secundarios.

Considerar estos elementos son esenciales para garantizar el correcto funcionamiento.

2.3 Diseño y construcción del primer prototipo Hele-Shaw

2.3.1 Consideraciones de diseño y construcción del primer prototipo

El diseño del prototipo se basó en la observación de prácticas similares documentadas en videos académicos, adoptando las dimensiones y características necesarias para el estudio de perfiles específicos. A continuación, se detallan los aspectos clave de las decisiones de diseño:

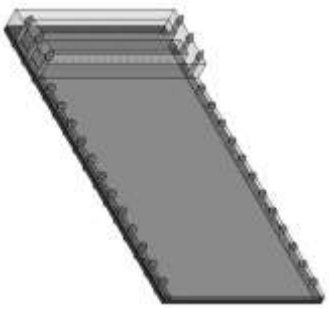


Fig 20. Diseño del primer prototipo Hele Shaw.

Estructura de las placas

- **Placa superior.**

Estanque principal: Almacena el agua que va a circular entre las placas, con un volumen calculado para mantener un flujo constante y uniforme.

Estanque de tinte: Permite inyectar fluido coloreado de manera controlada para visualizar las líneas de corriente y patrones de flujo.

- **Placa inferior**

Orificios de salida: Estos orificios se encuentran en la parte inferior de la placa facilitando el drenaje de salida de fluido, evitando acumulaciones que puedan alterar el régimen laminar.

A continuación en la TABLA I, se muestra los datos técnicos del primer prototipo Helle-Shaw.

TABLA I

DATOS TÉCNICOS DEL PROTOTIPO HELLE-SHAW

Datos técnicos del prototipo Helle-Shaw.	
Espacio de visualización (largo)	480 mm
Espacio de visualización (ancho)	450 mm
Espesor entre placas	2 mm

- **Selección de materiales**

Materiales de las placas: Este material debe poseer varias características primordiales, entre ellas tenemos: transparencia, rigidez, maquinabilidad.

Para la selección de material se tomará en cuenta lo mencionado anteriormente, cada característica será calificada en una escala de 1 a 3, siendo 1: Mala; 2: Regular, 3: Buena. A continuación, se presenta la TABLA II, la cual resume los criterios de selección de material de placas utilizados en el proceso de diseño. Estos criterios consideran aspectos como propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, facilidad

de fabricación y costo, con el fin de asegurar un desempeño óptimo del componente en su entorno de trabajo.

TABLA II

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIAL DE PLACAS

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIAL DE PLACAS					
Material	Óptica	Rigidez	Maquinabilidad	Acceso	Costo
Acrílico	3	2	3	3	2
Vidrio	3	3	1	2	3
Policarbonato	2	3	2	2	2

Separación entre placas: Esta separación se encuentra calibrada para cumplir con la condición del número de Reynolds, ya que esta afectara directamente en la condición de flujo laminar.

Este prototipo tiene características principales las cuales nos ayudó a determinar valores necesarios para el funcionamiento adecuado y legible del mismo. Entre las características más importantes tenemos la separación entre placas (h), esta separación fue primordial para el cumplimiento del número de Reynolds en placas, a su vez este nos ayuda a determinar caudales necesarios para el ingreso del fluido.

2.3.2 Determinación del Número de Reynolds para Flujo entre Placas

En el análisis del flujo entre placas paralelas, se considerará un régimen laminar caracterizado por un número de Reynolds menor que la unidad ($Re < 1$), Esta condición obedece a la naturaleza del fluido y a las bajas velocidades implicadas en el sistema, lo que asegura un comportamiento estable y predecible del flujo.

Bajo estas premisas, y considerando las condiciones específicas del experimento, se disponen los siguientes datos para el cálculo del número de Reynolds en el dispositivo:

Agua

Densidad: $\rho = 1000\ \frac{kg}{m^3}$

Viscosidad: $\mu = 0.001\ Pa * s$

- Tablero de visualización

Largo: $l = 50\ cm$

Ancho: $a = 40\ cm$

Separación: $h = 2\ mm$

En base a la ecuación para determinar Reynolds, despejamos la velocidad y el caudal necesario para su funcionamiento.

$$Re = \frac{\rho * velocidad * h}{\mu}$$

$$velocidad = \frac{Re * \mu}{\rho * h} = \frac{1 * 0.001Pa * s}{1000\frac{kg}{m^3} * 0.002m} = 5 * 10^{-4}\frac{m}{s}$$

$$velocidad = (5 * 10^{-4})\frac{m}{s}$$

Determinación del caudal necesario en base a la velocidad determinada:

$$Q_{entrada} = velocidad * l * h = 5 * 10^{-4}\frac{m}{s} * 0.50m * 0.002m$$

$$Q_{entrada} = (5 * 10^{-7})\frac{m^3}{s}$$

Para este cálculo se consideró la sección más extensa del área de visualización del dispositivo, ya que representa el tramo más crítico en el análisis del flujo. En cuanto al comportamiento del fluido en las tuberías, se establece que, al obtenerse un número de Reynolds inferior a 2000, el régimen de flujo es clasificado como laminar, condición esencial para garantizar una circulación estable y predecible dentro del sistema.

$Re < 2000$, Flujo laminar.

Datos conocidos:

Diámetro: $d = 0.006\ m$

Entradas: $e = 4$

Determinamos el caudal individual para cada entrada.

$$Q_{individual} = \frac{Q_{entrada}}{e} = \frac{(5 * 10^{-7})\frac{m^3}{s}}{4}$$

$$Q_{individual} = (1.25 * 10^{-7})\frac{m^3}{s}$$

$$área = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * d0.006^2}{4}$$

$$área = (2.827 * 10^{-5})m^2$$

$$V_{individual} = \frac{Q_{individual}}{área} = \frac{(1.25 * 10^{-7})\frac{m^3}{s}}{(2.827 * 10^{-5})m^2}$$

$$V_{individual} = 0.004\frac{m}{s}$$

Determinada la velocidad individual de cada tubería se determina el número de Reynolds, tomando en cuenta que este debe poseer un flujo laminar:

$$Re = \frac{\rho * V_{individual} * diametro}{\mu}$$

$$Re = \frac{1000\ \frac{kg}{m^3} * 0.004\frac{m}{s} * 0.006\ m}{0.001\ Pa * s}$$

$$\boldsymbol{Re = 26.53}$$

El valor calculado del número de Reynolds permite confirmar que el flujo en el interior del dispositivo se mantiene dentro del régimen laminar.

En cuanto al caudal, si bien se ha estimado un valor teórico inicial, este será ajustado ya sea duplicando o triplicando su magnitud para compensar posibles pérdidas que puedan generarse a lo largo del sistema, especialmente en tuberías, conexiones y acoplamientos. Además, se ha identificado que el ángulo de inclinación del dispositivo incide directamente sobre la velocidad del fluido y, por ende, sobre el caudal necesario para un funcionamiento adecuado.

El caudal final a utilizar será definido con base en los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas en el prototipo. Dicho valor será posteriormente

recalculado para asegurar que se mantenga dentro del rango requerido para conservar el flujo laminar según los criterios del número de Reynolds.

Con los valores ajustados de caudal establecidos para el correcto funcionamiento del dispositivo, se procedió a la fase experimental inicial del prototipo. Durante estas pruebas se detectaron diversas problemáticas, que serán redactas en el siguiente aparatado.

2.3.3 Problemáticas y Soluciones

- **Control de la Salida del Fluido**

El diseño original del prototipo presentaba una apertura parcial en la sección inferior, lo que generaba un flujo irregular del fluido. Esta condición impedía la distribución uniforme del agua entre las placas, afectando la eficiencia del sistema.

Solución.

Analizado esta problemática se optó por sellar completamente la sección inferior incorporando empaque adicional, eliminando así fugas de fluido. Además, se perforaron orificios de salida en la base del prototipo, diseñados para permitir un flujo de fluido controlado y continuo. Estas modificaciones no solo resolvieron el problema de las fugas desiguales, sino que también mejoraron la distribución del agua entre las placas, asegurando un funcionamiento más eficiente del sistema, como se muestra en la Fig 21.

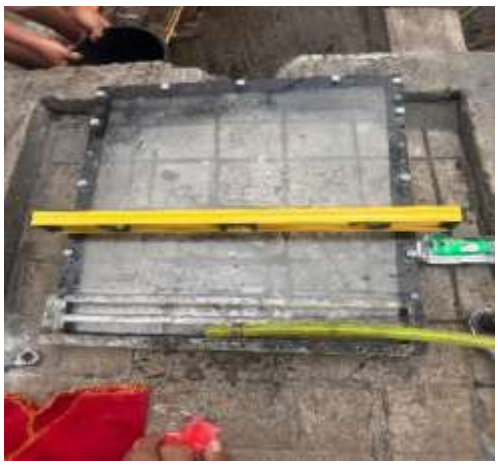


Fig 21. Fotografía del control de la salida del fluido.

- **Distribución del Fluido Principal e Inyección de Tinta**

El sistema inicial del prototipo permitía el ingreso generalizado de fluidos, los cuales se almacenaban en un estanque interno y posteriormente circulaban a través de las placas. Sin embargo, se identificó una distribución irregular del líquido durante su recorrido. Gracias a la transparencia de las placas, fue posible observar que en ciertas zonas del área de visualización el fluido no circulaba de manera eficiente o incluso presentaba espacios vacíos, lo que impedía un llenado homogéneo en la sección designada para su observación.

Esta misma problemática se manifestó durante la inyección de tinta, ya que el mecanismo de ingreso era similar al del fluido principal. Como consecuencia, se generó un consumo excesivo de tinta sin una distribución adecuada. El flujo irregular del fluido principal afectó directamente la redistribución de la tinta, ya que esta no se mezclaba correctamente y, en cambio, se acumulaba en zonas donde el fluido principal presentaba discontinuidades. Esto provocó la formación de concentraciones localizadas de tinta en uno o varios puntos del área de visualización, comprometiendo la funcionalidad del sistema, como se muestra en la Fig 22.



Fig 22. Fotografía de la inyección de tinta en distribución abierta.

Solución.

Para resolver estas limitaciones, se implementó un rediseño que incluyó el sellado completo de los estanques tanto de tinta como de agua. Esta modificación permitió controlar individualmente los ingresos de cada fluido, asegurando una distribución equitativa y un llenado uniforme en el área de visualización. Además, se incorporaron cuatro mangueras de 8 mm de diámetro exterior, cuyas dimensiones y disposición se

basaron en estudios previos de dispositivos con características similares, adaptándose a las especificaciones del prototipo.

Respecto al ingreso de tinta, se estableció una única entrada ubicada en la parte central del estanque. Esta configuración facilitó una dispersión homogénea de la tinta dentro del volumen disponible, permitiendo que se distribuyera de manera uniforme hacia las perforaciones de salida. Con estas modificaciones, se logró optimizar el flujo tanto del fluido principal como de la tinta, eliminando las acumulaciones no deseadas y mejorando la eficiencia general del sistema, como se muestra en la Fig 23.



Fig 23. Fotografía de la inyección de tinta en distribución cerrada.

- **Sellado y Prevención de Fugas**

Durante las pruebas experimentales se detectaron múltiples puntos de fuga en el sistema, principalmente asociados al diseño del empaque de separación. El empaque original, conformado por secciones independientes, presentaba deficiencias en su unión, especialmente en las esquinas donde los espacios entre piezas permitían la filtración significativa de agua. Adicionalmente, se identificaron pérdidas de fluido en las conexiones de los pernos de ajuste y en los puntos de acceso destinados a la entrada de tinta y agua.

Solución.

Para solventar estos problemas de estanqueidad, se implementaron varias mejoras técnicas. En primer lugar, se reemplazó el empaque original por uno fabricado en papel Victoria, material comúnmente empleado en empaquetaduras de motores eléctricos por sus propiedades de resistencia y sellado, como se muestra en la Fig 24. Este nuevo

empaque se diseñó como una pieza monolítica, eliminando las uniones internas que generaban fugas. Los cortes para los pernos se realizaron con mayor precisión dimensional y se complementaron con arandelas que mejoraron la distribución de la presión durante el apriete.

Como medida complementaria, se modificó el ancho de los empaques y se optimizó el sistema de sujeción. La incorporación de arandelas permitió ejercer una fuerza de compresión más uniforme sobre toda la superficie del empaque, evitando deformaciones localizadas y garantizando un sellado efectivo en los puntos críticos. Estas modificaciones demostraron ser efectivas al eliminar prácticamente en su totalidad las fugas observadas inicialmente en el prototipo.



Fig 24. Fotografía de empaque en papel victoria.

- **Estabilización del Ángulo de Inclinación**

El dispositivo incorporaba un sistema de inclinación variable que permitía regular la velocidad del fluido. Sin embargo, durante las pruebas iniciales se evidenció que la falta de un ángulo óptimo predeterminado afectaba significativamente el flujo interno, generando perturbaciones en la circulación del líquido. Esta condición inadecuada de operación comprometía el rendimiento general del sistema al no alcanzarse las condiciones ideales de flujo.

Solución.

Para resolver esta limitación, se desarrolló un soporte angular ajustable que permite modificar con precisión la inclinación del dispositivo, como se muestra en la Fig 25. Mediante pruebas experimentales sistemáticas, se determinó el rango de ángulos que

garantiza un flujo laminar estable sin afectar la funcionalidad del equipo. El soporte diseñado ofrece la ventaja adicional de adaptarse a diferentes condiciones operativas, manteniendo siempre la inclinación óptima que favorece el movimiento uniforme del fluido a través del sistema.



Fig 25. Fotografía de la estabilización del ángulo de inclinación.

- **Variación del caudal**

Durante las pruebas experimentales realizadas después de implementar las modificaciones iniciales, se observó una inconsistencia en el caudal de entrada del agua. Estas variaciones se manifestaban como disminuciones repentinas en el flujo, lo cual afectaba directamente el funcionamiento del área de visualización. Cuando el caudal de entrada disminuía, la velocidad de salida del fluido superaba la capacidad de reposición, generando vacíos parciales y la formación de bolsas de aire en la zona de observación. Este fenómeno comprometía la funcionalidad del dispositivo y la precisión de las mediciones.

Solución

Para solucionar este problema, se implementó un sistema de control de flujo integrado por dos componentes principales. En primer lugar, se instaló una válvula de regulación aguas, permitiendo ajustar manualmente el flujo cuando éste excedía los parámetros deseados. Como elemento de medición y control, se integró un caudalímetro digital en la línea de entrada, el cual proporciona lecturas precisas en tiempo real del flujo circulante. Este instrumento permite realizar ajustes finos al sistema, asegurando que el caudal se mantenga dentro de los valores óptimos determinados experimentalmente.

$$Q_{requerido} = 6.1 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

La altura a la que reposará el dispositivo será de 1 metro con respecto al punto donde se ubicará el dispositivo.

$$h = 1m$$

Analizando la disposición de los materiales seleccionados se determinó:

Manguera de alimentación ½ pulgada

$$d_m = 11.5\, mm$$

$$l_m = 1.10\, m$$

Determinación de perdidas por fricción en la maguera:

$$v_1 = \frac{Q_{requerido}}{\pi * \frac{d_m^2}{4}} = 0.587 \frac{m}{s}$$

$$f = 0.02$$

$$Hf_{manguera} = f * \left(\frac{l_m}{d_m}\right) * \left(\frac{v_1}{2 * g}\right) = 0.034\, m$$

Determinamos la perdida en el sistema de distribución:

Datos del sistema de distribución:

$$d_t = 12.7\, mm$$

$$l_t = 1.31\, m$$

$$codos = 4$$

$$salidas\ borde\ agudo = 4$$

$$v_2 = \frac{Q_{requerido}}{\pi * \frac{d_t^2}{4}} = 0.482 \frac{m}{s}$$

Coeficientes de perdida:

$$codo\ 45° \approx K_1 = 0.4$$

$$salida\ borde\ agudo \approx K_2 = 0.5$$

Sumatoria de los coeficientes de perdida:

$$K_{LT} = (codos * K_1) + (Salidas * K_2) = 5.2$$

Pérdida total en el sistema de distribución:

$$Hf_{tuberia} = f * \left(\frac{l_m}{d_m} + K_{LT}\right) * \left(\frac{v_1}{2 * g}\right) = 0.026\ m$$

Altura total:

$$H = h + Hf_{manguera} + Hf_{tuberia} = 1.059m$$

2.3.4 Distribución similar del caudal

Tras una presentación al personal de ingenieros de la FICM, se nos dio la recomendación de la distribución equitativa del caudal en cada uno de los ingresos del fluido, ya que esté afectaba directamente al flujo laminar, debido a que este tiene que distribuirse simultáneamente en toda el área de visualización, en nuestro prototipo esto no sucedía de forma que se decidió analizar de manera experimental y bajo simulaciones el porcentaje de distribución en cada una de las salidas de fluido y seleccionar un sistema que nos dé como resultado la uniformidad del caudal para el dispositivo.

Obteniendo los siguientes resultados:

- **Sistema lineal**



Fig 26. Experimentación de distribución de caudal del sistema lineal.

En la Fig 26) se muestra el sistema lineal que está conformado por un tubo PVC de ½ pulgada, en uno de sus extremos tiene el acople para unión con una manguera de la misma media, en su otro extremo se tiene un tapón exterior. En su largo posee 3 salidas de diámetro 8mm.

Análisis experimental

Para el análisis experimental se tomó el tiempo de llenado de cada una de las salidas para un volumen de 1000 mL, luego se midió el tiempo de llenado de la entrada principal, esta con el fin de determinar el caudal de ingreso, en la TABLA III se muestra la toma de resultados.

Toma de datos:

TABLA III

TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA LINEAL

TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES				
	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo 3 (s)	Tiempo promedio (s)
Salida 1	28,17	28,45	27,55	28,06
Salida 2	20,68	21,22	20,85	20,92
Salida 3	12,79	13,05	12,98	12,94
Entrada	6,31	6,14	6,2	6,22

Determinación de caudales individuales:

Salida 1:

$$Q_{salida1} = \frac{volumen}{tiempo\ 1} = \frac{1000\ mL}{28.06\ s} = (3.564 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Salida 2:

$$Q_{salida2} = \frac{volumen}{tiempo\ 2} = \frac{1000\ mL}{20.92\ s} = (4.78 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Salida 3:

$$Q_{salida3} = \frac{volumen}{tiempo\ 3} = \frac{1000\ mL}{12.94\ s} = (7.728 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Entrada:

$$Q_{entrada} = \frac{volumen}{tiempo\ entrada} = \frac{1000\ mL}{6.22\ s} = (1.608 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}$$

Análisis del porcentaje en cada salida:

Salida 1:

$$\%Q_{salida1} = \frac{Q_{salida1} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(3.564 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.608 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 22.174\%$$

Salida 2:

$$\%Q_{salida2} = \frac{Q_{salida2} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(4.78 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.608 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 29.742\%$$

Salida 3:

$$\%Q_{salida3} = \frac{Q_{salida3} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(7.728 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.608 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 48.084\%$$

Porcentaje total:

$$\%Q_{entrada} = \%Q_{salida1} + \%Q_{salida2} + \%Q_{salida3}$$

$$\%Q_{entrada} = 22.174\% + 29.742\% + 48.084\%$$

$$\%Q_{entrada} = 100\%$$

Análisis con asistente computacional.

Para este apartado se empleó el software SolidWorks Flow Simulation con el objetivo de realizar el análisis computacional del flujo. Previamente, se desarrolló el modelo de diseño correspondiente, considerando detalladamente las características geométricas y dimensionales de las tuberías involucradas. Para llevar a cabo la simulación, se definió como condición de contorno principal el parámetro de caudal de entrada, el cual permitió evaluar el comportamiento del fluido en el sistema, como se muestra en la Fig 27.

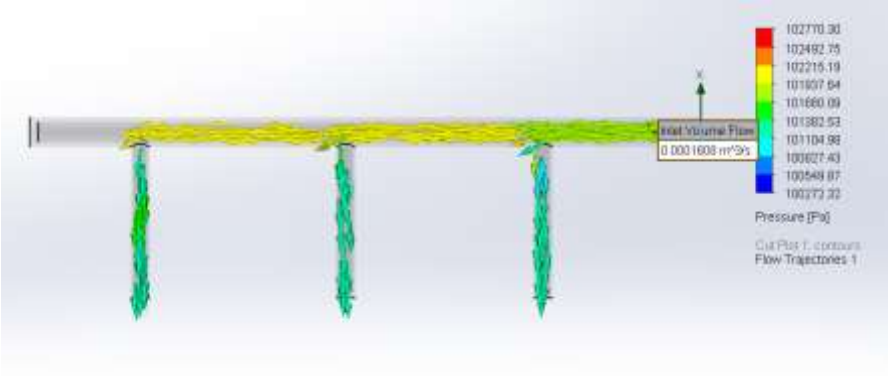


Fig 27. Análisis con asistente computacional de la distribución de caudal del sistema lineal.

Analizado los resultados, se pudo observar valores más exactos con respecto al diseño propuesto, se tiene en cuenta que estos resultados se obtienen tras un cálculo de un diseño perfecto, en el cual no existen fugas de agua, caídas de presión, entre otros.

Resultados del análisis

A continuación, se detallan los resultados obtenidos tras la realización del análisis correspondiente, los cuales permiten evaluar el comportamiento del sistema bajo las condiciones establecidas. Estos resultados constituyen una base fundamental para interpretar el desempeño del diseño propuesto, como se muestra en la Fig 28.

Summary

Goal Name	Unit	Value
SG Volume Flow Rate 2	[m^3/s]	-5.9542e-05
SG Volume Flow Rate 3	[m^3/s]	-5.3864e-05
SG Volume Flow Rate 4	[m^3/s]	-4.7394e-05

Fig 28. Resultados del análisis de la distribución de caudal del sistema lineal.

Interpretación de resultados:

La salida 2 o Rate 2, tiene un caudal 25.6% mayor que la salida 4 o Rate 4.

La variación entre salidas es significativa, lo que indica un desequilibrio en la distribución del flujo.

Observación:

La máquina de Hele Shaw requiere uniformidad en el caudal para mantener un flujo laminar entre las placas. Las diferencias observadas fueron del 22% vs 48% generan perturbaciones y patrones de flujo asimétricos.

Al analizar este diseño se determina que esta variabilidad no es confiable para los experimentos a realizar a continuación ya que estos necesitan condiciones controladas y repetibles.

- **Sistema de T**

En la Fig 29. se muestra el sistema de T que está conformado por un tubo PVC de ½ pulgada, una reducción a tubo de 8mm, división tipo T, y esta a su vez distribuye dos mangueras las cuales en su extremo tiene una T para completar las 4 divisiones necesarias.



Fig 29. Experimentación de distribución de caudal del sistema de T.

Análisis experimental

Para el análisis experimental se tomó el tiempo de llenado de cada una de las salidas para un volumen de 1000 mL, luego se midió el tiempo de llenado de la entrada principal, esta con el fin de determinar el caudal de ingreso, en la TABLA IV se muestra la toma de resultados.

Toma de datos:

TABLA IV

TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA DE T

TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES				
	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo 3 (s)	Tiempo promedio (s)

TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES				
Salida 1	35,36	35,15	35,54	35,35
Salida 2	28	27,8	28,2	28
Salida 3	25,51	25,15	25,49	25,38
Salida 4	35,21	35,54	35,81	35,52
Entrada	7,18	7,45	7,31	7,31

Determinación de caudales individuales:

Salida 1:

$$Q_{salida1} = \frac{volumen}{tiempo\ 1} = \frac{1000\ mL}{35.35\ s} = (2.829 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Salida 2:

$$Q_{salida2} = \frac{volumen}{tiempo\ 2} = \frac{1000\ mL}{28\ s} = (3.571 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Salida 3:

$$Q_{salida3} = \frac{volumen}{tiempo\ 3} = \frac{1000\ mL}{25.38\ s} = (3.94 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Salida 4:

$$Q_{salida3} = \frac{volumen}{tiempo\ 4} = \frac{1000\ mL}{35.52\ s} = (2.84 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Entrada:

$$Q_{entrada} = \frac{volumen}{tiempo\ entrada} = \frac{1000\ mL}{7.587\ s} = (1.318 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}$$

Análisis del porcentaje en cada salida:

Salida 1:

$$\%Q_{salida1} = \frac{Q_{salida1} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(2.829 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.318 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 21.46\%$$

Salida 2:

$$\%Q_{salida2} = \frac{Q_{salida2} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(3.571 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.318 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 27.09\%$$

Salida 3:

$$\%Q_{salida3} = \frac{Q_{salida3} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(3.94 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.318 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 29.89\%$$

Salida 4:

$$\%Q_{salida4} = \frac{Q_{salida4} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(2.84 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.318 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 21.55\%$$

Porcentaje total:

$$\%Q_{entrada} = \%Q_{salida1} + \%Q_{salida2} + \%Q_{salida3}$$

$$\%Q_{entrada} = 21.46\% + 27.09\% + 27.09\% + 21.55\%$$

$$\%Q_{entrada} = 100\%$$

Análisis con asistente computacional.

Se utilizó SolidWorks Flow Simulation para analizar el flujo, basándose en un modelo diseñado previamente con las dimensiones y características de las tuberías. El caudal de entrada se estableció como condición principal para evaluar el comportamiento del fluido, como se muestra en la Fig 30.



Fig 30. Análisis con asistente computacional de la distribución de caudal del sistema de T.

Resultados del análisis

En este apartado se presentan los resultados derivados del análisis realizado, reflejando el comportamiento del modelo ante las condiciones de contorno aplicadas. Esta información es clave para validar la efectividad del diseño y detectar posibles puntos críticos, tal como se puede observar en la Fig 31.

Goal Name	Unit	Value
SG Volume Flow Rate 1	[m^3/s]	-3.3332e-05
SG Volume Flow Rate 2	[m^3/s]	-3.2491e-05
SG Volume Flow Rate 3	[m^3/s]	-3.2678e-05
SG Volume Flow Rate 4	[m^3/s]	-3.3298e-05

Fig 31. Resultados del análisis de la distribución de caudal del sistema de T.

Interpretación de resultados

Para la interpretación de los resultados obtenidos bajo simulación se realizó un cálculo para el porcentaje de variación entre el valor mayor y el valor menor, con el fin de determinar el porcentaje de variación entre el uno y el otro.

$$\frac{3.3332 - 3.2491}{3.29x10^{-5}} x100 = 2.5\%$$

La diferencia entre el caudal más alto y el más bajo es mínima, siendo menor al 3%, esto nos da a conocer que este sistema posee una distribución excelente.

- **Sistema de anillo**

En la Fig 32. se muestra el sistema anillo, este sistema se puso en funcionamiento después de la intervención de un técnico en plomería, esta persona nos supo manifestar que para sistemas de cascadas en los cuales se debe visualizar de manera uniforme la caída de agua se realizaba un anillo de flujo de agua. De esa manera se llegó a la elaboración de un diseño basado en las explicaciones del técnico.



Fig 32. Experimentación de distribución de caudal del sistema de anillo.

Análisis experimental

Este sistema simula un anillo, debido a que su construcción se da en el ingreso en una sección intermedia del sistema, esta reparte en dos direcciones el fluido, a su vez está posee codos de 45° con el fin de reducir la perdida de fluido, en el extremo opuesto al ingreso se tiene las salidas que se conectaran al dispositivo construido, en la TABLA V se muestra la toma de resultados.

Toma de datos:

TABLA V

TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA DE ANILLO

TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES				
	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo 3 (s)	Tiempo promedio (s)
Salida 1	22,63	21,84	22,58	22,35
Salida 2	21,03	21,4	21,25	21,22
Salida 3	18,06	20,1	19,55	19,23
Salida 4	20,45	21,1	20,65	20,73
Entrada	5.25	5.10	5.05	5.205

Determinación de caudales individuales:

Salida 1:

$$Q_{salida1} = \frac{volumen}{tiempo\ 1} = \frac{1000\ mL}{22.35\ s} = (4.684 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Salida 2:

$$Q_{salida2} = \frac{volumen}{tiempo\ 2} = \frac{1000\ mL}{21.22\ s} = (4.713 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Salida 3:

$$Q_{salida3} = \frac{volumen}{tiempo\ 3} = \frac{1000\ mL}{19.23\ s} = (4.943 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Salida 4:

$$Q_{salida4} = \frac{volumen}{tiempo\ 4} = \frac{1000\ mL}{20.73\ s} = (4.824 * 10^{-5})\frac{m^3}{s}$$

Entrada:

$$Q_{entrada} = \frac{volumen}{tiempo\ entrada} = \frac{1000\ mL}{5.205s} = (1.921 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}$$

Análisis del porcentaje en cada salida:

Salida 1:

$$\%Q_{salida1} = \frac{Q_{salida1} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(4.684 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.921 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 24.442\%$$

Salida 2:

$$\%Q_{salida2} = \frac{Q_{salida2} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(4.713 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.921 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 24.591\%$$

Salida 3:

$$\%Q_{salida3} = \frac{Q_{salida3} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(4.943 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.921 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 25.795\%$$

Salida 4:

$$\%Q_{salida4} = \frac{Q_{salida4} * 100}{Q_{entrada}} = \frac{(4.824 * 10^{-5})\frac{m^3}{s} * 100}{(1.921 * 10^{-4})\frac{m^3}{s}} = 25.173\%$$

Porcentaje total:

$$\%Q_{entrada} = \%Q_{salida1} + \%Q_{salida2} + \%Q_{salida3}$$

$$\%Q_{entrada} = 24.442\% + 24.591\% + 25.975\% + 25.173\%$$

$$\%Q_{entrada} = 100\%$$

Análisis con asistente computacional.

Al igual que en los otros análisis realizados, se utilizó el asistente computacional que permitió simular y evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones definidas. Esta herramienta facilitó la interpretación de fenómenos complejos mediante modelos digitales, optimizando tiempos de análisis y mejorando la precisión de los resultados, como se muestra en la Fig 33.

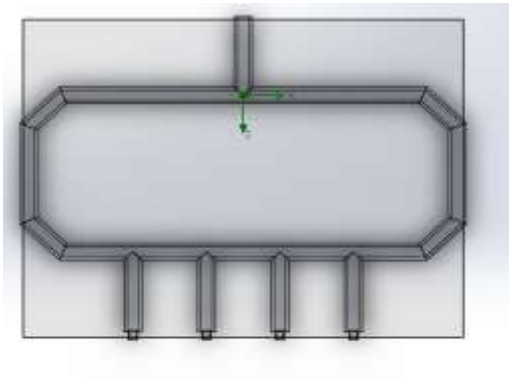


Fig 33. Análisis con asistente computacional de la distribución de caudal del sistema de anillo.

Resultados obtenidos:

Los resultados obtenidos a partir del análisis computacional se exponen a continuación. Estos permiten observar el desempeño del sistema y guiar futuras decisiones técnicas, como se puede observar en la Fig 34.



Goal Name	Unit	Value
SG Volume Flow Rate 1	[m^3/s]	-3.6339e-05
SG Volume Flow Rate 2	[m^3/s]	-3.7503e-05
SG Volume Flow Rate 3	[m^3/s]	-3.7507e-05
SG Volume Flow Rate 4	[m^3/s]	-3.6350e-05

Fig 34. Resultados del análisis de la distribución de caudal del sistema de anillo.

Interpretación de resultados

Se puede observar en los resultados que la salida 2 y 3 tienen caudales casi similares, esto nos indica una excelente uniformidad en estas salidas.

La diferencia entre las salidas 1 y 4, son valores ligeramente bajos en comparación con los valores de las salidas 2 y 3, la diferencia máxima es del 3.1%, lo que sigue siendo un valor aceptable para las condiciones de flujo laminar.

- **Selección del sistema de regulación de caudal.**

Para esta selección se determinaron varios criterios para la selección del sistema, estos criterios fueron tomados según las necesidades del dispositivo, conjuntamente con una comparación de datos porcentuales de variación de las salidas y de ser el caso futuros cambios a realizarse en el dispositivo, como se muestra en la TABLA VI.

TABLA VI

CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE CAUDAL

CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN			
Criterio	Sistema Lineal	Sistema de T	Sistema en Anillo
Uniformidad del caudal	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Pérdidas de presión	Alto Desempeño	Adecuado	Óptimo
Espacio requerido	Adecuado	Óptimo	Limitado
Flexibilidad	Deficiente	Limitado	Alto Desempeño
Complejidad constructiva	Óptimo	Limitado	Adecuado

A continuación, se recopilan en la Tabla VII los resultados de los diferentes sistemas de distribución, permitiendo una evaluación detallada de sus resultados y desempeños.

TABLA VII

COMPARATIVA DE SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

COMPARATIVA DE SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN			
Salidas	Sistema Lineal	Sistema T	Sistema anillo
1	22,17%	21,47%	24,44%
2	29,74%	27,09%	24,59%
3	48,08%	29,89%	25,80%
4		21,55%	25,17%
Total	100,00%	100,00%	100,00%

A continuación, en la Fig 35. se presenta un diagrama comparativo que visualiza de manera gráfica los resultados cuantitativos detallados en la Tabla VII, facilitando así la interpretación y comparación de los datos obtenidos en el análisis.

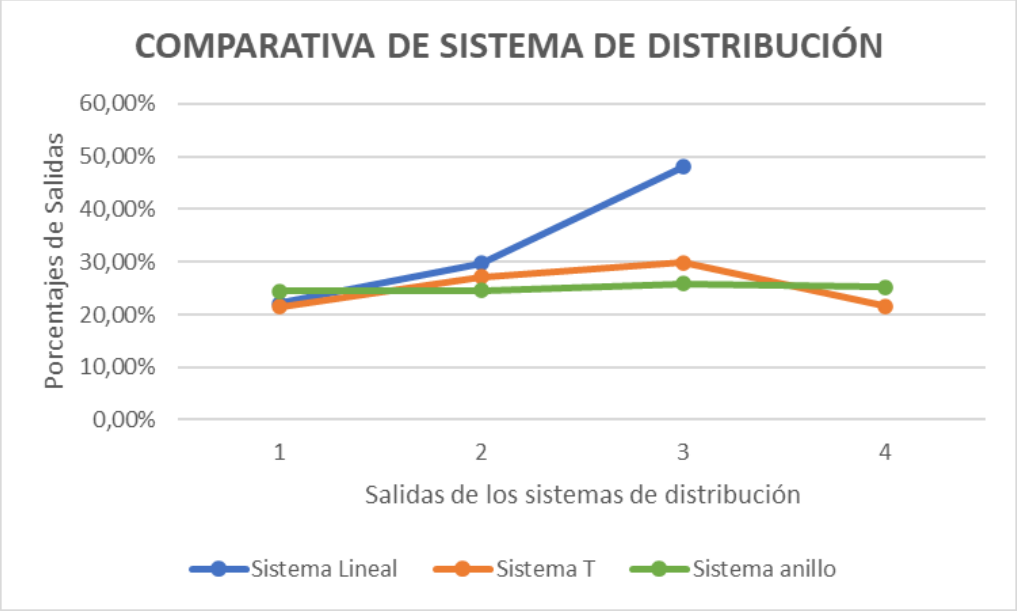


Fig 35. Diagrama de comparativa de sistema de distribución.

Analizando la TABLA VII, se determinó como solución al problema de distribución de caudal similar la construcción del sistema tipo anillo, este tiende a darnos una distribución casi igual en todas sus salidas, y el pequeño error de variación será

ajustado por reguladores de flujo de tipo aguja, debido a que estos reguladores son más precisos en su calibración. De esta manera se recreará la entrada de flujo equitativo en todas sus salidas.

2.3.5 Velocidad de la tinta

Para determinar la velocidad exacta se realizará una aproximación de forma experimental, debido a que es necesaria la practica para poder ver la cantidad de flujo necesaria para una correcta visualización, determinado esto se procede a la determinación a base de cálculos de la velocidad del fluido.

Para este cálculo se tomará en cuenta el valor del caudal requerido, partiendo desde este valor para obtener la razón de mezcla de la tinta con el agua.

$$Q_{requerido} = 6.1 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Datos del sistema de distribución de tinta.

Para la distribución de tinta se incorporó un estanque del cual bajara a través de gravedad el fluido, esta salida se subdivide en 2, luego estas dos se incorporan a un acople de 5 entradas, de las cuales 2 fueron asignadas para entrada, y 3 fueron asignadas para salida.

$$d_t = 4\,mm$$

$$d_i = 1\,mm$$

$$division\ Y = 1$$

$$salidas\ borde\ agudo = 12$$

Definición de la razón de mezcla:

Esta definición se da de forma experimental, de tal manera que el líquido baje a un porcentaje de la velocidad requerida en el dispositivo. En el prototipo actual se está trabajando con un 10% de la velocidad del agua, siendo esta la razón de mezcla que se ocupará.

$$R = 0.1$$

$$Q_{tinta} = R * Q_{requerido} = (6.1 * 10^{-6}) \frac{m^3}{s}$$

$$v_{tinta} = \frac{Q_{tinta}}{\pi * \frac{d_t^2}{4}} = 0.485 \frac{m}{s}$$

Determinada la velocidad de tinta, calculamos si esta se encuentra bajo un flujo laminar;

$$Re = \frac{\rho * v_{tinta * d_t}}{\mu} = 1941.69$$

Trabajando con las especificaciones anteriores del flujo laminar en tuberías, podemos notar que el número de Reynolds de la tinta se encuentra en **Flujo Laminar,** como se aprecia en la Fig 36.

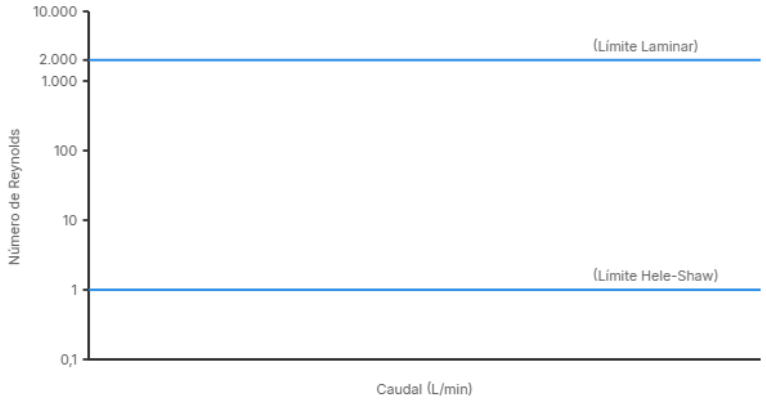


Fig 36. Diagrama de Flujo de numero de Reynolds.

Debido a que tenemos 3 orificios de salida, determinamos el caudal de cada orificio. Este nos servirá para determinar la velocidad de salida en los agujeros de 1 mm de diámetro.

$$Q_{salida} = \frac{Q_{tinta}}{salidas} = (2.033 * 10^{-6}) \frac{m}{s}$$

$$v_{tinta} = \frac{Q_{salida}}{\pi * \frac{d_t^2}{4}} = 2.589 \frac{m}{s}$$

Esta es la velocidad calculada con la que la tinta saldrá a través de los agujeros de 1 mm distribuidos a lo ancho de la sección de visualización del dispositivo.

2.3.6 Altura del recipiente de tinta

Para determinar la altura de esté recipiente se tomó en cuenta que el nivel más bajo será hasta donde desciende las mangueras, que es un valor de 5 cm, también se tomará en cuenta el valor en pérdidas por fricción analizadas en un flujo laminar, de manera que tenemos:

$$l_{tuberia} = 0.5\ m$$

Para determinar el factor de fricción para el flujo laminar se utiliza ecuación:

$$f = \frac{64}{Re} = 0.033$$

Entonces tenemos:

$$h_f = f * \left(\frac{l_{tuberia}}{d}\right) * \left(\frac{{v_{tinta}}^2}{2 * g}\right) = 0.049\ m$$

Perdidas por accesorios:

Para el acople Y tenemos:

$$K = 1$$

Este valor de perdida se establece en cada bifurcación del conector, en este caso son 2 bifurcaciones.

$$h_{accesorios} = 2 * K * \frac{{v_{tinta}}^2}{2 * g} = 0.024\ m$$

Perdida en los agujeros de 1 mm:

Estos agujeros tienen una longitud de 3 mm, la cual recorre desde el depósito de tinta hasta el flujo del agua.

$$l_{agujero} = 3\ mm$$

$$\Delta P = \frac{128 * \mu * Q_{salida} * l_{agujero}}{salidas * \pi * d^4} = 20.711\ Pa$$

$$h_{agujeros} = \frac{\Delta P}{\rho * g} = 0.002\ m$$

Suma de las perdidas calculadas:

$$h_{total} = h_{agujeros} + h_{accesorios} + h_f + 5\ cm = 12.56\ cm$$

Tomando en cuenta este valor determinado, se realizará prácticas para determinar la altura ideal, este valor nos sirve de referencia para saber desde que altura podemos trabajar, este valor no es exacto debido a que en la práctica se puede encontrar otro tipo de perdidas no asumidas en estos cálculos realizados.

2.4 Diseño y construcción del dispositivo de Hele-Shaw

Luego de las pruebas exploratorias con el prototipo inicial, se procedió al diseño detallado y la construcción de un dispositivo de Hele-Shaw de mayor precisión, incorporando mejoras para obtener resultados experimentales de calidad investigativa. El dispositivo final conserva el principio de flujo entre placas paralelas, pero cuenta con un sistema de inyección de tintes más robusto (con múltiples puertos) y una fabricación más cuidadosa para asegurar la uniformidad del flujo y la facilidad de uso en múltiples ensayos.

A continuación, se detallan criterios para el diseño y construcción del dispositivo:

2.4.1 Criterios de diseño del dispositivo Hele-Shaw

El dispositivo se diseñó con dimensiones de 60 cm × 46 cm, medidas que garantizan una visualización óptima del flujo del fluido. El área efectiva de observación es de 50 cm × 40 cm.

En este diseño no se consideró la recirculación del fluido, dado que su reutilización se ve comprometida al mezclarse con la tinta trazadora seleccionada, sustancia empleada para visualizar las líneas de flujo.

- **Estructura y materiales**
  - Base: Fabricada en chapa de acero inoxidable de 1 mm de espesor, soporta las placas de acrílico.
  - Soportes: Perfiles en "L" del mismo material, fijados a la base mediante soldadura por el proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding).

- Fijación: La base incluye orificios perimetrales para pernos de sujeción, así como entradas y salidas para el fluido y la tinta.

- **Componentes de visualización**
  - Dos placas blancas, seleccionadas para mejorar el contraste de las líneas de flujo.
  - Una placa transparente (tipo vidrio) en la parte exterior, que facilita la observación.
  - Mecanismo de apertura: La placa transparente cuenta con un sistema que permite su apertura para modificar el ángulo o el perfil interno del dispositivo.

- **Fabricación**
  - Todos los componentes (base y acrílicos) fueron diseñados y cortados por cortadora láser, asegurando precisión para un ensamblaje adecuado.

- **Sistema de distribución de caudal**
  - Tuberías: Se empleó tubo de PVC de ½ pulgada, equipado con accesorios para garantizar una distribución uniforme del flujo en las salidas.
  - Regulación: Para corregir posibles desigualdades en el caudal, se incorporaron válvulas de regulación de aguja.

- **Visualización del flujo**
  - El dispositivo incluye un estanque interno con una línea de 12 orificios, espaciados cada 3.2 cm, para una correcta visualización de las líneas de flujo.

- **Control del sistema**
  - El diseño incorpora un soporte central de mando, que permite regular tanto el ingreso del fluido como la inyección de tinta, como se muestra en la Fig 37.



Fig 37. Diseño del dispositivo Helle-Shaw mediante software CAD.

2.4.2 Construcción del dispositivo Helle-Shaw

1. Procesos iniciales de fabricación

El proceso constructivo se inició con el corte de las placas de acrílico y la base metálica, seguido del doblado de la chapa de acero inoxidable que conforma la base. Estos dobleces fueron diseñados para alojar de manera precisa las placas de acrílico blanco, garantizando su inmovilidad durante el funcionamiento del dispositivo y facilitando el ensamblaje del resto de componentes, como se muestra en la Fig 38.



Fig 38. Proceso constructivo del dispositivo.

2. Sistema de ajuste de inclinación

Los perfiles de acero inoxidable fueron modificados estructuralmente para incorporar un mecanismo de altura variable en su sección superior, como se muestra en la Fig 39. Esta modificación permite:

- Variación controlada del ángulo de inclinación del dispositivo

- Ajuste preciso de las condiciones de flujo
- Adaptabilidad para diferentes configuraciones experimentales



Fig 39. Sistema de ajuste de inclinación.

3. Mecanismo de fijación rápida

Para optimizar el proceso de ajuste se implementó:

- Tuercas mariposa que permiten modificaciones rápidas
- Un extremo soldado mediante proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding) para fijación permanente
- Unión soldada de todos los componentes estructurales a la base principal
- Proceso posterior de abrillantado para mejorar acabado superficial y resistencia a la corrosión, como se muestra en la Fig 40.



Fig 40. Mecanismo de fijación rápida.

4. Sistema de apertura del dispositivo

Como se muestra en la Fig 41., se observa el mecanismo de acceso al interior del equipo se diseñó considerando:

- Implementación de dos bisagras de 2 pulgadas con modificación geométrica para adaptación perfecta
- Unión soldada (GMAW) a la estructura base en un extremo
- Fijación mediante tornillería especial al acrílico en el extremo opuesto
- Verificación funcional del sistema mediante pruebas de apertura/cierre



Fig 41. Sistema de apertura del dispositivo.

5. Red de distribución principal

La red principal de distribución, ilustrada en la Fig 42., presenta una configuración detallada del sistema que incluye los elementos y conexiones clave para garantizar un funcionamiento eficiente. Esta configuración abarca aspectos críticos como la disposición de tuberías, válvulas, puntos de control y parámetros operativos esenciales para el análisis y optimización del desempeño del sistema:

- Tubería PVC de ½" con codos a 45°
- Conexiones en T para distribución principal
- 4 salidas para mangueras de 8 mm
- Medidor de caudal digital integrado
- Sellado con cinta de teflón para evitar fugas



Fig 42. Sistema distribución principal de caudal.

6. Sistema de tinte y drenaje

El diseño contempla:

- Estanque de tinta en posición elevada respecto al tablero de control
- Distribución a 3 puntos de inyección interna
- 12 salidas para visualización de líneas de flujo
- Colector unificado de drenaje externo
- Estanque de recuperación de fluidos usados

7. Sistema de sellado

La separación entre placas se asegura mediante un sistema de sellado robusto y cuidadosamente diseñado, que emplea empaques especializados para mantener la integridad hidráulica y evitar fugas, como se muestra en la Fig 43., donde se detalla la disposición y características del sistema de empaques:

- Empaques de papel Victoria de triple capa
- Espesor calibrado según requerimientos de flujo
- Compatibilidad con fluidos utilizados
- Resistencia a condiciones de operación



Fig 43. Empaque del sistema de sellado.

Este proceso constructivo incorporó consideraciones de funcionalidad, precisión y repetibilidad, asegurando que el dispositivo cumpla con los requerimientos para la visualización de patrones de flujo en configuraciones Hele-Shaw. Cada componente fue diseñado para permitir modificaciones y ajustes, facilitando la adaptación a diferentes condiciones experimentales.

2.4.3 Selección de flujo de inyección

En experimentos, se pueden añadir tintas o colorantes al fluido para observar cómo el flujo se mueve a través del dispositivo. Esto ayuda a visualizar la interacción del flujo con obstáculos o con diferentes geometrías de entrada y salida. A continuación, se muestran algunas tintas o colorantes que son utilizados en experimentaciones de visualización:

- **Tinta de Colorante**

Las tintas o colorantes, se disuelven fácilmente en agua y no alteran de manera significativa la densidad o viscosidad del flujo, estas propiedades se muestran en la TABLA VIII.

TABLA VIII

PROPIEDADES DE TINTA DE COLORANTE

Tinta de Colorante	
Composición Principal	Agua, azul de metileno o verde de bromocresol

Tinta de Colorante	
Densidad (kg/m³)	1000–1050
Viscosidad (Pa·s)	0.001–0.002
Solubilidad	Alta en agua
Precio Estimado ($/L)	5 – 10
Consideraciones	Contraste visual adecuado, seguro y fácil de limpiar
% Mezcla Típica en Agua	Sí, 0.05% – 0.2%

- **Colorantes Alimentarios**

Los colorantes alimentarios son una opción simple y económica para visualizar el flujo. Son solubles en agua y vienen en varios colores, lo cual permite realizar pruebas multicolores para ver cómo se mezclan los flujos, estas propiedades se muestran en la TABLA IX.

TABLA IX

PROPIEDADES DE COLORANTES ALIMENTARIOS

Colorantes Alimentarios	
Composición Principal	Agua, glicerina (opcional), colorantes artificiales
Densidad (kg/m³)	1000–1100
Viscosidad (Pa·s)	0.001–0.005
Solubilidad	Alta en agua
Precio Estimado ($/L)	3 – 8
Consideraciones	Multicolor, económico, no reacciona con placas
% Mezcla Típica en Agua	Sí, 0.01% – 0.1%

- **Tinta Fluorescente**

Las tintas fluorescentes se utilizan en combinación con luz UV para mejorar la visualización en ambientes con poca iluminación. Estas tintas se destacan bajo luz ultravioleta, creando un contraste claro, estas propiedades se muestran en la TABLA X.

TABLA X

PROPIEDADES DE TINTA FLUORESCENTE.

Tinta Fluorescente	
Composición Principal	Agua o base glicólica, colorante fluorescente
Densidad (kg/m³)	1000–1200
Viscosidad (Pa·s)	0.001–0.004
Solubilidad	Alta en agua
Precio Estimado ($/L)	15 – 30
Consideraciones	Alta visibilidad con luz UV, útil en poca luz
% Mezcla Típica en Agua	Sí, 0.02% – 0.2%

- **Pintura Sensible a la Presión o a la Temperatura (PSP/TSP)**

Aunque menos común en dispositivos de Hele-Shaw, la pintura sensible a la presión o a la temperatura puede aplicarse en superficies de interés si se desea ver cómo el flujo afecta directamente ciertas áreas. Cambia de color en respuesta a variaciones de presión o temperatura, estas propiedades se muestran en la TABLA XI.

TABLA XI

PROPIEDADES DE PSP/TSP.

Pintura Sensible a la Presión o a la Temperatura (PSP/TSP)	
Composición Principal	Polímeros, solventes, partículas sensibles
Densidad (kg/m³)	800–1200
Viscosidad (Pa·s)	0.002–0.02
Solubilidad	Soluble en solventes no acuosos
Precio Estimado ($/L)	50–100
Consideraciones	Indica presión o temperatura, más usada en túneles de viento
% Mezcla Típica en Agua	No, se aplica sobre superficies

- **Tinta a Base de Nanopartículas**

Las nanopartículas, como las de óxido de titanio o de otros materiales, pueden dispersarse en agua para crear tintas que resaltan bajo ciertos tipos de luz. Estas partículas permiten una visibilidad sin mezclarse completamente con el agua, proporcionando una "textura" que facilita la observación del flujo, estas propiedades se muestran en la TABLA XII.

TABLA XII

PROPIEDADES DE TINTA A BASE DE NANOPARTÍCULAS

Tinta a Base de Nanopartículas	
Composición Principal	Agua, nanopartículas (TiO_2, Ag, sílice)
Densidad (kg/m^3)	1000–1200
Viscosidad (Pa·s)	0.0015–0.003
Solubilidad	Alta en agua
Precio Estimado ($/L)	20–50
Consideraciones	Alta resolución, útil para visualizar estructuras finas del flujo

- **Tinte trazadora seleccionada**

Con base en parámetros técnicos fundamentales y de alto impacto en el rendimiento, tales como la composición química detallada, densidad, viscosidad, solubilidad específica en el medio de trabajo, costo económico y proporción típica de mezcla, se elaboró una tabla comparativa exhaustiva de tintas. Esta tabla facilita una evaluación objetiva y cuantitativa de las propiedades físico-químicas y económicas de las alternativas disponibles, permitiendo así seleccionar de manera fundamentada la tinta más adecuada para optimizar la visualización del flujo dentro del dispositivo de Hele-Shaw, como se muestra en la Tabla XIII. La consideración de estos parámetros asegura no solo la calidad visual, sino también la compatibilidad con el sistema y la eficiencia del experimento.

TABLA XIII

PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE TINTA TRAZADORA

PARÁMETROS DE CONDICIONES DE OPERACIÓN				
Tipo de Tinta	Visibilidad	Compatibilidad con Agua	Toxicidad	Costo
Colorante a base de agua	Alta en medios transparentes	Alta	Baja	Bajo
Colorante alimentario	Moderada	Alta	Muy baja (grado alimentario)	Bajo
Tinta fluorescente	Muy alta bajo luz UV	Variable	Media (dependiendo del tipo)	Medio
PSP/TSP	Alta bajo excitación óptica	Baja	Alta	Alto
Tinta con nanopartículas	Alta (según formulación)	Media	Media-alta	Alto

Se seleccionó colorante alimentario como tinta trazadora por su alta visibilidad en medios transparentes, solubilidad en agua, baja toxicidad en concentraciones moderadas y fácil disponibilidad. Estas propiedades lo convierten en una opción segura, económica y eficaz para visualizar el comportamiento del flujo laminar en el dispositivo de Hele-Shaw.

2.5 Selección de perfiles aerodinámicos

2.5.1 Razonamiento técnico de la selección

Para este análisis, se decidió aplicar la serie de 4 dígitos de perfiles aerodinámicos porque son más simples de estudiar y modelar en términos de flujo de fluidos en el dispositivo de Hele-Shaw. Esta serie permite realizar un estudio básico de las

características aerodinámicas de los perfiles sin involucrar las complejidades de otras series más avanzadas, como la de 5 dígitos o las supercríticas.

Se seleccionaron los perfiles 0024, 2412 y 6142 por las siguientes razones:

- **Perfil 0024:** Este perfil es simétrico (sin curvatura), lo cual permite estudiar el flujo en una geometría balanceada sin ninguna asimetría. Es especialmente útil para analizar condiciones de flujo sin levantar fuerza de sustentación, ideal para la experimentación básica, este perfil se muestra en la Fig 44.

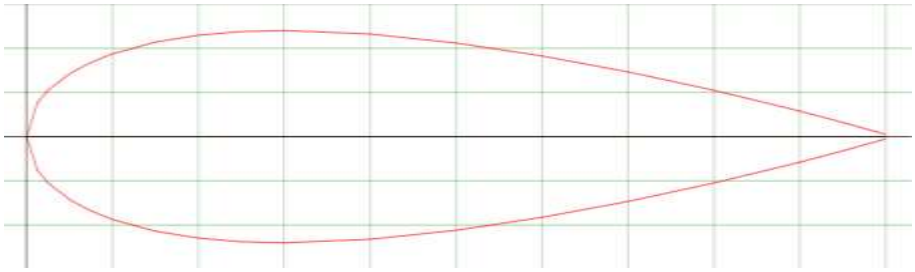


Fig 44. Perfil NACA 0024 [25].

- **Perfil 2412:** Es uno de los perfiles más comunes y representa un perfil cambered, es decir, tiene curvatura. Este perfil es útil para observar cómo el flujo se ajusta y distribuye alrededor de una superficie curvada, lo que es importante para aplicaciones en alas de bajo y mediano rendimiento, este perfil se muestra en la Fig 45.

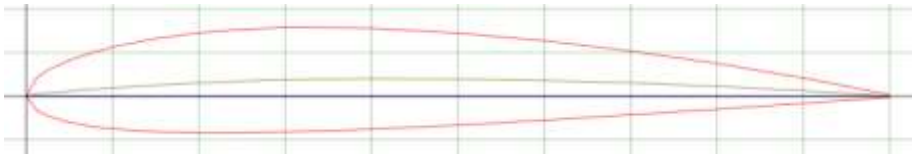


Fig 45. Perfil NACA 2412 [25].

- **Perfil 6142:** Tiene una curvatura pronunciada, lo que permite evaluar cómo el flujo se adapta a perfiles con mayor deformación y estudiar las diferencias en el flujo comparado con perfiles más "suaves". Este perfil suele usarse en aplicaciones que requieren alta sustentación y ofrece una perspectiva interesante para observar cambios en la velocidad y presión alrededor de la curvatura, este perfil se muestra en la Fig 46.

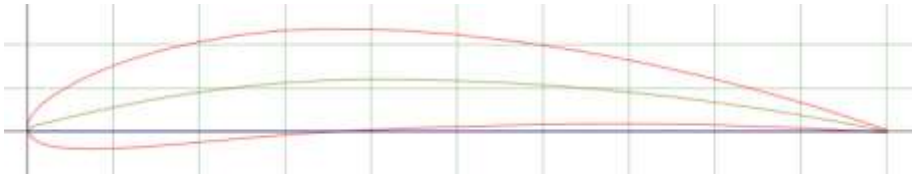


Fig 46. Perfil NACA 6142 [25].

La selección de estos perfiles obedece la intención de cubrir el estudio en un espectro variado de geometrías. Este abanico permite analizar comparativamente como cada modificación impacta en el flujo visualizado en el celda de Hele-Shaw. A continuación, se muestra en la Fig 47. un diagrama comparativo de curvatura media vs cuerda de los perfiles seleccionados:

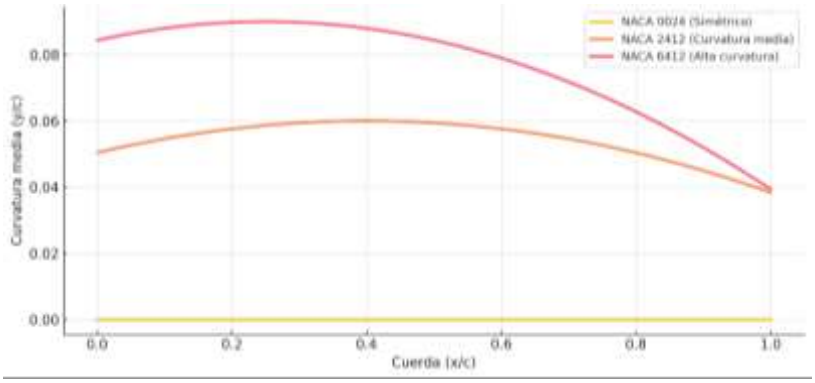


Fig 47. Curvatura Media de Perfiles NACA: 0024 vs 2412 vs 6142

Esta figura tiene como finalidad ilustrar las diferencias en la distribución de curvatura de cada perfil, lo cual influye directamente en la forma del flujo sobre el extradós e intradós.

2.6 Diseño de experimentos

El diseño experimental constituye una etapa clave para garantizar la rigurosidad del estudio y la recolección sistemática de datos. En esta investigación, se plantea un enfoque factorial que permite analizar el comportamiento del flujo visualizado en un dispositivo de Hele-Shaw.

2.6.1 Condiciones de operación

Las condiciones de operación fueron definidas en función de los parámetros técnicos requeridos para el correcto funcionamiento del sistema. Se consideraron variables como presión, temperatura, caudal, tipo de fluido y características del entorno, con el

fin de asegurar un desempeño estable y eficiente durante las pruebas experimentales o simulaciones. Estos valores operativos permiten establecer límites de trabajo seguros y confiables, como se muestra en la Tabla XIV, donde se resumen las especificaciones adoptadas para el análisis.

TABLA XIV

PARÁMETROS DE CONDICIONES DE OPERACIÓN

PARÁMETROS DE CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Parámetro	Valor	Observaciones
Espaciado entre placas	2 mm	Define la altura del canal; influye en visualización 2D.
Ángulo de ataque del perfil	0°, 15° y 30°	Ajustado manualmente.
Tipo de perfil	NACA 0024 / 2412 / 6142	Simétrico y asimétrico para comparar efectos de curvatura.
Caudal del fluido	3.7 L/min	Caudal controlado.
Velocidad media del flujo	2 - 3 m/s	Asegura flujo laminar.
Tiempo de estabilización del flujo	10 – 20 s	Tiempo para esperar antes de inyectar el colorante
Tiempo de inyección de colorante	20 – 30 s	Para obtener resultados óptimos.
Número de Reynolds	<2000	Régimen de flujo laminar controlado de tuberías.
Uniformidad del espaciado (error)	≤ ±0.005 mm	Tolerancia máxima para garantizar flujo cuasi-2D.
Condiciones de temperatura ambiente	20 – 25 °C	Ideal mantener temperatura constante para evitar variaciones de viscosidad.

PARÁMETROS DE CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Parámetro	Valor	Observaciones
Nivelación del sistema	Horizontal con burbuja de nivel	Para evitar inclinación que distorsione el flujo.

2.6.2 Registro visual del flujo

Para registrar el comportamiento del flujo, se utilizó un sistema de visualización compuesto por diferentes aspectos, permitiendo una captura precisa de los patrones fluidodinámicos, como se muestra en la Tabla XV.

TABLA XV

REGISTRO VISUAL DEL FLUJO

Aspecto	Detalle específico
Tipo de registro	Fotografía fija
Dispositivo de captura	Cámara digital HD (mínimo 1080p) o smartphone con buena resolución
Ubicación de la cámara	Fijada en trípode perpendicular al plano de la celda de Hele-Shaw (vista superior)
Distancia cámara-celda	Aprox. 40–50 cm para cubrir todo el campo de flujo
Iluminación	Luz LED blanca uniforme, colocada lateralmente para evitar sombras y reflejos
Momento de captura	Una vez que el flujo ha alcanzado régimen estable (aprox. 20–30 segundos después de iniciado el flujo)
Número de fotos por ensayo	Mínimo 3 fotografías por configuración experimental
Formato de archivo	JPG/PNG para imágenes

Cada captura fue etiquetada según el perfil, caudal a la entrada, ángulo de ataque y ángulo de la estructura, y almacenada con su correspondiente memoria de datos para facilitar el análisis posterior.

2.6.3 Identificación y codificación

A continuación, en la Fig 48. se muestra el tipo de codificación utilizado para la identificación de los experimentos que se realizaron:



Fig 48. Explicación de la codificación para experimentación.

2.7 Simulación CFD

- **Software empleado (ANSYS Fluent)**

Las simulaciones se realizaron utilizando el software **ANSYS Fluent 2024 R2** la versión estudiantil, aprovechando su capacidad de resolver flujos laminares bidimensionales en geometrías definidas. Se optó por este software por su versatilidad, documentación académica y amplia validación en estudios de flujo aerodinámico.

La simulación numérica del comportamiento del flujo se desarrolló empleando el módulo **Fluent**, ampliamente reconocido por su capacidad para resolver ecuaciones de dinámica de fluidos mediante el método de volúmenes finitos. Este procedimiento se ejecutará siguiendo una secuencia sistemática representada por el flujograma, como se muestra en la Fig 49.

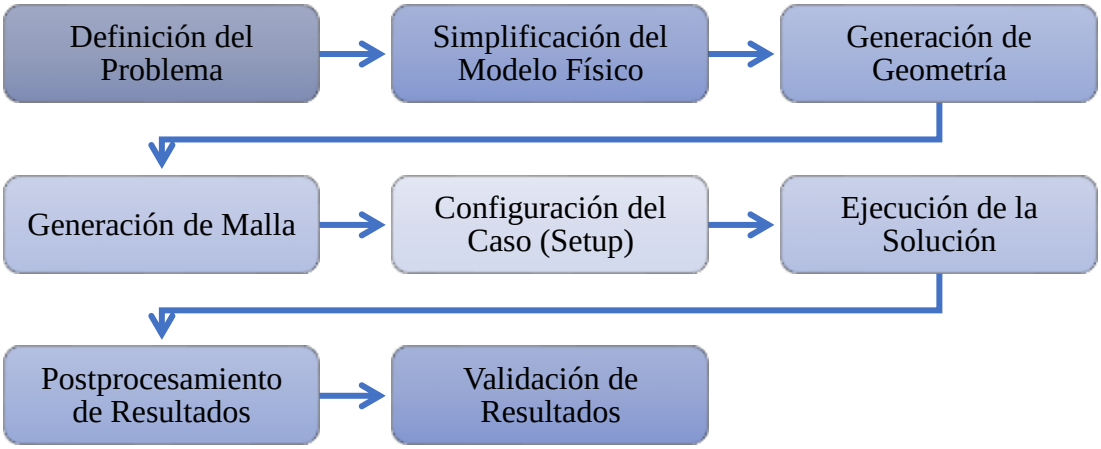


Fig 49. Diagrama Procedimiento General de Simulación CFD en ANSYS Fluent.

Proceso de simulación

Para la simulación computacional CFD de perfiles aerodinámicos en una celda de Hele-Shaw, se realizó una simplificación del modelo con el fin de reducir el costo computacional y facilitar la convergencia numérica. Esta simplificación permite representar los aspectos esenciales del fenómeno sin comprometer la validez de los resultados, enfocándose en las características geométricas y de flujo más relevantes para el análisis experimental.

Se definieron parámetros normalizados, considerando un dominio bidimensional (2D) con flujo laminar, debido al bajo número de Reynolds. A continuación, se presentan los parámetros para cada etapa del proceso de simulación:

1. **Modelado de la Geometría**

La geometría tridimensional del canal fue diseñada en SolidWorks, representando fielmente el volumen de fluido entre dos placas paralelas que conforman el dispositivo de Hele-Shaw. El modelo incluye:

- Ranura de entrada del fluido ubicado en el extremo superior del dispositivo y salida ubicada en el extremo inferior del dispositivo.
- Un perfil aerodinámico (tipo NACA) en el centro del dominio, como se muestra en la Fig 50.
- Un espesor uniforme de canal (del orden de milímetros).
- Exportación del archivo en formato .STEP para su importación en ANSYS Workbench.



Fig 50. Geometría de volumen del fluido del dispositivo Helle-Shaw.

2. **Importación y Preparación del Modelo en ANSYS**

Se utilizó el módulo **Mesh** en **ANSYS Workbench** para ejecutar la importación de la geometría. Los pasos realizados fueron:

- Importación del archivo (.STEP) en el apartado de Geometry (Import Geometry).
- Definición del tipo de análisis (2D o 3D).
- Asignación de un solo cuerpo de fluido para evitar problemas en el mallado.

3. **Generación de la Malla**

La malla fue generada utilizando el mismo modulo utilizado anteriormente, con las siguientes características:

- Primero especificamos las secciones para la entrada de fluido, salida de fluido, las paredes y el volumen de fluido.

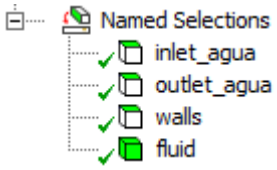


Fig 51. Denominación de superficies (Named Selections).

- Tipo de malla: no estructurada (tetraédrica), con refinamiento local.
- Refinamiento intenso en torno al perfil aerodinámico para capturar adecuadamente la capa límite.

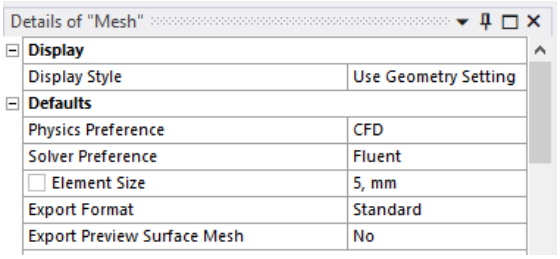


Fig 52. Configuración de la mallado.

Para la simulación CFD del flujo en el dispositivo de Hele-Shaw, se simplificó el modelado de los perfiles aerodinámicos a fin de reducir el tiempo de cálculo y

garantizar la estabilidad numérica. Esta simplificación permitió generar una malla de calidad aceptable, cumpliendo con valores de Skewness < 0.8 y Orthogonal Quality > 0.2, lo cual asegura resultados confiables según [26], como se muestra en la Fig 53.



Fig 53. Métricas de espectros de calidad de Skewness y Orthogonal Quality [26].

4. Configuración Física en Fluent

Ocupamos el recurso (Fluid Flow (Fluent)), en Fluent se configuraron los siguientes parámetros:

General:

- Solver Options: Activación (Double Precision) y el número de procesadores de solución (4).
- Solver: 3D, Presión Basada, Estacionario (Transient), Gravedad $\left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)$.
- Modelo de Flujo: Laminar, ya que el flujo entre placas estrechas y bajas velocidades corresponde a un número de Reynolds bajo.
- Configuración de Materiales (Materials, Fluid)

Fluido: wáter-liquid ($\rho = 998.2\ kg/m^3$, $\mu = 0.001003\ Pa \cdot s$).

Condiciones de contorno:

- Entrada: *mass-flow-inlet*.
- Valores definidos por cálculos experimentales
  - Mass Flow Rate: $0.061 \frac{kg}{s}$
  - Initial Gauge Pressure: $793.36\ Pa$
- Salida: *outflow*.

- Paredes y perfil aerodinámico: *wall*.

Propiedades de referencia:

- Gravedad activada (perpendicular a la zona de visualización).

5. Inicialización y Solución

Inicialización desde la entrada, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Acoplamiento presión-velocidad: SIMPLE.
- Discretización: segundo orden para mayor precisión espacial.
- Convergencia: monitoreo de residuales hasta $< 1\times10^{-5}$ para continuidad y velocidad.
- Run Calculation se configuro de la siguiente manera para obtener resultados confiables:
    - Tipo de avance temporal fijo
    - Se definió 100 pasos de tiempo, tamaño de paso 1 s, 10 iteraciones por paso, actualización de perfiles y reporte cada paso (intervalo = 1).

6. Representación gráfica de los resultados

Los resultados de visualización de las líneas de corriente, para identificar la trayectoria del flujo alrededor de los perfiles, se configuro de la siguiente manera:

- Se utilizo 1000 pasos de integración (step), un intervalo de muestreo (path skip) de 40.
- Una atenuación del trazo de 1 (path coarsen) correspondiente.
- Se estableció un grosor de línea (line width) igual a 2.

Esta parametrización fue seleccionada con el objetivo de generar una representación clara y comparable con los patrones de flujo observados experimentalmente mediante el dispositivo de Hele-Shaw.

2.8 Criterios de comparación cualitativa

Con el fin de evaluar la efectividad del dispositivo de Hele-Shaw como herramienta de visualización del comportamiento del flujo, y su grado de concordancia con los resultados obtenidos mediante simulación CFD, se establecen criterios de comparación cualitativa. Estos criterios permiten analizar la similitud entre ambos métodos desde una perspectiva visual, apoyada en el análisis técnico de patrones de flujo.

2.8.1 Criterios cualitativos

Los siguientes elementos han sido seleccionados como criterios de comparación visual:

- **Líneas de corriente (streamlines):** Representan trayectorias tangentes al campo de velocidad del fluido, útiles para visualizar la dirección del flujo alrededor del perfil aerodinámico. En la TABLA XVI se muestran los criterios de evaluación de las líneas de corriente (streamlines).

TABLA XVI

CRITERIOS DE EVALUACIÓN – LÍNEAS DE CORRIENTE (STREAMLINES)

Nivel de similitud	Descripción del criterio visual	Valor
Alta	Las trayectorias de las líneas de corriente son prácticamente iguales: forma, dirección y curvatura son coherentes.	3
Media	Coinciden en el patrón general, pero con diferencias en curvatura, longitud o desviación leve.	2
Baja	Las líneas de corriente tienen formas y trayectorias distintas o contradictorias entre experimento y CFD.	1

- **Zonas de recirculación:** Corresponden a regiones donde el flujo se invierte o gira sobre sí mismo, producto de la separación del fluido respecto a la superficie del perfil. En la TABLA XVII se muestran los criterios de evaluación de las zonas de recirculación.

TABLA XVII

CRITERIOS DE EVALUACIÓN – ZONAS DE RECIRCULACIÓN

Nivel de similitud	Descripción del criterio visual	Valor
Alta	La recirculación se presenta claramente en el mismo lugar, con forma y tamaño similares en experimento y simulación.	3
Media	Se presenta en ambos, pero con diferencias en ubicación o forma de los vórtices.	2
Baja	Solo aparece en uno de los casos o difiere significativamente en posición, intensidad o forma.	1

- **Transición de régimen de flujo:** Hace referencia al cambio de flujo laminar a turbulento, observado en función de la velocidad del fluido, líneas de corriente y la geometría del perfil aerodinámico. En la TABLA XVIII se muestran los criterios de evaluación de la transición del régimen de flujo.

TABLA XVIII

CRITERIOS DE EVALUACIÓN – TRANSICIÓN DE RÉGIMEN DE FLUJO

Nivel de similitud	Descripción del criterio visual	Valor
Alta	La transición del flujo (de laminar a perturbado) se presenta en la misma zona en ambos casos, con similar comportamiento.	3
Media	La transición es visible en ambas condiciones, pero con diferencias leves en ubicación o extensión.	2
Baja	No hay coincidencia entre experimento y simulación, o solo aparece en uno de los dos.	1

2.8.2 Escala de comparación cualitativa

Para evaluar los criterios anteriores, se establece una escala de similitud, como se muestra en la TABLA XIX.

TABLA XIX

ESCALA DE COMPARACIÓN CUALITATIVA

Nivel de Similitud	Rango de puntaje total	Interpretación
Alta	7 – 9	Coincidencia clara y consistente entre experimento y CFD.
Media	4 – 6	Coincidencia parcial, diferencias moderadas aceptables.
Baja	1 – 3	Divergencias importantes o ausencia de correspondencia visual.

2.8.3 Matriz de evaluación cualitativa

Para la creación de la matriz de evaluación cualitativa, se tomó en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, dando como resultado la TABLA XX.

TABLA XX

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA

Elemento evaluado	Puntaje
Transición de régimen de flujo	
Líneas de corriente (streamlines)	
Zonas de recirculación	
Puntaje total	
Nivel de similitud	

2.8.4 Hipótesis nula (H_0):

No existe una correspondencia cualitativa significativa entre el comportamiento del flujo visualizado en el dispositivo de Hele-Shaw y los resultados obtenidos mediante simulación CFD, independientemente de la geometría del perfil, el ángulo de ataque o el caudal.

2.8.1 Hipótesis alternativa (H_1):

Existe una correspondencia cualitativa significativa entre el comportamiento del flujo visualizado en el dispositivo de Hele-Shaw y los resultados obtenidos mediante simulación CFD, en función de la geometría del perfil, el ángulo de ataque y el caudal de entrada.

2.9 Operacionalización de variables

La operacionalización de variables permite definir cómo se medirán y evaluarán los elementos clave del estudio, estableciendo las dimensiones y los indicadores asociados a cada variable. En este proyecto experimental, se consideran las siguientes:

2.9.1 Variable Dependiente

La variable dependiente es aquella cuya variación es resultado directo de los cambios en una o más variables independientes dentro de un experimento o análisis. Su comportamiento es medido y registrado para evaluar el efecto de las condiciones impuestas sobre el sistema. De esta manera, los parámetros correspondientes fueron definidos y sistematizados según lo establecido en la Tabla XXI.

TABLA XXI

VARIABLES DEPENDIENTES

Definición de la variable	Indicadores	Instrumento de medición
Comportamiento del flujo visualizado	Transición de régimen de flujo Líneas de corriente (streamlines) Zonas de recirculación	Observación directa Registro fotográfico Matriz de evaluación cualitativa
Correspondencia con simulación CFD	Grado de similitud visual (alta, media, baja) según criterios definidos	Comparación lado a lado de imágenes Matriz de evaluación cualitativa

2.9.2 Variable Independiente

La variable independiente es aquella que se manipula intencionalmente dentro de un experimento con el fin de observar su efecto sobre una o más variables dependientes. Su valor es controlado por el investigador y no depende de otras variables del sistema. El análisis de su influencia permite establecer relaciones causales y validar hipótesis dentro del estudio. En consecuencia, las especificaciones han sido organizadas y detalladas como se indica en la Tabla XXII.

TABLA XXII

VARIABLES INDEPENDIENTES

Definición de la variable	**Indicadores**	**Instrumento de medición**
Geometría del perfil aerodinámico	Forma y curvatura del perfil (NACA: 0024, 2412 y 6142)	Modelo 3D impreso Referencia técnica NACA
Ángulo de ataque	Variación angular respecto al flujo (0°, 15°, 30°)	Transportador angular Registro manual en el montaje
Condiciones del flujo	Tipo de tinta trazadora 1: colorante alimenticio 5% agua 95% 2: colorante alimenticio 5% glicerina 35% agua destilada 60%	Caudalímetro Control de bomba

A continuación, en la Fig 54. se presenta un flujograma que sintetiza la estructura experimental del estudio, destacando la interacción entre las variables independientes y su efecto directo sobre la variable dependiente. Este diagrama permite visualizar de manera clara y ordenada los factores que fueron controlados durante las pruebas, así como los parámetros evaluados, facilitando la comprensión del enfoque metodológico y del proceso de análisis aplicado.

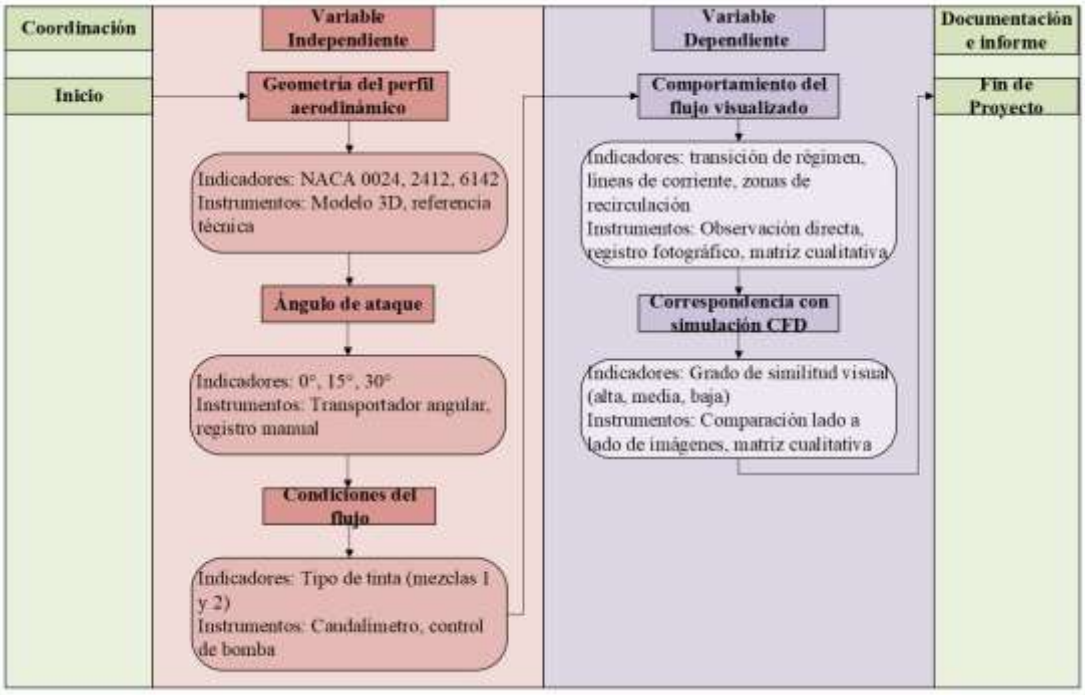


Fig 54. Flujograma de variables independientes y dependientes del estudio.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUCIONES

Este capítulo presenta los hallazgos del estudio, comenzando con los resultados cualitativos de la visualización de flujo obtenidos con el dispositivo Hele-Shaw y posteriormente, se exponen los resultados de simulaciones CFD.

3.1 Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos experimentales realizados con el dispositivo de Hele-Shaw, donde se visualizó el comportamiento del flujo alrededor de distintos perfiles aerodinámicos tipo NACA.

A continuación, se exponen los registros fotográficos de las líneas de corriente generadas por la inyección de colorante, así como el análisis cualitativo y patrones observados en los perfiles.

3.1.1 Líneas de corriente (streamlines) resultados experimentales

A continuación, se presentan a continuación los registros experimentales correspondientes al perfil NACA 0024, 2412 y 6142 utilizando la tinta trazadora 1. Como se muestra en la TABLA XXIII, TABLA XXIV y TABLA XXV.

TABLA XXIII

RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 1 - 0024

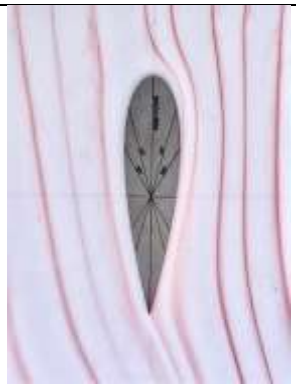
RESULTADOS FL 1 - 0024		
FL 1 - 0024 - 0°	FL 1 - 0024 - 15°	FL 1 - 0024 - 30°
		

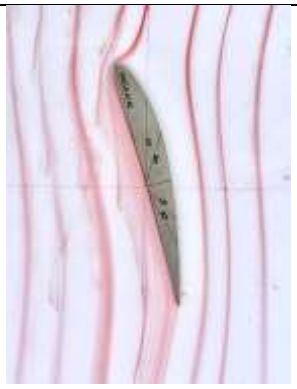
TABLA XXIV

RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 1 - 2412

RESULTADOS FL 1 - 2412		
FL 1 - 2412 - 0°	FL 1 - 2412 - 15°	FL 1 - 2412 - 30°
		

TABLA XXV

RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 1 - 6142

RESULTADOS FL 1 - 6142		
FL 1 - 6142 - 0°	FL 1 - 6142 - 15°	FL 1 - 6142 - 30°
		

A continuación, se presentan los resultados experimentales correspondientes a los perfiles aerodinámicos NACA 0024, 2412 y 6142, utilizando la tinta trazadora 2 como fluido visualizador del comportamiento del flujo. Las pruebas fueron realizadas bajo distintas condiciones angulares (0°, 15° y 30°) con el objetivo de analizar la influencia del ángulo de ataque en la formación de líneas de corriente. Como se muestra en la TABLA XXVI, TABLA XXVII y TABLA XXVIII, se observa la evolución del patrón

de flujo alrededor de cada perfil, lo que permite establecer comparaciones visuales respecto a la distribución del fluido y posibles zonas de recirculación generadas por la geometría del cuerpo.

TABLA XXVI

RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 2 - 0024

RESULTADOS FL 2 - 0024		
FL 2 - 0024 - 0°	FL 2 - 0024 - 15°	FL 2 - 0024 - 30°
		

TABLA XXVII

RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 2 - 2412

RESULTADOS FL 2 - 2412		
FL 2 - 2412 - 0°	FL 2 - 2412 - 15°	FL 2 - 2412 - 30°
		

TABLA XXVIII

RESULTADOS DE VISUALIZACIÓN DE FL 2 - 6142

RESULTADOS FL 2 - 6142		
FL 2 - 6142 - 0°	FL 2 - 6142 - 15°	FL 2 - 6142 - 30°
		

3.2 Resultados de simulaciones CFD

Con el objetivo de validar los resultados experimentales, se llevaron a cabo simulaciones numéricas en ANSYS Fluent para los perfiles NACA 0024, 2412 y 6142, bajo condiciones de flujo bidimensional, incompresible y en régimen laminar (Re < 1), replicando las condiciones experimentales.

El modelo empleado corresponde al régimen de flujo laminar, con refinamiento de malla en la proximidad de los perfiles y condiciones de frontera acordes al montaje experimental, permitiendo una comparación directa entre ambos enfoques.

3.2.1 Discretización del Dominio Computacional y Análisis de Calidad

El dominio computacional fue discretizado mediante una malla estructurada, optimizada para garantizar una representación precisa del contorno de los perfiles aerodinámicos. La calidad de la malla fue evaluada de forma rigurosa utilizando métricas clave como skewness y orthogonal quality, parámetros fundamentales que inciden directamente en la estabilidad numérica del modelo. Se priorizó mantener los valores dentro de rangos recomendados para asegurar la convergencia del cálculo y la confiabilidad de los resultados obtenidos. Esta validación es esencial para permitir una comparación coherente y técnicamente válida entre los resultados simulados y los

obtenidos experimentalmente. A continuación, se muestran los resultados de la creación de malla en la TABLA XXIX, TABLA XXX y TABLA XXXI.

TABLA XXIX

DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO COMPUTACIONAL DEL PERFIL NACA 0024

Perfil NACA	Ángulo de ataque	Skewness	Orthogonal Quality	Número elementos	Comentario Aceptación
0024	0°	6,8873e-003	0,99879	7784	Aceptable
0024	15°	6,1549e-003	0,999	7767	Aceptable
0024	30°	8,1167e-003	0,99869	7775	Aceptable

TABLA XXX

DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO COMPUTACIONAL DEL PERFIL NACA 2412

Perfil NACA	Ángulo de ataque	Skewness	Orthogonal Quality	Número elementos	Comentario Aceptación
2412	0°	1,0973e-002	0,99773	7988	Aceptable
2412	15°	1,3697e-002	0,99765	8019	Aceptable
2412	30°	1,0627e-002	0,99799	7966	Aceptable

TABLA XXXI

DISCRETIZACIÓN DE DOMINIO COMPUTACIONAL DEL PERFIL NACA 6142

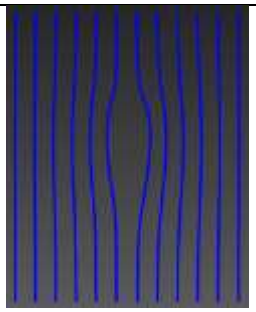
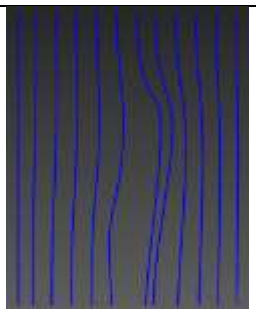
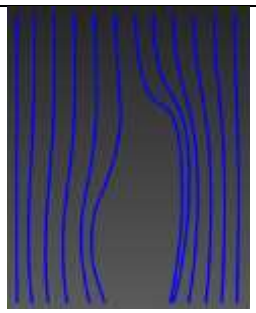
Perfil NACA	Ángulo de ataque	Skewness	Orthogonal Quality	Número elementos	Comentario Aceptación
6142	0°	2,3284e-002	0,99459	50484	Aceptable
6142	15°	2,1947e-002	0,99513	50190	Aceptable
6142	30°	2,338e-002	0,99483	50298	Aceptable

3.2.2 Líneas de corriente (streamlines) resultados CFD

Las líneas de corriente generadas mediante la simulación CFD permiten visualizar de forma clara la trayectoria del fluido alrededor de los perfiles NACA evaluados. Estos resultados proporcionan información clave sobre zonas de aceleración, separación del flujo y recirculación, facilitando la interpretación del comportamiento aerodinámico bajo distintas condiciones de operación, como se muestra en la TABLA XXXII.

TABLA XXXII

RESULTADOS LÍNEAS DE CORRIENTE (STREAMLINES) CFD

RESULTADOS LÍNEAS DE CORRIENTE (STREAMLINES) CFD		
0024 - 0°	0024 - 15°	0024 - 30°
		
2412 - 0°	2412 - 15°	2412 - 30°
		
6412 - 0°	6412 - 15°	6412 - 30°
		

3.3 Análisis comparativo de resultados

A continuación, se presenta la comparación entre los resultados experimentales obtenidos mediante el dispositivo de Hele-Shaw y las simulaciones CFD realizadas en ANSYS Fluent que evidenció una alta concordancia en diversos aspectos del comportamiento del flujo alrededor de los perfiles aerodinámicos. Sin embargo, también se identificaron algunas discrepancias que se presentan en la siguiente tabla:

3.3.1 Análisis comparativo de resultados del perfil NACA 0024

A continuación, se presenta el análisis de los resultados comparativos obtenidos para las diferentes configuraciones del perfil NACA 0024.

TABLA XXXIII

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 0024 0°

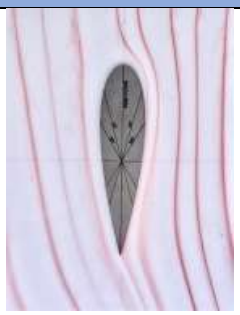
FL 1 - 0024 - 0°	FL 2 - 0024 - 0°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA XXXIV

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 0024 0°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 0024 - 0°	Puntaje FL 2 - 0024 - 0°
Transición de régimen de flujo	3	3
Líneas de corriente (streamlines)	3	2
Zonas de recirculación	3	3
Puntaje total	9	8
Nivel de similitud	Alta	Alta

TABLA XXXV

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 0024 15°

FL 1 - 0024 - 15°	FL 2 - 0024 - 15°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA XXXVI

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 0024 15°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 0024 - 15°	Puntaje FL 2 - 0024 - 15°
Transición de régimen de flujo	2	3
Líneas de corriente (streamlines)	2	2
Zonas de recirculación	2	2
Puntaje total	5	6
Nivel de similitud	Media	Media

TABLA XXXVII

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 0024 30°

FL 1 - 0024 - 30°	FL 2 - 0024 - 30°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA XXXVIII

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 0024 30°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 0024 - 30°	Puntaje FL 2 - 0024 - 30°
Transición de régimen de flujo	3	3
Líneas de corriente (streamlines)	3	3
Zonas de recirculación	2	2
Puntaje total	8	8
Nivel de similitud	Alta	Alta

3.3.2 Análisis comparativo de resultados del perfil NACA 2412

Se presentan a continuación los resultados del análisis comparativo para las distintas configuraciones del perfil NACA 2412.

TABLA XXXIX

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 2412 0°

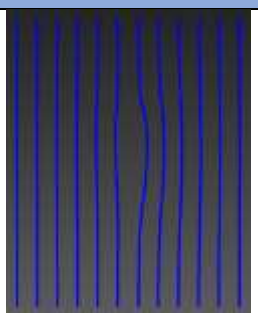
FL 1 - 2412 - 0°	FL 2 - 2412 - 0°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA XL

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 2412 0°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 2412 - 0°	Puntaje FL 2 - 2412 - 0°
Transición de régimen de flujo	3	3

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 2412 - 0°	Puntaje FL 2 - 2412 - 0°
Líneas de corriente (streamlines)	3	3
Zonas de recirculación	3	3
Puntaje total	9	9
Nivel de similitud	Alta	Alta

TABLA XLI

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 2412 15°

FL 1 - 2412 - 15°	FL 2 - 2412 - 15°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA XLII

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 2412 15°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 2412 - 15°	Puntaje FL 2 - 2412 - 15°
Transición de régimen de flujo	3	2
Líneas de corriente (streamlines)	3	2
Zonas de recirculación	3	3
Puntaje total	9	7
Nivel de similitud	Alta	Alta

TABLA XLIII

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 2412 30°

FL 1 - 2412 - 30°	FL 2 - 2412 - 30°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA XLIV

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 2412 30°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 2412 - 30°	Puntaje FL 2 - 2412 - 30°
Transición de régimen de flujo	2	2
Líneas de corriente (streamlines)	3	2
Zonas de recirculación	2	2
Puntaje total	7	6
Nivel de similitud	Alta	Media

3.3.3 Análisis comparativo de resultados del perfil NACA 6142

A continuación, se muestran los resultados del estudio comparativo realizado sobre las diferentes variantes del perfil NACA 6142.

TABLA XLV

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 6142 0°

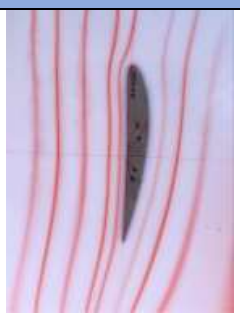
FL 1 - 6142 - 0°	FL 2 - 6142 - 0°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA XLVI

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 6142 0°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 6142 - 0°	Puntaje FL 2 - 6142 - 0°
Transición de régimen de flujo	3	3
Líneas de corriente (streamlines)	3	3
Zonas de recirculación	3	3
Puntaje total	9	9
Nivel de similitud	Alto	Alto

TABLA XLVII

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 6142 15°

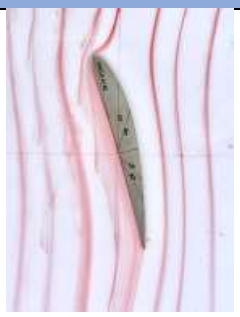
FL 1 - 6142 - 15°	FL 2 - 6142 - 15°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA XLVIII

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 6142 15°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 6142 - 15°	Puntaje FL 2 - 6142 - 15°
Transición de régimen de flujo	2	2
Líneas de corriente (streamlines)	2	3
Zonas de recirculación	2	2
Puntaje total	6	7
Nivel de similitud	Media	Alta

TABLA XLIX

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL PERFIL NACA 6142 30°

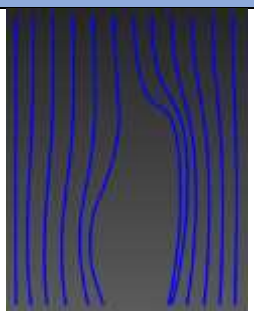
FL 1 - 6142 - 30°	FL 2 - 6142 - 30°	Evidencia ANSYS Fluent
		

TABLA L

MATRIZ DE EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL NACA 6142 30°

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 6142 - 30°	Puntaje FL 2 - 6142 - 30°
Transición de régimen de flujo	2	2
Líneas de corriente (streamlines)	3	1
Zonas de recirculación	2	2
Puntaje total	7	5

Elemento evaluado	Puntaje FL 1 - 6142 - 30°	Puntaje FL 2 - 6142 - 30°
Nivel de similitud	Alta	Baja

3.4 Verificación de hipótesis

La hipótesis planteada en esta investigación se comprobó mediante el análisis cualitativo de las visualizaciones experimentales y su comparación directa con los resultados obtenidos mediante simulación CFD. Utilizando una matriz de evaluación con tres criterios (transición de régimen de flujo, líneas de corriente y zonas de recirculación), se asignaron puntajes a cada combinación experimental, como se muestra en la TABLA LI y TABLA LII.

TABLA LI

ANÁLISIS DE SIMILITUD DE RESULTADOS FL 1

Análisis de Similitud de Resultados FL 1	
Planteamiento de hipótesis	
Hipótesis nula (H0):	No existe una correspondencia cualitativa significativa entre experimentación y simulación.
Hipótesis alternativa (H1):	Existe una correspondencia cualitativa significativa entre experimentación y simulación.
Experimentación	**Nivel de similitud**
FL 1 - 0024 - 0°	9
FL 1 - 0024 - 15°	5
FL 1 - 0024 - 30°	8
FL 1 - 2412 - 0°	9
FL 1 - 2412 - 15°	9
FL 1 - 2412 - 30°	7
FL 1 - 6142 - 0°	9
FL 1 - 6142 - 15°	6
FL 1 - 6142 - 30°	7

TABLA LII

ANÁLISIS DE SIMILITUD DE RESULTADOS FL 2

Análisis de Similitud de Resultados FL 2	
Planteamiento de hipótesis	
Hipótesis nula (H0):	No existe una correspondencia cualitativa significativa entre experimentación y simulación.
Hipótesis alternativa (H1):	Existe una correspondencia cualitativa significativa entre experimentación y simulación.
Experimentación	**Nivel de similitud**
FL 2 - 0024 - 0°	8
FL 2 - 0024 - 15°	6
FL 2 - 0024 - 30°	8
FL 2 - 2412 - 0°	9
FL 2 - 2412 - 15°	7
FL 2 - 2412 - 30°	6
FL 2 - 6142 - 0°	9
FL 2 - 6142 - 15°	7
FL 2 - 6142 - 30°	5

El análisis de similitud cualitativa revela una tendencia general hacia una alta correspondencia entre los resultados experimentales y de simulación para los perfiles aerodinámicos evaluados bajo diferentes ángulos de ataque, con la mayoría de los valores situándose en el rango superior de la escala (7-9). Sin embargo, la presencia de algunos niveles de similitud moderados (5-6), y tomando en cuenta las discrepancias observadas en la estabilidad y definición de las estructuras de flujo, impide una validación fuerte y unánime de la hipótesis alternativa. En otras palabras, si bien existe una considerable similitud en muchos casos, ciertas inconsistencias no permiten concluir que existe una correspondencia cualitativa significativa en todos los escenarios analizados.

Esto se debe a la existencias de posibles discrepancias observadas en la estabilidad y definición de las estructuras de flujo. Mientras que las simulaciones en ANSYS Fluent

predicen con claridad la formación de zonas de recirculación y separación laminar, los experimentos mostraron una tendencia a la rápida difusión del trazador y a la formación de una estela turbulenta y poco definida, en lugar de burbujas de separación estables.

3.4.1 Discrepancias

En el análisis experimental se controló las condiciones de funcionamiento y las mismas establecerlas como condiciones de contorno en ANSYS Fluent, sin embargo, algunas de las causas de las posibles discrepancias se las interpretaron de la siguiente manera:

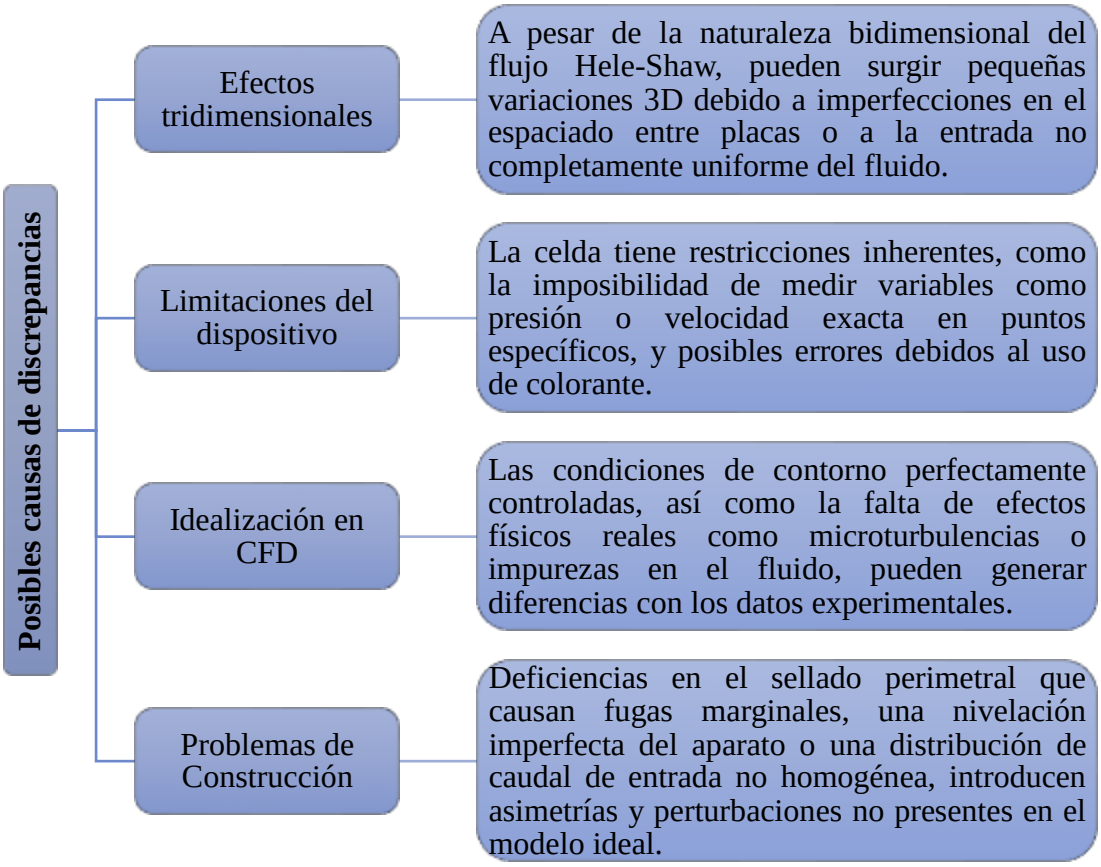


Fig 55. Diagrama conceptual de posibles causas de discrepancias.

3.5 Análisis crítico

3.5.1 Resultados cualitativos observados a través del dispositivo Hele-Shaw

El experimento permitió observar directamente la evolución del flujo al interactuar con perfiles aerodinámicos, algo que normalmente se limita a la simulación o a costosos túneles de viento. Gracias al dispositivo Hele-Shaw, fue posible identificar lo siguiente:

- Líneas de corriente: Se identificaron patrones de flujo bidimensionales, mostrando cómo el fluido se adapta a la geometría de los perfiles NACA 0024, 2412 y 6142.
- Efecto del ángulo de ataque: Se corroboró que perfiles simétricos (como el NACA 0024) mantienen un flujo estable a ángulos bajos, mientras que perfiles curvados (como el NACA 2412 y 6142) presentan separación temprana.

3.5.2 Valor pedagógico y técnico del experimento

Valor pedagógico

El experimento tiene un alto valor didáctico, permitiendo a lo siguiente:

- Visualizar conceptos abstractos como líneas de corriente, curvatura del flujo y formación de estelas.
- Comprender el efecto del ángulo de ataque y la geometría del perfil sobre el comportamiento del flujo.
- Establecer conexiones entre la teoría, la práctica experimental y la simulación numérica.

Valor técnico

Técnicamente, el experimento permite:

- Establecer una aproximación accesible y replicable para validar comportamientos cualitativos del flujo.
- Permite probar múltiples perfiles y configuraciones, útil en etapas preliminares de diseño aerodinámico.

3.6 Cuadro de Materiales Análisis de Costos y Viabilidad Económica

Para contextualizar la relevancia y el impacto de este proyecto, se realizó un análisis comparativo de los costos asociados al diseño y construcción del dispositivo Hele-Shaw. Este análisis no solo cuantifica la inversión requerida para el prototipo desarrollado, sino que también lo contrasta con el costo de adquirir equipos de laboratorio comerciales para visualización de flujos, tanto en el mercado nacional como internacional.

3.6.1 Costos Directos

Para el cálculo de los costos directos, se consideran principalmente los materiales y componentes utilizados en el proceso. Esto incluye la adquisición de materias primas, piezas específicas y cualquier elemento necesario para la fabricación o ensamblaje del producto, garantizando así una estimación precisa de los gastos asociados directamente a la producción.

3.6.1.1 Materiales y Componentes

En la TABLA LIII se especifican los materiales y componentes necesarios requeridos para la construcción del dispositivo Helle-Shaw.

TABLA LIII

COSTOS DIRECTOS (MATERIALES Y COMPONENTES)

COSTOS DIRECTOS (MATERIALES Y COMPONENTES)					
Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unidad	Costos total
1	Tuberia PVC de 1/2 in (6m)	1	m	$8,40	$8,40
2	Codo de 45°	8	u	$0,96	$7,68
3	T de 1/2 in	5	u	$0,66	$3,30
4	Union de 1/2 in	1	u	$2,16	$2,16
5	Reducción de 1/2 a 1/4	4	u	$2,40	$9,60
6	Acoples rapidos de 1/8 a 6 mm	3	u	$2,40	$7,20
7	Acoples rapidos de 1/4 a 8 mm	12	u	$2,70	$32,40

COSTOS DIRECTOS (MATERIALES Y COMPONENTES)					
Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unidad	Costos total
8	Reguladores de flujo tipo aguja	4	u	$14,40	$57,60
9	Caudalimetro digital	1	u	$60,00	$60,00
10	Llave de 1/2 de compuerta	1	u	$19,80	$19,80
11	Adaptador de tubo de 1/2 a manguera	1	u	$0,60	$0,60
12	Manguera de 8 mm (1m)	6	m	$1,80	$10,80
13	Acrílico blanco 6 mm	2	u	$24,00	$48,00
14	Acrílico transparente 9 mm	1	u	$24,00	$24,00
15	Chapa de acero inoxidable 1 mm	1	u	$24,00	$24,00
16	Empaque de corcho 3 mm	1	u	$22,80	$22,80
17	Pega para tubo PVC	1	u	$1,80	$1,80
18	T de 8 mm	2	u	$2,10	$4,20
19	Manguera de 6 mm (1m)	2	m	$1,50	$3,00
20	Conector tipo Y	1	u	$2,10	$2,10
21	Conector de 5 entradas	1	u	$3,00	$3,00
22	Frasco de tinta	1	u	$7,50	$7,50
23	Machuelo NTP 1/2 in	1	u	$6,00	$6,00
24	Machuelo M10x1	1	u	$2,70	$2,70
25	Nivel de piola	2	u	$1,50	$3,00
26	Pernos de ajuste rapido	10	u	$2,70	$27,00
27	Colorante vegetal rojo (1kg)	1	kg	$3,00	$3,00
28	Controlador de flujo 8 mm	4	u	$8,40	$33,60
29	Controlador de flujo 6 mm	1	u	$4,80	$4,80
30	Tornillo 3/16	4	u	$0,03	$0,12
31	Bisagras	2	u	$2,70	$5,40
32	Bomba	1	u	$100,00	$100,00

COSTOS DIRECTOS (MATERIALES Y COMPONENTES)					
Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo unidad	Costos total
TOTAL					**$545,56**

3.6.1.2 Estimación de Mano de Obra

Para cuantificar el valor del esfuerzo técnico invertido en el proyecto, se realizó una estimación de los costos de mano de obra. Se consideraron las horas-hombre dedicadas a cada una de las etapas críticas del desarrollo, desde la conceptualización hasta las pruebas finales. Se ha establecido una tarifa de $3.00 USD por hora, un valor competitivo para un técnico especializado o ingeniero junior en el contexto ecuatoriano, esto se puede observar en la TABLA LIV.

TABLA LIV

COSTOS DIRECTOS (MANO DE OBRA)

COSTOS DIRECTOS (MANO DE OBRA)			
Etapa del Proyecto	Horas Estimadas	Tarifa/Hora (USD)	Costo Subtotal (USD)
Diseño y Planificación	20	$3,00	$60,00
Fabricación y Adquisición	15	$3,00	$45,00
Ensamblaje y Montaje	25	$3,00	$75,00
Pruebas y Calibración	15	$3,00	$45,00
TOTAL HORAS ESTIMADAS	75		
TOTAL COSTOS DIRECTOS (MANO DE OBRA)			$225,00

3.6.1.3 Costos Totales

El costo total del proyecto se desglosó en costos directos (materiales) y costos directos (mano de obra estimada), reflejando las condiciones del mercado ecuatoriano, resultado observado en la TABLA LV.

TABLA LV

COSTOS TOTALES

COSTOS TOTALES	
Descripción	Costo (USD)
Costos Directos (Materiales)	$545,56
Costos Directos (Mano de Obra Estimada)	$225,00
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	$770,56

3.6.2 Análisis de Viabilidad Económica y Comparativa Internacional

Para evaluar de manera integral el impacto y la rentabilidad del proyecto, se realizó un análisis de costos detallado, contrastando la inversión del prototipo desarrollado localmente con el costo de adquisición de equipos de laboratorio comerciales equivalentes en el mercado internacional.

- **Costo FOB (Free On Board):** El precio de lista del equipo en su país de origen, sin incluir envío ni importación.
- **Costo Estimado en Ecuador:** El costo FOB más un recargo estimado del 40% para cubrir gastos de envío internacional, seguro, aranceles de importación e impuestos locales.

TABLA LVI

COMPARATIVA CON MODELOS INTERNACIONALES

COMPARATIVA DE COSTOS CON MODELOS INTERNACIONALES				
Equipo y Modelo	País de Origen	Descripción Técnica	Costo FOB Estimado (USD)	Costo Estimado en Ecuador (USD)
Dispositivo Hele-Shaw	Ecuador	Celda artesanal con sistema de bombeo y control de caudal.	N/A	$771

Didatec BCD 010	Francia	Equipo didáctico de gama media para demostraciones educativas claras.	$2.500	$4.200
Mechnotek MTE-20	India	Equipo educativo completo, incluye tanque de suministro y bomba.	$2.200	$3.080
Armfield F1-38	Reino Unido	Aparato Hele-Shaw. Diseñado para usarse con el banco hidráulico Armfield F1-10.	$2.500	$3.915
GUNT H215 Hele-Shaw Flow Visualization	Alemania	Módulo para visualización de flujo Hele-Shaw. Requiere banco hidráulico base (HM 240) para operar.	$8.000	$12.000

El análisis que se puede observar en la Fig 65. revela una ventaja económica abrumadora a favor del desarrollo local. El costo total de nuestro prototipo ($770,56) es significativamente inferior al de cualquier alternativa comercial importada.

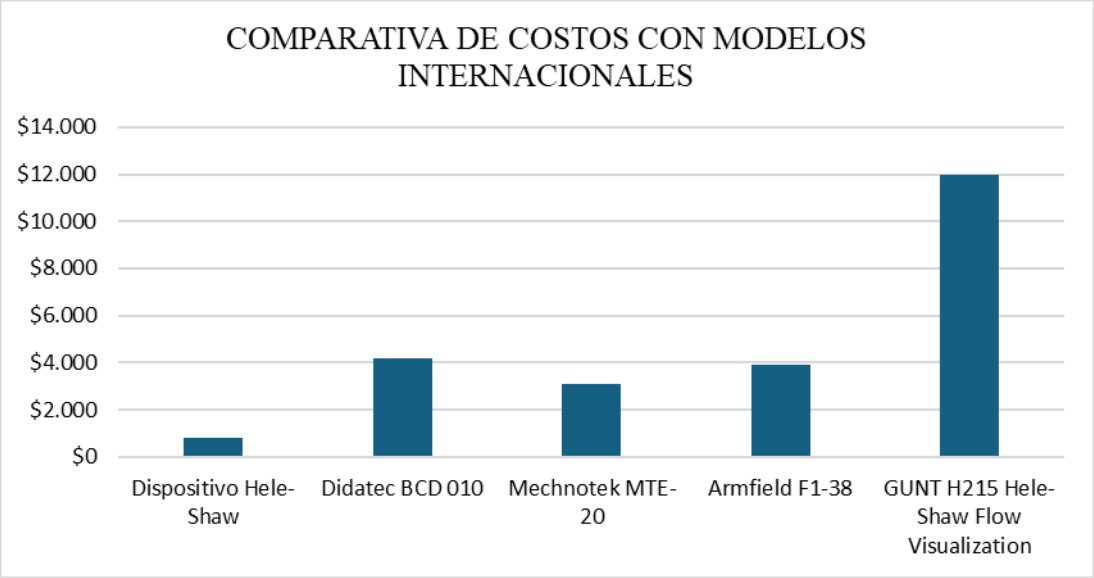


Fig 56. Comparativa de costos con modelos internacionales.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La revisión exhaustiva de técnicas reveló un panorama de metodologías para la visualización de flujos, cada una con fortalezas y debilidades. Se reconoció el valor del dispositivo Hele-Shaw por su capacidad intrínseca de simplificar la complejidad tridimensional del flujo en una representación bidimensional accesible. Se destacó la importancia de elegir la técnica de visualización más adecuada según el objetivo del estudio, reconociendo que la validez depende de la implementación de componentes externos, para la pureza y estabilidad del sistema de fluido.
- Se ha diseñado y construido un dispositivo experimental de celda Hele-Shaw, cumpliendo con los objetivos de crear una plataforma física para la visualización de flujos alrededor de perfiles aerodinámicos. El dispositivo, con su estructura modular y su sistema de inyección de tinte, demostró ser operativo y permitió la observación directa de fenómenos de la dinámica de fluidos, validando su concepción como herramienta de laboratorio y cumpliendo con el alcance propuesto en la metodología.
- Las pruebas con perfiles NACA 0024, 2412 y 6142 permitieron visualizar cualitativamente las líneas de corriente. Sin embargo, la difusión del trazador y la inestabilidad del flujo en ángulos de ataque elevados limitaron la nitidez y precisión de las visualizaciones, subrayando la necesidad de un control más riguroso sobre las condiciones experimentales.
- Se determinó que las limitaciones constructivas y operativas del dispositivo artesanal son la causa principal de las desviaciones respecto al comportamiento teórico. Específicamente, se concluyó que factores como las micro-imperfecciones en el paralelismo de las placas, la rugosidad superficial inherente al material, la inestabilidad del caudal de alimentación y la naturaleza difusiva del tinte impidieron la consecución de un régimen de flujo Hele-Shaw ideal ($Re < 1$) de manera sostenida. Estos factores introdujeron efectos tridimensionales y micro-turbulencias no contemplados en el modelo 2D

laminar, lo que explica la ausencia de estructuras de flujo bien definidas como las burbujas de separación laminar.

- La comparación reveló discrepancias significativas que evidenciaron la brecha entre el modelo físico idealizado y la implementación práctica. Mientras que las simulaciones predijeron patrones de flujo nítidos y estables, los resultados experimentales se caracterizaron por una rápida difusión del trazador y la tendencia a la turbulencia, limitando la similitud cualitativa y resaltando la importancia de una evaluación cuidadosa de las limitaciones experimentales al interpretar los resultados y contrastarlos con las predicciones teóricas.

4.2 Recomendaciones

- Para mejorar la nitidez en la visualización de las líneas de corriente y reducir la difusión del trazador, se recomienda optimizar el sistema de inyección. Una posible mejora consiste en sustituir los actuales puertos de entrada por agujas hipodérmicas de calibre fino, que permiten una dosificación más precisa y localizada del tinte. Asimismo, puede considerarse la implementación de técnicas sin masa, como la generación de burbujas de hidrógeno mediante electrólisis, las cuales actúan como trazadores con menor inercia y menor dispersión, facilitando así la obtención de patrones de flujo más definidos.
- Con el fin de minimizar los efectos tridimensionales no deseados que pueden distorsionar el flujo dentro del dispositivo, es fundamental incrementar la precisión geométrica del canal de visualización. Se sugiere fabricar el espaciador perimetral como una sola pieza mediante mecanizado CNC, con tolerancias estrictas del orden de ±0.05 mm o inferiores. Además, se debe establecer un protocolo de ensamblaje riguroso, que contemple la verificación del paralelismo entre las placas de vidrio en múltiples puntos de control, utilizando galgas de espesores, a fin de asegurar una separación constante y uniforme en toda la zona de observación.
- Para garantizar un flujo estable y libre de perturbaciones, es esencial reemplazar el actual sistema de alimentación. Se propone el uso de una bomba peristáltica de laboratorio, la cual proporciona un flujo constante con mínima pulsación, o alternativamente, la construcción de un tanque de carga de altura constante (cabezal de Mariotte), que mantiene una presión de entrada estable

mediante principios hidrostáticos, eliminando la dependencia de componentes mecánicos activos que puedan introducir fluctuaciones.

- En cuanto a futuras líneas de investigación, una de las prioridades es la incorporación de técnicas de medición cuantitativa que complementen la naturaleza cualitativa del dispositivo. Se recomienda la integración de sensores de presión diferencial en zonas estratégicas del perfil, como el extradós, intradós y el punto de estancamiento, así como la implementación de un sistema de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV), lo que permitiría obtener mapas detallados de velocidad y presión. Estos datos experimentales servirían para validar de forma más precisa los resultados obtenidos por simulación numérica.
- Asimismo, una vez optimizado el sistema, se sugiere ampliar el dominio experimental, incluyendo el análisis de perfiles aerodinámicos más complejos, como aquellos pertenecientes a las series NACA de cinco dígitos o perfiles supercríticos. También puede considerarse el uso de fluidos con mayor viscosidad, como mezclas de glicerina y agua, con el objetivo de evaluar el efecto del número de Reynolds en el comportamiento del flujo. Adicionalmente, sería pertinente investigar fenómenos de inestabilidad como el efecto Saffman-Taylor, mediante la introducción de dos fluidos inmiscibles en la celda de Hele-Shaw.
- Finalmente, para mejorar la correlación entre los resultados experimentales y numéricos, se recomienda desarrollar un modelo CFD más avanzado. Este debe considerar simulaciones transitorias para capturar adecuadamente las inestabilidades del flujo, así como incorporar modelos de transporte de especies, que permitan simular el comportamiento del tinte en el fluido. Esta mejora permitiría realizar comparaciones visuales directas y detalladas con las grabaciones experimentales, fortaleciendo la validación del modelo propuesto.

Referencias Bibliográficas

[1] H. Selby, *Investigation of the nature of surface resistance of water and of stream-line motion under certain experimental conditions*. London, 1898. Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: https://search.worldcat.org/title/Investigation-of-the-nature-of-surface-resistance-of-water-and-of-stream-line-motion-under-certain-experimental-conditions/oclc/17929897

[2] "The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid," *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, vol. 245, no. 1242, pp. 312–329, Jun. 1958, doi: 10.1098/RSPA.1958.0085.

[3] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 5ª edition. Nueva York, EE. UU.: McGraw-Hill, 2003.

[4] G. M. Homsy, "Viscous Fingering in Porous Media," *Annu Rev Fluid Mech*, vol. 19, no. Volume 19, 1987, pp. 271–311, Jan. 1987, doi: 10.1146/ANNUREV.FL.19.010187.001415.

[5] D. J. Acheson, *Elementary Fluid Dynamics*, 1ª edition. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press Inc., 1990.

[6] J. D. Anderson and C. Cadou, *Fundamentals of Aerodynamics*, 7ª edition. Nueva York, EE. UU.: McGraw Hill LLC, 2024.

[7] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 1st edition. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.

[8] "GENERAMOS INCLUSIÓN, CREAMOS SOSTENIBILIDAD 1 CONTEXTO DE LA ECONOMÍA POPULAR Y SOLIDARIA 7 1.1 INSTITUCIONALIDAD DE LA ECONOMÍA POPULAR Y SOLIDARIA 8 1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ECONOMÍA POPULAR Y SOLIDARIA 9".

[9] J. O. García, J. A. López, Á. A. Galeasso, and E. Ibarrola, "Diseño, construcción y puesta a punto de una celda Hele-Shaw," 2009, Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available:

https://www.researchgate.net/publication/305773958_DISENO_CONSTRUCCION_Y_PUESTA_A_PUNTO_DE_UNA_CELDA_HELLE--_SHAW

[10] P. K. Kundu and I. M. Cohen, *Fluid Mechanics (4ª Ed.)*, 4ª edition. Academic Press (Elsevier imprint), 2010.

[11] R. W. Fox, A. T. McDonald, P. J. Pritchard, and J. C. Leylegian, *Fluid Mechanics*, 8ª edition. Hoboken, Nueva Jersey, EE. UU.: John Wiley & Sons, 2012.

[12] H. Schlichting and K. Gersten, "Boundary-Layer Theory," *Boundary-Layer Theory*, pp. 1–799, Oct. 2016, doi: 10.1007/978-3-662-52919-5/COVER.

[13] G. S. Settles, "Schlieren and Shadowgraph Techniques," *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, 2001, doi: 10.1007/978-3-642-56640-0.

[14] M. Držík and J. Chlpík, "Optical methods in experimental mechanics," *Acta Physica Slovaca*, vol. 64, no. 2–3, pp. 101–216, Apr. 2014, doi: 10.2478/APSRT-2014-0002.

[15] T. Liu, "Pressure- and Temperature-Sensitive Paints," *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, Dec. 2011, doi: 10.1002/9780470686652.EAE076.

[16] "Cámara científica MWIR de alta velocidad FLIR X6980 | Teledyne FLIR." Accessed: Nov. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.flir.com.mx/products/x6980/?vertical=rd+science&segment=solutions

[17] "Measurement principle of laser-Doppler anemometry (modified from... | Download Scientific Diagram." Accessed: Nov. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Measurement-principle-of-laser-Doppler-anemometry-modified-from-wwwDantecDynamicscom_fig3_294290131

[18] T. Castrellón Pérez, "Diseño y construcción de un aparato de Hele-Shaw," 2008, *Uniandes*. Accessed: Apr. 08, 2025. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/1992/23656

[19] T. Castrellón Pérez, “Diseño y construcción de un aparato de Hele-Shaw,” 2008, *Uniandes*. Accessed: Jun. 17, 2025. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/1992/23656

[20] G. H. Scarpin, *Apunte “Aerodinámica de perfiles.”* Córdoba, Argentina, 2002. Accessed: Apr. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.kimerius.com/app/download/5782479311/Aerodin%C3%A1mica%2Bde%2Bperfiles.pdf

[21] “OpenFOAM.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.openfoam.com/

[22] “Simcenter STAR-CCM+ | Siemens Software.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: https://plm.sw.siemens.com/es-ES/simcenter/fluids-thermal-simulation/star-ccm/

[23] “COMSOL - Software para simulación multifísica.” Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.comsol.com/

[24] T. J. Chung, *Computational Fluid Dynamics*, 2ª edition. Huntsville, AL, EE. UU., 2014. Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: http://www.uah.edu/cfd

[25] “Herramientas para perfiles aerodinámicos.” Accessed: Nov. 13, 2024. [Online]. Available: http://airfoiltools.com/

[26] S. M. Salim, S. C. Cheah, and S. K. Chan, “‘Evaluation of mesh quality metrics for skewed and orthogonal grids in CFD simulations,’” Journal of Computational Physics. Accessed: Jun. 09, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Skewness-and-orthogonal-quality-mesh-metrics-spectrums_fig2_320786408

Anexos

Anexo 1. Evidencia fotográfica de pruebas prácticas

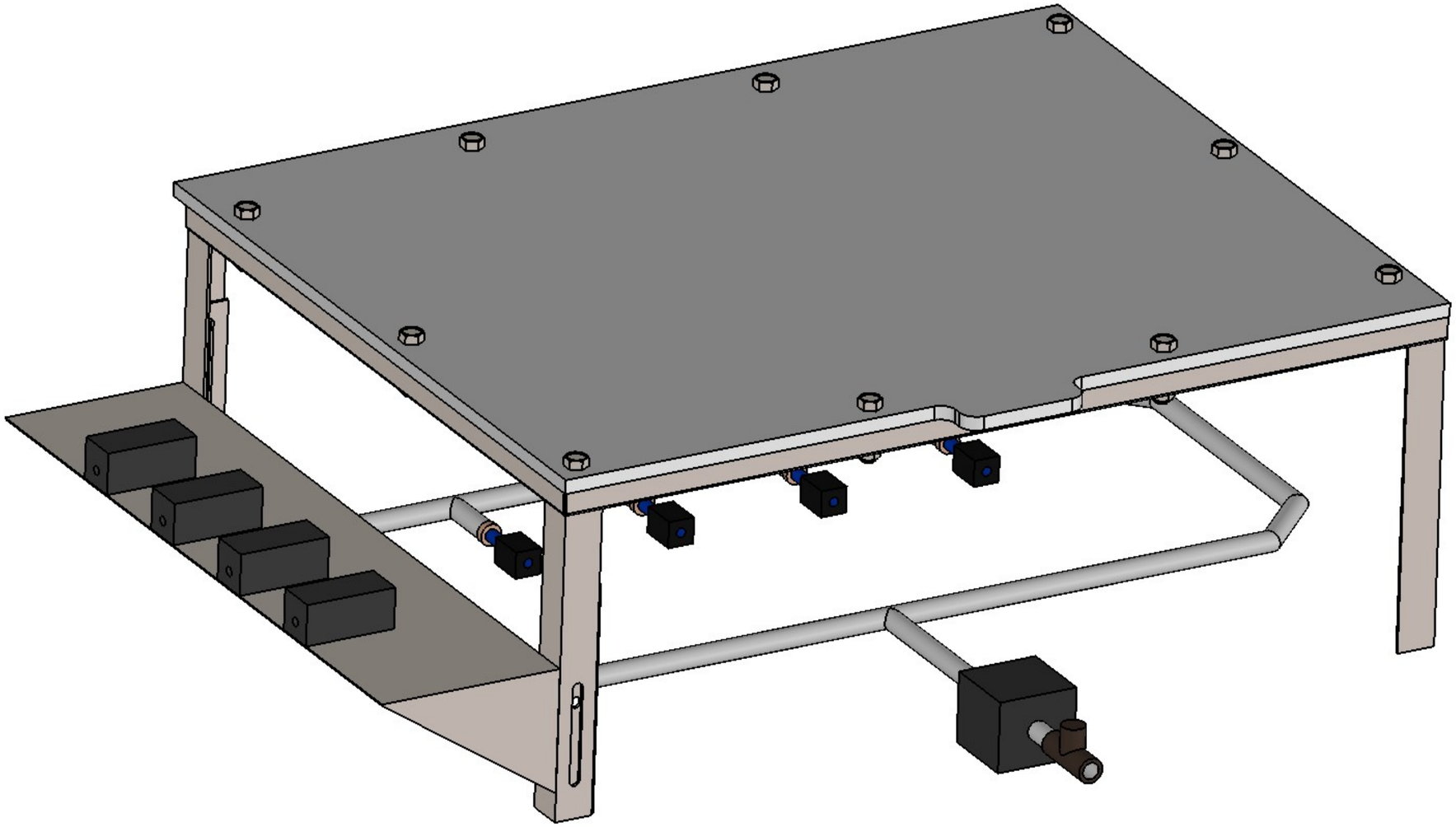






Anexo 2. Planos técnicos del dispositivo

DISPOSITIVO HELE - SHAW



K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

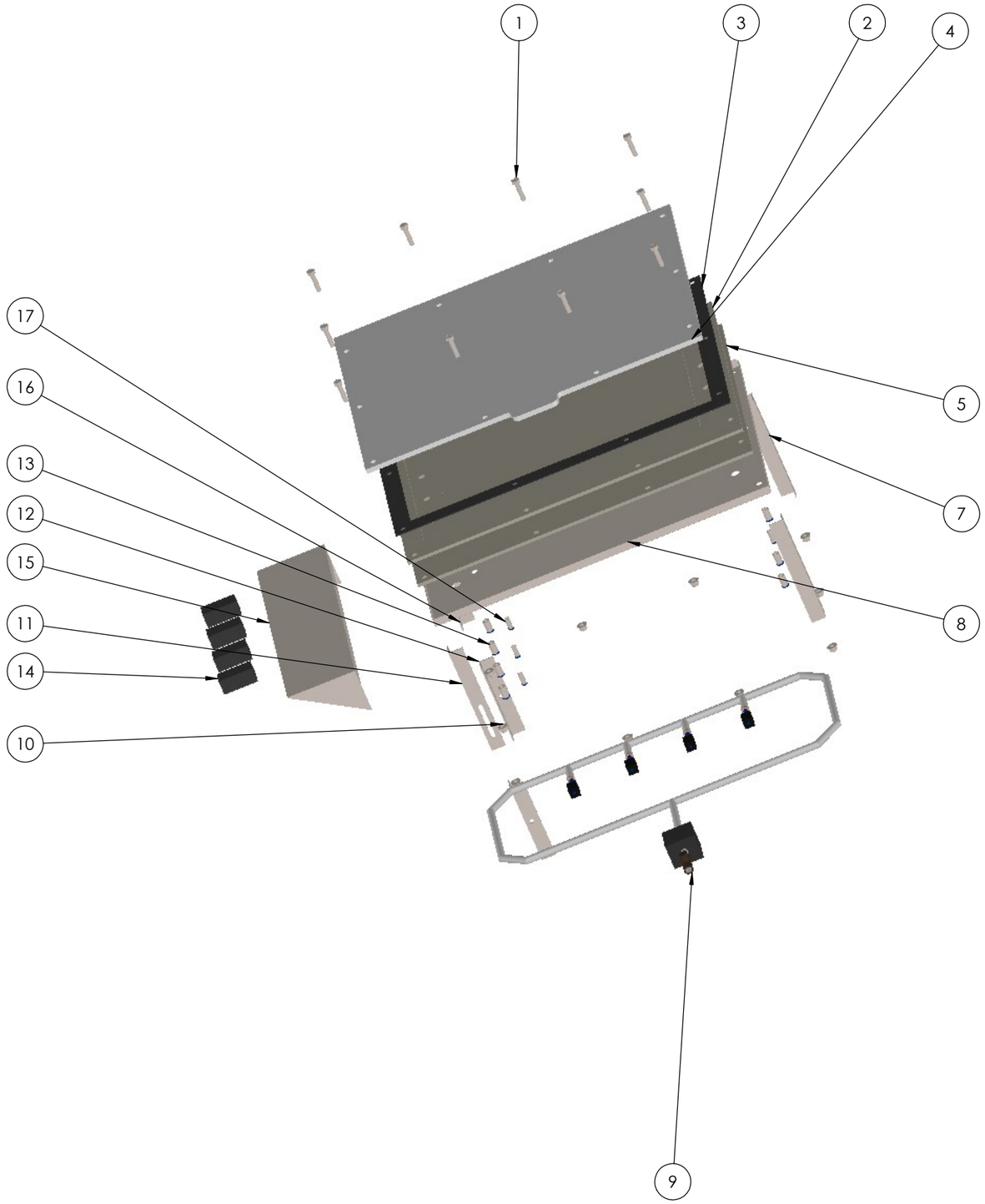
Edición	Modificación	Fecha	Nombre

Tolerancia:	Peso: 11.79 kg	Material: Varios

	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.

U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

Denominación: Dispositivo Hele - Shaw	Escala: 1:2
Número de Lámina: 01 DE 013	Registro:
(sustitución)	



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Perno de liberación rápida M8	Adquirido	10
2	Placa de acrilico blanco intermedia	Fabricado	1
3	Empaque de corcho	Fabricado	1
4	Placa de visualización	Fabricado	1
5	Placa de acrilico blanco inferior	Fabricado	1
7	Soporte vertical inferior	Fabricado	2
8	Soporte principal	Fabricado	1
9	Sistema hidráulico	Fabricado	1
10	Tuerca M8	Adquirido	10
11	Soporte lateral regulable izquierdo	Fabricado	1
12	Soporte lateral interior regulable	Fabricado	2
13	Conector rápido 1/4 in - 8 mm	Adquirido	8
14	Válvula de control de caudal	Adquirido	4
15	Tablero de control	Fabricado	1
16	Soporte lateral regulable derecho	Fabricado	1
17	Conector rápido 1/8 in - 6 mm	Adquirido	3

K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

Tolerancia: | Peso: | Material: VARIOS

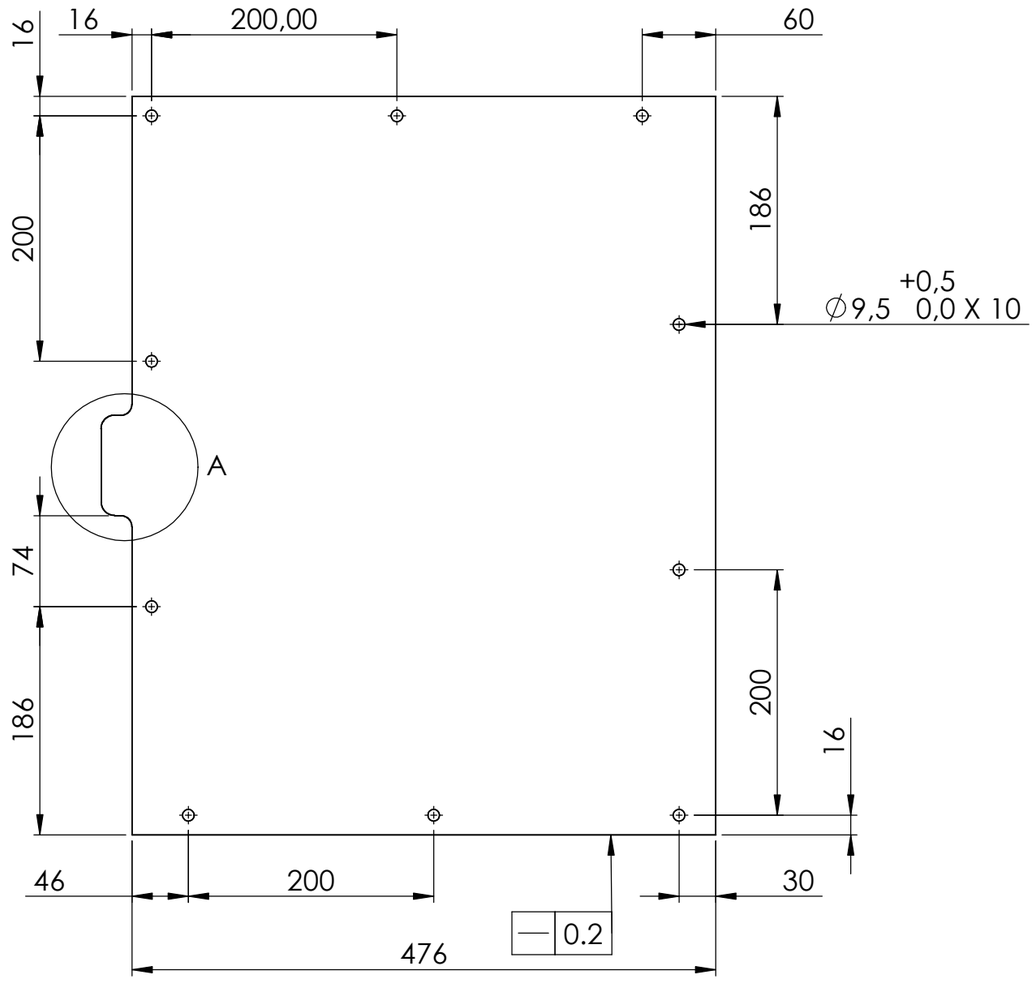
	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.

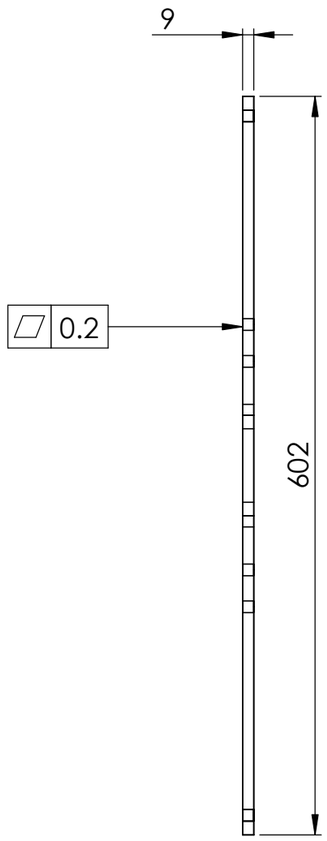
U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

Denominación: Detalle de piezas | Escala: 1:5

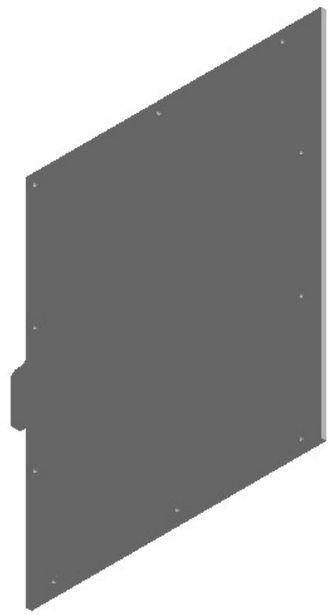
Número de Lámina: 02 DE 013 | Registro:

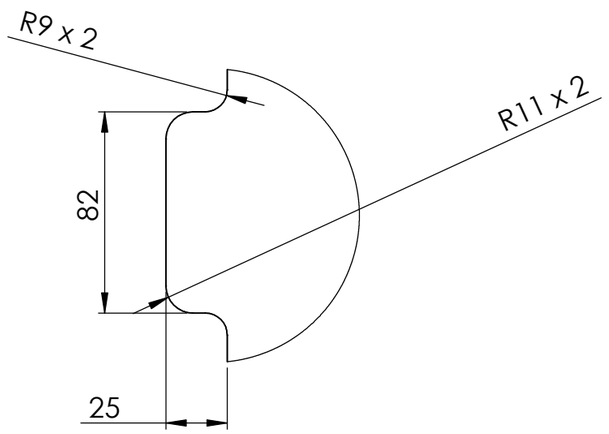
(sustitución)





VISTA ISOMÉTRICA





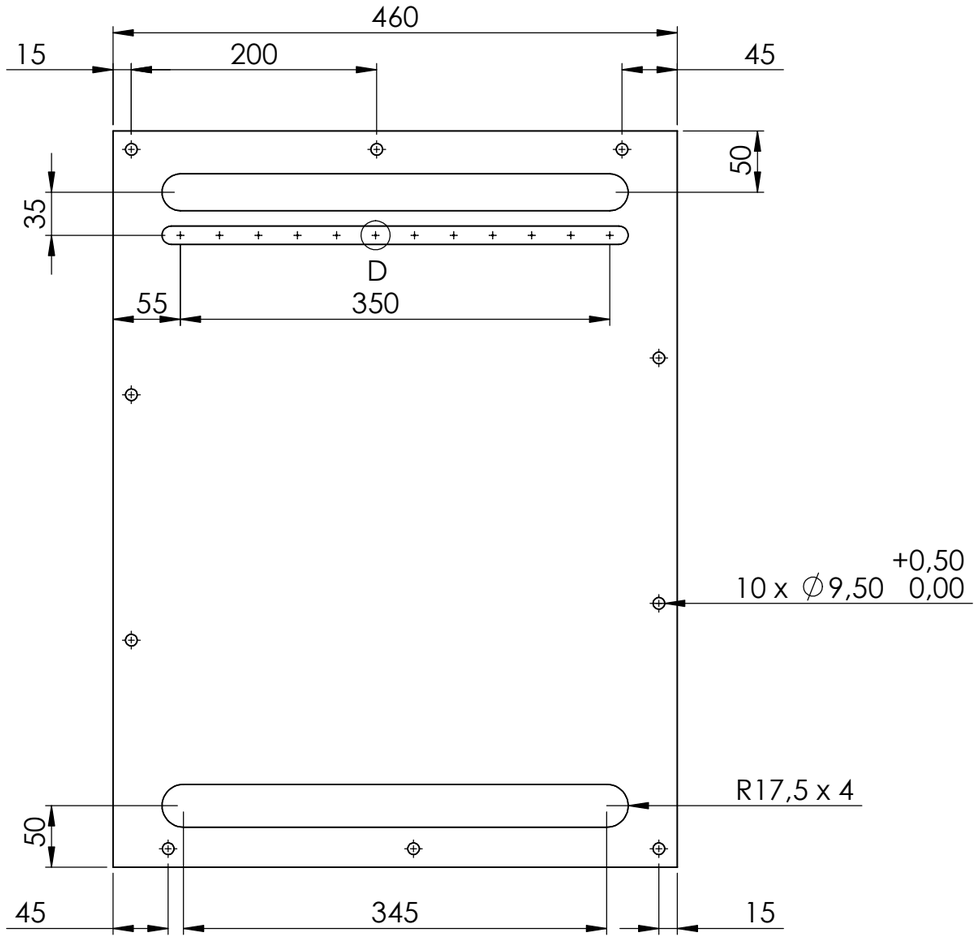
DETALLE A
ESCALA 2 : 5

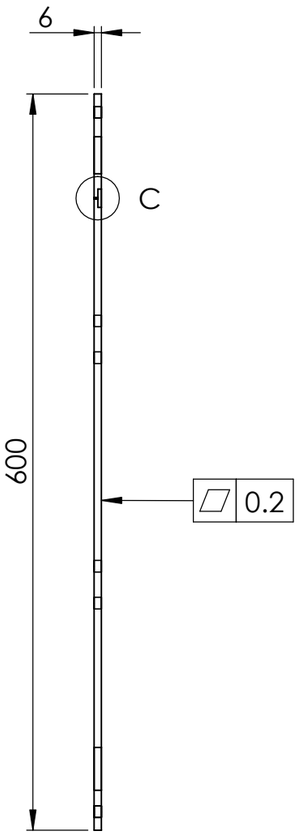
K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

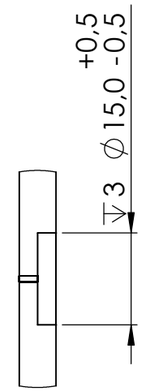
Edición	Modificación	Fecha	Nombre

	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.

Tolerancia: ± 0.5 mm	Peso: 3,1 kg	Material: Acrílico de alta resistencia transparente	
U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA		Denominación: Placa de visualización	Escala: 1:5
		Número de Lámina: 03 DE 013	Registro:
		(sustitución)	

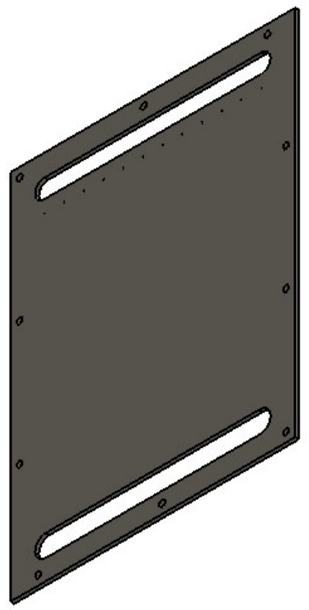


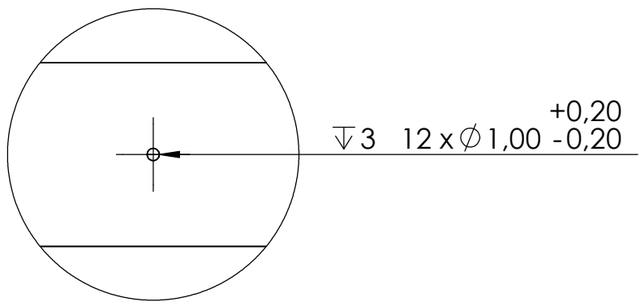




DETALLE C
ESCALA 1 : 1

VISTA ISOMÉTRICA





DETALLE D
ESCALA 2 : 1

K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	K.G. - J.T.
Revisó:	15/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	15/6/2025	Ing. Nuñez D.

Tolerancia: ± 0.5 mm

Peso: 1.7 kg

Material: Acrílico blanco de alta resistencia

U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

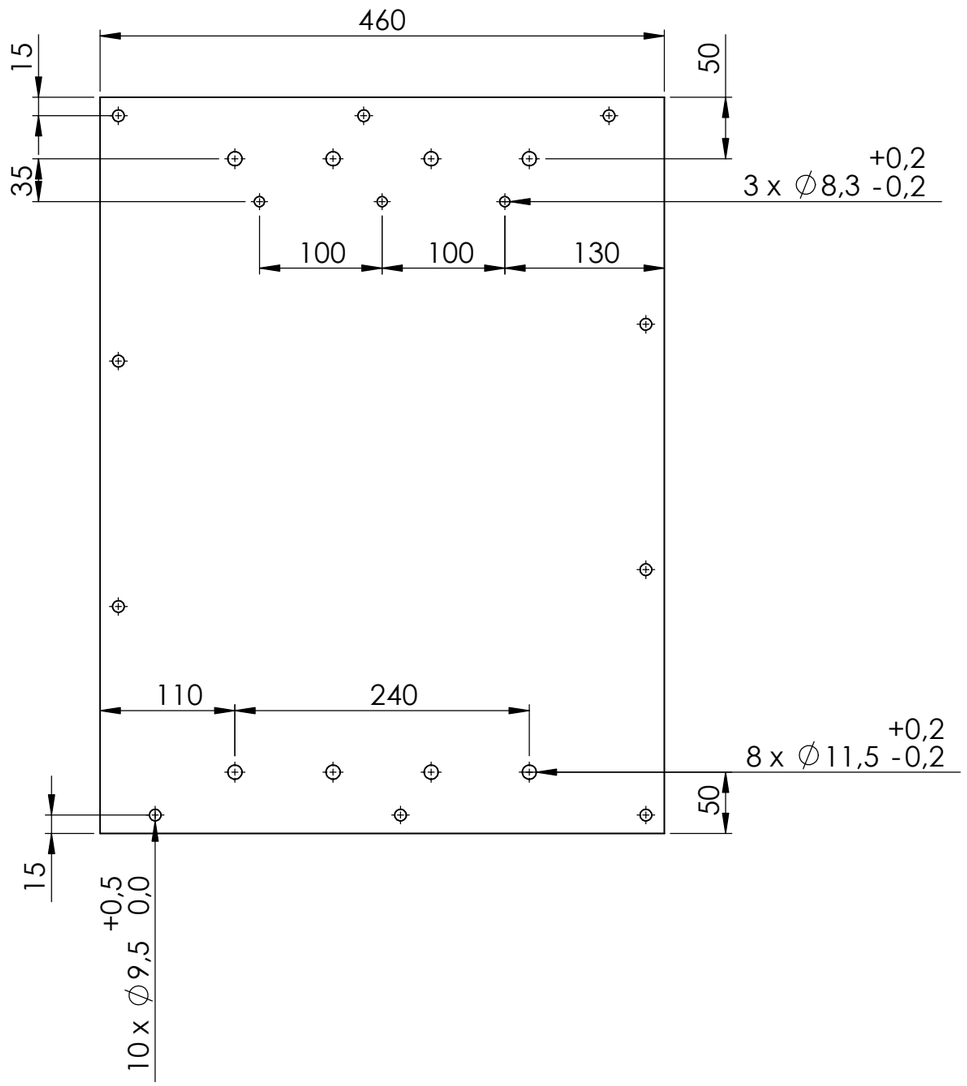
Denominación: Placa de acrílico blanco intermedia 6 mm

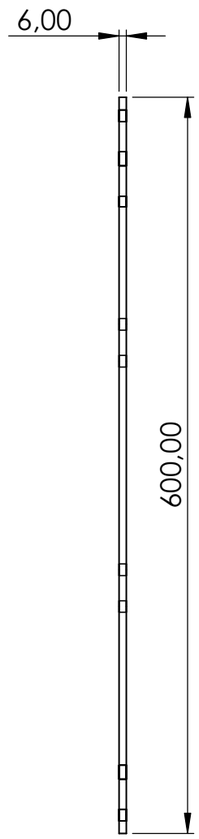
Escala: 1:5

Número de Lámina: 04 DE 013

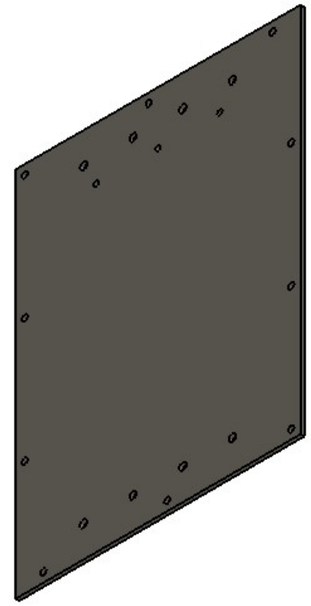
Registro:

(sustitución)





VISTA ISOMÉTRICA



K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.

Tolerancia: ±0,5 mm

Peso: 1,9 kg

Material: Acrílico blanco de alta resistencia

U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

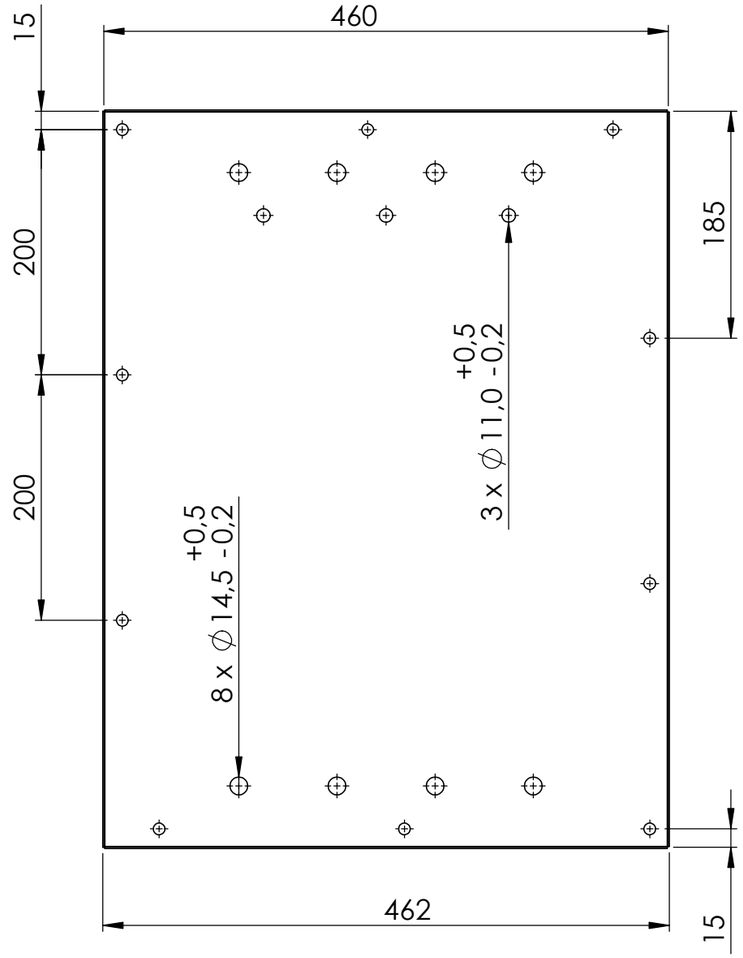
Denominación: Placa de acrílico blanco inferior 6 mm

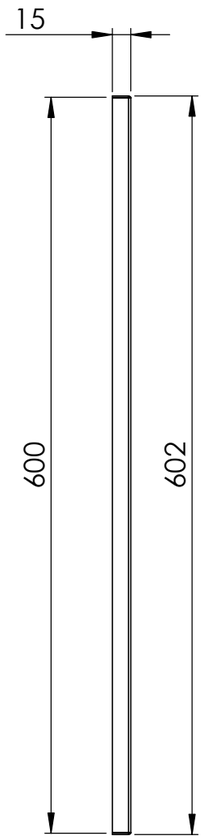
Escala: 1:5

Número de Lámina: 05 DE 013

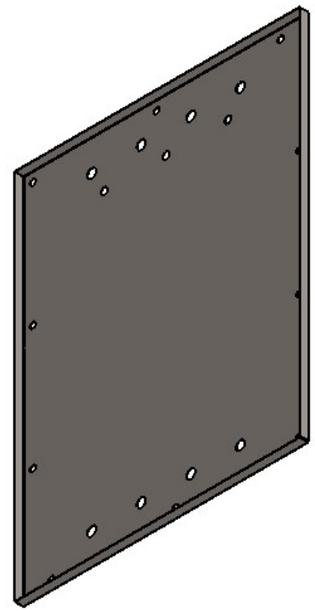
Registro:

(sustitución)





VISTA ISOMÉTRICA



K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.

Tolerancia: ± 0.5mm

Peso: 2.4 kg

Material: Chapa metalica de acero inoxidable

U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

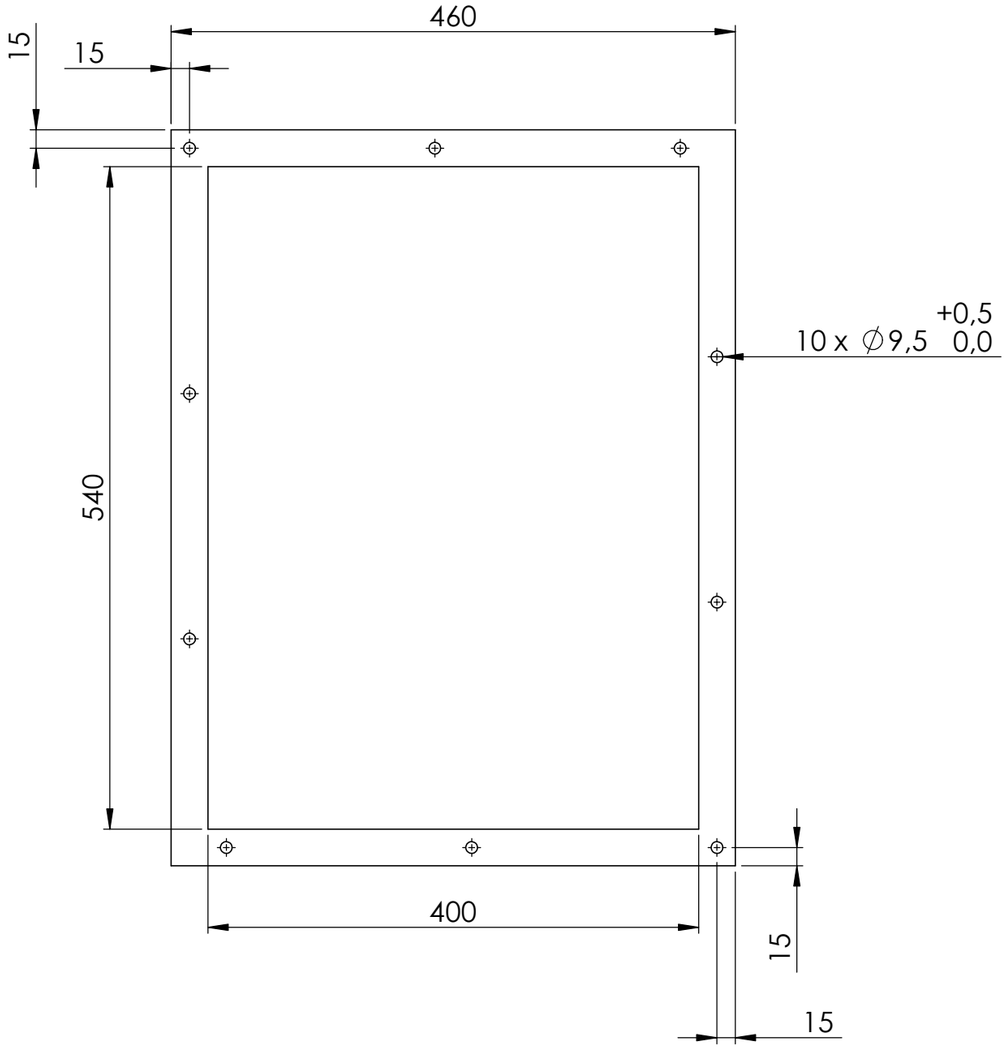
Denominación: Soporte principal

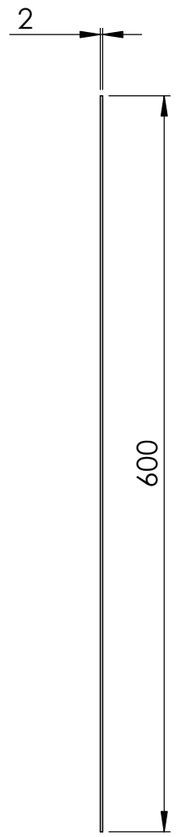
Escala: 1:5

Número de Lámina: 06 DE 013

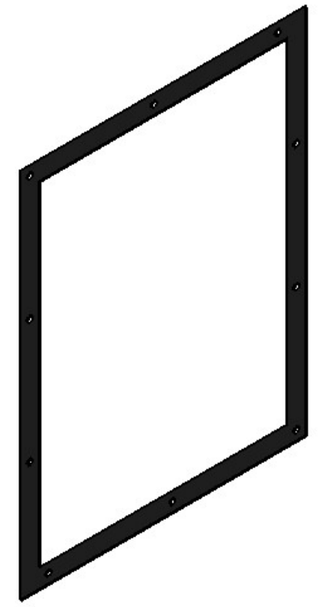
Registro:

(sustitución)





VISTA ISOMÉTRICA



K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.

Tolerancia: ± 1 mm

Peso: 0.12 kg

Material: Corcho

U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

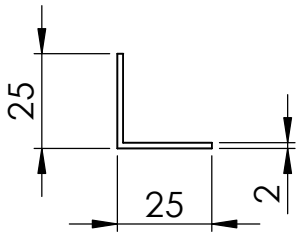
Denominación: Empaque de corcho

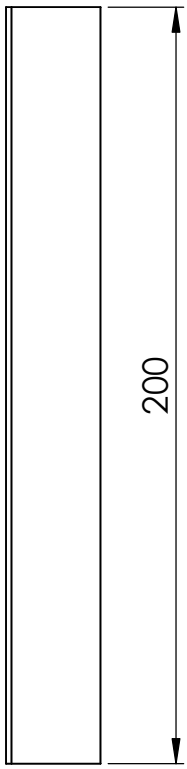
Escala: 1:5

Número de Lámina: 07 DE 013

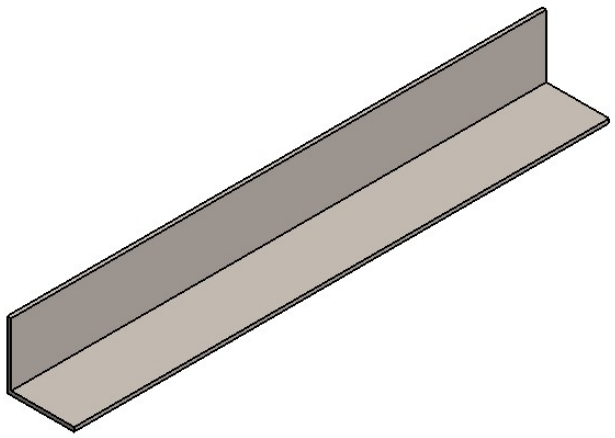
Registro:

(sustitución)



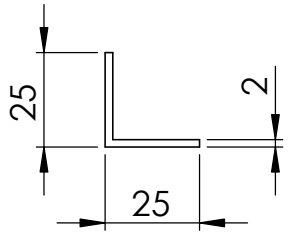


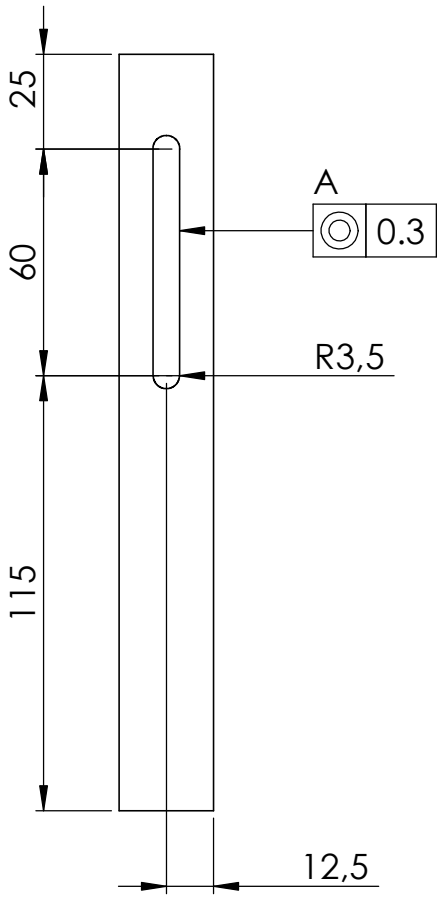
VISTA ISOMÉTRICA



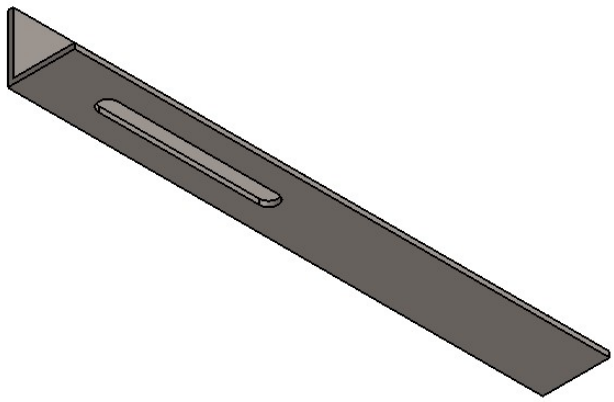
K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Tolerancia: ± 0.5 mm	Peso: 116 gr	Material: Acero inoxidable AISI 316	
	Fecha	Nombre	Denominación: Soporte vertical inferior — Escala: 1:2
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.	
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.	
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.	
U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA			Número de Lámina: 08 DE 013 — Registro:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre
			(sustitución)



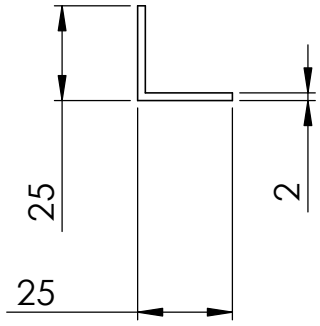


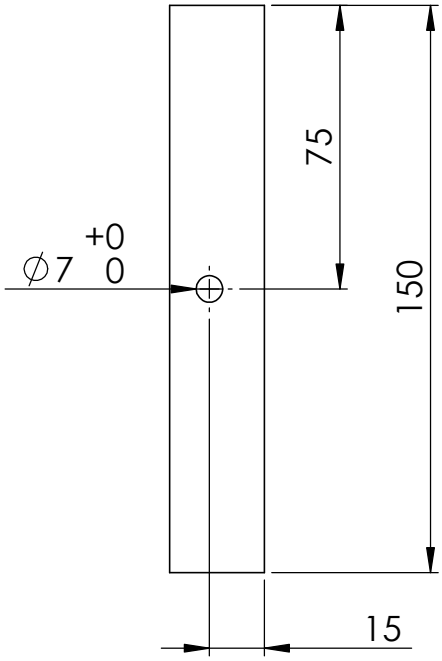
VISTA ISOMÉTRICA



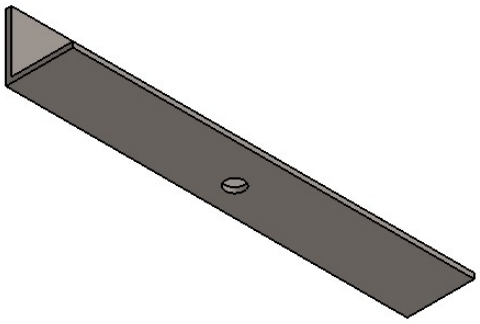
K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Tolerancia: ± 0.5 mm	Peso: 146 gr	Material: Acero inoxidable AISI 316	
	Fecha / Nombre	Denominación: Soporte lateral superior regulable	Escala: 1:2
Dibujó: 12/6/2025 G.K. - T.J.			
Revisó: 16/6/2025 Ing. Nuñez D.			
Aprobó: 16/6/2025 Ing. Nuñez D.			
U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA		Número de Lámina: 09 DE 013	Registro:
Edición / Modificación / Fecha / Nombre		(sustitución)	





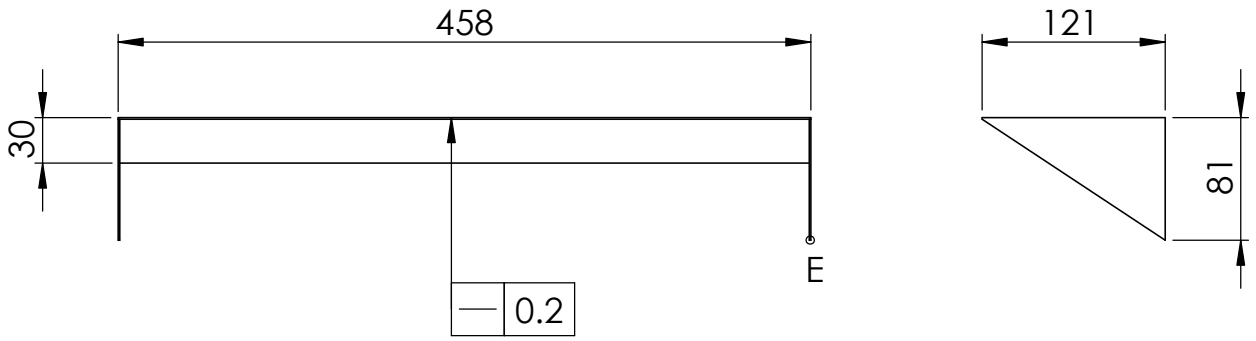
VISTA ISOMÉTRICA

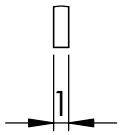


K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Tolerancia: ± 0.5 mm	Peso: 114 gr	Material: Acero inoxidable AISI 316	
	Fecha	Nombre	Denominación: Soporte lateral regulable interno
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.	Escala: 1:2
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.	
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.	
U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA			Número de Lámina: 010 DE 013
Edición	Modificación	Fecha	Nombre
			(sustitución)

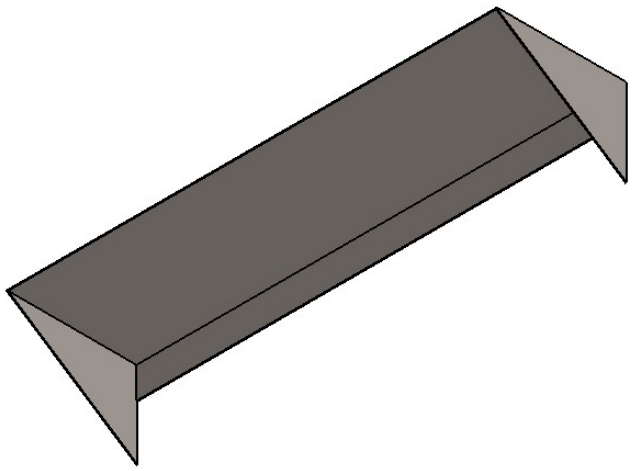
Registro:





DETALLE E
ESCALA 2 : 1

VISTA ISOMÉTRICA

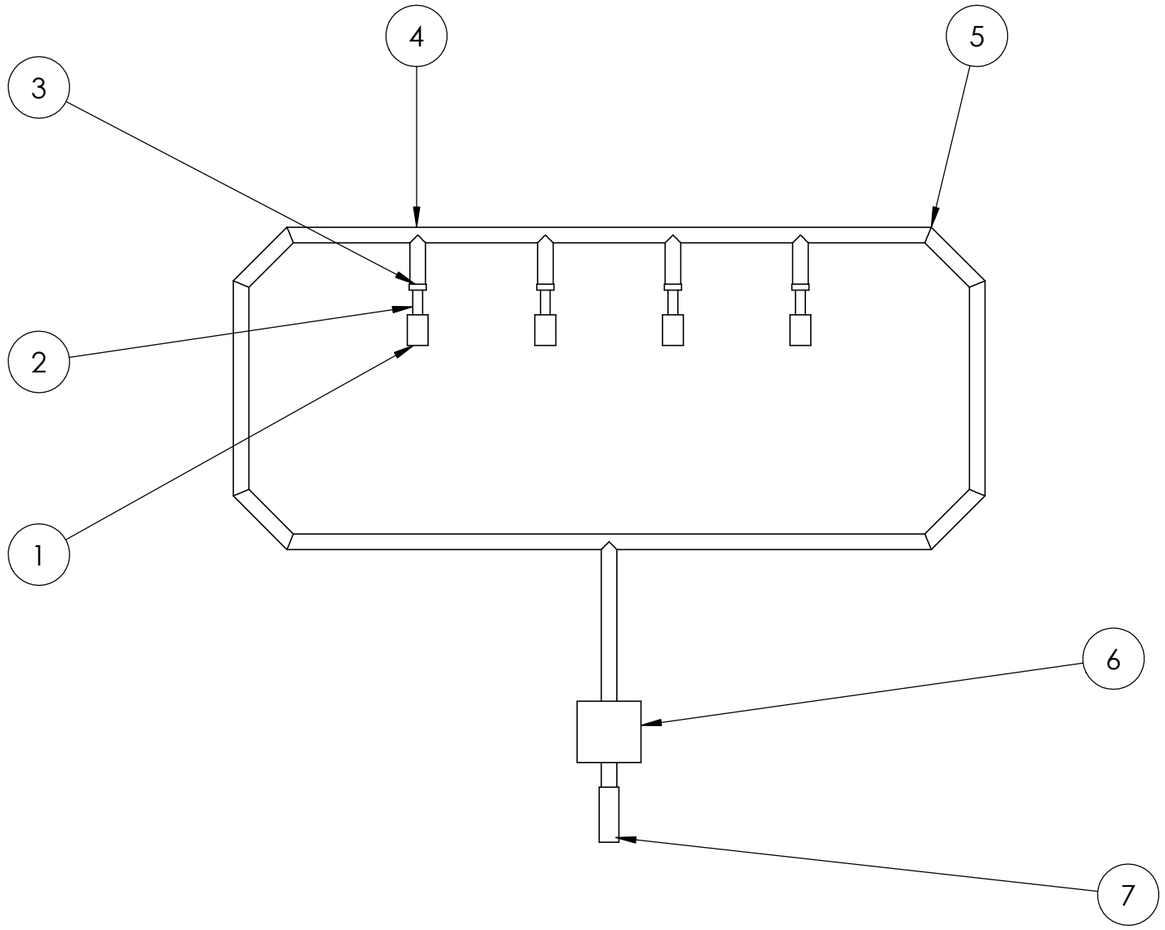


K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

				Tolerancia: ± 0.5 mm	Peso: 626 gr	Material: Acero inoxidable AISI 316	
					Fecha	Nombre	Denominación: Soporte de mando
				Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.	Escala: 1:5
				Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.	
				Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.	
				U.T.A.			Número de Lámina: 011 DE 013
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERÍA MECÁNICA			(sustitución)

Registro:

Sistema Hidráulico



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Válvula de regulación tipo aguja	Adquirido	4
2	Manquera 8 mm	Adquirido	4
3	Reducción de 1/2 in - 8 mm	Adquirido	4
4	T de 1/2 in	Adquirido	5
5	Codo 45° de 1/2 in	Adquirido	8
6	Medidor de caudal digital	Adquirido	1
7	Llave de compuerta de 1/2 in	Adquirido	1

K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

Tolerancia: | Peso: | Material: VARIOS

	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.

U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

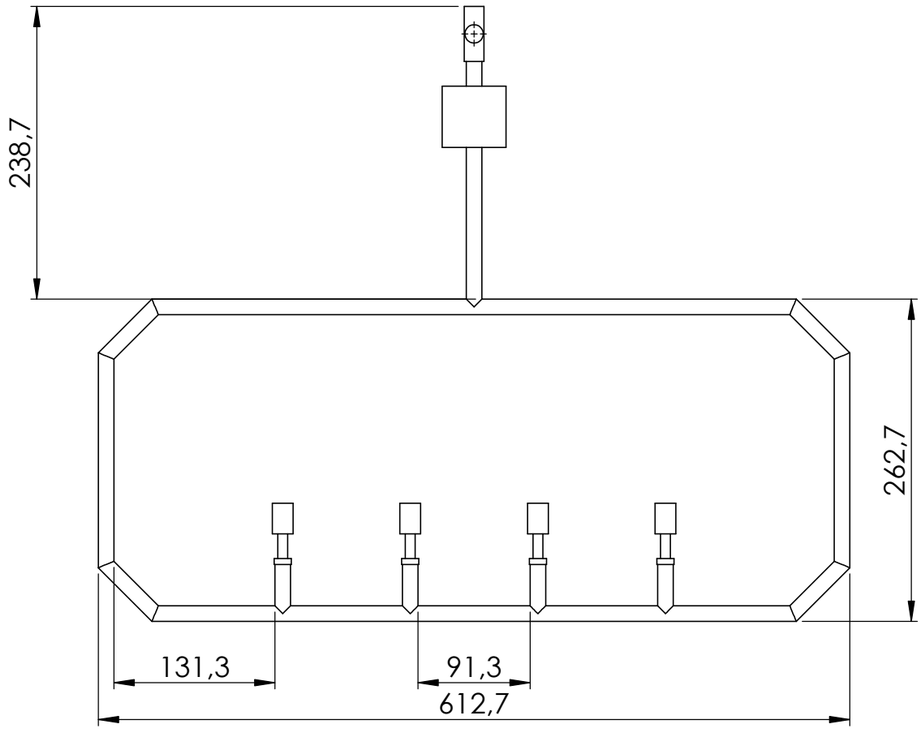
Denominación: Sistema hidráulico

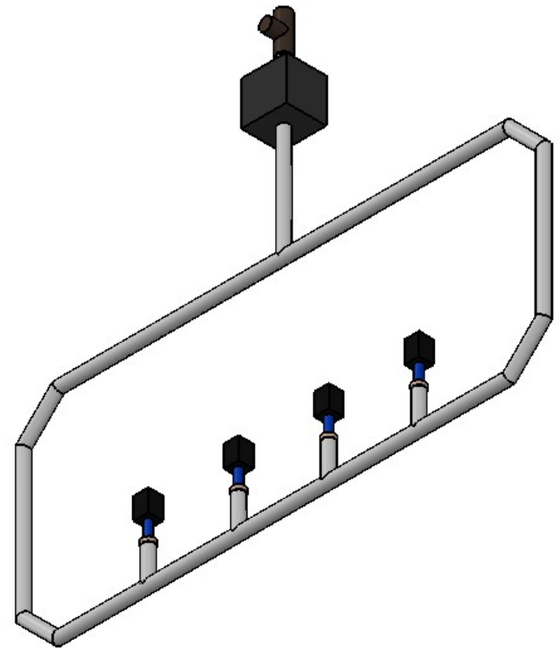
Escala: 1:5

Número de Lámina: 012 DE 013

Registro:

(sustitución)





K.G. - Kevin Guamán
J.T. - Jean Tipantasig

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

	Fecha	Nombre
Dibujó:	12/6/2025	G.K. - T.J.
Revisó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.
Aprobó:	16/6/2025	Ing. Nuñez D.

Tolerancia:

Peso:

Material:
Varios

U.T.A.
INGENIERÍA MECÁNICA

Denominación:
Medidas del sistema hidráulico

Escala:
1:5

Número de Lámina:
013 DE 013

Registro:

(sustitución)