

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE  
VISUALIZACIÓN SCHLIEREN PARA EL TÚNEL  
AERODINÁMICO DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS  
LIBERTADORES.**

**GONZÁLEZ SASTOQUE ANDRÉS ENRIQUE.  
HASTAMORIR GONZÁLEZ GHYLVVER ALEXANDER .**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA AERONÁUTICA  
BOGOTÁ D.C.  
2015**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE VISUALIZACIÓN  
SCHLIEREN PARA EL TÚNEL AERODINÁMICO DE LA  
INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES.

GONZÁLEZ SASTOQUE ANDRÉS ENRIQUE

Cód 201010042604.

HASTAMORIR GONZÁLEZ GHYLVÉR ALEXANDER .

Cód 200910075604

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico

Director del Proyecto:

Msc. IVÁN FELIPE RODRÍGUEZ BARÓN

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA AERONÁUTICA  
BOGOTÁ D.C.

2015

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

## Dedicatoria

*Dedicamos esta tesis a nuestros padres, quienes nos apoyaron emocional y económicamente a concluir con éxitos esta etapa de nuestras vidas.*

*A nuestros amigos quienes nos apoyaron a escribir y concluir esta tesis.*

*A nuestros maestros quienes nunca desistieron al enseñarnos, y nos apoyan siempre a ser mejores profesionales pero sobre todo mejores personas.*

## **Agradecimientos**

*Un sincero agradecimiento a los*

*Ing. Aurelio Méndez Moreno,  
Ing. Diego Armando Reyes Caballero,  
Msc. Francisco Javier González Cruz,  
Msc. Iván Felipe Rodríguez Barón,  
Ing. Jesús Alberto Barón Cruz,  
Msc. Jhonathan Orlando Murcia Piñeros,  
Ing. Marcela Ríos Romero,  
Estudiante de Ing Sebastian Moreno.*

*Gracias a su apoyo y motivación se pude llevar a cabo este proyecto, sus consejos nos permitieron seguir adelante y evitaron que decayéramos en este camino que nosotros elegimos recorrer.*

## Tabla de Contenidos

	Pág.
<b>GLOSARIO</b>	12
<b>VARIABLES</b>	14
<b>RESUMEN</b>	16
<b>ABSTRACT</b>	17
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	18
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	19
<b>OBJETIVOS</b>	20
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	21
<b>2. MARCO CONCEPTUAL</b>	23
2.1. ÓPTICA	23
2.1.1. Óptica Geométrica	23
2.1.1.1. Reflexión.	24
2.1.1.2. Espejos.	25
2.1.1.3. Refracción	28
2.1.1.4. Lentes	29
2.1.2. Óptica Física	30
2.1.2.1. Difracción	30
2.1.2.2. Interferencia	31
2.1.2.3. Principio de Huygens	32
2.2. CONCEPTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	33
2.2.1. Conducción	33
2.2.2. Convección.	34
2.2.2.1. Convección Natural.	34
2.2.2.2. Convección Forzada.	35
2.2.3. Radiación.	35
2.3. CONCEPTOS BÁSICOS SCHLIEREN	37
2.3.1. Antecedentes.	37
2.3.2. Personajes Relevantes en la Historia y Desarrollo de la Técnica	39
2.3.3. Propagación De La Luz En Un Medio No Homogéneo.	39
2.3.4. Sistema Schlieren y Observaciones.	41
2.3.4.1. Elementos.	42
2.3.4.2. Tipos de montajes.	42

<b>3. TÚNEL AERODINÁMICO EXPERIMENTAL DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES</b>	45
3.1. PLANOS DEL LABORATORIO DE AERODINÁMICA EXPERIMENTAL DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES.	49
<b>4. MONTAJE</b>	51
4.1. ELEMENTOS DEL MONTAJE	51
4.1.1. Espejo	51
4.1.1.1. Base cinemática	52
4.1.1.2. Condiciones de Cuidado del espejo	52
4.1.2. Fuente de Luz	53
4.1.3.. Cámara	53
4.1.4. Cuchilla	54
4.2. DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS	54
4.2.1. Montaje en el Túnel Aerodinámico	55
<b>5. DATOS EXPERIMENTALES</b>	57
5.1. EXPERIMENTOS PREPARATORIOS AL MONTAJE EN TÚNEL	57
5.2. EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL TÚNEL DE VIENTO	58
<b>6. ANÁLISIS COMPUTACIONAL</b>	68
<b>7. CONCLUSIONES</b>	74
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	76
<b>ANEXOS</b>	78

# LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Conceptos Óptica	23
Figura 2. Reflexión Especular y Difusa	24
Figura 3. Reflexión	25
Figura 4. Espejos Planos	26
Figura 5. Espejos Cóncavo y Convexo	27
Figura 6. Ley de Snell	29
Figura 7. Tipos de Lentes	29
Figura 8. Lentes Convergente y Divergente	30
Figura 9. Difracción	30
Figura 10. Interferencia de Ondas	31
Figura 11. Doble rendijade Young	32
Figura 12. Modos de la Transferencia de Calor	33
Figura 13. Conducción de Calor en Una Placa Plana	34
Figura 14. Convección natural (libre)	35
Figura 15. Convección forzada	35
Figura 16. Radiación Solar	36
Figura 17. Sistema Schlieren Original creado por Hooke	37
Figura 18. Línea de tiempo del desarrollo del sistema Schlieren	38
Figura 19. Fenómeno de la convección observado con la técnica Schlieren	41
Figura 20. Schlieren tipo-z	42
Figura 21. Schlieren espejo Coincidente	43
Figura 22. Sistema Schlieren de alineación fuera del eje	44
Figura 23. Túnel Aerodinámico Experimental De La Institución Universitaria Los Libertadores	45
Figura 24. Sección de prueba	46
Figura 25. Sección de entrada y Salida del Túnel Aerodinámico	46
Figura 26. Perfil de Velocidades del Túnel de Viento	47
Figura 27. Vista superior del Túnel de viento	49
Figura 28. Sección de pruebas del túnel de viento	50
Figura 29. Espejo	51
Figura 30. Base cinemática	52
Figura 31. Fuente de Luz	53
Figura 32. Cámara	54
Figura 33. Cuchilla	54
Figura 34. Disposición de los Elementos	55
Figura 35. Montaje Técnica de Schlieren en el túnel Aerodinámico de la Institu- ción Universitaria los Libertadores	56
Figura 36. Observación del Flujo Convectivo de una Vela.	57
Figura 37. Observación del Flujo convectivo sobre una Superficie.	57
Figura 38. Observación del Flujo convectivo sobre la salida de un intercambiador de calor.	58
Figura 39. Placa plana	59
Figura 40. Flujo sobre placa plana	59

Figura 41. Modelos de Estudio	60
Figura 42. Media Luna	61
Figura 43. Borde de la cara Exterior	62
Figura 44. Romboide	62
Figura 45. Borde inferior del Romboide	63
Figura 46. Perfil	64
Figura 47. Media Luna	65
Figura 48. Borde Superior de la cara Exterior.	65
Figura 49. Romboide	66
Figura 50. Punta del Romboide	66
Figura 51. Perfil	67
Figura 52. Simulación Media Luna.	69
Figura 53. Media Luna Simulación vs Practica.	69
Figura 54. Simulación Romboide.	70
Figura 55. Romboide Simulación vs Practica.	70
Figura 56. Simulación Romboide con mayor ángulo de Proyección.	71
Figura 57. Romboide 2 Simulación vs Practica	71
Figura 58. Simulación perfil	72
Figura 59. perfil Simulación vs Practica	72
Figura 60. Simulación perfil 2.	73
Figura 61. Perfil 2 Simulación vs Practica.	73
Figura 62. Calentador de aire.	82
Figura 63. Pruebas preparatorias Schlieren usando un puntero laser y un espejo cóncavo común.	84
Figura 64. Técnica de Schlieren primeras pruebas Túnel Aerodinámico.	85

# LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Número de Reynolds	48
Tabla 2. Velocidades Túnel de Viento	78
Tabla 3. Datos técnicos túnel aerodinámico TELSAT Aerospace	78
Tabla 4. Costos Proyecto	83

# LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Tablas de especificaciones técnicas.	78
Anexo B. Desarrollo matemático de las características del túnel aerodinámico.	79
Anexo C. Recomendaciones y Costos	82
Anexo D. Pruebas Preparatorias	84
Anexo E. Carta de cesión de Derechos	86

## GLOSARIO

**Aberración Cromática:** Fenómeno producido por la diferencia en la longitud de onda de los rayos de luz que llegan a un mismo punto.

**CAD:** acrónimo de Computational Assist Design que traduce Diseño asistido por computadora

**CAE:** acrónimo de Computer-Aided Engineering que traduce Análisis de Ingeniería por Computadora

**CFD:** acrónimo de Computational Fluid Dynamics que traduce Dinámica de Fluidos por Computadora.

**Capa Limite:** capa limite se define como la zona entre un fluido y una superficie donde el movimiento se perturba; en esta la velocidad del fluido va desde cero (contacto con la superficie) hasta 99 % (el punto más lejano).

**Gradiente:** Razón de cambio de una magnitud.

**FEA/FEM:** acrónimo de Finite Element Analysis que traduce Análisis por Elementos Finitos.

**Flujo Convectivo:** Circulación de la masa de un fluido durante un proceso de transferencia de calor por convección, de importancia en sistemas pasivos de refrigeración de reactores de agua ligera.

**Flujo Subsónico:** Flujos con velocidades por debajo de la del sonido  $Mach < 1$ .

**Flujo Transónico:** Flujos con velocidades cercanas a la del sonido  $Mach \cong 1$ .

**Flujo Sónico:** Flujos con velocidades igual a la del sonido  $Mach = 1$

**Flujo Supersónico:** Flujos con velocidades mayores que la del sonido  $Mach > 1$

**LED SMD:** Diodo emisor de luz el cual está montado sobre la superficie de una placa de circuito impreso y encapsulado en una resina semirrígida. En este caso SMD es el Acronimo de surface mounted device en español dispositivo de montaje superficial.

**Flujo Hipersónico:** Flujo con velocidades muy superiores a la del sonido  $Mach > 4, 5$ .

**Luz Colimada:** Fenómeno en el cual los rayos de luz que provienen de una misma fuente son paralelos los unos con los otros.

**Onda de Choque Normal:**Onda de choque unidimensional.

**Onda de Choque Oblicua:** onda de choque bidimensional que tiene lugar en cuerpos con forma de cuña.

**Schlieren:**Técnica de visualización que permite apreciar las variaciones en el gradiente de densidad producto de un cambio de temperatura o velocidad.

**Vorticidad:**La vorticidad es una medida vectorial que caracteriza a la rotación que experimenta y a la que está sometido el fluido.

## VARIABLES

### Nomenclatura

$A$	Área.
$a$	Distancia libre entre la fuente de la imagen y el plano de corte.
$\Delta a$	Cambio debido a la refracción.
$C$	Centro de Curvatura de un espejo esférico, también contraste de la imagen.
$c_0$	Velocidad de la luz en el vacío.
$c$	Velocidad de la luz en un medio diferente al vacío.
$D$	Dioptra de una lente, también se define como el ancho en una rendija.
$D_e$	Diametro del Espejo.
$D_h$	Diámetro hidráulico.
$d$	Representan distancias.
$F$	Punto focal.
$f$	Distancia focal.
$f/n_0$	Relación focal del espejo o el lente.
$h$	Altura del Objeto, también Constante de transferencia de calor por convección.
$h'$	Altura de la Imagen.
$I$	Imagen resultante de la reflexión sobre un espejo.
$K$	Conductividad térmica, también Constante de Gladstone-Dale.
$l, l$	Representan longitudes.
$M$	Amplificación de la lente, también número de Mach.
$m$	Representa un número entero.
$n$	Índice de refracción.
$p$	Distancia entre el objeto y el espejo, también presión.
$Q$	Tasa de Conducción de Calor.
$q$	Distancia entre la imagen y el espejo.
$R$	Radio de curvatura del espejo, también constante universal de los gases.
$Re$	Número de Reynolds.
$s$	Sección de pruebas.
$T$	Temperatura.
$T_s$	Temperatura superficial.
$T_f$	Temperatura Final.
$t$	Tiempo.
$V$	Punto central del espejo.
$v$	Velocidad.
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas.

## Alfabeto griego

$\alpha, \theta$	Representan ángulos.
$\lambda$	Longitud de onda.
$\rho$	Densidad $Kg/m^3$ .
$\epsilon$	Angulo de deflexión de la luz.
$\mu$	Viscosidad de un fluido $Ns/m^2$ .
$\xi$	Constante.

## RESUMEN

Se ha implementado el sistema de visualización de Schlieren en el túnel aerodinámico de la Institución Universitaria Los Libertadores, con el propósito de mejorar la calidad de las investigaciones referentes al estudio de la aerodinámica y transferencia de calor; no obstante aclarando que la aplicación de la técnica no se limita a estas dos exclusivamente, permitiendo realizar estudios relacionados con la gasodinámica. Ha de destacarse que esta investigación genera una revisión de los conceptos más básicos de la óptica, enfatizando la teoría de los espejos y fenómenos como la refracción y la difracción, siendo estos dos últimos vitales para entender la teoría detrás la técnica, de igual manera se realizó un recorrido breve sobre la trayectoria histórica que ha tenido la técnica de Schlieren en el pasar de los años, enfocándose en los momentos históricos más relevantes y que más significaron en el desarrollo de la misma.

Como propósito fundamental de la investigación y como el título de la misma lo indica, esta se centró en el diseño y construcción de un sistema Schlieren capaz de funcionar en el túnel aerodinámico de la institución universitaria los Libertadores, para lo cual se generó una investigación de dos niveles; una primera parte centrada en explicar de forma fundamental la teoría más básica de la técnica y una segunda parte en desarrollar el dispositivo funcional. Es vital importancia resaltar que la misma manera se realizó un barrido de información relacionado con las aplicaciones que pudiese llegar esta técnica a nivel Colombia, enmarcándose su uso por parte de otras instituciones en el campo del análisis de flujo convectivo sobre superficies calientes bajo condiciones ambientales normales.

Ha de mencionarse que con el fin de convalidar los resultados obtenidos durante el transcurso de las prácticas realizadas en el túnel aerodinámico, se realizaron una serie de simulaciones CFD, que ayudasen a generar un punto de comparación entre las imágenes prácticas y las simuladas, con el objetivo principal de establecer la eficiencia de la técnica, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos entre la práctica y la simulación deben tener puntos en común; siendo conscientes que esta no pueden ser idénticas dadas las condiciones ideales que supone un software FEA/FEM como ANSYS y donde existen variables que no son tomados en cuenta dentro del software y que si están presentes en la práctica.

Palabras clave:

Gasodinámica, Schlieren, CFD, Flujo Convectivo.

## ABSTRACT

It has been implemented Schlieren display system in the wind tunnel of the university's Libertadores, with the aim of improving the quality of investigations concerning the study of aerodynamics and heat transfer; however clarify the application of the technique is not limited to these two only, allowing gasodynamic perform related studies. It is emphasized that this research generates a revision of the most basic concepts of optics, emphasizing the theory of mirrors and phenomena such as refraction and diffraction, the latter two vital to understand the theory behind the technique, just as is hiso a brief tour of the historical trajectory that has been in the Schlieren technique over the years, focusing on the most relevant and most meant to develop the same historic moments.

Fundamental purpose of the investigation and as the title suggests it, this is focused on the design and construction of a Schlieren system capable of operating in the wind tunnel of the university's Libertadores, for which an investigation was generated two levels; a first part focused on fundamentally explain the most basic theoretical technique and a second part in developing the functional device. It is vital to note that the same way a sweep of information related to the applications that this technique could reach level Colombia took place, being framed use by other institutions in the field of analysis of convective flow on hot surfaces under normal ambient conditions .

It should be mentioned that in order to validate the results obtained during the course of the practices made in the wind tunnel, a series of CFD simulations, that would help were made to generate a point of comparison between practical images and simulated with main objective of establishing the efficiency of the technique, considering that the results obtained from practice and simulation must have points in common; being aware that this may not be identical because of the ideal conditions representing an FEA / FEM software like ANSYS and where there are variables that are not taken into account in the software and if they are present in practice.

Keywords:

Gasodynamic, Schlieren, CFD, Convective Flow.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Con base a la necesidad de conocer e identificar el comportamiento del flujo de aire circundante a una superficie, nace la necesidad de la aplicación de técnicas eficientes que permitan un claro reconocimiento del comportamiento de este; actualmente la institución cuenta con un laboratorio experimental para pruebas aerodinámicas, el cual consta de la existencia de un túnel de viento subsónico de circuito abierto y una balanza de tres ejes, en este se aplican técnicas de visualización con humo, que dependen en gran medida de varias variables no controlables como lo es la cercanía del flujo tintado con la superficie o elemento de prueba, lo que en sí mismo genera la necesidad de encontrar técnicas que permitan centrar la zona de estudio, permitiendo de esta manera profundizar en los análisis del comportamiento del flujo cercanos al elemento de prueba; esto con el fin de generar condiciones de estudio más precisas y que ayudaran al desarrollo de asignaturas tales como mecánica de fluidos, aerodinámica general y aerodinámica computacional.

## JUSTIFICACIÓN

Dentro del contexto del estudio aerodinámico se hace necesario y relevante el tener conocimiento concerniente al comportamiento, que puede llegar a tener un flujo de aire sobre un cuerpo y/o elemento de estudio, este conocimiento permite establecer factores de forma para aumentar o disminuir condiciones de arrastre o sustentación; de la misma forma permite establecer estudios respecto a condiciones de desprendimiento de capa límite y caracterización aerodinámica de formas y/o geometrías que faciliten el desarrollo de las investigaciones y/o proyectos que sean llevados a cabo dentro del contexto de las asignaturas o semilleros de investigación de la Institución Universitaria Los Libertadores.

El estudio aerodinámico referente al comportamiento del flujo se puede establecer bajo parámetros teórico-analíticos que mediante ecuaciones ya establecidas dan como resultados coeficientes y variables que permiten por medio de un software FEA/FEM como ANSYS; generar simulaciones de dicho comportamiento, pero que se construyen bajo condiciones ideales; por otro lado el componente experimental, permite generar condiciones más reales y aplicables, pero que pueden estar limitados en cuanto a la precisión. El método de visualización de Schlieren permite captar variaciones en el gradiente de densidad de un flujo que circula alrededor de una superficie y/o elemento, esto concede una imagen que permite apreciar el comportamiento del fluido sobre la superficie; estos datos visuales nos dan paso al desarrollo de parámetros de diseño respecto a las características aerodinámicas de nuestro elemento de estudio, que debido a su naturaleza pueden llegar a ser más precisos y/o exactos en comparación con otras técnicas de visualización, esta precisión agregada permite a docentes y estudiantes el desarrollo de análisis foto interpretativos más exactos que generan condiciones para la creación de documentos, artículos, informes, etc. de mayor calidad.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y construir el sistema de visualización de schlieren para el túnel aerodinámico de la fundación universitaria los libertadores.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar las características y parámetros esenciales del método de schlieren.
- Calcular y seleccionar los lentes, espejos y equipos necesarios para la disposición del sistema de schlieren en el túnel aerodinámico.
- Realizar el debido montaje del sistema con la realización de la pruebas de visualización.
- Obtener las fotografías de alta calidad que permita visualizar el flujo sobre modelos a través de la técnica.
- Realizar fotointerpretación y correlación de los datos obtenidos por medio del software FEA/FEM (ANSYS).

# 1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al desarrollo y aplicación de la técnica de Schlieren en el túnel aerodinámico de la Institución Universitaria Los Libertadores, con el fin de establecer mejores condiciones para la investigación de los fenómenos aerodinámicos que puedan ocurrir sobre un cuerpo que se encuentre dentro de un fluido, en este caso el aire.

La técnica de Schlieren desde sus inicios en el siglo XVII, se estableció como una herramienta para la observación de los medios transparentes (aire), esta estaba enfocada en la investigación de la dinámica de gases. En un principio fue Hooke quien aplicó la técnica en la observación del comportamiento que tenía el aire que circundaba la flama de una vela; en el siglo XVIII la técnica no tuvo ningún avance notable, durante este periodo la técnica se limitó a la observación de estrías o venas dentro de los componentes ópticos; fue a finales de este siglo y a comienzos del otro cuando Christian Huygens implementó la utilización de espejos dentro de la técnica y estableció los principios fundamentales de esta. Durante el transcurso del siglo XX fue cuando gracias a las investigaciones de personajes como Robert W. Wood, Carl Cranz, Hubert Schardin, Rudolf Hermann, Douglas W. Holder y R.J. North que la técnica encontró su camino en la investigación aeronáutica, que desde un inicio gracias a las investigaciones de Einst Mach en el campo de la balística del siglo anterior, se desarrolló en el ámbito de la aerodinámica transónica y supersónica[1].

Hoy en día la técnica se aplica a la investigación y análisis gasodinámico de los flujos que viajan a velocidades hipersónicas dentro de toberas, de igual manera es una técnica ampliamente usada en la investigación de las ondas de choques que se generan en vehículos de vuelo transónico y supersónico (aeronaves militares, comerciales) sin dejar de lado el desarrollo militar que está ha tenido, a nivel de la transferencia de calor la técnica es usada para visualizar el comportamiento y distribución de flujos térmicos (aires acondicionados y calefactores) dentro de un ambiente.

Esta investigación se centra en establecer las condiciones para la utilización de la técnica en el túnel aerodinámico de la institución universitario los Libertadores, esto a través del reconocimiento de las investigaciones anteriores y la indagación de las características propias del sistema, que permitan identificar y analizar los diferentes componentes de la técnica para poder aplicarlos en el laboratorio, ha de aclararse de la misma manera se realizara una simulación que permita corroborar los datos prácticos obtenidos por la técnica. Es de vital importancia resaltar que la técnica ha sido ampliamente usada en la investigación de flujos transónicos, supersónicos e hipersónicos, y que de igual manera existen aplicaciones en el campo de la transferencia de calor; pero existen pocas pruebas o investigaciones que refuten su aplicación en flujos subsónicos como lo es en este caso en especial, también es importante denotar que en el caso de Colombia son pocas las personas que han incursionado en el campo y los que lo han hecho han in-

cursorado en los tópicos anteriormente mencionados.

Dentro del contexto de todo lo anteriormente mencionado esta investigación, aportara al entendimiento de la técnica de Schlieren y su aplicación dentro del campo de la aerodinámica subsónica; de igual manera generara condiciones propicias para la investigación de fenómenos aerodinámicos dentro de la institución.

Ha de aclararse que con el fin del buen desarrollo de esta investigación, esta se dividirá en cuatro grandes secciones, un marco referencial o conceptual, un marco práctico (montaje, pruebas), desarrollo de simulaciones y las conclusiones de los resultados obtenidos; Cabe mencionar dentro de este contexto, que esta investigación se centra y limita al desarrollo y luego aplicación de la técnica en el túnel de viento, centrándose en la conceptualización de los elementos involucrados en el montaje (espejos, lentes, cámaras, etc...) y la posterior toma de datos (fotografías) con el sistema, no excluyendo la fotointerpretación y correlación de datos, sin llegar a profundizar en el contexto del fenómeno observado.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

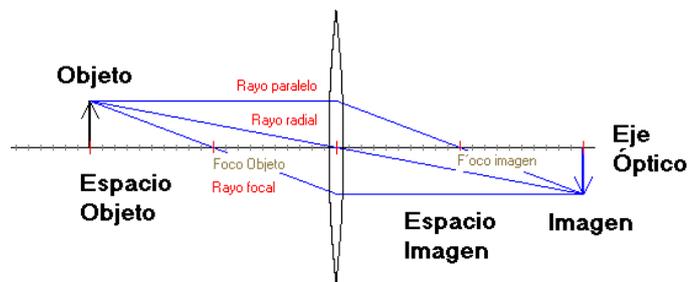
### 2.1. ÓPTICA

La óptica es la rama de la física que analiza las características y las propiedades de la luz, estudiando cómo se comporta y se manifiesta<sup>1</sup>.

#### 2.1.1. Óptica Geométrica.

La óptica geométrica es aquella que estudia la luz a partir de los principios de refracción y reflexión, considerando esta como un elemento de comportamiento particular y por ende lineal. Dentro de este contexto se aplican los conceptos de la formación de imágenes en espejos y lentes<sup>2</sup>.

Figura 1: Conceptos Óptica



Fuente: [www.acacia.pntic.mec.es](http://www.acacia.pntic.mec.es)

Para estudiar la posición de una imagen con respecto a un objeto se utilizan los siguientes conceptos:

- Eje óptico. Eje de abscisas perpendicular al plano refractor. El sentido positivo se toma a la derecha al plano refractor, que es el sentido de avance de la luz.
- Espacio objeto. Espacio que queda a la izquierda del dioptrio.
- Espacio imagen. Espacio que queda a la derecha del dioptrio.
- Imagen real e imagen virtual. A pesar del carácter ficticio de una imagen se dice que una imagen es real si está formada por dos rayos refractados convergentes. Una imagen real se debe observar en una pantalla. Se dice que es virtual si se toma por las prolongaciones de dos rayos refractados divergentes.
- Foco objeto. Punto  $F$  del eje óptico cuya imagen se encuentra en el infinito del espacio imagen.

<sup>1</sup>Definición de óptica - Qué es, Significado y Concepto [En línea]. Disponible en <<http://bit.ly/1MeVwvZ>>

<sup>2</sup>Página web <<http://bit.ly/1G783wb>>[En línea].

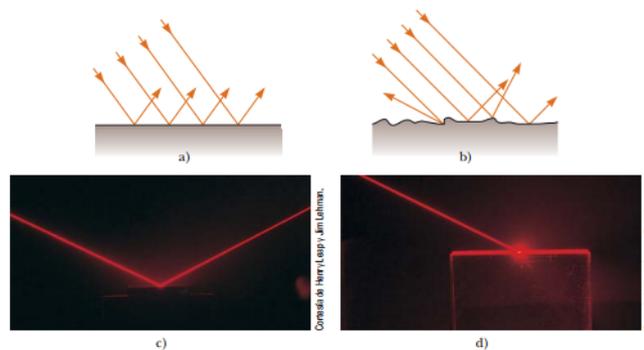
- Foco imagen. Punto  $F'$  del eje óptico que es la imagen de un punto del infinito del espacio objeto.

**2.1.1.1. Reflexión:** La reflexión se puede definir como el cambio de dirección que experimenta un rayo luminoso al chocar con la superficie de un objeto; este fenómeno es particularmente visible cuando un haz de luz incide sobre una superficie plana y pulida (espejo)<sup>3</sup>.

Existen dos formas de reflexión: la primera se da cuando rayos de luz inciden sobre una superficie uniforme, en este caso todos los rayos son direccionados en la misma dirección y el mismo ángulo, en este caso esta es llamada **reflexión especular**; en caso contrario si la superficie es rugosa, los rayos de luz que incidan sobre esta se dispersaran en diferentes direcciones, haciendo imposible la creación de una imagen clara, este tipo de reflexión se le conoce como **reflexión difusa**<sup>4</sup>.

La fig.2 permite apreciar gráficamente la diferencia entre estos dos tipos de reflexión; en la imagen de la derecha se aprecia como los rayos de luz luego de incidir sobre una superficie uniforme se reflejan de manera ordenada mientras que la imagen de la izquierda los rayos de luz son desorganizados, esto debido a las mismas leyes de la reflexión.

Figura 2: Reflexión Especular y Difusa



Fuente: Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II.

Dentro del contexto de la reflexión es vital denotar que esta se rige por dos importantes leyes:

1. El rayo incidente forma con la normal un ángulo de incidencia que es igual al ángulo que forma el rayo reflejado con la normal, que se llama ángulo reflejado<sup>5</sup>.

<sup>3</sup>Universidad tecnológica nacional-Facultad regional rosario.[En línea] Disponible en <<http://bit.ly/1HfNphs>>

<sup>4</sup>Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II; Raymond A. Serway.

<sup>5</sup>Página web:<<http://bit.ly/1hKvUXC>>[En línea]

2. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en un mismo plano, es decir, son coplanares.

La fig.3 permite apreciar las variables presentes en el fenómeno de la reflexión, de igual manera permite apreciar la veracidad de las leyes anteriormente mencionadas.

Figura 3: Reflexión



Fuente: Fullciencia.com 2012.

**2.1.1.2. Espejos.** Por definición, espejo es el nombre que recibe toda superficie o lámina de cristal azogado por la parte posterior, o de metal bruñido, para que se reflejen en ella los objetos. Por extensión se denomina espejo a toda superficie que produce reflexión de los objetos, por ejemplo: *la superficie del agua*<sup>6</sup>.

■ **Espejos planos.**

La formación de imágenes tiene su explicación en la ley de la reflexión donde los rayos de luz se reflejan hacia el ojo dando la impresión de que esta proviniese desde a detrás del espejo, cuando en realidad estas provienen del objeto y que debido a la superficie lisa y uniforme del espejo generan una reflexión especular que direcciona todos los rayos en una sola dirección<sup>7</sup>.

La imagen formada en el espejo plano tiene las siguientes características:<sup>8</sup>:

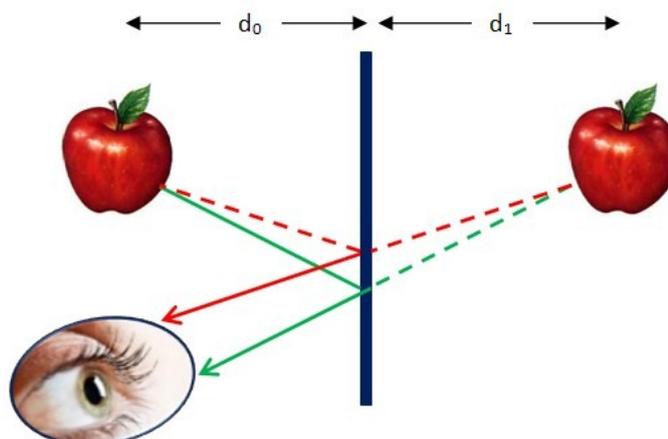
- La imagen formada es virtual.
- La imagen formada está a la misma distancia que el objeto del espejo.
- La imagen está derecha igual que el objeto, sin embargo experimenta una inversión lateral, o sea la izquierada está a la derecha y viceversa.
- La imagen es de igual tamaño que el objeto.

<sup>6</sup>Página web: <<http://bit.ly/1JmHPty>>[En línea]

<sup>7</sup>Física GIANCOLI sexta Edición

<sup>8</sup>Página web <<http://www.fisic.ch/cursos/>>[En línea]

Figura 4: Espejos Planos



Fuente: Tomado de [www.escolares.net](http://www.escolares.net)

### Espejos Esféricos.

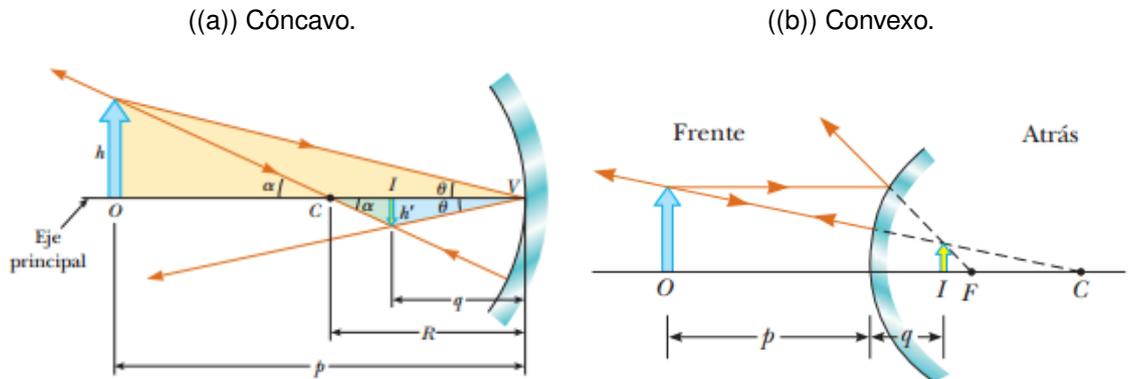
Las superficies reflectoras no siempre se limitan a espejos planos, existen espejos curvos que entre lo más comunes se encuentran aquellos que su forma es equivalente a la sección de una esfera. Un espejo **convexo** es llamado así cuando la reflexión ocurre sobre la superficie saliente o abombada de este, mientras que un espejo **cóncavo** es aquel donde la reflexión ocurre en la parte interna de la esfera<sup>9</sup>.

La fig.5 sección (a) permite apreciar las variables que se deben tener en cuenta al momento de estudiar la formación de imágenes sobre espejos esféricos. En esta imagen se observa como los rayos de luz provenientes de un objeto  $O$  con una altura  $h$ , inciden sobre la superficie curva del espejo con un ángulo  $\theta$  y  $\alpha$ ; el rayo que incide con el ángulo  $\theta$  golpea en el centro del espejo  $V$  y se refleja con ese mismo ángulo de entrada, mientras que el rayo que incide con el ángulo de entrada  $\alpha$  atraviesa en el centro de curvatura del espejo  $C$ , este rayo choca con la superficie del espejo con un ángulo de  $90^\circ$ , por lo cual se refleja sobre la misma trayectoria de llegada. En el punto donde ambos rayos reflejados convergen se genera una imagen  $I$ , la cual posee una altura  $h$ , la distancia que hay entre la  $I$  y el centro del espejo  $V$  se conoce como  $q$ , mientras que la distancia que hay entre el objeto y el centro del espejo  $V$  se le conoce como  $p$ ; el radio de curvatura del espejo  $R$  está dado por la distancia entre  $C$  y el centro del espejo  $V$ . Para el caso de la sección (b) se ha de tener en cuenta que el centro de curvatura  $C$  y la imagen  $I$  se generan en la parte posterior del espejo, por lo cual en este caso se aplica un manejo de signo distinto al de la sección (a)<sup>10</sup>.

<sup>9</sup>Física GIANCOLI sexta Edición, Formación de imágenes por medio de espejos esféricos Página 635.

<sup>10</sup>Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II.

Figura 5: Espejos Cóncavo y Convexo.



Fuente: Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II.

A partir de lo anteriormente mencionado se establece el modelo matemático-geométrico que rige a los espejos curvos, en este caso el desarrollo se centra en los espejos cóncavos haciendo claridad que para los espejos convexos aplican el mismo desarrollo pero con una aplicación de los signos distinta. "La primera variable a definir será la amplificación. La amplificación de un espejo se define como la altura de la imagen dividida por la altura del objeto"[8], matemáticamente esto se expresa de la siguiente manera:

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad (1)$$

De la ecuación 1 tenemos que  $M$  es la amplificación de la lente, mientras que  $h'$  y  $h$  son una relación entre la altura de la imagen creada con la altura del objeto respectivamente; de igual manera la amplificación de una lente se puede establecer como una relación entre la distancia que existe entre la imagen y la lente  $q$  y la distancia entre el objeto y la lente  $p$ .

De la fig.5 a partir de la sección (a) se puede deducir la ecuación del espejo, esto a partir del desarrollo geométrico del triángulo dorado más pequeño, a partir de este obtenemos que:

$$\frac{h'}{h} = -\frac{R - q}{p - R} \quad (2)$$

Al realizar una comparación entre la ecuación 1 y 2 y al aplicar el desarrollo algebraico obtenemos la ecuación del espejo en función de  $R$  definida como:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \quad (3)$$

De igual manera la ecuación del espejo puede estar definida a partir de la distancia focal del mismo, en este caso el objeto está muy lejos del espejo y  $p$  es

mucho más grande que  $R$ . Definimos  $f$  como el punto donde todos los rayos de luz convergen y matemáticamente se expresa como:

$$f = \frac{R}{2} \quad (4)$$

La distancia focal es un parámetro particular de un espejo determinado, y puede ser utilizada para comparar un espejo con otro. Al combinar las ecuaciones 2 y 3 la ecuación del espejo se expresa en función de la distancia focal:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (5)$$

Nótese que la distancia focal de un espejo depende sólo de su curvatura y no del material con que esté fabricado, porque la formación de la imagen es el resultado de rayos que se reflejan de la superficie del material<sup>11</sup>.

Ha de notarse de igual manera, que el desarrollo matemático referente a la teoría de los espejos esféricos, fue tomado en su totalidad de los textos: Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II y Física GIANCOLI sexta Edición, y que este documento solo hace referencia a este desarrollo.

**2.1.1.3. Refracción.** La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro<sup>12</sup>. Esta se produce debido al cambio de velocidad de luz al pasar de un medio a otro. Matemáticamente esta está definida así:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (6)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción del material y se define como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío  $c_0$  y la velocidad de la luz en un medio diferente al vacío  $c$ . Nótese también que la ecuación (6) fue tomada del texto Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media capítulo 2 conceptos básicos.

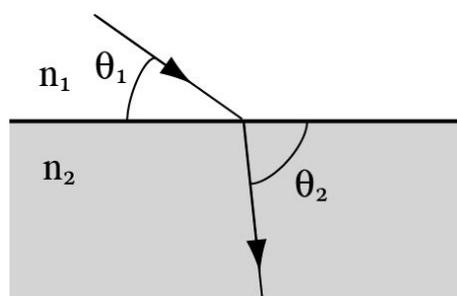
- **ley de Snell.** La ley de Snell es la relación analítica entre los índices de refracción de dos medios diferentes, teniendo en cuenta las direcciones de propagación de la luz respecto a la normal, esta se define de la siguiente manera.

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (7)$$

<sup>11</sup>Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II. Página 1012-1013

<sup>12</sup>Página web [www.fisic.ch](http://www.fisic.ch) [en línea]

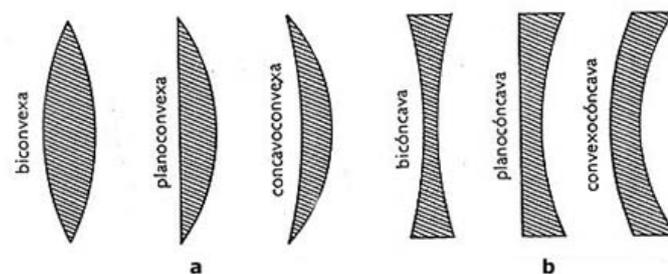
Figura 6: Ley de Snell.



Fuente: [www.ehu.es](http://www.ehu.es)

**2.1.1.4. Lentes.** Las lentes son medios transparentes limitados por dos superficies, siendo curva al menos una de ellas<sup>13</sup>. Estas están divididas en dos categorías *lentes convergentes* y *lentes divergentes*.

Figura 7: Tipos de Lentes.



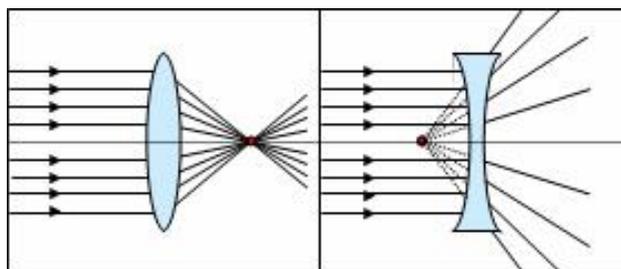
Fuente: Física para todos.

Las **lentes divergentes** (b) son aquellas que al momento de recibir diferentes rayos de luz paralelos los separan en diferentes direcciones, mientras que las **lentes convergentes** (a) reciben distintos rayos de luz paralelos y los centran en un único punto. Lo anterior implica que las lentes convergentes sean más gruesas en el centro que en los extremos y que las lentes divergentes sean más delgadas en el centro que en los extremos.

La fig.8 permite apreciar gráficamente el comportamiento de la luz al a travesar una lente convergente y una lente divergente.

<sup>13</sup>TPágina web [www.cienciasnaturales-fisica.blogspot.com](http://www.cienciasnaturales-fisica.blogspot.com) [en línea]

Figura 8: Lentes Convergente y Divergente.



Fuente: [www.fisicade5to.wikispaces.com](http://www.fisicade5to.wikispaces.com)

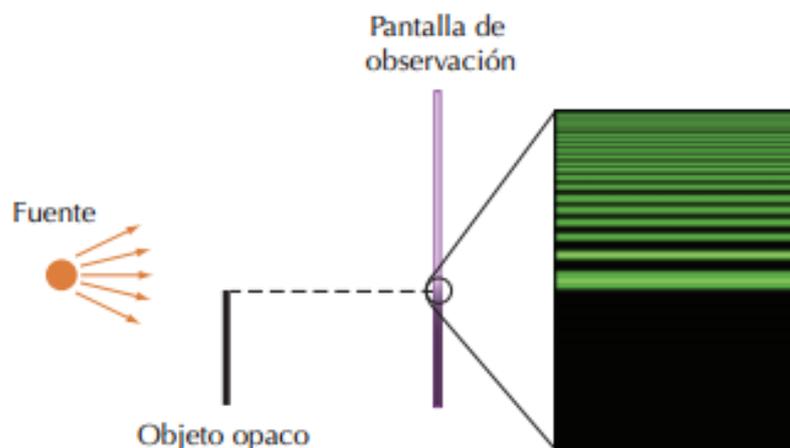
### 2.1.2. Óptica Física

Se considera la óptica física como aquella que estudia lo relacionado a la naturaleza ondulatoria de la luz, es decir, considera a ésta como un conjunto de ondas dentro del espectro radio magnético y no como un haz de luz que viajan en línea recta.

De igual manera como se denoto en la sección anterior ha de reiterarse que el desarrollo matemático que se pueda presentar en este documento, hace referencia a información tomada de los textos: Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II y Física GIANCOLI sexta Edición, y que aquí se presenta debido a su relevancia con el buen desarrollo y entendimiento de la investigación.

**2.1.2.1. Difracción.** Fenómeno por el cual se produce una desviación de los rayos luminosos cuando pasan por un cuerpo opaco o por una abertura de diámetro menor o igual que la longitud de onda<sup>14</sup>.

Figura 9: Difracción.



Fuente: Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II.

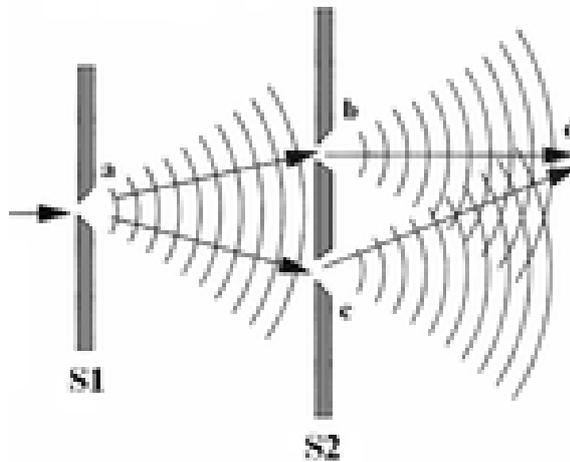
<sup>14</sup>Google Definiciones [En línea]. Disponible en <<http://tinyurl.com/opz9jzg>>

La luz que pasa a través de una rendija muy estrecha de ancho  $D$  (en el orden de la longitud de onda  $\lambda$ ) producirá un patrón con un brillo máximo central de medio ancho  $\theta$  dado por<sup>15</sup>:

$$\text{sen}\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (8)$$

**2.1.2.2. Interferencia.** La interferencia es un fenómeno característico de las ondas donde dos o más ondas que se encuentran se unen o se destruyen entre sí, esto debido a sus fases individuales.

Figura 10: Interferencia de Ondas.



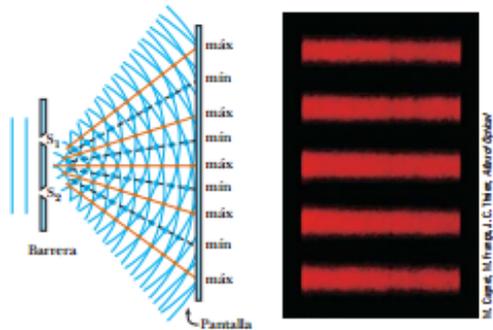
Fuente: [www.fisic.ch](http://www.fisic.ch)

La interferencia puede presentarse de dos formas, la primera se da cuando dos o más ondas que se encuentran poseen la misma fase por ende se amplían y generan una nueva onda, ésta se conoce con el nombre de *interferencia constructiva*, en el segundo caso estas ondas se encuentran en diferentes fase y se destruyen o anulan, está se le da el nombre de *interferencia destructiva*.

El experimento de Young demostró claramente la interferencia de luz. Las manchas brillantes que se observan en la fig.11 demuestran la interferencia constructiva donde la longitud de onda  $\lambda$  se establece en números enteros, mientras que las manchas oscuras dan lugar a las zonas donde  $\lambda$  difiere entre ambas.

<sup>15</sup>Física GIANCOLI Sexta Edición, Capítulo 24 pág 691

Figura 11: Doble rendijade Young.



Fuente: Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II.

Matemáticamente la interferencia constructiva ésta defina por:

$$\text{sen}\theta = m \frac{\lambda}{d} \quad (9)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz,  $d$  es la separación de las rendijas y  $m$  es un numero entero, de igual manera la interferencia destructiva se define como:

$$\text{sen}\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d} \quad (10)$$

La ecuación 9 para interferencia constructiva también se sostiene para una *rejilla de difracción*, que consiste de muchas rendijas o líneas paralelas, separadas una de otra por una distancia  $d$ <sup>16</sup>.

**2.1.2.3. Principio de Huygens.** El principio de Huygens afirma que todo punto en un frente de onda se puede considerar como fuente de ondas mas pequeñas que se dispersan hacia delante con la rapidez de la onda misma. El nuevo frente de onda es la envoltura (tangente común) de todas esas pequeñas ondas.

La longitud de onda de la luz en un medio con índice de refracción  $n$  es<sup>17</sup>:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad (11)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el vacío, la frecuencia no cambia.

<sup>16</sup>Física de GIANCOLI, página 691.

<sup>17</sup>Física de GIANCOLI, página 690.

## 2.2. CONCEPTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor se puede definir como el paso de energía térmica (Calor) de un cuerpo a otro, siendo esta transferencia del cuerpo con mayor energía a el de menor energía como ejemplo en caso de una varilla de hierro expuesta a una llama, donde la zona de la varilla en contacto con la llama se calentará primero y después ésta energía se desplazará hacia el lado frío de la barra.<sup>18</sup>

Figura 12: Modos de la Transferencia de Calor.



Fuente: Tomado de <http://www.artinaid.com>

Tal y como lo muestra la fig.12 la transferencia de calor se puede presentar en tres formas distintas que se explicaran brevemente a continuación pero ha de resaltarse antes que el desarrollo matemático que acompaña a este fue tomado en su totalidad de diferentes textos entre ellos Transferencia de Calor y Masa de Yunus Cengel .

### 2.2.1. Conducción.

La conducción es la transferencia de calor, por medio de la excitación molecular en el interior del material, sin ningún tipo de movimiento entre los objetos<sup>19</sup>. La conducción no implica un movimiento de la materia si no de energía y se puede presentar en sólidos, líquidos y gaseoso.

La transferencia de calor por conducción obedece a la ley de Fourier, que establece que la tasa de conducción de calor  $Q_{conduccion}$  es proporcional al área de transferencia de calor ( $A$ ) y al gradiente de temperatura ( $dT/dx$ ), o:

$$Q_{conduccion} = -KA \frac{dT}{dx} \quad (12)$$

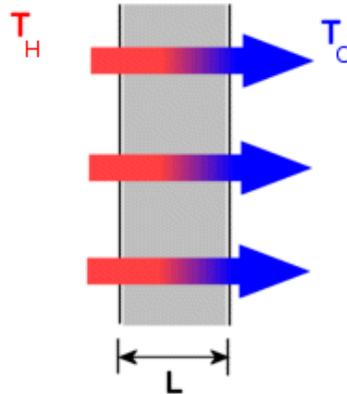
Donde  $K$  es la conductividad térmica, mide la capacidad de un material para conducir el calor. Las unidades de  $K$  son  $W/m^{\circ}C$ .<sup>20</sup>

<sup>18</sup>Transferencia de calor y masa. Yunus Cengel, Cuarta Edición.

<sup>19</sup>hyperphysics [En Línea]. Disponible en <http://tinyurl.com/owedo9d>

<sup>20</sup>SoliworkHelp [En Línea]. Disponible en <http://bit.ly/1CoFbo5>

Figura 13: Conducción de Calor en una Placa Plana.



Fuente: SolidWork Help.

Para la capa plana de la fig.13, la tasa de conducción de calor viene dada por:

$$Q_{conduccion} = \frac{-KA(T_H - T_C)}{L} \quad (13)$$

### 2.2.2. Convección.

La convección es el modo de transferencia de calor en la que el calor se transfiere desde la cara de un sólido a un fluido (o gas) adyacente en movimiento.<sup>18</sup>

La tasa de intercambio de calor entre un fluido de temperatura  $T_f$  y la cara de un sólido de área  $A$  a temperatura  $T_s$  se rige por la ley de enfriamiento de Newton, que se puede expresar de la siguiente manera:<sup>18</sup>

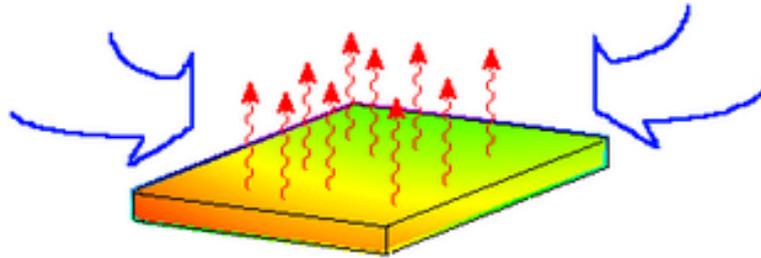
$$Q_{conveccion} = hA(T_s - T_f) \quad (14)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección. Las unidades de  $h$  son  $W/m^2K$ . El coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) depende del movimiento, la geometría y las propiedades físicas y termodinámicas del fluido.<sup>21</sup>

**2.2.2.1. Convección Natural.** Se hace referencia a la convección natural cuando un objeto pierde calor a través de su entorno sin intervención artificial, es decir, no existen elementos que alteren el movimiento del fluido en el medio en que se encuentra este elemento.

<sup>21</sup>SoliworkHelp [En Línea]. Disponible en <<http://bit.ly/1G7cAi6>>

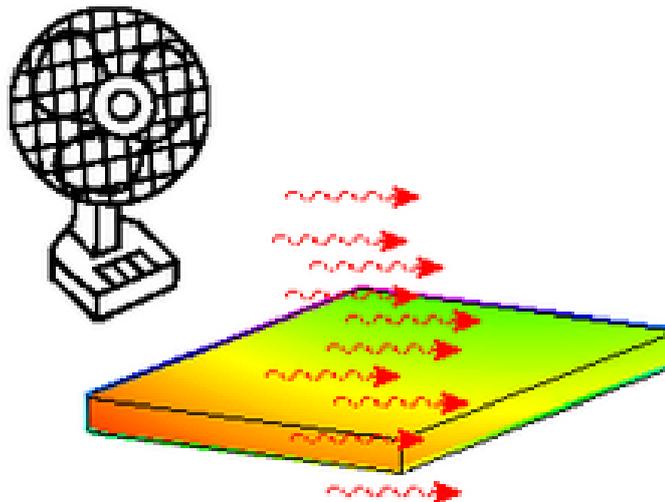
Figura 14: Convección natural (libre)



Fuente: SolidWork Help.

**2.2.2.2. Convección Forzada.** Se hace referencia a la convección forzada cuando por medio de un elemento y/o maquina se genera un movimiento de flujo sobre un objeto con el fin de hacer que este pierda o gane calor, es decir, se altera el entorno forzando el movimiento de un flujo de gas o líquido.

Figura 15: Convección forzada.



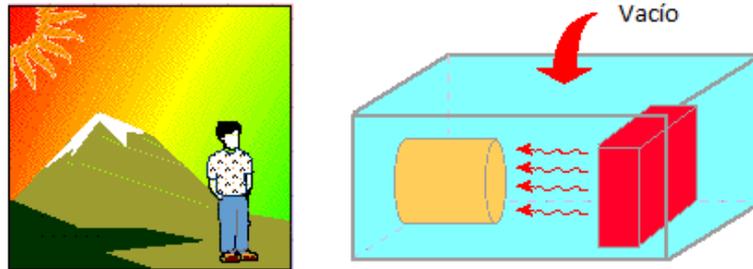
Fuente: SolidWork Help.

### 2.2.3. Radiación.

La radiación consiste en la transferencia de energía térmica a través de ondas electromagnéticas, en este caso no se requiere de un medio intermedio para que ocurra la transferencia, es decir, un objeto puede encontrarse suspendido en el vacío y perder o ganar calor por las emisiones interna, un ejemplo de esto es la manera en como la tierra adquiere y/o absorbe el calor del sol cuando entre ambos no existe un medio sólido, líquido o gaseoso, si no el vacío del espacio; la explicación a esto es que el sol irradia el calor en forma de ondas que llegan a la tierra, ha de aclararse que a diferencia de los formas de transferencia anteriores,

la radiación no cumple con el principio de transferencia que dice que este se presenta desde el cuerpo con más energía hacia al de menor energía térmica<sup>22</sup>.

Figura 16: Radiación Solar.



Fuente: SolidWork Help.

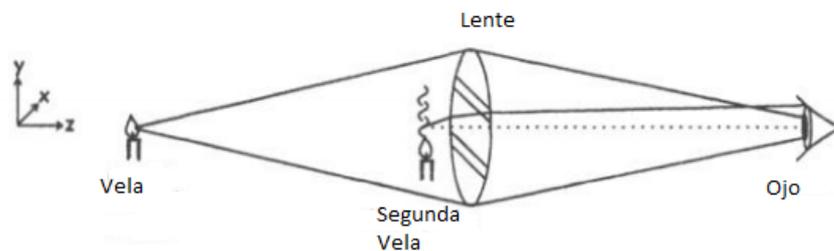
<sup>22</sup>Transferencia de calor y masa. Yunus Cengel, Cuarta Edición.

## 2.3. CONCEPTOS BÁSICOS SCHLIEREN

### 2.3.1. Antecedentes.

El trasfondo histórico de la técnica de Schlieren se remonta hacia el periodo del siglo 17, cuando Robert Hooke observó el comportamiento del aire y la influencia de la temperatura en este, Hooke desarrollo el primer modelo del sistema Schlieren, el cual utilizo con el fin de describir el comportamiento del aire que circundaba la flama de una vela.

Figura 17: Sistema Schlieren Original creado por Hooke.

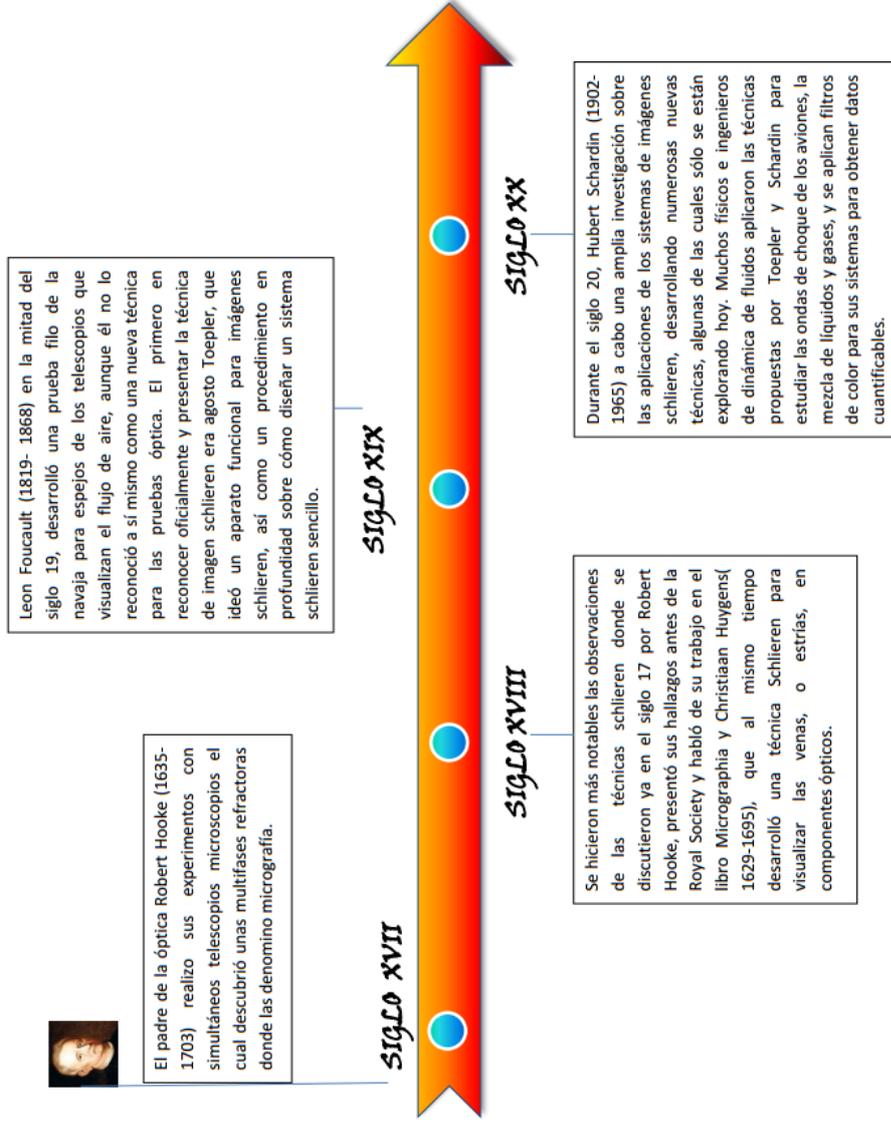


Fuente: Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media.

La técnica de Schlieren si bien data sus inicios con Hooke en el siglo 17, no fue hasta el siglo 19 cuando August Toepler nombró esta técnica, de la misma manera Toepler fue el primero en desarrollar un aparato práctico y funcional, ha de resaltar que antes que él en el año 1685 Christian Huygens desarrollo lo que sería las bases y principios fundamentales de la técnica[1].

La técnica de schlieren en sus inicios se limitaba al estudio de los fenómenos térmicos y sus consecuencias en el entorno, en específico aquellos relacionados con el fenómeno de la convección; más tarde ésta técnica sería aplicada al estudio de ondas de choque, en un principio desde el punto de vista militar (Balístico), pero que más tarde gracias a Douglas encontraría sus aplicaciones en el ámbito aeronáutico, donde la técnica sería usada para estudiar los puntos en los cuales se generaban las ondas de choque sobre un perfil aerodinámico. La fig.20 divide el desarrollo de la técnica en 4 periodos históricos y destaca los más importantes eventos de éstos:

Figura 18: Línea de tiempo del desarrollo del sistema Schlieren.



Fuente: Recopilación de los aspectos más importantes de la historia de Schlieren; hecha por Ghylyver Hastamorir.

### 2.3.2. Personajes Relevantes en la Historia y Desarrollo de la Técnica.:

#### Siglo 17

Robert Hooke

Se le conoce como el padre de la óptica inhomogénea.

#### Siglo 18

Jean Paul Marat

Desarrolló el Helioscope.

Christian Huygens

Estableció los principios de la técnica.

#### Siglo 19

Leon Foucault

Fue el primero en usar filtros y cuchillas.

Henry Draper

Publico y dibujo la elevación del flujo de aire desde una mano.

August Toepler

Fue quien nombro la técnica y desarrolló un aparato práctico y ajustable.

W.H.F Talbort

Fue uno de los pionera en la fotografía

Einst Mach

trabajó a fondo en el desarrollo de estudios balísticos, usando la técnica de schlieren y el desarrollo de la luz estroboscópica.

Peter Salcher

trabajo junto con Mach.

Vicnet Dvorák

Describió diferentes fenómenos en el agua como en la atmosfera, recopilo datos de Hooke, Toppler, Morat, mostrando y comparando los resultados obtenidos con los originales.

#### Siglo 20

Robert W. Wood

Exploro el mundo del movimiento de las ondas de choque en el aire.

Ludwing Prandtl

Estudió el flujo de los gases supersónicos.

Carl Cranz

Hizo una gran contribución al estudio de la fotografía de alta velocidad gracias a su camara Cranz-Shardin.

Hubert Schardin

Su trabajo provee un solido trasfondo sobre la teoría de la imagen de Schlieren.

Rudolf Hermann

Junto con su grupo en 1939 construyeron un túnel de viento supersónico que aplicaba la técnica de Schlieren.

Douglas W. Holder

Trabajó con la técnica con el fin de estudiar el comportamiento del flujo sónico y supersónico sobre perfiles.

R. J. North

Contribuyo al desarrollo de filtros y cuchillas para mejorar la calidad y rango de medida de la técnica de Schlieren.

### 2.3.3. Propagación De La Luz En Un Medio No Homogéneo.

Como se destacó anteriormente en la sección 2.1 de óptica, la luz se propaga de forma uniforme y paralela a través de medios homogéneos, como sucede con

la luz de una estrella que viaja por el vacío y llega a la tierra, si consideramos a la atmosfera terrestre homogénea; esto implicaría que la luz de una estrella golpea a la tierra con rayos paralelos y uniformemente distribuidos por todo el globo terráqueo, pero esto en realidad no sucede dado que la atmósfera terrestre es una mezcla de gases cada uno con propiedades individuales y diferentes lo cual genera cambios en la trayectoria de estos rayos de luz de manera microscópica<sup>23</sup>.

Anteriormente a través de la ecuación 6, se establecían las condiciones para estudiar el comportamiento de la luz en medios transparentes, esto gracias a que el índice de refracción, permite observar la variación en la velocidad de la luz al cambiar de un medio a otro. Con el fin de mejorar el entendimiento de la refracción que sufre la luz al cruzar dicho medio se hace necesario generar una relación entre el índice de refracción del elemento con la densidad del mismo, esto se expresa de la siguiente manera<sup>27</sup>:

$$n - 1 = K\rho \quad (15)$$

Donde  $K$  es la constante de Gladstone-Dale, que es alrededor de  $0,23\text{cm}^3/\text{g}$  para el aire en condiciones normales,  $n$  es el índice de refracción del elemento y  $\rho$  la densidad. También la ecuación 15 no solo depende de  $\rho$ ; algunos cambios en la densidad del aire en el orden de dos unidades solo causan una variación de más o menos 3% en  $n$ , por ende si se desea detectar estos cambios se requiere de un equipo óptico muy sensible. El índice de refracción de un gas depende de la composición del mismo, la temperatura, la densidad y la longitud de onda de la luz, en muchos casos estas condiciones no van más lejos que las condiciones atmosféricas normales por ende es posible aplicar la ecuación de los gases ideales.

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (16)$$

En el caso de la aplicación de la técnica de Schlieren, la curvatura de un haz de luz está dado por la siguiente relación:[1]

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \quad (17)$$

Integrando esto una vez, con el componente de la deflexión angular de la luz tenemos que:

$$\epsilon_x = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial x} dz; \quad \epsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (18)$$

Para la aplicación bidimensional de Schlieren la longitud  $L$  a lo largo del eje óptico es incluido en la resolución de la ecuación 18, transformándose de la siguiente

<sup>23</sup>Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media, Página 25 y 26.

manera:

$$\epsilon_x = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x}; \quad \epsilon_y = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y} \quad (19)$$

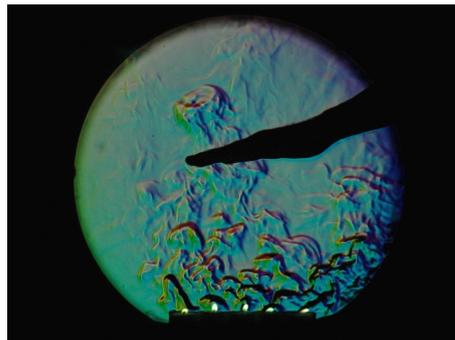
Donde  $n_0$  es el índice de refracción en el medio. Esta expresión es la base de la técnica de Schlieren, y deja claro que esta se rige por el gradiente  $\partial n/\partial x$  y  $\partial n/\partial y$ [1].

Es de vital importancia denotar que el desarrollo matemático anteriormente descrito fue tomado del texto Técnicas de Schlieren y Shadowgraph: Visualización de fenómenos en medios transparentes o en inglés Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media, y que por ende este documento hace referencia a este desarrollo matemático y no toma autoría sobre el mismo.

#### 2.3.4. Sistema Schlieren y Observaciones.

El sistema óptico Schlieren o fotografía Schlieren es una técnica óptica por la cual se puede apreciar y visualizar la variación en el gradiente de densidad de un medio transparente y no homogéneo. El efecto de Schlieren puede presentarse tanto en gases como líquidos y sólidos, siendo este mismo producto de cambios en la densidad que pueda sufrir el elemento de estudio o el entorno en el que este está inmerso, es decir, un cambio en la temperatura del mismo, la exposición a flujos a altas velocidades o la presencia de elementos distintos dentro de un mismo material; pueden causar un cambio en la densidad y así mismo el en índice refracción, el cual es captado a través de la técnica.<sup>24</sup>.

Figura 19: Fenómeno de la convección observado con la técnica Schlieren.



Fuente: [www.ian.org](http://www.ian.org)

Esta técnica óptica especial es extremadamente sensible a los cambios en la trayectoria de la luz, lo cual hace posible observar los cambios en el índice de refracción en el aire. La fig.19 es un ejemplo de la sensibilidad del sistema, donde se aprecia un conjunto de velas encendidas en la parte inferior y se aprecia cómo

<sup>24</sup>Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media, Página 25 y 26.

se genera el proceso de convección con el ambiente circundante.

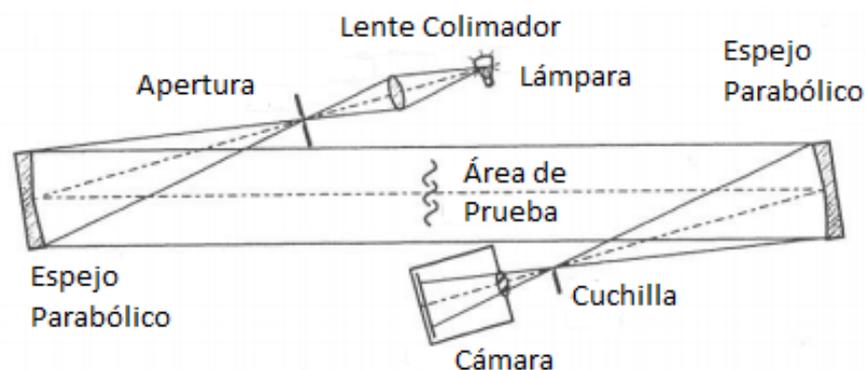
**2.3.4.1. Elementos.** La técnica de Schlieren básicamente requiere de los siguientes elementos para su montaje :

- *Espejos y lentes.*
- *Cámara*
- *Cuchilla*
- *Luz Colimada*

**2.3.4.2. Tipos de montajes.** La técnica de Schlieren en el transcurso de los años ha sufrido de diversas modificaciones y/o adaptaciones dependiendo de la aplicación; estas variantes se dan agregando o quitando elementos o cambiando la disposición de los mismos, pero que aun así se rigen de los principios ópticos fundamentales, estos cambios permiten generar ciertas condiciones de sensibilidad ante el fenómeno, siendo algunos de estos más sensible a efectos como la aberración cromática. Lo anteriormente mencionado da lugar a que se puede apreciar en diferentes textos o experimentos montajes como el tipo-z o disposiciones lineales de la misma técnica.

- **Sistema Schlieren tipo-z:** Dentro de todas las disposiciones existentes esta es la más usada hoy en día, usando dos espejos esféricos en contraposición uno respecto del otro, esta disposición genera un amplio campo de observación, que solo está limitado por el costo de los elementos, pero que a su vez se ve afectado con mayor facilidad a fenómenos como la aberración cromática.

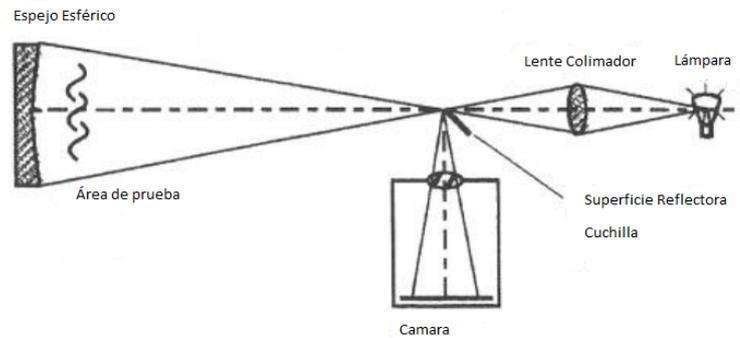
Figura 20: Schlieren tipo-z



Fuente: Tomado del Texto "Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media"

- **Sistema de un único espejo coincidente:** Dentro de esta disposición se debe destacar que no se hace necesario la presencia de un lente colimador si se usa un espejo telescópico, dado que este último lo hace automáticamente (auto colimador), a diferencia del tipo-z esta disposición solo requiere de un único espejo lo cual limita su campo de observación, en este caso la sección de pruebas se ubica en la parte frontal del espejo a diferencia del tipo-z donde esta se ubicaba en la zona central de ambos espejos, a diferencia de la disposición anterior no cuenta con la ventaja de los rayos paralelos, lo cual limita sus aplicaciones pero es bastante usado debido a su sensibilidad.

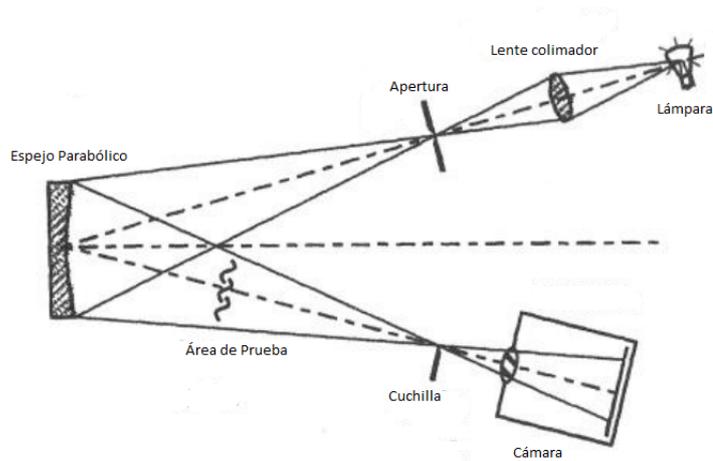
Figura 21: Schlieren espejo Coincidente



Fuente: Tomado del Texto "Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media"

- **Sistema Schlieren de alineación fuera del eje:** De la misma forma que el sistema de espejo coincidente esta disposición usa un único espejo, pero en este caso la cámara y la fuente de luz se ubican en puntos distintos al eje central del espejo, este montaje es relativamente sencillo en relación a su alineación pero es susceptible a las aberraciones.

Figura 22: Sistema Schlieren de alineación fuera del eje



Fuente: Tomado del Texto "Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media"

- **Sistema Schlieren de Multi-espejos:** Esta configuración de la técnica aumenta notablemente la sensibilidad, lo cual lo hace susceptible a las vibraciones y cambios en las corrientes de aire, recientemente se aplica en la observación de plasma.

### 3. TÚNEL AERODINÁMICO EXPERIMENTAL DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

La Institución Universitaria Los Libertadores cuenta con un túnel aerodinámico experimental de circuito abierto y de flujo subsónico, este túnel es de succión y cuenta con un Fan centrífugo. Este es un túnel TELSAT AEROSPACE, y su estructura esta principalmente hecha en fibra de vidrio, a excepción de la sección de prueba que esta es en acrílico.

Figura 23: Túnel Aerodinámico Experimental De La Institución Universitaria Los Libertadores.



Fuente: Fotografías tomadas por Ghylver Hastamorir en el Laboratorio de Aerodinámica experimental de la Institución Universitaria Los Libertadores.

Dentro del contexto del desarrollo del Sistema de Schlieren para el túnel aerodinámico se hace necesario, el reconocimiento de algunos aspectos importantes, en específico se hace referencia al perfil de velocidades y al número de Reynolds.

El número de Reynolds es un parámetro adimensional nombrado por Osborne Reynolds, este permite establecer una relación entre la velocidad, la densidad, la longitud característica y la viscosidad de un fluido, con el fin de definir su comportamiento interno, es decir, establecer si este es laminar, turbulento o transitorio; matemáticamente este se expresa de la siguiente manera:

$$Re = \frac{vl\rho}{\mu} \quad (20)$$

La viscosidad en sí misma es un parámetro que depende de las condiciones de temperatura del ambiente, esta puede ser calculada por medio de la ecuación de Sutherland (21).

$$\mu = 1,458 \times 10^{-6} \frac{T^{1,5}}{T + 110,4} \quad (21)$$

En donde  $T$  está dada en Kelvin  $K$ .

Figura 24: Sección de prueba.



Fuente: Fotografías tomadas por Ghylver Hastamorir en el Laboratorio de Aerodinámica experimental de la Institución Universitaria los Libertadores.

La fig.24 permite apreciar la sección de pruebas del túnel aerodinámico, esta sección de pruebas posee una longitud de  $1,39m$  y un ancho de  $67,9cm$ , este último con un gradiente de incremento cada  $69cm$  en  $\cong 1,2mm$ . El espesor de la pared de acrílico de la sección de prueba es de  $\cong 32mm$ .

Figura 25: Sección de entrada y Salida del Túnel Aerodinámico.

((a)) Sección de entrada



((b)) Salida del Túnel

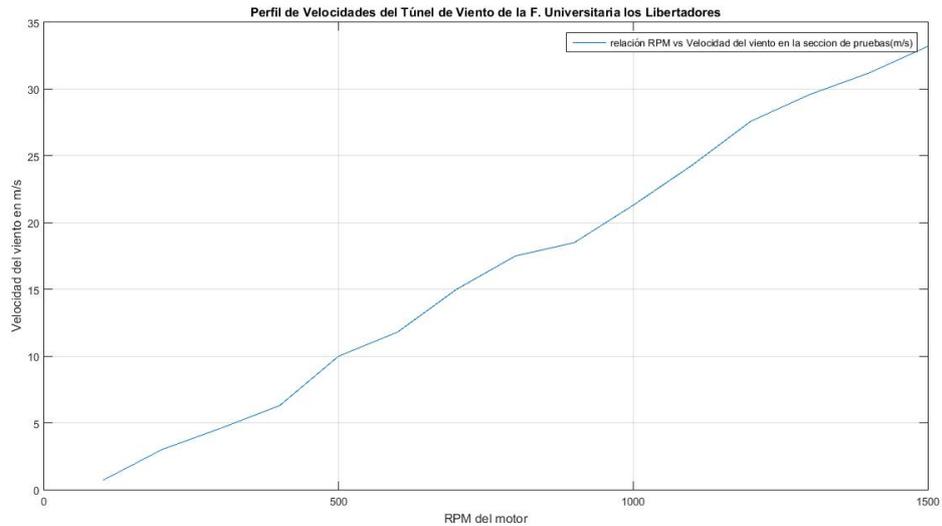


Fuente: Fotografías tomadas por Ghylver Hastamorir en el Laboratorio de Aerodinámica experimental de la Institución Universitaria Los Libertadores.

La sección de entrada del túnel aerodinámico posee un área aproximada de  $2,97m^2$  y la sección de salida un área aproximada de  $1,76m^2$ .

La fig.26 permite apreciar el perfil de velocidades del túnel aerodinámico en el cual se implementara el sistema de Schlieren, esta grafica permite en conjunto a la ecuación (20) y (21) establecer el numero  $R_e$  con el cual opera el túnel aerodinámico.

Figura 26: Perfil de Velocidades del Túnel de Viento



Fuente: Datos obtenidos gracias al estudiante de Ing. Sebastián Moreno, miembro del semillero de investigación de coherencia de la Institución Universitaria Los Libertadores.

Nótese que las condiciones atmosféricas presentes durante el día de la prueba se establecieron en una temperatura promedio de  $17,8^{\circ}C$  y una presión atmosférica de  $748Hpa$ . Al reemplazar la temperatura en la ecuación (25) se obtiene que  $\mu$  es  $1,802 \times 10^{-5} Kg/sm$ . Con el  $\mu$  obtenido reemplazamos los datos en la ecuación (21) y obtenemos el número de Reynolds correspondiente para cada velocidad. Estos se pueden apreciar en la tabla.1.

Para la tabla.1 la densidad de Bogotá se consideró como  $0,771Kg/m^3$  que se estableció a partir de la tabla de la atmosfera estándar tomada del texto Aerodynamics for Engineers [10].

Tabla 1: Número de Reynolds.

v(m/s)	Re
0,70	16622,28
3,00	71238,35
4,60	109232,13
6,30	149600,53
10,00	237461,15
11,80	280204,16
15,00	356191,73
17,50	415557,02
18,50	439303,14
21,30	505792,26
24,30	577030,60
27,60	655392,79
29,60	702885,02
31,20	740878,80
33,20	788371,03

Fuente: Desarrollado a partir de los datos de la tabla 2 anexo A.

En este caso ha de aclararse que debido a que el flujo viaja internamente por un ducto la ecuación (20), desarrollada por Osborne Reynolds, sufre un pequeño cambio:

$$Re = \frac{v\rho D_h}{\mu} \quad (22)$$

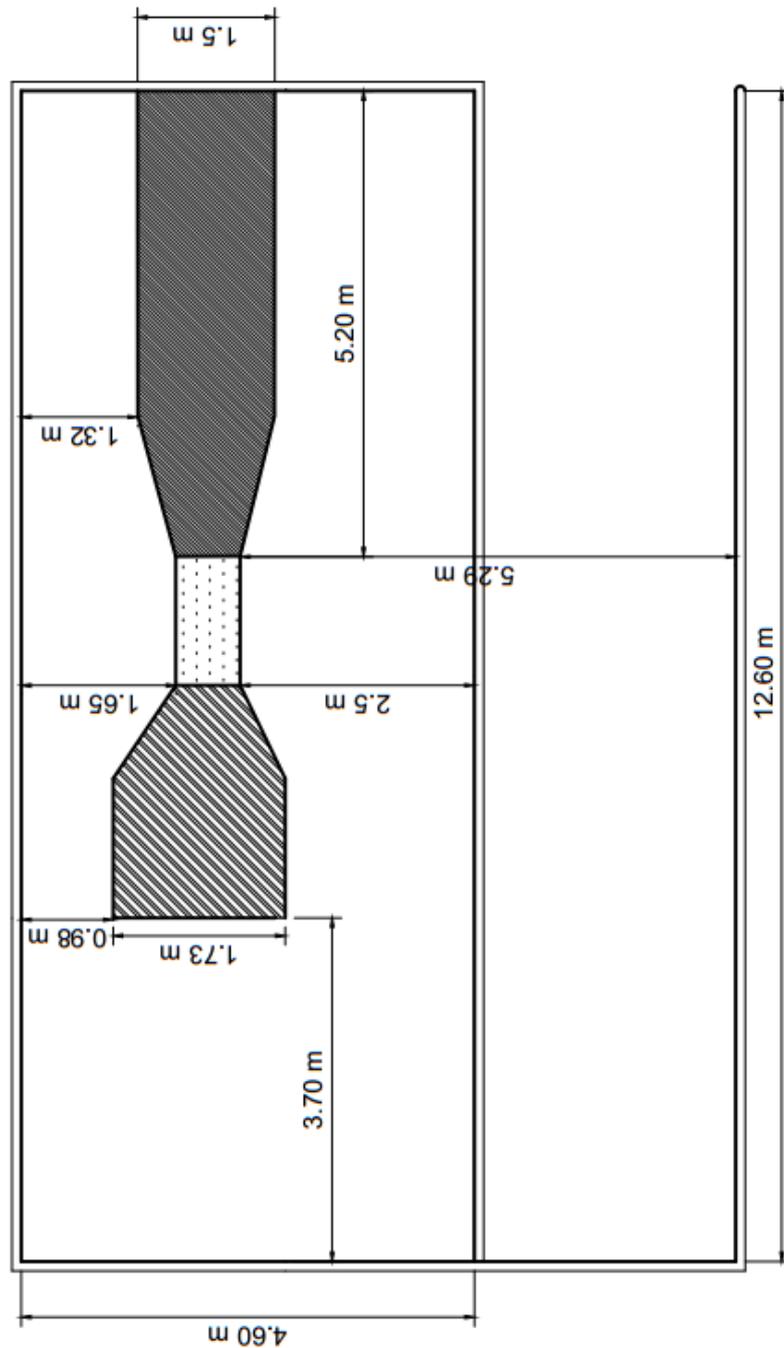
Donde  $D_h$  es el diámetro hidráulico del conducto, que para este caso es la sección de prueba. El diámetro hidráulico depende de la geometría del ducto, para este caso en específico se considera la sección de prueba como un rectángulo, por ende esta se define así:

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b} \quad (23)$$

La ecuación (23) fue tomada del texto: Transfería de calor y masa de Yunus Cengel. (Convección forzada interna pág. 468.)

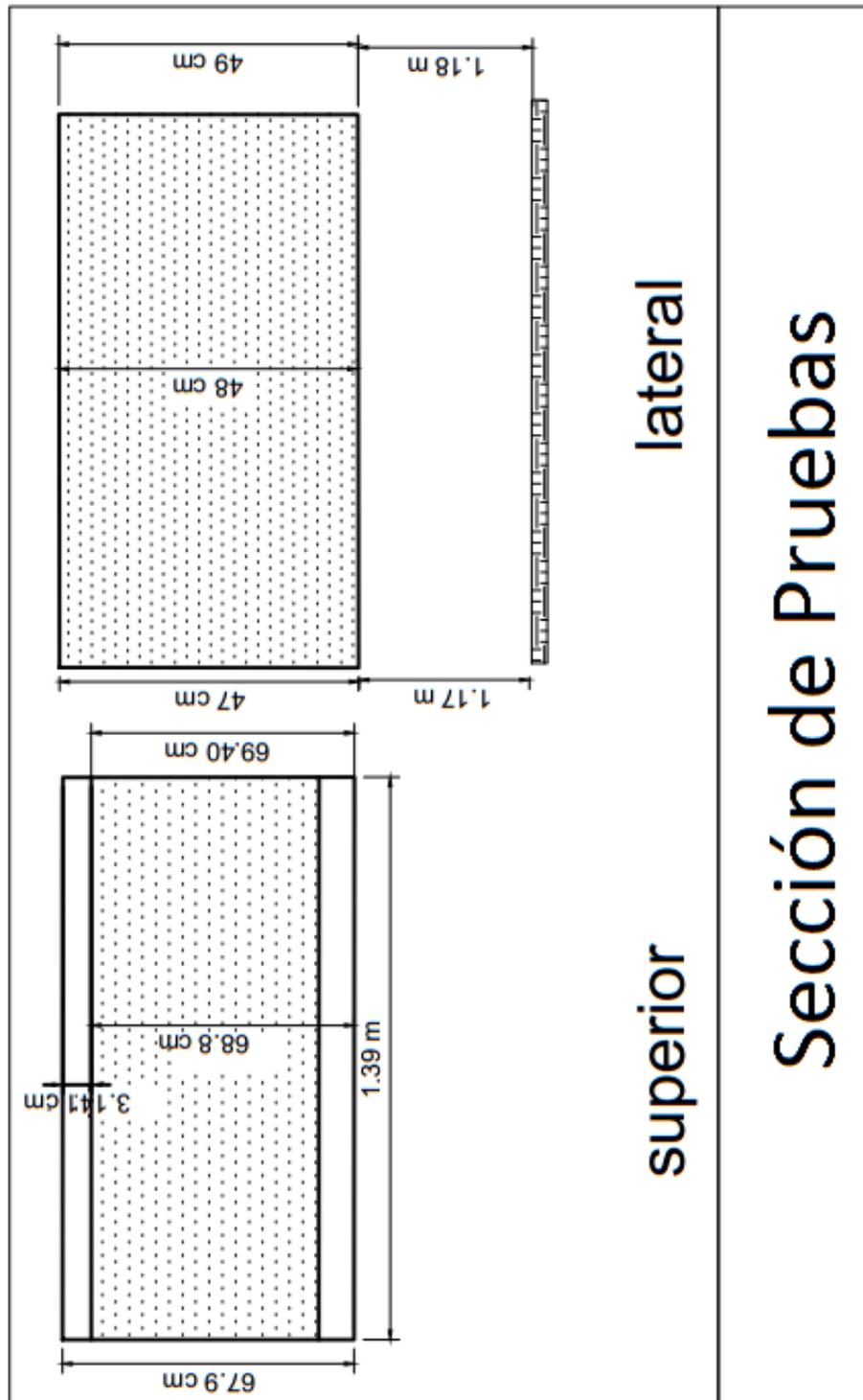
### 3.1. PLANOS DEL LABORATORIO DE AERODINÁMICA EXPERIMENTAL DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES.

Figura 27: Vista superior del Túnel de viento.



Fuente: Planos realizados por Ghylver Hastamorir por medio del software Solidworks.

Figura 28: Sección de pruebas del túnel de viento.



Fuente: Planos realizados por Ghylver Hastamorir por medio del software Solidworks.

## 4. MONTAJE

### 4.1. ELEMENTOS DEL MONTAJE

Tal y como se mencionó en la sección 2.3.3.1. La técnica de schlieren requiere de unos elementos básicos para su aplicación y funcionamiento que para el caso de este experimento en específico poseen las siguientes características.

#### 4.1.1. Espejo:

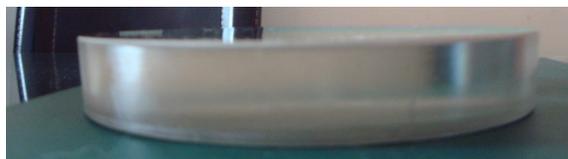
El espejo es en si la parte más importante del experimento, este concentra los haces de luz provenientes de una fuente (LED) y los enfoca en un punto, dependiendo de la calidad y tamaño del espejo la luz puede ser direccionada de forma organizado o distorsionarse. Los parámetros más importantes para seleccionar el espejo se dan primero por las condiciones de espacio, este parámetro está definido por el radio de curvatura del espejo, y es independiente del tamaño del mismo, se puede optar con un espejo de  $D_e$  mayor a un metro pero un  $R$  de  $50cm$ , esto indica que el  $D_e$  se relaciona con la cantidad de luz que puede atrapar el espejo, mas no con su distancia focal  $f$ .

Figura 29: Espejo

((a))



((b))



Fuente: Andrés Gonzalez, Espejo telescópico f8.

La fig.30 permite apreciar el espejo que se utiliza en esta investigación y cuyas características son:

- $R=2.4m$

- $f=1.20\text{m}$
- $E_{\text{espesor}}=0,022\text{m}$
- $D_e= 0,15\text{m}$

**4.1.1.1. Base cinemática:** Dentro del contexto del montaje, se hace necesario garantizar ciertas condiciones que permitan facilitar el proceso de alineación del sistema, por ende, se construyó a partir de madera Triples y una lámina metálica una base cinemática, que permitiese sujetar en el espejo y a su vez permitiese ciertos grados de movilidad.

Figura 30: Base cinemática



Fuente: Fotografías tomadas por Ghylver Hastamorir.

**4.1.1.2. Condiciones de Cuidado del espejo:** Dado a las condiciones de calibración y calidad de la superficie del espejo, este debe tener un cuidado especial, esto con el fin de evitar al máximo daños sobre el mismo, por ende se debe tener en cuenta que:

- No se debe tocar con las manos la superficie refractiva del espejo, éste debe sostenerse por los lados.
- Este debe ser limpiado con acetona o agua destilada. Esta solo debe dejarse caer sobre la superficie del espejo y no debe ser frotada con un trapo.
- La limpieza se puede realizar con gasa, esta no se debe presionar sobre la superficie solo debe deslizar con cuidado para esparcir los restos líquidos fuera del espejo.
- Con especial cuidado se debe barrer la superficie del espejo con un algodón para retirar los residuos sólidos, evitar pasar el mismo algodón por un mismo lugar dos veces.
- Los residuos que puedan quedar como las motas de algodón se debe retirar soplando aire a través de una pera de absorción o con una jeringa.

#### 4.1.2. Fuente de Luz:

Dentro del contexto del montaje del experimento, la elección y selección de la fuente de luz influye directamente en los resultados; está debe garantizar una proyección uniforme de los rayos de luz, es decir, dentro de esta no deben existir puntos de oscuridad causados ya sea por la geometría de la lámpara o diseño de la misma. En este caso en particular se usa una linterna de baterías triple AAA, cuyo diodo LED es del tipo SMD, dado que este tipo en particular garantizan homogeneidad en la proyección de los rayos; ha de aclararse que el color del LED no representa una gran influencia en los resultados finales, dado que estos dependen de la luminosidad del LED.

Figura 31: Fuente de Luz



Fuente: Fotografía tomada por Andrés Enrique González Sastoque.

#### 4.1.3. Cámara:

Especificaciones cámara:

- Pixeles efectivos: 16mp
- Zoom Óptico: 30x (24-720mm)
- Sensibilidad ISO 6.400
- Estabilizador de imagen: Óptico
- Control: Manual y Automático
- Grabación de Video: HD 1280x720 con salida HDMI

Figura 32: Cámara



Fuente: Fotografía tomada por Andrés Enrique González Sastoque.

#### 4.1.4. Cuchilla:

La cuchilla dentro de la técnica de Schlieren es aquella con la que se genera un efecto de difracción sobre la pantalla de observación o la cámara con la que se registra el experimento, esta puede ser desde una cuchilla de afeitar hasta cualquier elemento que posea un borde fino, en este caso la fig. 37 se aprecia los elementos utilizados en este caso en particular.

Figura 33: Cuchilla



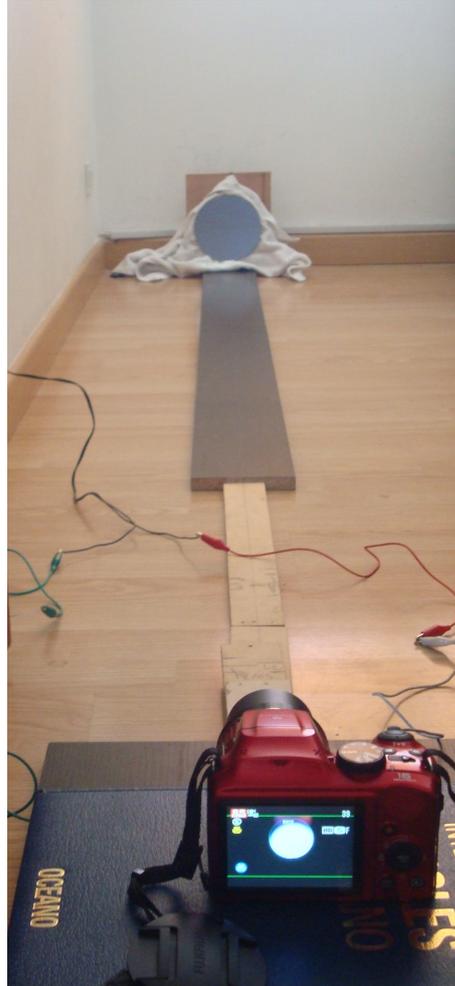
Fuente: Fotografía tomada por Andrés González.

## 4.2. DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS

Anteriormente en el documento se establecieron diferentes tipos de disposiciones para el desarrollo de la técnica de Schlieren, cada una de estas poseía ventajas o desventajas en relación a las demás, y estaban limitadas por el espacio y el costo de los elementos, por lo cual dada las condiciones de espacio dentro de las instalaciones de la universidad y que se enmarcan en la fig.27 se define para esta investigación una disposición de espejo coincidente con alineación fuera

de eje, esto resultado del poco espacio con lo que se cuenta y el costo de los elementos (espejo telescópico) requeridos por la aplicación de la técnica.

Figura 34: Disposición de los Elementos



Fuente: Alineación de espejo coincidente con alineación fuera del eje de la técnica de Schlieren.

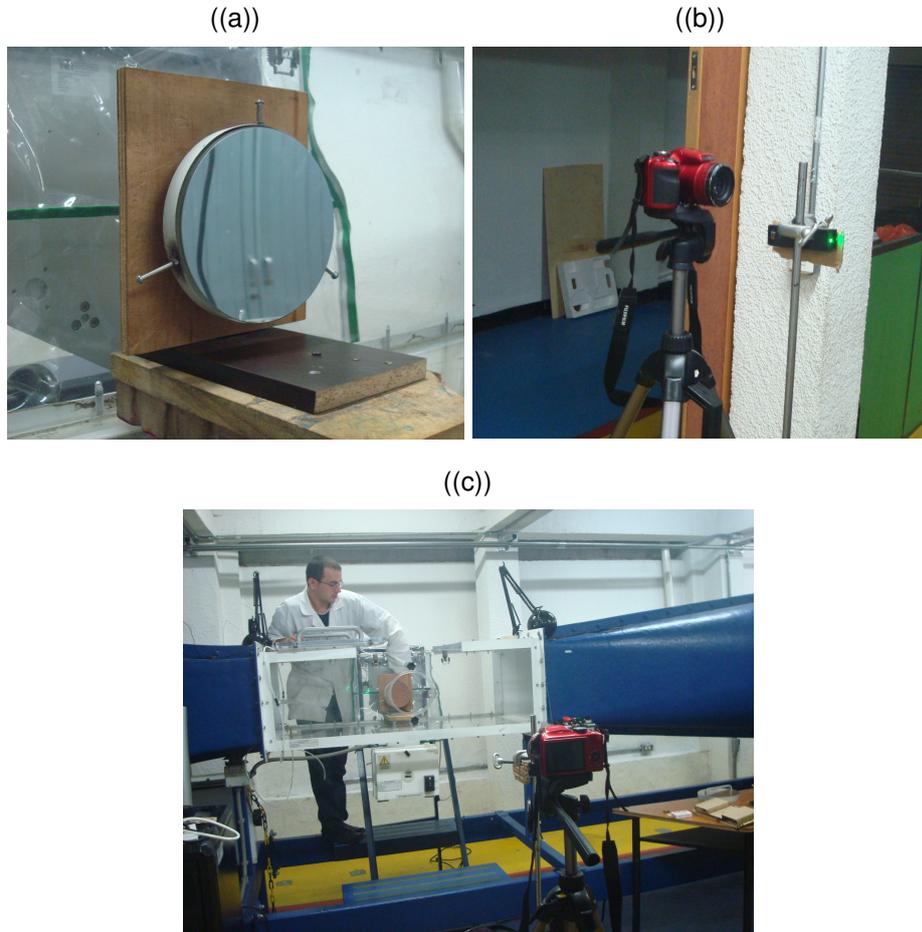
#### 4.2.1. Montaje en el Túnel Aerodinámico

Dada las condiciones de espacio y limitaciones técnicas, el montaje de la técnica de Schlieren dentro del laboratorio se realizó de la siguiente manera:

1. El espejo se ubicó dentro de la sección de pruebas del túnel aerodinámico, esto debido al deterioro que presenta el acrílico de la sección de prueba.
2. Usando un trípode, se ubicó la cámara de observación a una distancia de  $2,40m$  del espejo. Frente a esta a una distancia no mayor a los  $10cm$  se ubica un soporte universal en el cual se sujeta la fuente de luz y la chuchilla.
3. Dadas las pésimas condiciones del acrílico del túnel (rayones y la no uniformidad de éste), se hace necesario realizar las pruebas sin la tapa.

4. Teniendo posicionado los elementos en el túnel, se enciende el LED y se ubica el reflejo de este sobre el lente de la cámara.

Figura 35: Montaje Técnica de Schlieren en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.



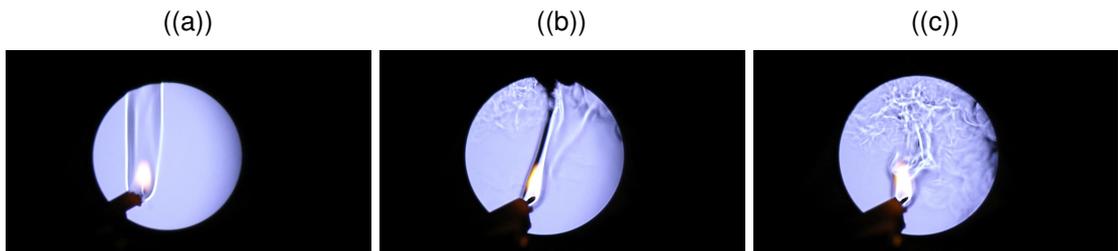
Fuente: Disposición de espejo coincidente con alineación fuera de eje de la técnica de Schlieren en el túnel aerodinámico de la Institución Universitaria Los Libertadores.

## 5. DATOS EXPERIMENTALES

### 5.1. EXPERIMENTOS PREPARATORIOS AL MONTAJE EN TÚNEL

La sección 5.1 enmarca los resultados de los experimentos realizados en condiciones ambientales normales, donde el objetivo central hacía referencia a establecer las condiciones y parámetros de funcionamiento de la técnica, permitiendo probar los elementos del montaje bajo condiciones mínimas de operación (establecer funcionalidad del espejo, cámara, luz, cuchilla ).

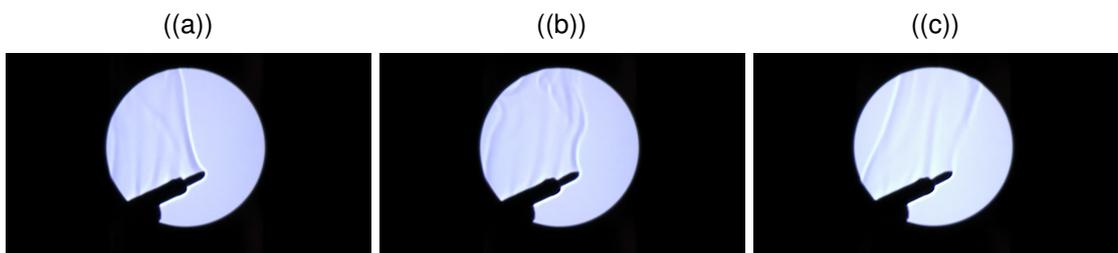
Figura 36: Observación del Flujo Convectivo de una Vela.



Fuente: Andrés Gonzalez, Flujo convectivo procedente de la flama de una vela.

La fig.36 permite apreciar el flujo convectivo de una vela, en este caso la energía que transmite la flama al aire, produce un cambio en la densidad de la atmosfera que la circunda, este cambio en la densidad genera que el aire ascienda , tal y como se muestra en la fig. 36(a), de la misma manera las secciones (b) y (c) de la fig.36 permiten apreciar como el flujo puede ser alterado con facilidad por el simple hecho de agitar el aire que circunda a la vela. Por otro lado la fig.37 permite apreciar el flujo convectivo procedente de un cautín encendido, en este caso se puede observar como el mayor cambio en el gradiente de densidad del aire se enfoca sobre las superficies más calientes del cautín.

Figura 37: Observación del Flujo convectivo sobre una Superficie.

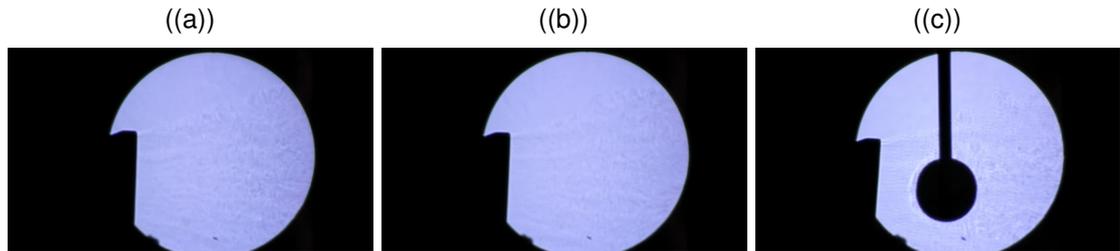


Fuente: Andrés Gonzalez, Flujo convectivo procedente de un Superficie Caliente (Cautín).

Ha de tenerse en cuenta que la visualización del fenómeno se da gracias al cambio en el índice de refracción que se produce por efecto del cambio en el gradiente densidad del aire, por lo cual entre más grande sea la variación, mucho más visible será el fenómeno, de la misma manera esto aplica para las condiciones del

experimento, donde entre más estables sean estas, mejor será la visualización, un ejemplo de esto se puede apreciar en la fig.38.

Figura 38: Observación del Flujo convectivo sobre la salida de un intercambiador de calor.



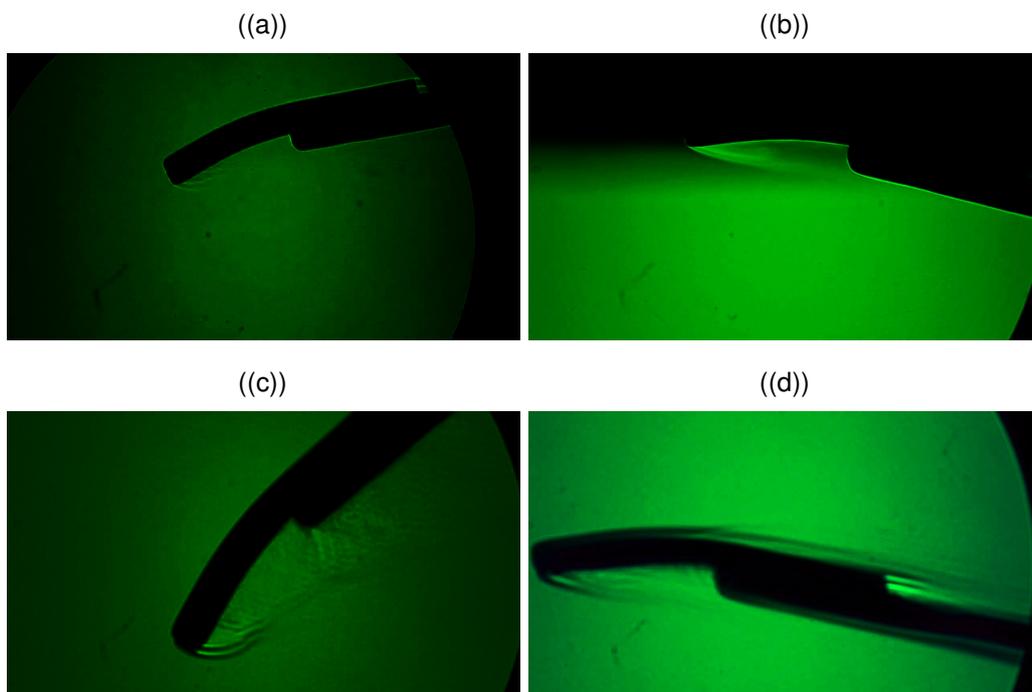
Fuente: Andrés Gonzalez, Flujo convectivo procedente de un secador de cabello.

En la fig.38 se muestra el flujo convectivo producido por la boquilla de un intercambiador de calor de uso casero (secador de cabello), en este caso dado a la velocidad y forma de la boquilla del secador, el aire es turbulento. La sección (c) de la fig.38 permite apreciar cómo se comporta el de aire al chocar con un objeto esférico, en este caso se genera una zona de presión en la parte frontal de la esfera y sobre ella debido al elemento de sujeción de la misma.

## 5.2. EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL TÚNEL DE VIENTO

Visualización de la capa limite térmica producida sobre una placa plana con un temperatura superficial de  $140^{\circ}\text{C}$  dentro de la sección de prueba del túnel aerodinámico, bajo condiciones de velocidad del viento de  $8,7\text{m/s}$ . En la sección (a) se observa la placa enfrentada al flujo del viento, en este caso no se hace uso de la chuchilla, por lo cual el efecto es apenas visible sobre la punta de la placa, donde se apreció el desprendimiento de la capa limite debido a la geometría y el ángulo de proyección del modelo, en la sección (b) se introduce la cuchilla desde la posición superior con el fin de contrastar la imagen y facilitar la visualización del fenómeno, en este caso se reduce el ángulo de ataque de la placa; en esta imagen se aprecia como el aire al chocar con la punta de la placa enmarca la capa limite térmica, mientras que de la misma forma se denota el flujo turbulento que se genera dentro de la sección que no es alcanzada por el aire.

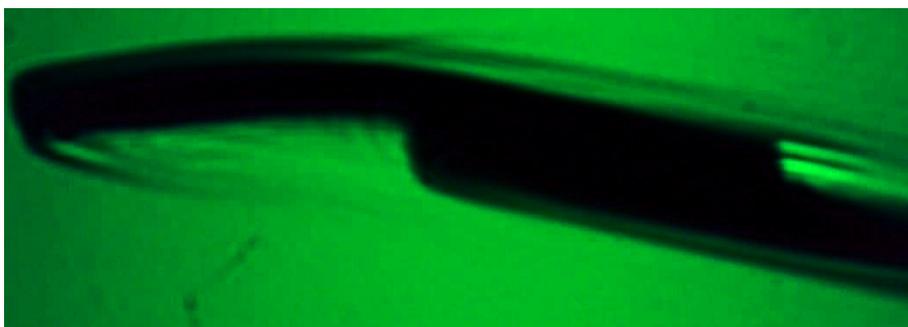
Figura 39: Placa plana.



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la institución universitaria los Libertadores.

En la sección (c) de la fig.30 el ángulo de proyección de la placa es mucho mayor, por lo cual el flujo es mayormente turbulento, efecto que es claramente visible en la imagen, mientras que en la sección (d) se le da un pequeño ángulo de ataque a la placa, en este caso la imagen permite apreciar la capa límite térmica sobre la superficie del modelo, en este caso es visible los punto en los cuales la capa se desprende de la superficie.

Figura 40: Flujo sobre placa plana



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la institución universitaria los Libertadores.

En la fig.40 se observa como el flujo genera vorticidad sobre la punta de la placa debido al ángulo de proyección que este posee en relación al viento relativo que choca sobre esté.

Lo anteriormente mencionado hace referencia a una serie de pruebas patrón, cuyo propósito se centró en resaltar y parametrizar las condiciones en la cuales la técnica es efectiva y/o funcional en el túnel aerodinámico, de igual manera a partir de esta experiencia se definen las condiciones de la prueba y se evidencia la necesidad de la realización de un tratamiento de software en las imágenes, esto para aumentar el contraste y resaltar los resultados observados a través de la técnica; este tratamiento se limita a aumentar o disminuir el contraste en relación al brillo de la imagen, o en algunos caso a manipular los colores primarios de esta, ha de aclararse que este tratamiento no altera el contenido y/o información de la imagen si no únicamente las condiciones de luz de la misma.

Los experimentos a estudiar dentro del contexto de la investigación se centran bajo tres modelos distintos, hechos a partir de una platina de acero y calentados por medio de una resistencia; para este caso en particular se definieron dos condiciones de estudio distintas que se aplicaron a cada modelo.

Figura 41: Modelos de Estudio.



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

Condiciones de las pruebas:

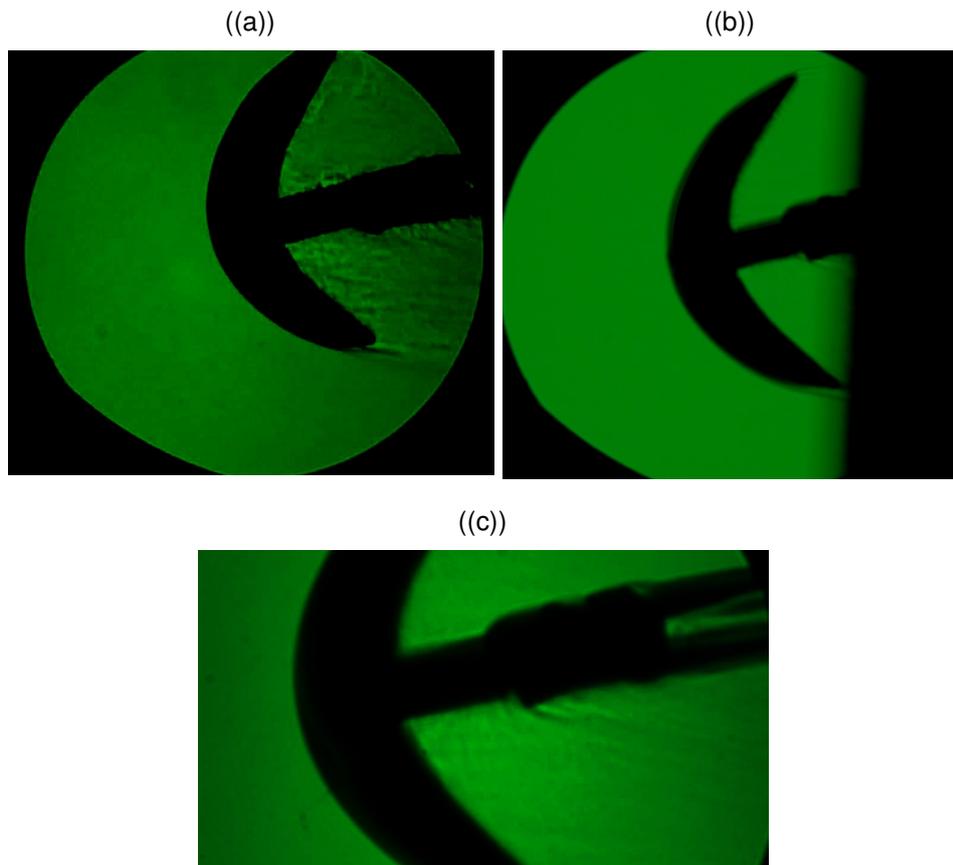
- $T=19.1\text{ }^{\circ}C$
- $\rho = 0,771Kg/m^3$
- $P_{atmosferica} = 748Hpa$
- $P_{seccindeprueba} = 22Pa$
- $v = 8,3m/s$

De lo anteriormente mencionado ha de resaltar que la presión dentro de la sección de prueba, es la presión con la que el aire choca con el elemento, es decir, no representa la presión atmosférica si no la fuerza que implica el flujo de aire sobre el cuerpo en un punto. Ha de resaltarse que las condiciones para las temperaturas superficiales  $T_s$ , apreciadas en la parte anterior se mantienen, variando

únicamente las condiciones de velocidad dentro de la sección de prueba.

En la fig.42 se aprecia el flujo convectivo de la media luna, donde la  $T_s$  es de  $120^{\circ}C$ , la sección (a) muestra en esencia el comportamiento del flujo en la cara interna del modelo donde este es predominantemente turbulento y desorganizado, por otro lado en la sección (b) gracias a la inclusión de la cuchilla se amplifica el contraste sobre los bordes de la cara externa, donde el flujo se separa e intenta continuar con la circunferencia de la cara; en este caso la geometría de la pieza genera una especie de conducto que guía al flujo interno, dado que el flujo procedente de los bordes exteriores se mueve a una velocidad muy superior a la velocidad de la zona interior, este efecto es comparable al de abrir un paraguas en lluvia, donde el flujo golpea la cara externa y sigue la curva, hasta el punto donde esta acaba, en donde este se separa del modelo, aislando el flujo de la sección interior de la exterior. La sección (c) muestra una amplificación de la zona interna inferior de la media luna, donde se aprecia de mejor manera la turbulencia del flujo.

Figura 42: Media Luna.

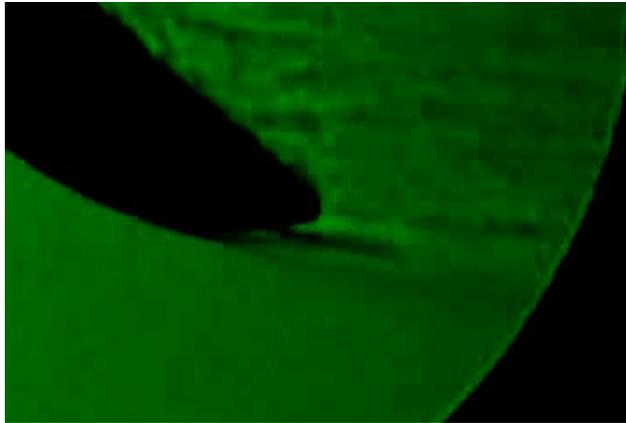


Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylyver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.

La fig.43 permite apreciar levemente como la capa limite se separa de la superficie a causa de la aceleración que experimenta el aire al recorrer la geometría de

la cara exterior, donde esta llegando a un punto diverge de la superficie.

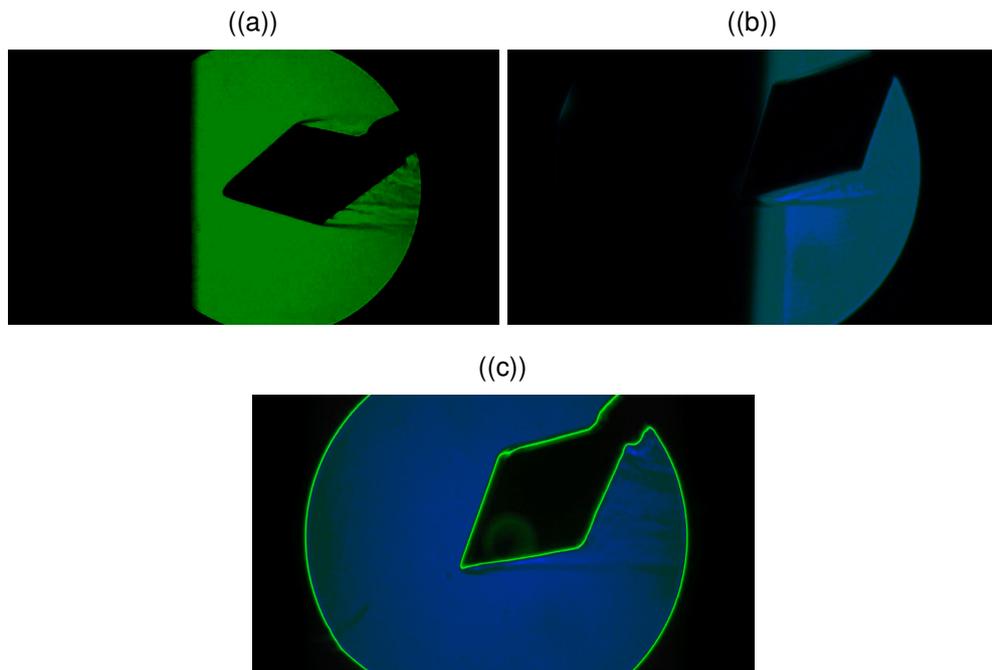
Figura 43: Borde de la cara Exterior.



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.

En el caso de la geometría romboide, que se muestra en la fig.44 secciones (a),(b) y (c) la  $T_s$  es de  $125^{\circ}C$ . La seccion (a) permite evaluar el comportamiento del flujo al recorrer la parte frontal de la geometria donde la corriente de aire golpea la punta de modelo y diverge por la parte superior e inferior, el aire continua su recorrido, cuando este llegue al borde final, donde cambia la geometria, el flujo se separa abruptamente.

Figura 44: Romboide.

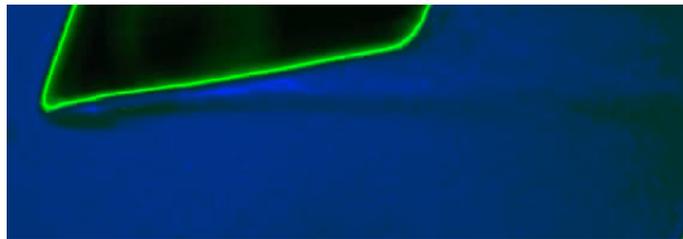


Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.

En la sección (b) de la fig.44 el romboide se encuentra enfrentando la cara superior al flujo, y la cuchilla entra desde la parte frontal de la imagen, esto con el fin propósito de magnificar el contraste sobre la punta del modelo, y mejorar la visualización del efecto, en este caso en la imagen se oscurecieron los tonos verdes y se iluminaron los azules.

La fig.45 permite apreciar una línea de división producto de la diferencia en el gradiente de densidad entre el flujo circundante al modelo y la corriente presente en la sección de pruebas. Dentro del contexto geométrico de esta figura ha de destacarse que bajo condiciones de mayor velocidad (cercanas o superiores a 1 mach) en el flujo, sería posible apreciar un efecto de onda de choque oblicua, esto debido a la forma de cuña que posee el elemento de prueba; mientras que en el caso del modelo de la media luna, sería posible apreciar el efecto de una onda de choque normal.

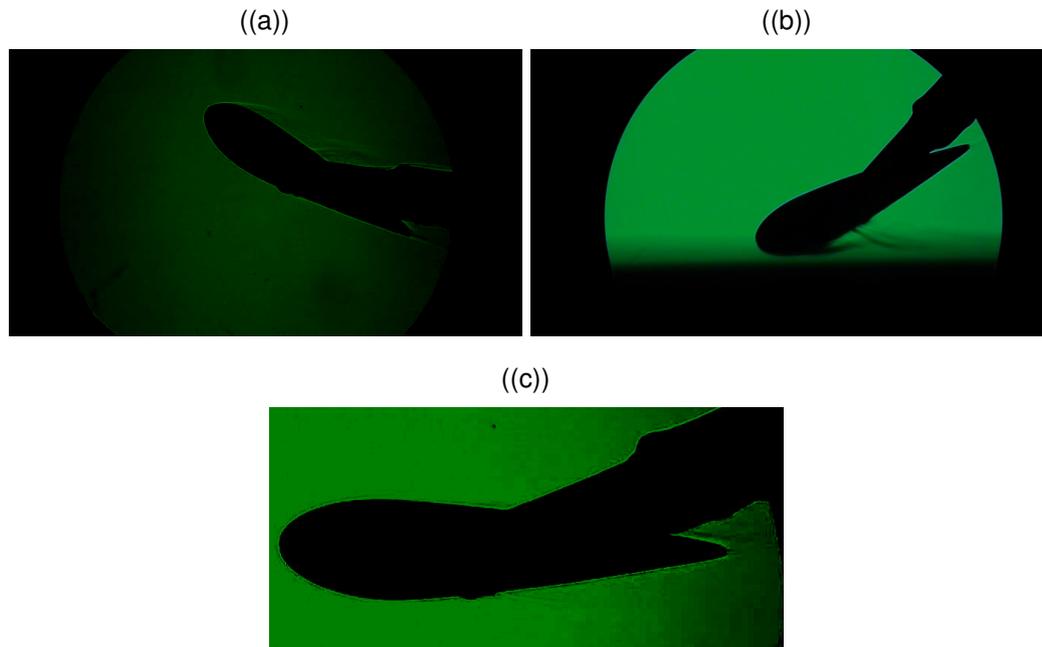
Figura 45: Borde inferior del Romboide.



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.

En la fig.46 se observa un perfil en tres diferente ángulos. La sección (a) permite observar el perfil en un ángulo de ataque alto, por lo tanto se aprecia el efecto de pérdida de la sustentación que sufre, en este caso la capa limite se separa rápidamente de la superficie, y se genera una zona de alta turbulencia sobre el extradós del modelo, por otro lado la sección (b) invierte los ángulos, en este caso se genera un alto ángulo de proyección de extradós, lo cual genera un desprendimiento de capa limite prematura sobre el intradós. Ha de mencionarse que la  $T_s$  del perfil se establece en  $130^{\circ}C$

Figura 46: Perfil.



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.

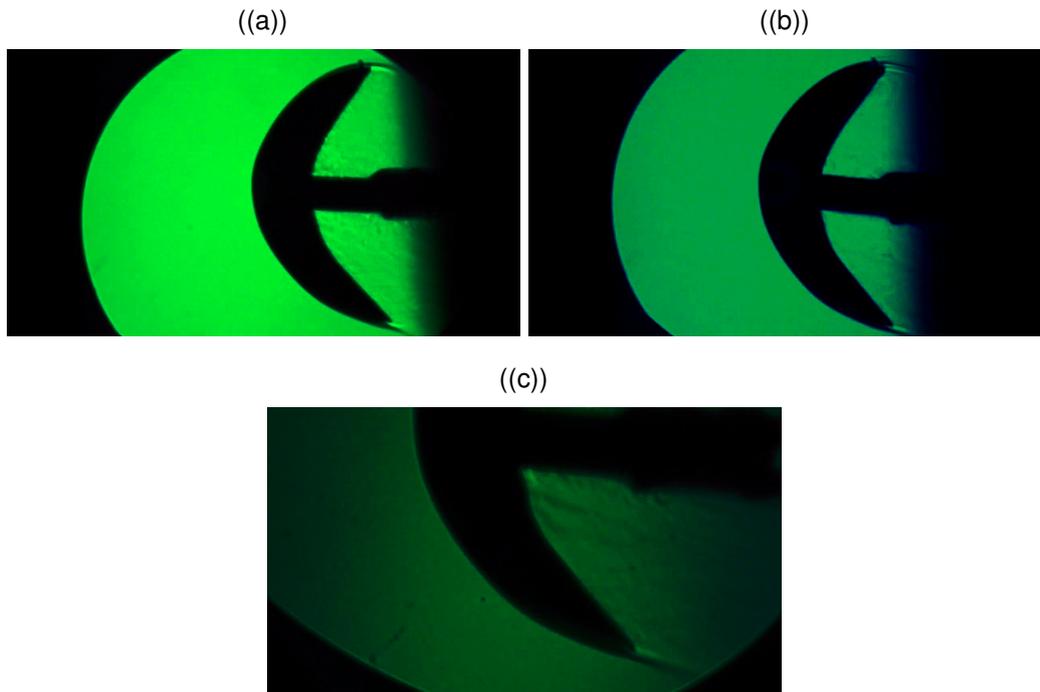
La sección (c) de la fig.46 muestra un perfil en un ángulo neutro, en este caso se observa levemente la capa límite sobre la superficie del perfil; esto debido a las velocidades dentro de la sección de prueba que no logran generar un efecto más notable sobre este.

Condiciones de la segunda ronda de pruebas:

- $T=19.1\text{ }^{\circ}C$
- $\rho = 0,771Kg/m^3$
- $P_{atmosferica} = 748Hpa$
- $P_{seccindeprueba} = 104Pa$
- $v = 13,44m/s$

La fig.47 tal y como la fig.42 muestra los efectos del flujo sobre la media luna, este caso la proyección del flujo sobre el borde final de la curva se extiende un poco más debido al aumento en la velocidad relativa del viento, esto de cierta forma reduce el cono que se proyecta desde la cara interna del modelo. En la fig.48 sobre el borde superior de la cara externa se aprecia como la capa limite se separa sobre de la superficie mucho antes de llegar al límite de la cara.

Figura 47: Media Luna.



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.

La fig.48 permite visualizar el punto de separación de la capa limite sobre la superficie da la cara externa en el borde superior.

Figura 48: Borde Superior de la cara Exterior.

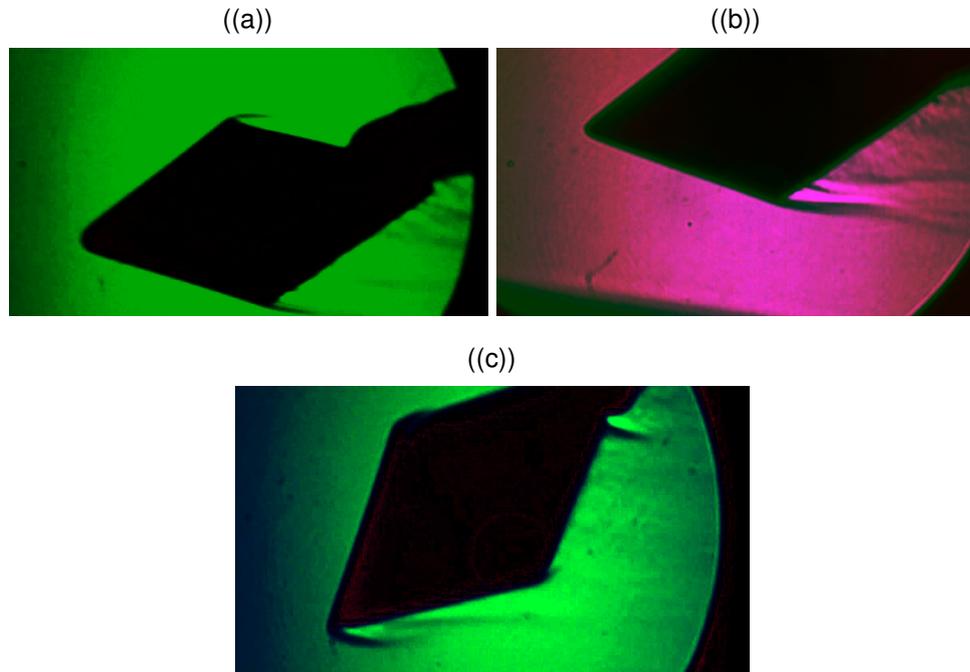


Fuente:Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores. .

La fig.49 igual que la fig.44 muestra los efectos del aumento de la velocidad del flujo sobre la superficie del romboide. En la sección (a) al igual que en la imagen homologa de esta, se observa como el flujo sigue la superficie del modelo, y se separa al llegar al borde, en este caso dado al aumento en la velocidad la apertura de la separación es mucho menor, de la misma manera en la sección

(b) se reducen los tonos verdes y se iluminan los rojos con el fin de aumentar la visual sobre el borde inferior del modelo.

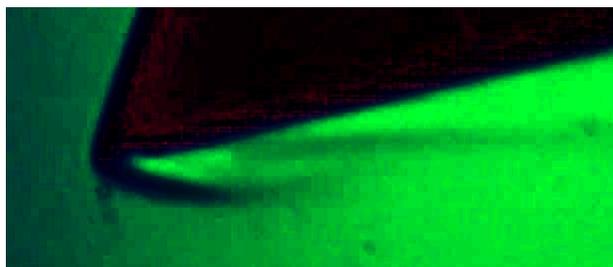
Figura 49: Romboide.



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.

En la fig.50 se aprecia como el flujo al momento de chocar sobre la punta del romboide se separa abruptamente de este, generando una zona turbulenta sobre la cara inferior.

Figura 50: Punta del Romboide.

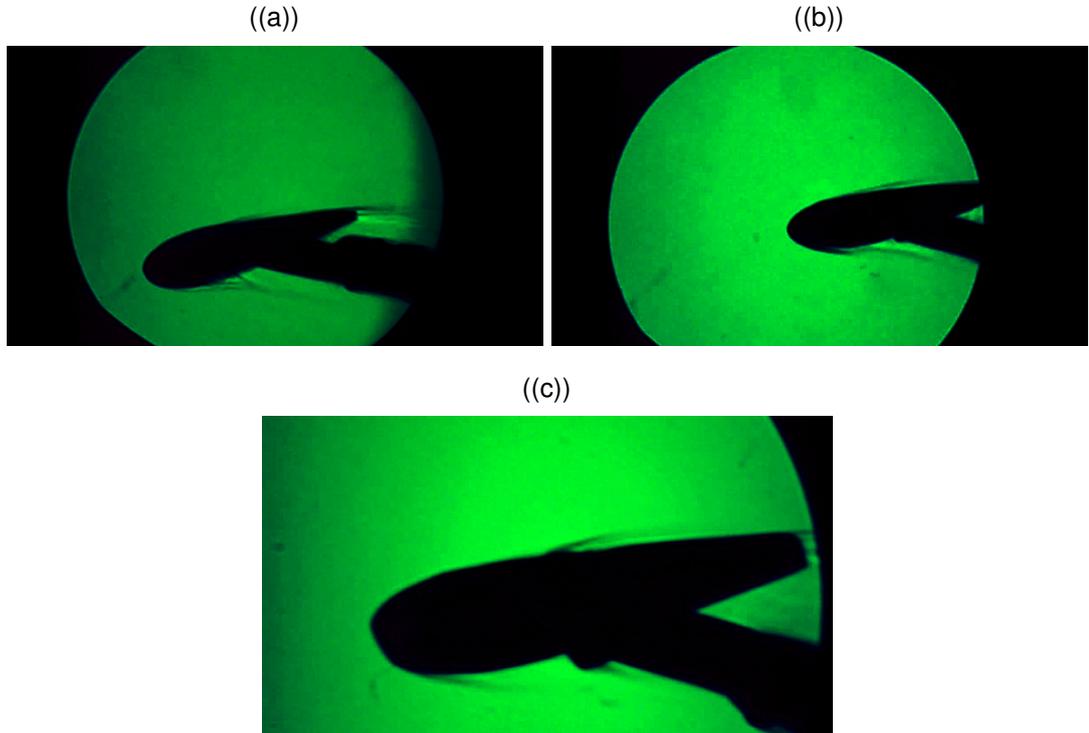


Fuente:Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores. .

En la fig.51 se aprecia la capa limite sobre el perfil, en este caso el perfil se posiciono sobre un pequeño ángulo de proyeccion del extrados, en la sección (a) se visualiza el desprendimiento de la capa limite sobre el borde ataque en la parte inferior del extrados, en esta imagen en especifico el desprendimiento se da hacia la parte intermedia de la superficie, mientras que en las sección (b),

en ángulo es menor, y el desprendimiento se da más sobre la parte central del intrados.

Figura 51: Perfil.



Fuente: Fotografía tomada por Andrés González y Ghylver Hastamorir en el túnel Aerodinámico de la Institución Universitaria los Libertadores.

La sección (c) muestra y amplifica lo visto en la sección (a), en este caso en particular se denota el desprendimiento de capa que se genera en el punto de sujeción del modelo, tanto en la parte superior como la parte inferior.

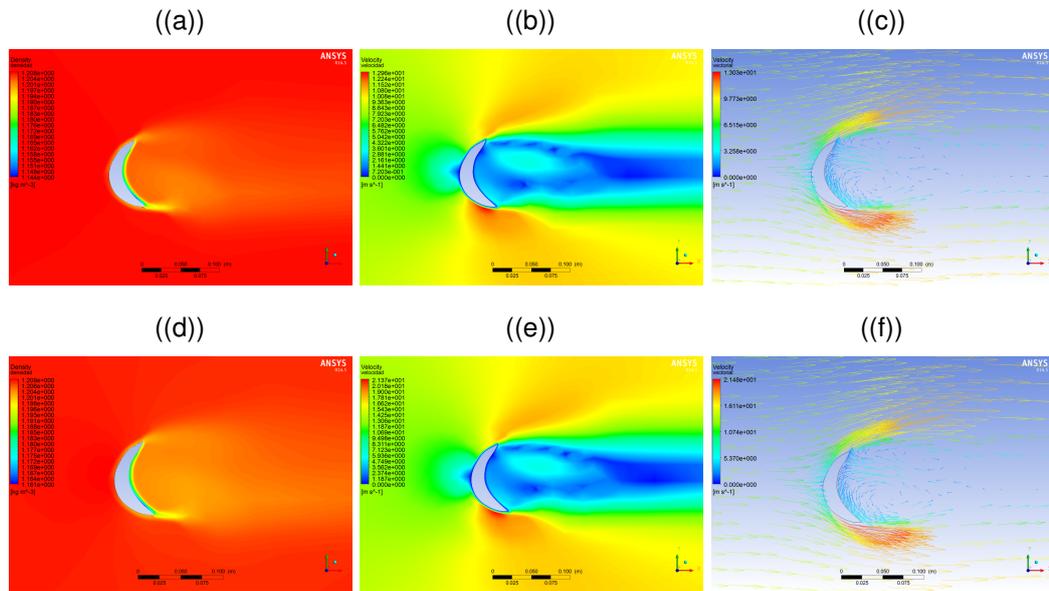
## 6. ANÁLISIS COMPUTACIONAL

Con el propósito de corroborar los resultados de la práctica se hace necesario la inclusión de un método de comparación, en este caso en específico se recurre a la utilización del módulo CFD de ANSYS; a través de este se generan condiciones similares a las de la prueba; ha de mencionarse que el criterio de comparación se evaluara desde un punto de vista cualitativo. Los parámetros establecidos para la simulación son:

- Los modelos CAD se realizaron a partir de fotografías escaladas, con el fin de hacerlos lo más parecidos posibles a los modelos usados durante las prácticas.
- La simulación se establece bajo el modelo de la ecuación de la energía.
- Se generó un enmallado automático, bajo el parámetro de alto detalle en la malla, y se agregó un refinamiento de la misma sobre la superficie del modelo.
- Las condiciones del aire se define bajo los parámetros de un gas-ideal bajo una viscosidad de  $1,809e - 5 Kg/sm$  a un temperatura ambiente de  $19,1^{\circ}C$ .
- La ecuación se resuelve bajo los parámetros de una ecuación de primer orden.
- Se definieron dos diferentes situaciones en las simulaciones:
  - Se define para las figuras 52, 54, 56, 58 y 60 secciones de la (a) a la (c), para este caso la velocidad está dada en  $8,3m/s$  y la presión en  $22Pa$ .
  - Se define para las figuras 52, 54, 56, 58 y 60 secciones de la (d) a la (f), para este caso la velocidad está dada en  $13,44m/s$  y la presión en  $104Pa$ .
  - Las simulaciones para la investigación se realizarán desde una perspectiva 2D, esto implica que se ignoraran elementos diferentes al modelo usado en la práctica (sistemas de sujeción u otros elementos físicos dentro de la sección de prueba).
- Las figuras 52, 54 56, 58 y 60 se dividen en dos grupos mencionados anteriormente, y estas a su vez se dividen en tres, en donde las secciones (a) y (d), (b) y (e) y (c) y (f) corresponden al comportamiento de la densidad, la velocidad y análisis vectorial correspondientemente.

La fig.52 permite apreciar los resultados simulados de la media luna; en donde a grandes rasgos se denota como el flujo al golpear la cara externa de esta, genera una zona de alta presión, lo que reduce la velocidad del aire que llega y acelera el flujo que se encuentra sobre la superficie causando un desprendimiento de la capa limite, efecto apreciable en la fig.53 sección (b).

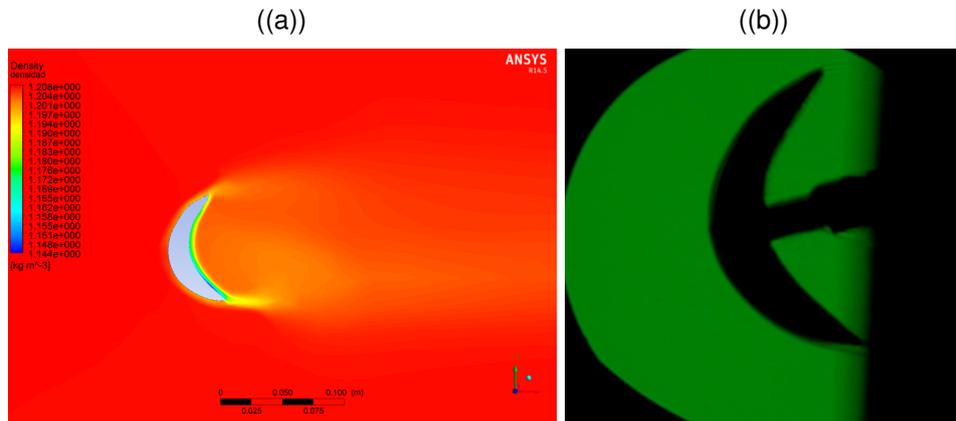
Figura 52: Simulación Media Luna.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

En la fig.53 se observa una comparación entre el comportamiento de la densidad en ANSYS versus lo observado en la prueba, en este caso se denota como el gradiente de densidad es visible sobre los bordes de la cara exterior y sobre la cara interior.

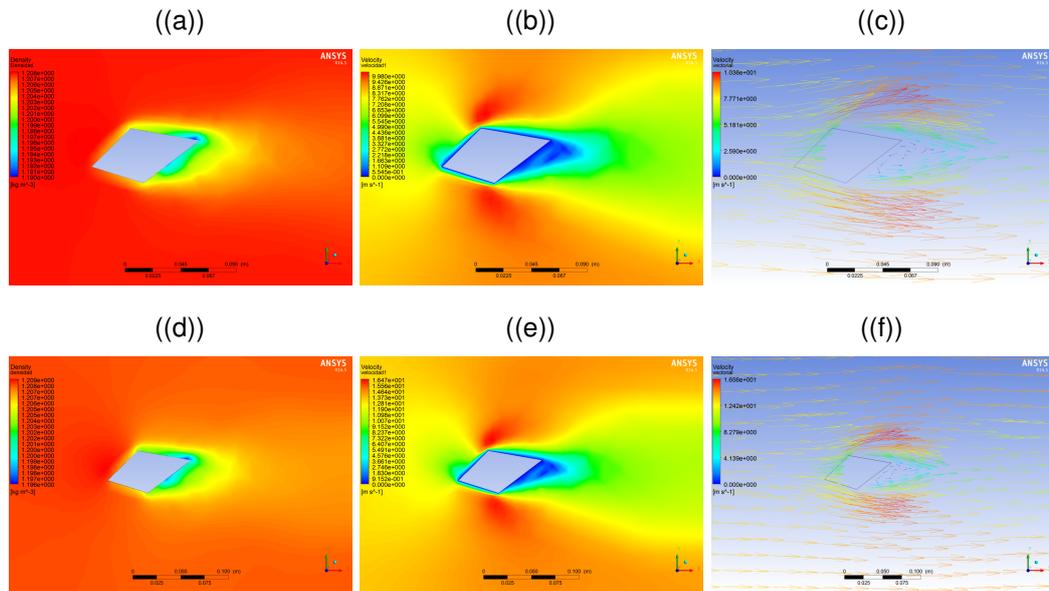
Figura 53: Media Luna Simulación vs Practica.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

La fig.54 tal y como la fig.52 permite apreciar la equiparación de las pruebas realizadas en el túnel, dentro de un escenario virtual, mientras que en la fig.55 sección (a), se observa como el gradiente de densidad es apreciable por la parte posterior del modelo tal y como lo muestra la sección (b) de la misma figura. De igual manera ha de resaltarse que en la cara frontal se genera una capa delgada que no es fácilmente apreciable en la práctica.

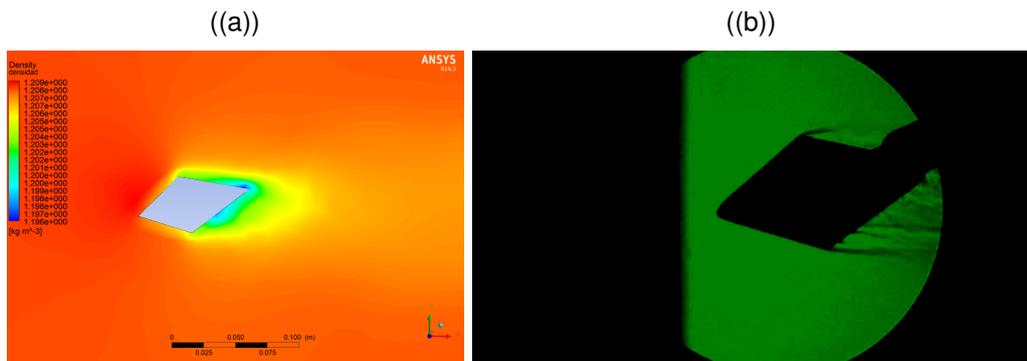
Figura 54: Simulación Romboide.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

La fig. 55 permite apreciar la relación entre el comportamiento del gradiente de densidad que existe en el modelo y la simulación, en este caso la sección (a) se visualiza la simulación CFD mientras que la sección (b) se observan los resultados prácticos, obtenidos a través de la técnica.

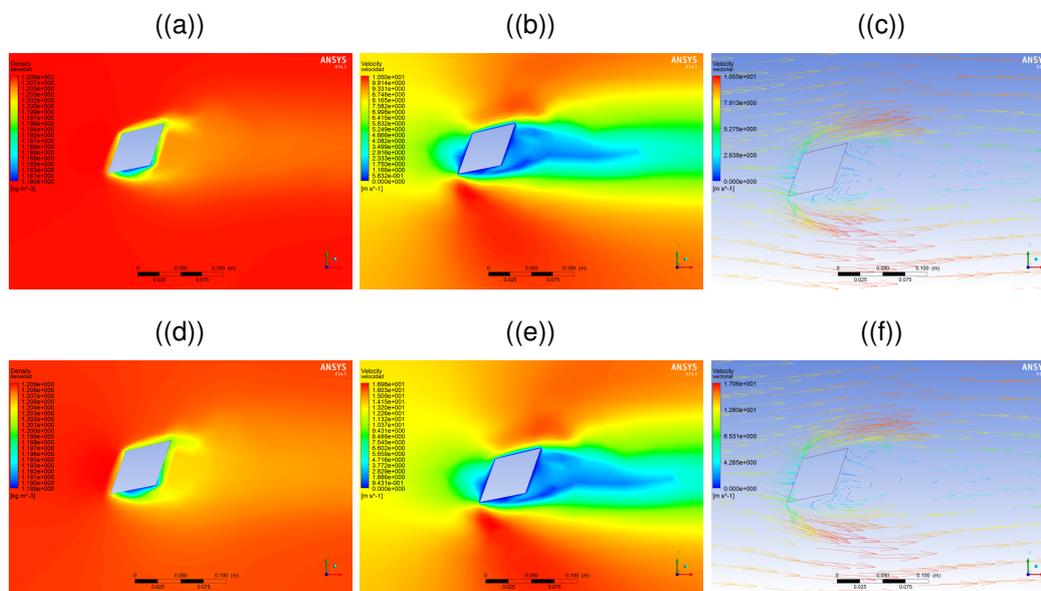
Figura 55: Romboide Simulación vs Practica.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir. .

En el caso de las fig.56 y 57 se aprecia el comportamiento del flujo sobre el romboide en un ángulo de proyección mucho mayor. En este caso las secciones (b) y (e) de la fig.56, permiten apreciar como la velocidad se reduce sobre la cara frontal generando una zona de presión que se enmarca y se aprecia mucho mejor en la sección (e) dado el aumento de velocidad que esta sufre, de la misma forma se enmarca como la velocidad es mucho mayor sobre la cara posterior del mismo.

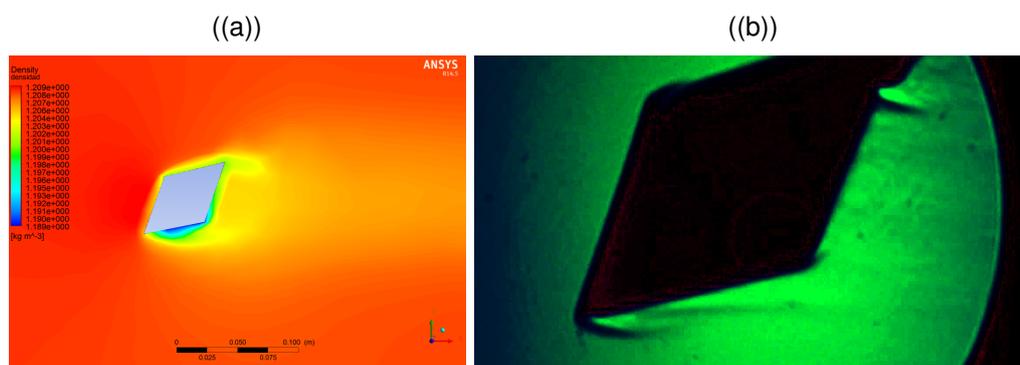
Figura 56: Simulación Romboide con mayor ángulo de Proyección.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

En la fig.57 se muestra como el mayor cambio en el gradiente de densidad se da en la parte inferior de la cara posterior, esto se debe a la vorticidad que se genera sobre punta del modelo y que se aprecia en la fig.56 sección (f), ha de resaltarse que esto se da debido a que el cambio en la densidad es producto de la  $T_s$  del modelo.

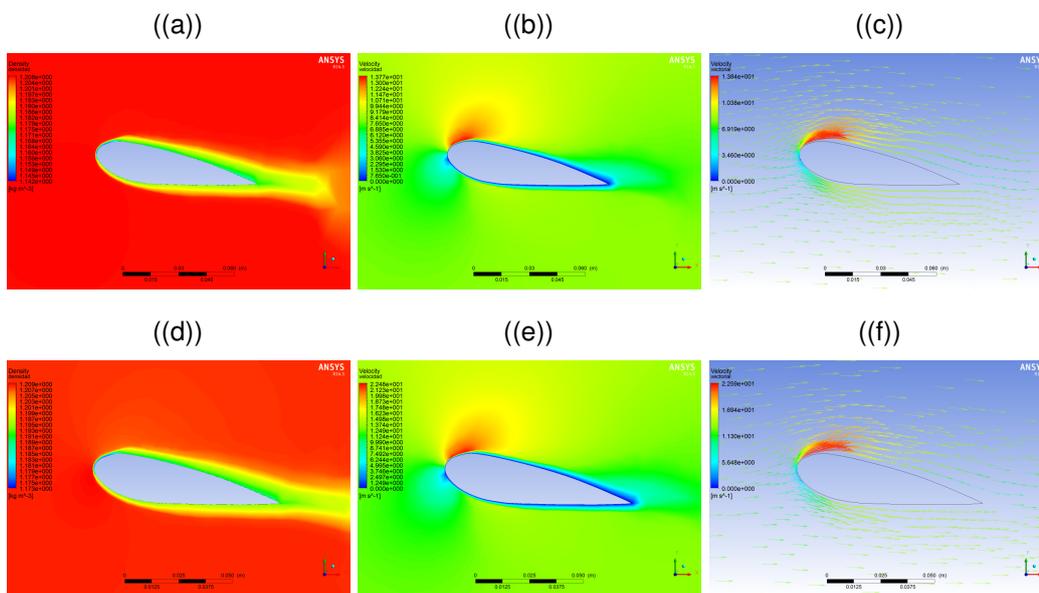
Figura 57: Romboide 2 Simulación vs Practica.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

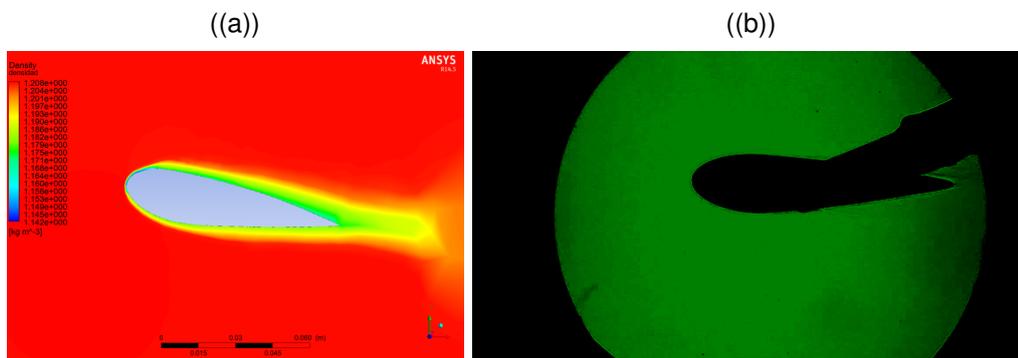
La fig.58 enmarca las condiciones y resultados del escenario virtual de las pruebas del perfil, en este caso, lo que la simulación permite apreciar, no es visible con claridad sobre el modelo real, que se muestra en la fig.59 sección (b), en este caso sobre el modelo se genera una capa limite sobre la superficie del perfil y cuya separación se pierde por la sombra del sistema de sujeción, pero que se enmarca sobre el borde de salida del modelo.

Figura 58: Simulación perfil.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

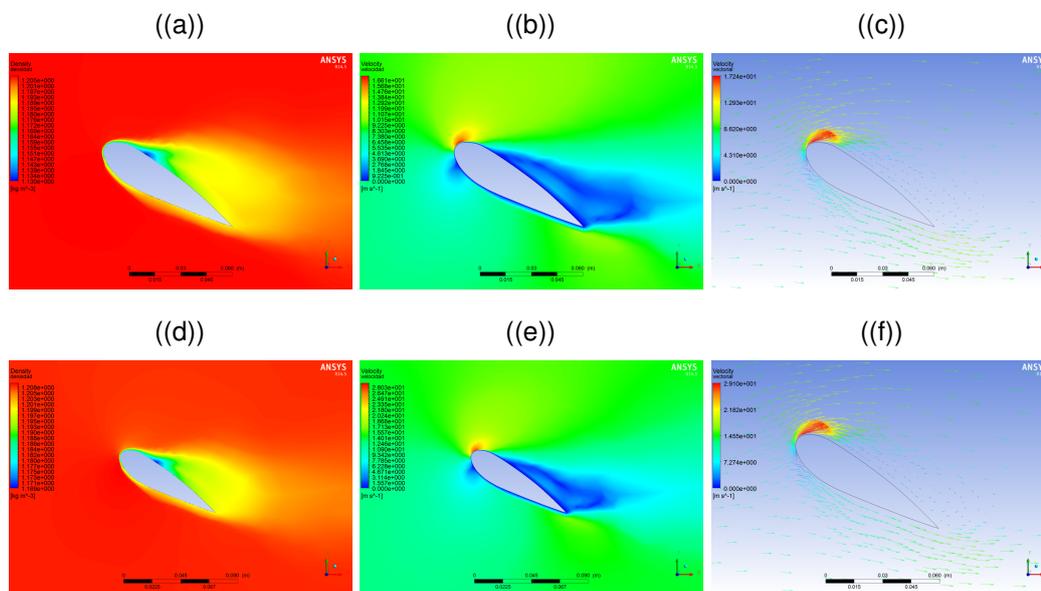
Figura 59: perfil Simulación vs Practica..



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

La fig. 60 permite apreciar el punto de separación de la capa límite sobre el perfil, desde la perspectiva de la densidad, velocidad y análisis vectorial, se ha de resaltar que a través de la técnica se aprecia dicho comportamiento desde el gradiente de densidad.

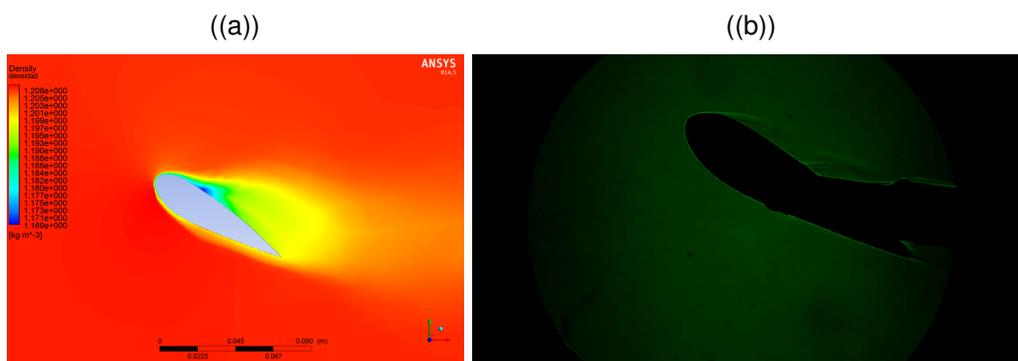
Figura 60: Simulación perfil 2.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

La fig.61 a diferencia de la fig.59, permite apreciar como el flujo que recorre la superficie del perfil se desprende sobre el borde de ataque del modelo, debido al alto ángulo de ataque. En este caso el efecto es visible en ambas imágenes; de igual manera en la sección (b), se ha de resaltar que se hacen visibles los efectos del soporte sobre el modelo, pudiéndose observar otro punto de separación de flujo sobre el mismo, este punto de separación es producto de la tuerca de sujeción que se encuentra sobre eje  $y$ .

Figura 61: Perfil 2 Simulación vs Practica.



Fuente: Simulación CFD realizada por Andrés González y Ghylver Hastamorir.

la fig.61 es una comparación entre la simulación y la práctica, en este caso la imagen permite apreciar los efectos del sistema de sujeción sobre el modelo, que no son apreciable en la simulación, dada las condiciones de la misma.

## 7. CONCLUSIONES

1. Dentro del contexto de la investigación se ha de mencionar que la técnica de Schlieren a nivel nacional solo ha sido estudiada dentro de la temática de la transferencia de calor, específicamente en el campo de la observación del flujo convectivo procedente de superficies y/o elementos a altas temperaturas, siendo la Universidad Pontificia la que más ha incursionado en este tema, y donde la universidad San Buenaventura ha realizado algunas aproximaciones; por lo que la información en referencia a las aplicaciones de la técnica de Schlieren en Colombia es escasa; ha de mencionarse que la institución universitaria los Libertadores sería de las pocas instituciones en Colombia en busca de aplicar la técnica de Schlieren en el estudio de la aerodinámica subsónica.
2. Actualmente la técnica de Schlieren es ampliamente usada en la investigación de flujos supersónicos e hipersónicos, dado a que esta da la posibilidad de observar las ondas de choques producto de las altas velocidades.
3. En el campo de la investigación aeronáutica y aeroespacial, la técnica de Schlieren permite apreciar los puntos críticos sobre la superficie o modelo de estudio, esto a través de la posibilidad de observar en que puntos exactos del modelo se generan las ondas de choque; por lo tanto haciendo posible generar mejoras sobre el mismo.
4. La técnica Schlieren en relación a la técnica de visualización por humo, brinda una mayor precisión en el estudio aerodinámico, dado que esta técnica se centra en la observación de los cambios del gradiente de densidad causados por velocidad (producto de la geometría del elemento de estudio o sección de prueba) o temperatura (superficies a altas temperaturas); por lo cual los efectos se denotan directamente sobre la superficie del cuerpo.
5. La técnica de Schlieren debido a su alto grado de sensibilidad es susceptible a las imperfecciones más pequeñas que se puedan encontrar dentro de la sección de prueba, en este caso en particular el deterioro notable en el acrílico de la sección de prueba generaba distorsión sobre la imagen, y los múltiples rayones sobre el mismo no permitían una clara visualización del fenómeno, por lo cual el espejo debido a introducirse dentro del túnel y la prueba se realizó sin la tapa del mismo; a partir de lo anterior se concluye que se requieren condiciones de uniformidad y calidad en los elementos que se encuentre entre el espejo y la cámara.
6. Las aplicaciones del análisis CFD permiten generar un ambiente virtual, donde se simulan las condiciones de las pruebas, pero que se desenvuelven bajo condiciones ideales, y que excluyen fenómenos o efectos producto de otros elementos como el sistema de sujeción (en este caso en particular) que afectan los resultados prácticos, ha de aclararse que aunque elementos como estos pueden introducirse en el ambiente virtual, estos generan condiciones de análisis distintas y más complejas que requieren de una

concepción más profunda de las propiedades del flujo y las variables presentes durante la prueba, lo cual implica un entendimiento más avanzado del software Ansys.

7. A través de las simulaciones se corroboran los datos de las pruebas, indicando la efectividad de la técnica, y funcionalidad dentro del contexto práctico en el túnel aerodinámico en la Institución Universitaria los Libertadores, notase que el punto de comparación entre la simulación y la práctica se definió, bajo criterios netamente cualitativos y no cuantitativos. .

## Bibliografía

- [1] Prof. R.J, Adrian; Prof. M. Gharib; Prof. Dr. Wolfgang Merzkirch; Prof. Dr. D. Rockwell; Prof.J. H. Whitelaw. Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media. G.S. Settles : Springer, 1949. 367p. ISBN 3 – 540 – 66155 – 7.
- [2] A. J. Smits; T.T. Lim. Flow Visualization: Techniques and Examples. Second Edition London: Imperial College Press, 2012. 423p. ISBN 978 – 1 – 84816 – 791 – 9.
- [3] Norma Técnica Colombiana NTC 1486: Documentación, Presentación de Tesis, Trabajos de Grado y Otrs Trabajos de Investigación.[PDF].Sexta Actualización. Bogotá D.C, 2008 -[citado 20 de enero del 2015]. I.C.S: 01,140,20
- [4] Centro Colombiano Del Derecho de Autor. [en línea].Fecha de consulta 20 de enero del 2015. Disponible en <http://www.cecolda.org.co/index.php/la-asociacion>
- [5] Norma Técnica Colombiana NTC 4490: Referencias Documentales para fuentes de información Electrónicas.[PDF]. Bogotá D.C, 1998 -[citado 20 de enero del 2015]. I.C.S: 01,140,20
- [6] Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations: Geometrical Optics, Refraction and Dispersion. [En Línea]. Harvard College E.U, 2014 - [citado 21 de enero del 2015]. Disponible en [http://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/icb/icb.do?keyword=k16940&pageid=icb.page93268&pageContentId=icb.pagecontent221620&view=view.do&viewParam\\\_name=indepth.html#a\\\_icb\\\_pagecontent221620](http://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/icb/icb.do?keyword=k16940&pageid=icb.page93268&pageContentId=icb.pagecontent221620&view=view.do&viewParam\_name=indepth.html#a\_icb\_pagecontent221620).
- [7] National Aeronautics And Space Administration: Schlieren System.[En línea]. Florida E.E.U.U; 2014 -[Citado 23 de Enero del 2015]. Disponible en <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/tunvschlrn.html>.
- [8] Douglas C. ; Giancoli. Física: Principios con Aplicaciones. Sexta Edición. PEARSON Educación, 2006. 848p. ISB 970 – 26 – 0695 – 0
- [9] Serway, Raymond A; Jr. Jewett, John W. . Física: Para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II. Séptima Edición. CENGAGE Learning. 2009. 1383p. ISBN 10 : 607 – 481 – 358 – 2
- [10] Bertin, John J.; Cummings, Russel M. . Aerodynamics for Engineers. Fifth Edition. Pearson Prentice Hall. 2009. 752p. ISBN–13 : 978–0–13–235521–6
- [11] G. Wetzstein, W. Heidrich and R. Raskar. Computational schlieren photography with light field probes. International Journal of Computer Vision 110(2), pp. 113-127. 2014. Disponible en:[http:](http://)

//search.proquest.com/docview/1614610733?accountid=48891.DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1007/s11263-013-0652-x..>

- [12] S. Askari and M. H. Shojaeefard. Numerical simulation of flow over an airfoil with a cross flow fan as a lift generating member in a new aircraft model. *Aircraft Eng. Aerospace Technol.* 81(1), pp. 59-64. 2009. Disponible en:<http://search.proquest.com/docview/213774590?accountid=48891.DOI:http://dx.doi.org/10.1108/00022660910927466>.
- [13] LI, Z., et al. Starting Characteristics of Hypersonic Inlets in Shock Tunnel. En *28th International Symposium on Shock Waves*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 1015-1020.
- [14] MANCENÍDO, M., Et Al. Observación de Perturbaciones en Aire Mediante Técnicas De Moiré y Schlieren. En *Anales Afa*. 2013
- [15] ELSINGA, G. E., et al. Assessment and application of quantitative schlieren methods: Calibrated color schlieren and background oriented schlieren. *Experiments in Fluids*, 2004, vol. 36, no 2, p. 309-325.
- [16] O. A. Yevtikhiyeva, N. M. Skornyakova and A. V. Udalov. An investigation of the error of the background schlieren method. *Measurement Techniques* 52(12), pp. 1300-1305. 2009. Disponible en:[http://search.proquest.com/docview/209787419?accountid=48891.DOI:  
http://dx.doi.org/10.1007/s11018-010-9437-6](http://search.proquest.com/docview/209787419?accountid=48891.DOI:http://dx.doi.org/10.1007/s11018-010-9437-6).
- [17] E. J. FITZGERALD and E. J. JUMPER. The optical distortion mechanism in a nearly incompressible free shear layer. *J. Fluid Mech.* 512pp. 153-189. 2004. Disponible en:<http://search.proquest.com/docview/210895804?accountid=48891>.

## ANEXOS

### Anexo A

#### Tablas de especificaciones técnicas

Tabla 2: Velocidades Túnel de Viento

RPM	V(m/s)	T (°C)	p (Hpa)
100	0,7	17,8	748
200	3	17,8	748
300	4,6	17,8	748
400	6,3	17,8	748
500	10	17,8	748
600	11,8	17,8	748
700	15	17,8	748
800	17,5	17,8	748
900	18,5	17,8	748
1000	21,3	17,8	748
1100	24,3	17,8	748
1200	27,6	17,8	748
1300	29,6	17,8	748
1400	31,2	17,8	748
1500	33,2	17,8	748

Fuente: Datos obtenidos gracias al estudiante de Ing. Sebastián Moreno, miembro del semillero de investigación de coherencia de la Institución Universitaria Los Libertadores.

Tabla 3: Datos técnicos túnel aerodinámico TELSAT Aerospace

Modelo	M01-15-150M
Tipo	Túnel subsónico de circuito abierto
Velocidad máxima	41m/s
Ventilador	CT365
Caudal	35,339m/h
Potencia motriz	25HP
Mach	0,12
RPM	1700
KW	18,65

Fuente: Datos tomados del manual de usuario del túnel aerodinámico.

## Anexo B

### Desarrollo matemático de las características del túnel aerodinámico.

#### 1. Conversión °C a K

$$K = ^\circ C + 273,15$$

$$K = 17,8 + 273,15$$

$$K = 290,95$$

#### 2. Calculo del número de Reynolds.

$$Re : \frac{v l \rho}{\mu}$$

Los datos usados son:

$$v = 100 : 100 : 1500$$

El diámetro hidráulica de la sección de pruebas.

$$D_h = \frac{2ab}{a+b}$$

Donde  $a$  es la altura y  $b$  la base del rectángulo.

$$D_h = \frac{2 * 0,47m * 0,679m}{0,47m + 0,679m}$$

$$D_h = 0,555m$$

La  $\rho$  se obtiene de la atmosfera ISA, considerando la altura de Bogotá como 2630m:

$$\rho = 0,771Kg/m^3$$

En el caso de la viscosidad este se obtuve a partir de la ecuación Sutherland:

$$\mu = 1,458 \times 10^{-6} \frac{T^{1,5}}{T + 110,4}$$

Remplazamos  $T$ :

$$\mu = 1,458 \times 10^{-6} \frac{290,95^{1,5}}{290,95 + 110,4}$$

$$\mu = 1,802 \times 10^{-5} Kg/ms$$

Remplazamos estos valores en la ecuación:

a)

$$Re = \frac{0,7m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5} Kg/s * m}$$

$$Re = 16622,28$$

b)

$$Re = \frac{3m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 71238,35$$

c)

$$Re = \frac{4,6m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 109232,13$$

d)

$$Re = \frac{6,3m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 149600,53$$

e)

$$Re = \frac{10m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 237461,15$$

f)

$$Re = \frac{11,80m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 280204,16$$

g)

$$Re = \frac{15,00m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 356191,73$$

h)

$$Re = \frac{17,50m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 415557,02$$

i)

$$Re = \frac{18,50m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 439303,14$$

j)

$$Re = \frac{21,30m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$
$$Re = 505792,26$$

k)

$$Re = \frac{24,30m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$

$$Re = 577030,60$$

l)

$$Re = \frac{27,60m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$

$$Re = 655392,79$$

m)

$$Re = \frac{29,60m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$

$$Re = 702885,02$$

n)

$$Re = \frac{31,20m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$

$$Re = 740878,80$$

ñ)

$$Re = \frac{33,20m/s * 0,555m * 0,771Kg/m^3}{1,802 \times 10^{-5}Kg/s * m}$$

$$Re = 788371,03$$

## Anexo C

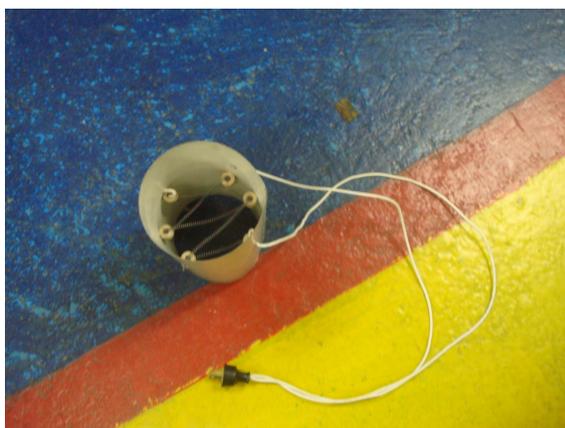
### Recomendaciones y Costos

#### 7.0.1. Recomendaciones

Durante el proceso y reconocimientos de los resultados, se dieron a lugar ciertas condiciones que podrían llegar a mejorar el contexto del experimento, estas se mencionan a continuación:

- **Calentar el flujo en lugar del modelo:** Durante el proceso y desarrollo de las prácticas en el túnel aerodinámico se idearon diversas maneras para lograr generar gradientes de densidad lo suficiente mente altos para que estos fuesen visibles a la cámara, en este caso se recurrió a la construcción de un cono como el que se muestra a continuación.

Figura 62: Calentador de aire.



Fuente: Intercambiador de calor de convección forzada.

La fig.62 permite apreciar una intercambiador de calor por convección forzada, donde se usó una resistencia de  $10\Omega$  a  $1000w$ , que calentaban el aire a una temperatura promedio de  $70^{\circ}C$  a  $80^{\circ}C$ ; en este caso el efecto era apenas visible; pero ha de resaltar que, aunque no se obtuvieron los resultados deseados debido a la temperatura si se lograra apreciar algo, indicando que a mayor temperatura, mayor será la variación en el gradiente del mismo, por lo cual se facilitara la visualización del fenómeno en la cámara.

- **Modelos de pruebas:** En este caso en particular los modelos aplicados en las pruebas permitieron apreciar el comportamiento del flujo de aire sobre estos; gracias a un calentador donde se ubicaron los modelos para luego sujetarlos a una resistencia, para introducirlos a la sección de prueba, en este caso el tiempo de calentado era mucho mayor al de enfriamiento, por lo cual el tiempo de la prueba era limitado. De esta experiencia nace la sugerencia de desarrollar modelos que sean capaces de generar calor

(resistencia hechas con formas precisas) y cuyas materias primas (aluminio, cobre, bronce) posean constantes de transferencia mucho mayores para brindar condiciones térmicas más estables.

- **Condiciones de la sección de prueba:** la condiciones de la sección de prueba como se ha mencionado con anterioridad, en este caso, no permitieron desarrollar un montaje no-invasivo, siendo necesario introducir el espejo en la sección de prueba y quitar la tapa frontal de esta, para garantizar las condiciones del experimento, por lo cual, si se llegase a requerir una prueba no invasiva se requeriría de un cambio de la sección de pruebas o el diseño de una sección diferente exclusiva para el desarrollo de la técnica que garantizan las condiciones para llevar a cabo la práctica.

## 7.0.2. Costos

Tabla 4: Costos Proyecto

Espejo Telescopico f8	\$ 791.666,25
Camara Fujifilm s4800	\$ 499.000,00
Cuchilla	\$ 1000,00
Led SMD	\$ 2.500,00
Base Cinematica	\$ 20.000,00
Software	Instalaciones Universidad
Papeleria	\$ 70.000,00
Transporte	\$ 200.000,00
Recurso Humano	\$ 350.000,00
Materiales	\$ 70.000,00
<b>Total</b>	<b>\$ 2.004.166,25</b>

Fuente: Andres Gonzalez y Ghylver Hastamorir, Balance costos transcurridos durante el transcurso del proyecto.

Ha de destacarse que la cámara Fujifilm s4800 incluye:

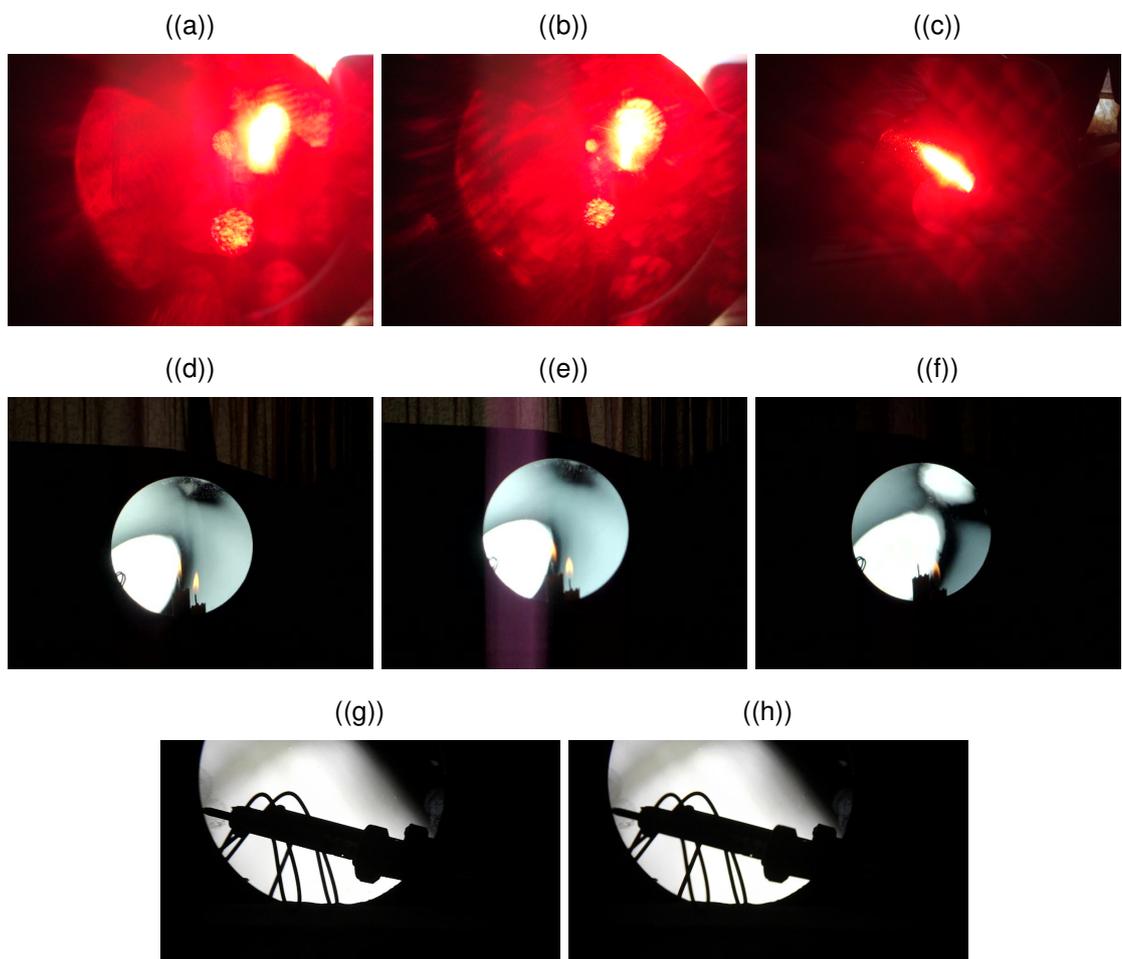
- Baterias Doble AA Cuatro unidades
- Cargador de baterías.
- Correa
- Protector Lente

## Anexo D

### Pruebas Preparatorias

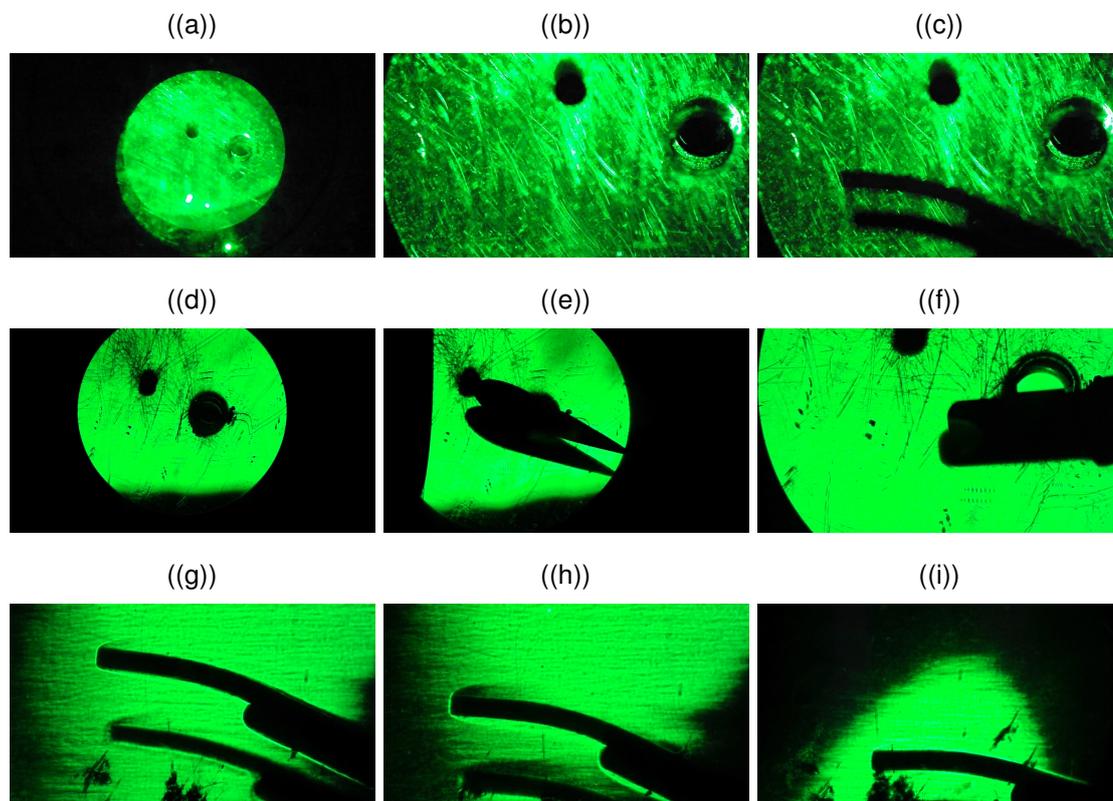
La fig.63 permite apreciar como el espejo afecta considerablemente las condiciones de la prueba, en este caso, se usó un espejo cóncavo común, el cual no enfocaba la luz en un punto, efecto que se denota en la observaciones de la imágenes donde solo una porción del espejo se ilumina frente a la lente, de la misma manera en las secciones (a) (b) y (c) se usó un puntero laser, en este caso, se genera un efecto de aberración sobre la lente.

Figura 63: Pruebas preparatorias Schlieren usando un puntero laser y un espejo cóncavo común.



Fuente: Andrés González y Ghylver Hastamorir; Primeros intentos de establecer las condiciones de la técnica, probando fuente de luz y espejo común.

Figura 64: Técnica de Schlieren primeras pruebas Túnel Aerodinámico. .



Fuente:Andrés Gonzalez; Montaje técnica con espejo fuera de la sección de pruebas y tapa puesta.

En la fig.64 se aprecia en las distintas secciones como el acrílico afecta notablemente los resultados, estando evidenciada en primer lugar la no completa distribución de la luz sobre la imagen que refleja el espejo; de la misma forma se aprecia como los rayones pueden llegar a afectar los resultados ocultando en algún caso los fenómenos apreciables con la técnica.

En el caso de las secciones (g) (h) y (i) las pruebas se realizaron sobre la parte inicial de la sección de pruebas con el fin de evitar los agujeros de soporte de modelos, en este caso la imagen mejora notablemente, pero se denotan aun las marcas del acrílico y la distribución de la luz no es completa.

## Anexo D

### CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Bogotá D.C.

Señores:

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C.

Autorizamos a los usuarios interesados para consultar solo con fines académicos, el contenido del trabajo de grado titulado:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE VISUALIZACIÓN SCHLIEREN PARA EL TÚNEL AERODINÁMICO DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES.**

Elaborado y presentado por los estudiantes Andres Enrique Gonzalez Sastoque; Ghylver Alexander Hastamorir Gonzalez como requisito para optar al título de Ingeniero Aeronáutico.

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y su autor.

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizo sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto las obras es de exclusiva autoría y tiene la titularidad sobre si misma. PARÁGRAFO: en caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, el autor, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados , para todos los efectos la universidad actúa como tercero de buena fe. EL AUTOR, autoriza a la Institución Universitaria los Libertadores, para que los términos establecidos en la ley 23 de 1982, la Ley 44 de 1993, Decisión andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use la obra objeto de la presentación.

Nombres completos	Documento de identidad	Firma