

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO AERONÁUTICO.
2. **TÍTULO:** DISEÑO DE UNA CÁMARA PARA LA VISUALIZACIÓN DEL CHORRO DE COMBUSTIBLE.
3. **AUTORES:** David Rodríguez Gamboa y Andrés Felipe Sánchez Ávila.
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C.
5. **FECHA:** Abril de 2017.
6. **PALABRAS CLAVES:** Diseño Conceptual, Sistema Óptico-Adquisitivo de Imágenes, Recipiente a Presión, Diseño preliminar, Presión de Diseño, ANSYS Workbench, Accesos Ópticos.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El presente trabajo de grado contiene el diseño conceptual y preliminar de un recipiente presurizado con un sistema óptico-adquisitivo de imágenes que a través de accesos ópticos obtiene las imágenes del chorro de atomización de un inyector comercial funcionando en el interior. El trabajo contiene la teoría estructural y óptica que fundamenta los sistemas principales, el diseño conceptual de las funciones críticas que requiere la máquina para cumplir sus funciones, un diseño preliminar con el dimensionamiento y simulaciones de las condiciones de operación en ANSYS Workbench y por último una selección de componentes y accesorios del sistema óptico adquisitivo y del recipiente presurizado.
8. **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Línea de Investigación AEROTECH. Programa de Ingeniería Aeronáutica.
9. **METODOLOGÍA:** Carácter Empírico-Analítico, con diseño conceptual, preliminar y detallado con desarrollos futuros.
10. **CONCLUSIONES:** Se concluye que el diseño conceptual es el encargado de guiar las posteriores fases de diseño, por medio de un concepto global dominante al final de varios procesos de filtración de conceptos. El recipiente presurizado soporta las condiciones de operación con un factor de seguridad confiable según lo demuestran las simulaciones en ANSYS Workbench. El sistema óptico adquisitivo permite la aplicación de la técnica de visualización de Schlieren por medio de los accesos ópticos enfrentados y los componentes de los subsistemas de iluminación, óptico y de adquisición que permiten la obtención de imágenes de alta calidad.

DISEÑO DE UNA CÁMARA PARA LA VISUALIZACIÓN DEL CHORRO DE
COMBUSTIBLE

DAVID RODRÍGUEZ GAMBOA
ANDRÉS FELIPE SÁNCHEZ ÁVILA

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA,
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ D.C, 2017

DISEÑO DE UNA CÁMARA PARA LA VISUALIZACIÓN DEL CHORRO DE
COMBUSTIBLE

DAVID RODRÍGUEZ GAMBOA
ANDRÉS FELIPE SÁNCHEZ ÁVILA

Trabajo presentado como requisito parcial para optar por el título de profesional en Ingeniería
Aeronáutica

Asesor: Ingeniero Harold Julián Acosta León

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA,
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ D.C, 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en principio a Dios por la sabiduría que me da cada día, por la salud y por mostrarme el camino para estar más cerca de cumplir mis metas. A mis Padres por su amor incondicional, por el constante apoyo, por creer en mis capacidades y ayudarme a dar el primer gran paso en mi vida profesional. A Paulette, quien creyó en mí desde siempre, me brindó su cariño y me alienta a salir adelante. A mi familia le agradezco por las bendiciones y por la compañía durante todo este proceso.

A mi compañero de proyecto de grado, con el cual he podido construir una verdadera amistad, le agradezco por la dedicación y compromiso con el presente trabajo, por la compañía y por su responsabilidad digna de admiración.

A Termovalle y al taller de controladores de combustibles de la Base Aérea Justino Mariño Cuesto de Madrid, por permitirme conocer sus instalaciones y los inyectores con los que trabajan.

Agradezco la asesoría de los ingenieros del programa de Ingeniería Aeronáutica por su apoyo en la realización del proyecto y a la Comunidad Franciscana, a la cual he confiado mi educación desde el colegio, fundamentada en los valores y el amor de San Francisco por la naturaleza.

DAVID RODRÍGUEZ GAMBOA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de culminar uno de mis más grandes sueños, porque su fortaleza y sus bendiciones me permitieron estar en pie durante tanto tiempo sin importar las adversidades, él me ha permitido ser fuerte, estar siempre rodeado de amor y de personas que llenan mi vida de buenos momentos. Le doy gracias porque me ha permitido permanecer enfocado en mis propósitos.

Le dedico este proyecto a mi mamá, la única que con su esfuerzo ha permitido que yo llegue a ser el hombre que soy, sus valores me permitieron ser un hombre fuerte y enfocado en mis ideales y metas. Ella es la única persona que ha luchado por que yo sea un profesional y este mérito es de ella y para ella.

Agradezco a mi compañero de pregrado y de proyecto de grado, un gran amigo, junto a él, conseguimos el mérito de desarrollar un proyecto, que, a pesar de las dificultades, hasta el día de hoy logramos sacar adelante.

Agradezco al Ingeniero Harold Julián Acosta, por su acompañamiento en la culminación del proyecto.

“Amo aquellos que pueden sonreír con los problemas, que pueden tomar fuerzas de la angustia y crecer valientemente por la reflexión. Aquellos cuya consciencia apruebe su conducta, perseguirán sus principios hasta la muerte”. Leonardo da Vinci

ANDRÉS FELIPE SÁNCHEZÁVILA

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Descripción y Formulación del Problema.....	4
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos de Investigación.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.5. Alcances y Limitaciones del Proyecto	6
1.5.1. Alcances	6
1.5.2. Limitaciones.....	6
2. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL.....	8
2.1. Sistema Óptico-Adquisitivo Teórico para la adquisición de imágenes del chorro de atomización de inyección en un espacio presurizado.	8
2.2. Recipiente a presión.....	9
2.2.1. Tipos de Recipiente.....	9
2.2.2. Tipos de Tapas en recipientes a presión.	9
2.2.3. Soldadura en recipientes a Presión	12
2.2.4. Boquillas en Recipientes a Presión	12
2.2.5. Bridas para boquillas.....	13
2.2.6. Tipos de caras de Bridas.	14
2.2.7. Propiedades de los materiales en recipientes a presión.	14
2.2.8. Código A.S.M.E.....	15
2.3. Óptica.....	15
2.3.1. Óptica geométrica.	15

2.3.2.	Combinación de lentes	20
2.3.3.	Aperturas y profundidad de campo	20
2.3.4.	Sistemas de Iluminación	21
2.3.5.	Propagación de luz en medios heterogéneos	22
2.3.5.1.	Técnicas de visualización Shadowgraph y Schlieren	23
2.3.5.2.	Configuración de Schlieren por transmisión.....	25
2.3.5.3.	Filtrado	26
2.3.6.	Sistemas de Adquisición	27
3.	METODOLOGÍA.....	31
3.1.	Enfoque de investigación	31
3.1.1.	Técnicas de recolección de información.....	31
4.	Diseño de Ingeniería	31
4.1.	Diseño Conceptual	32
4.1.1.	Requerimientos del cliente.....	32
4.1.2.	Análisis funcional	33
4.1.3.	Generación de conceptos	37
4.1.4.	Juicios de fiabilidad	39
4.1.5.	Revisión de la tecnología requerida.....	43
4.1.6.	Combinación de conceptos	44
4.1.7.	Matriz Pasa – No Pasa	45
4.1.8.	Matriz de Decisión o Método Pugh	46
4.1.9.	Despliegue de las Funciones de Calidad - QFD	49
4.2.	Diseño Preliminar.	53
4.2.1.	Diseño Estructural del Recipiente a presión	55
4.2.1.1.	Calculo del recipiente por presión interna.	59

4.2.1.2.	Análisis de Esfuerzos y deformaciones.	67
4.2.1.3.	Diseño de los pernos	68
4.2.1.4.	Registros	70
4.3.	Diseño Detallado.....	73
4.3.1.	Diseño detallado del recipiente a presión	74
4.3.1.1.	Análisis de criterios de falla.....	74
4.3.1.2.	Modelamiento del recipiente en CATIA.....	75
4.3.1.3.	Análisis estructural en ANSYS Workbench.....	79
4.3.1.4.	Manufactura del recipiente a presión.....	86
4.3.2.	Diseño detallado del Sistema Óptico-Adquisitivo.....	87
4.3.2.1.	Subsistema de Iluminación	88
4.3.2.1.1.	Selección de componentes del Subsistema de Iluminación.....	88
4.3.2.2.	Accesos ópticos.....	90
4.3.2.3.	Subsistema Óptico	90
4.3.2.4.	Selección de Componentes del Subsistema Óptico	91
4.3.2.5.	Selección de componentes del Subsistema de Adquisición.....	93
4.3.2.6.	Accesorios.....	94
4.3.3.	Selección de sensores.....	95
4.3.4.	Consideraciones para el diseño del sistema neumático asociado al recipiente presurizado.	95
5.	DESARROLLOS FUTUROS.....	97
6.	CONCLUSIONES	99
7.	BIBLIOGRAFÍA	101
9.	GLOSARIO	104
10.	ANEXOS	108

Tabla de Figuras

Figura 1. Cámara presurizada para test en inyectores Diésel de la Universidad de Eindhoven	2
Figura 3. Maqueta del recipiente para pruebas de inyectores multichorro	3
Figura 4. Ejemplo de la captación de la imagen en las pruebas de inyectores multichorro	4
Figura 5. Sistema Óptico-Adquisitivo Teórico para la adquisición de imágenes del chorro de atomización de inyección en un espacio presurizado	8
Figura 6. Vista lateral de la tapa plana.	9
Figura 7. Vista lateral de la tapa plana con ceja.	10
Figura 8. Vista lateral de la toriesférica.	10
Figura 9. Vista lateral de la tapa semielípticas.	11
Figura 10. Vista lateral de la tapa semiesférica.	11
Figura 11. Vista lateral de la tapa 80:10.	11
Figura 12. Vista lateral de la tapa c.....	12
Figura 13. Principio del mínimo tiempo de Fermat para reflexión y refracción de la luz.....	16
Figura 14. Formación de la imagen a través de una lente biconvexa explicada a través de tres rayos de luz que parten del objeto convergen en la imagen.	17
Figura 15. Interface esférica entre dos medios, cuyo radio determina las distancias de formación de imagen.....	18
Figura 16. Lente delgada construida a partir de dos superficies esféricas, los radios y el índice de refracción determinan las distancias de focalización.	19
Figura 17. Cálculo de una imagen mediante trazado de tres rayos a través de una lente delgada simétrica convergente.	19
Figura 18. Imagen del chorro de aire comprimido obtenidas con la técnica de Schlieren doble paso con espejo convencional.....	21
Figura 19. Desviación de los frentes de onda en un experimento sencillo de Shadowgraph.	23
Figura 20. Experimento de Shadowgraph con lente colimadora.	24
Figura 21. Configuración de Schlieren por transmisión, con fuente finita y filtrado espacial en el plano de Fourier.	25
Figura 22. Imágenes de chorro de aire comprimido utilizando diferentes configuraciones de corte por filtrado espacial.....	27

Figura 23. Representación de una cámara oscura simulada a partir de un agujero.	28
Figura 24. Diagrama Caja Negra mostrando las entradas de energía y materia, y la salida de información y materia de desecho.	34
Figura 25. Diagrama de caja transparente.....	35
Figura 26. Diagrama funcional.	36
Figura 27. Inyector de un motor Garrett TPE 310. Contiene entrada de combustible y entrada de aire a presión.....	56
Figura 28. Inyector de un motor Honeywell T53 – L703.....	56
Figura 29. Inyector de inicio de ignición de un motor Honeywell T53 – L703	57
Figura 30. Inyector de motores Pratt & Whitney PT6.....	57
Figura 31. Esquema de apertura del chorro de combustible. Se utiliza como referencia de los datos presentados por la Tabla 10.....	58
Figura 32. Presión Vs Temperatura del aire.	59
Figura 33. Detalle de unión para tapas planas.	62
Figura 34. Tipo de cara para el asentamiento del empaque.....	63
Figura 35. Localización de la carga de reacción del empaque.	64
Figura 36. Esquema de la configuración de una tapa toriesférica.	66
Figura 37. Deformación Unitaria del cilindro Vs Presión interna del recipiente a presión.....	67
Figura 38. Relación geométrica de la longitud del sujetador.	68
Figura 39. Saliente usando brida slip-on.....	71
Figura 40. Esquema de las características geométricas de la conexión de la boquilla y el recipiente.....	72
Figura 41. Diseño en CATIA del cilindro del recipiente.....	75
Figura 42. Modelamiento en CATIA de la brida.....	75
Figura 43. Diseño en CATIA de la tapa plana.....	76
Figura 44. Diseño en CATIA de la tapa cónica.....	76
Figura 45. Diseño en CATIA del acceso óptico.....	77
Figura 46. Dimensiones de la cabeza hexagonal de un perno.	77
Figura 47. Diseño en CATIA del cilindro del perno.	78
Figura 48. Diseño en CATIA de la tuerca.	78
Figura 49. Diseño en CATIA de la arandela.....	78

Figura 50. Ensamble en CATIA del recipiente.....	79
Figura 51. Primer refinamiento de malla.	80
Figura 52. Soporte fijo y presión interna en el conjunto del recipiente.	80
Figura 53. a) Máximo esfuerzo cortante y b) Deformación total del recipiente.	80
Figura 54. a) Factor de seguridad por Tresca y b) Von Mises.....	81
Figura 55. Sección del Path.	82
Figura 56. Mesh independency study. Path.	82
Figura 57. Refinamiento de Malla con espesor corregido.	83
Figura 58. a) Máximo esfuerzo cortante y b) Deformación total del recipiente con espesor corregido.	84
Figura 59. Factor de seguridad por a) Tresca y b) Von Mises, con espesor corregido.....	85
Figura 60. Enmallado del ensamble de un acceso óptico.	85
Figura 61. Deformación total a) y máximo esfuerzo equivalente b) del ensamble del acceso óptico.....	86
Figura 62. Factores de seguridad por a) Tresca y b) Von Misses del ensamble del acceso óptico.	86
Figura 63. Subsistema de iluminación del chorro de combustible/nafta.	90
Figura 64. Subsistema óptico: Consiste en el Acceso Óptico 2, la lente decolimadora que conforma la imagen en el plano de Fourier, y el filtrado espacial.....	92
Figura 65. Posición de la lente (m) Vs Ubicación, Altura y magnificación de la imagen.....	92
Figura 66. Configuración general del Sistema Óptico-Adquisitivo de imágenes.....	94
Figura 67. Configuración General del Sistema de Visualización de chorro de atomización de un inyector	95

Tabla de Ecuaciones

Ecuación (1).....	16
Ecuación (2).....	17
Ecuación (3).....	18
Ecuación (4).....	18
Ecuación (5).....	19
Ecuación (6).....	19
Ecuación (7).....	19
Ecuación (8).....	20
Ecuación (9).....	57
Ecuación (10).....	60
Ecuación (11).....	60
Ecuación (12).....	60
Ecuación (13).....	60
Ecuación (14).....	60
Ecuación (15).....	61
Ecuación (16).....	62
Ecuación (17).....	62
Ecuación (18).....	62
Ecuación (19).....	63
Ecuación (20).....	63
Ecuación (21).....	63
Ecuación (22).....	63
Ecuación (23).....	63
Ecuación (24).....	64
Ecuación (25).....	64
Ecuación (26).....	64
Ecuación (27).....	65
Ecuación (28).....	65
Ecuación (29).....	66
Ecuación (30).....	67

Ecuación (31).....	67
Ecuación (32).....	67
Ecuación (33).....	69
Ecuación (34).....	69
Ecuación (35).....	69
Ecuación (36).....	70
Ecuación (37).....	70
Ecuación (38).....	70
Ecuación (39).....	70
Ecuación (40).....	72
Ecuación (41).....	72
Ecuación (42).....	72
Ecuación (43).....	73
Ecuación (44).....	73
Ecuación (45).....	73
Ecuación (46).....	73
Ecuación (47).....	73
Ecuación (48).....	74
Ecuación (49).....	74
Ecuación (50).....	23
Ecuación (51).....	23
Ecuación (52).....	26
Ecuación (53).....	26

Contenido de Tablas

Tabla 1. Generación de conceptos específicos por cada función.....	38
Tabla 2. Conceptos restantes del filtro “Juicios de fiabilidad”	42
Tabla 3. Conceptos específicos restantes después del filtro "Revisión de la tecnología requerida"	43
Tabla 4. Combinación de conceptos.	44
Tabla 5. Generación de la matriz Pasa – No pasa.....	46
Tabla 6. “Peso” del requerimiento "Matriz de decisión"	47
Tabla 7. Conceptos globales para el desarrollo de la casa de la calidad.....	48
Tabla 8. Importancia relativa.	50
Tabla 9. Concepto global dominante.	52
Tabla 10. Longitud del chorro para $\alpha=19,5^\circ$ y $\alpha=50^\circ$	58

LISTA DE SIMBOLOS

- A_b : Área transversal neta de los tornillos en pulgadas cuadradas (mm^2).
- A_d : Área del perno sin rosca.
- A_m : Área transversal requerida de los tornillos calculada entre el resultado mayor de A_{m_1} y A_{m_2} en pulgadas cuadradas (mm^2).
- A_{m_1} , A_{m_2} : Área transversal neta requerida de los tornillos en condición de operación.
- $AO1$: Acceso óptico de entrada de luz.
- $AO2$: Acceso óptico de salida de luz.
- A_{tr} : Área con rosca del perno.
- b : Ancho efectivo de contacto del empaque.
- b_o : Ancho básico del empaque.
- c : Constante de rigidez.
- C : Contraste
- C' : Constante adimensional en función de la forma de unión entre la tapa y el cilindro.
- d : Diámetro medio.
- d_l : Distancia entre las lentes.
- d_p : Distancia del sujetador
- D : Diámetro de la lente.
- D_i : Diámetro interno del recipiente.
- E : Eficiencia de soldadura.
- f : Distancia del punto focal de la lente.
- F : Punto focal de la lente.
- F_i : Precarga del perno.
- G : Diámetro donde se localiza la reacción del empaque en pulgadas (mm).
- H : Altura de cálculo para P_H .
- hg : Brazo de palanca, distancia radial de la línea de centros de barrenos a la línea de reacción del empaque, en pulgadas (mm).
- I : Intensidad lumínica de la imagen.
- K_b : Rigidez del perno.
- K_m : Relación resorte.

- l : Agarre del sujetador.
- L : Distancia del medio heterogéneo que atraviesa el haz de luz.
- L_S : Longitud del sujetador.
- L_T : Longitud roscada.
- m : Relación t_r/t_s adimensional.
- n : Índice de refracción.
- n_o : Gradiente del índice de refracción del medio heterogéneo.
- n_1 : Índice de refracción del aire.
- n_2 : Índice de refracción del vidrio.
- n_w : Factor de seguridad de la soldadura.
- N : Rosca por pulgada.
- N_p : Número de pernos.
- M : Magnificación.
- p : Paso
- P : Presión de diseño (psi).
- P_o : Presión atmosférica estándar.
- P_H : Presión hidrostática.
- R : Diámetro de entrada de luz del diafragma.
- R_i : Radio interno del recipiente.
- r : Radio de la superficie esférica.
- S : Esfuerzo máximo permisible del material de la tapa a tensión t a la temperatura de diseño, en libra por pulgada cuadrada (KPa).
- S_1 : Esfuerzo circunferencial, tangencial o “*hoop stress*”.
- S_2 : Esfuerzo longitudinal o axial.
- S_3 : Esfuerzo radial.
- S_a : Esfuerzo máximo permisible del material de los tornillos a temperatura ambiente, en libra por pulgada cuadrada (MPa).
- S_b : Esfuerzo máximo permisible del material de los tornillos a temperatura de diseño, en libra por pulgada cuadrada (MPa).
- S_T : Esfuerzo total asumido en la garganta de la soldadura.
- t : Espesor mínimo requerido en la tapa, sin considerar corrosión, en pulgadas (mm).

t_r : Espesor requerido en el cuerpo.

t_s : Espesor real del cuerpo.

T : Temperatura.

W : Carga total de los tornillos, en libras (N).

x : Distancia del objeto al punto focal F .

x' : Distancia del punto focal F' , a la imagen.

x_o : Distancia entre el objeto y la lente.

x_i : Distancia entre la lente y la imagen.

y : Carga máxima permisible en el empaque o en la superficie de sello (psi).

Símbolos Griegos

Δa : Medida vertical de la desviación de la luz proyectada sobre una pantalla.

α_c : Ángulo respecto a la línea central del ángulo de apertura del chorro.

θ_1 : Ángulo de incidencia de la luz.

θ_2 : Ángulo de reflexión/refracción de la luz.

θ_c : Ángulo de apertura del chorro

ε : Ángulo de difracción.

$\varepsilon_{\#}$: Deformación unitaria en los ejesprincipales.

ν : Coeficiente de Poisson.

' : Imagen de un objeto o un punto después de la lente.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la Industria Aeroespacial, existen métodos de investigación, evaluación y experimentación aplicados a los procesos de inyección y combustión. Por esta razón, la Universidad de San Buenaventura, con el objetivo de incursionar en el estudio de los fenómenos de inyección, requiere del diseño de una máquina capaz de captar imágenes de los chorros de atomización provenientes de inyectores comerciales. Los inyectores serán operados dentro de un espacio presurizado, esto con la finalidad de estudiar la atomización del combustible a volumen constante.

El diseño se plantea para seguir una metodología de trabajo que logre partir de los requerimientos del cliente, desplegando un análisis de las funciones que permitirán cumplir con el propósito del producto, en este caso la cámara presurizada. El recipiente debe permitir adaptar diferentes inyectores de motores a reacción; en la aviación nacional es común ver aeronaves que operan con motores Garriett TPE 310, Honeywell T53 – L703, Pratt & Whitney PT6-3/3B/3BE/3BF/3BG, PT6 T-3D/3DE/3DF, PT6 A-68C, por esta razón el diseño parte de las condiciones de operación de los inyectores de las casas de motores mencionados.

Un dimensionamiento estructural del recipiente a presión permite realizar el análisis para el acoplamiento de un sistema óptico adquisitivo de imágenes. El sistema permite analizar por medio de la filtración de imágenes las partículas de la mezcla de combustible en la atomización, el flujo de la mezcla en la boquilla del combustible, la profundidad del chorro y el ángulo de apertura. Este tipo de análisis permitirá estudiar el comportamiento de los fluidos durante el proceso de atomización.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

En la actualidad el uso de recipientes a presión en la industria tiene una gran variedad de aplicaciones que abarca desde el diseño para contenido de productos líquidos, gaseosos, sólidos, entre otros, hasta diseño de recipientes para usos especiales y procesos industriales. Sin embargo, la aplicación de estos dispositivos en el campo de inyección de combustibles es limitada. En el ámbito internacional, se han desarrollado dispositivos para la integración de inyectores en espacios presurizados, esto con el objetivo de captar imágenes de los procesos de inyección de combustible en estado inerte y durante la combustión.

En el paper “Design and operation of a high pressure, high temperature cell for HD diésel spray diagnostics: guidelines and results” (Baert, 2009) de la Universidad Técnica Eindhoven, Países Bajos, presenta los diagnósticos ópticos realizados para la captación de imágenes en HD por medio de un sistema de captación de imágenes en alta definición, esto con el fin de evaluar por medio de un recipiente de ensayo el estudio del flujo de spray de un inyector a volumen constante durante un periodo de tiempo. El grupo de investigación de motores de esta Universidad, desarrolla pruebas de pre-combustión encaminadas a simular las condiciones de operación presentes durante el proceso de inyección, específicamente aquellas donde se puede evidenciar el comportamiento del flujo en la atomización de inyectores Diésel. En la *Figura 1* se muestra el recipiente presurizado utilizado para el desarrollo de las pruebas de penetración del chorro de combustible por medio del análisis de la punta del chorro inyectado, visualización de la tobera de inyección, variación de la densidad del chorro y la captación de imágenes.

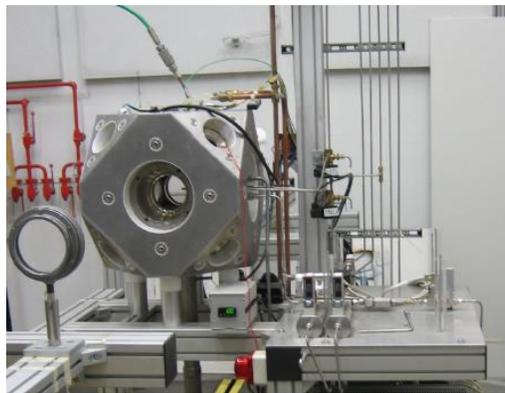


Figura 1. Cámara presurizada para test en inyectores Diésel de la Universidad de Eindhoven, utilizado en la investigación de procesos de inyección bajo un espacio presurizado. (Baert, 2009).

La tesis de doctorado “Caracterización de los Procesos de Inyección-Combustión Diésel Mediante Visualización y Procesado de Imágenes” (Zapata, 2010) de la Universidad Politécnica de Valencia, España, realiza caracterizaciones del chorro de combustible por medio de la obtención de imágenes y seguido de un procesamiento. Este proceso lo desarrolla mediante un recipiente que trabaja con nitrógeno inyectado, el cual es acoplado a un sistema óptico que recopila las imágenes del proceso de atomización de múltiples chorros. La captación de imágenes se desarrolla a través accesos ópticos debidamente iluminados y con acoplamiento de cámaras al interior del recipiente.

El artículo “Caracterización del chorro de combustible de inyección directa en un motor de dos tiempos para ciclomotor mediante tomografía láser” (García, 2000), expone la forma como el autor realiza la toma de imágenes del chorro por medio de instrumentos tomográficos láser, para la posterior caracterización.

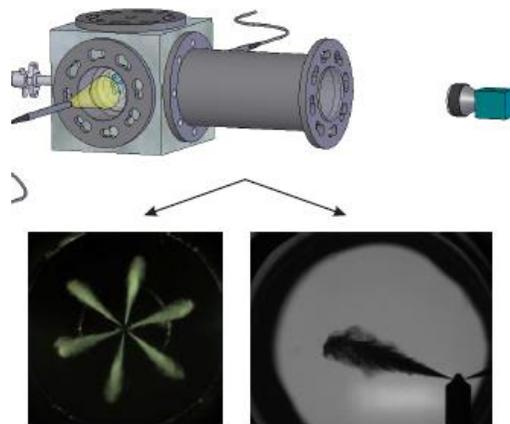


Figura 2. Maqueta del recipiente para pruebas de inyectores multichorro, contiene 3 accesos ópticos para lograr las tomas laterales y frontales (Zapata, 2010).

Los autores del artículo “The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles” (Payri, 2003) realizan caracterizaciones de chorros de combustible diésel de dos tipos de inyectores, esto mediante el uso de cámaras digitales de alta definición, con lo que se logra observar el efecto que tiene la cavitación del fluido al variar la presión. Las configuraciones de la cámara y la fuente de luz, así como la posiciones en las que se adaptan, sirven de base teórica para el proyecto.

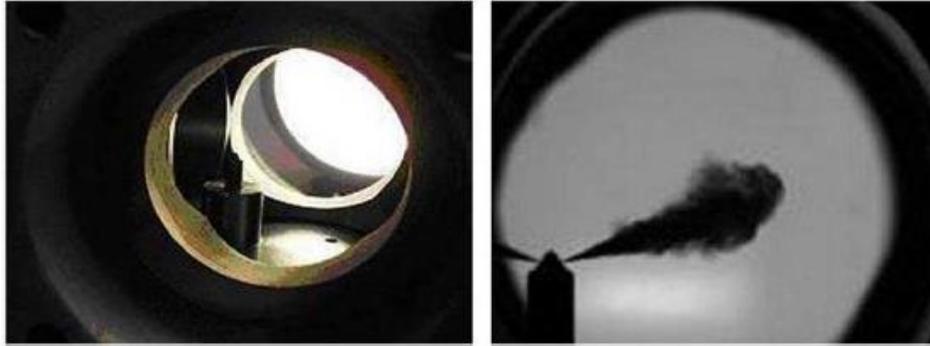


Figura 3. Ejemplo de la captación de la imagen en las pruebas de inyectores multichorro, contiene 2 accesos ópticos para lograr las tomas laterales (Payri, 2003).

El artículo “Comparison Study of Laboratory and Production Spray Guns in Film Coating: Effect of Pattern Air and Nozzle Diameter” (Müller, 2006), estudia la relación entre la presión de aire y el cambio del patrón de atomización de una boquilla de pistola pulverizadora, esto con base al diámetro. Se estudian también las características de pulverización, la densidad, el tamaño y velocidad de las gotas del combustible pulverizado. El estudio concluye con un modelo nuevo en donde se reduce tamaño de la gota de combustible un aumento en el patrón de aire que produce una reducción en la densidad de la pulverización.

1.2. Descripción y Formulación del Problema

Durante el proceso de combustión en motores a combustión interna, la atomización del chorro de los inyectores es de gran relevancia durante la detonación de la mezcla. La geometría del inyector, la presión, la mezcla con el oxidante, la penetración de chorro, su ángulo de apertura, junto al tamaño de gota generada y el tipo de chispa, son las principales variables que determinan el rendimiento que se puede obtener del motor durante la combustión.

Debido a que la mayoría de estos parámetros pueden ser estudiados en condiciones inertes, se plantea inicialmente el diseño de una máquina que permita la integración de inyectores en un espacio presurizado, simulando las condiciones de presión en cámaras de combustión.

La obtención de imágenes del proceso de inyección es uno de los requerimientos de la máquina y requiere del diseño de un sistema de iluminación y captación adaptado a un par de accesos ópticos al interior del recipiente a presión. Es necesario realizar una adecuada selección de los dispositivos para emplear diferentes técnicas de visualización de fenómenos en ambientes heterogéneos, de la propagación y filtración de la luz, además de un estudio de los dispositivos de captación de imagen.

Con base a lo expuesto anteriormente, se plantea la siguiente pregunta problema:

¿Cuáles son los criterios de diseño necesarios para determinar los procesos, componentes y subcomponentes que permitan el desarrollo teórico de una máquina capaz de captar imágenes del proceso de inyección en un recipiente presurizado a través de accesos ópticos?

1.3. Justificación

El interés por el comportamiento del chorro de combustible proveniente del proceso de atomización por los inyectores ha incentivado el estudio y la comprensión del comportamiento del fluido a través de diagnósticos ópticos. Por medio del estudio en detalle de filtraciones de imágenes, se obtiene un análisis a nivel macroscópico de la pulverización de la mezcla a la salida de la boquilla del inyector, la profundidad del chorro y el ángulo de apertura.

A través del diseño de un recipiente con la capacidad de adaptación de inyectores comerciales de aviación, se plantea el desarrollo de una cámara presurizada que permita realizar pruebas a diferentes presiones de procesos de inyección a volumen constante. Garantizando las condiciones de estanqueidad para evitar la afectación del chorro atomizado. El sistema óptico logra la captación de imágenes en alta definición, logrando así, profundizar en el análisis de la mezcla del chorro atomizado de combustible en una condición no reactiva.

1.4. Objetivos de Investigación

1.4.1. Objetivo General

Diseñar una cámara presurizada, con accesos ópticos que permita visualizar y adquirir la imagen de un chorro de combustible proveniente de un proceso de inyección.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar una cámara presurizada y hermética con accesos ópticos que permitan el acoplamiento de un sistema óptico-adquisitivo de imágenes, con el propósito de captar el chorro de combustible atomizado para un conjunto de inyectores.
- Diseñar los componentes estructurales del recipiente, uniones y accesorios que permitan la correcta ubicación de la cámara presurizada, así como del acoplamiento del sistema óptico-adquisitivo de imágenes.
- Seleccionar la configuración y los componentes necesarios para el ensamble de un sistema Óptico-Adquisitivo de imágenes

1.5. Alcances y Limitaciones del Proyecto

1.5.1. Alcances

- En el desarrollo del proyecto de pregrado se realizará un diseño conceptual, preliminar y detallado que permita definir los componentes y accesorios que conformarán el diseño de la cámara presurizada y el sistema óptico adquisitivo.
- El dimensionamiento para el diseño del recipiente a presión se realizara con base a los inyectores de los motores Garriett TPE 310, Honeywell T53 – L703, Pratt & Whitney PT6-3/3B/3BE/3BF/3BG, PT6 T-3D/3DE/3DF, PT6 A-68C.
- Durante el diseño preliminar y detallado sólo se tendrán en cuenta los componentes que integran la cámara presurizada y el conjunto del sistema óptico adquisitivo.
- Se representará adecuadamente por medio de planos de ingeniería los componentes que integran la cámara presurizada.
- Se realizará un análisis de criterios de falla a partir de los módulos de esfuerzos cortantes, deformación total y análisis del factor de seguridad para los componentes estructurales que conforman la cámara presurizada, por medio de un análisis de elementos finitos en el Software Ansys Workbench
- Se seleccionarán los sensores de temperatura y presión para la adquisición de datos de las condiciones internas del recipiente a presión.
- La cámara debe ser diseñada para soportar las condiciones de operación a diferentes presiones.
- Se seleccionará un sistema óptico de lentes, una cámara de adquisición de imágenes de alta definición, una fuente de luz y los componentes necesarios para la conformación de un sistema óptico-adquisitivo.

1.5.2. Limitaciones.

- Durante el diseño preliminar de la cámara presurizada no se tendrán en cuenta procesos de combustión, la operación de la maquina se limitará para la operación de los inyectores para condiciones inertes.
- El proyecto se limitará al diseño de los componentes principales que conforman el conjunto de la cámara presurizada, no se tendrá en cuenta el diseño de los componentes para la inyección de combustible, el sistema de alimentación y los inyectores que se pretendan utilizar.
- Durante el proceso de diseño preliminar y detallado no se tendrá en cuenta el diseño para el ajuste que permita adaptar el conjunto de inyectores y los sistemas de alimentación propios de

los motores Garriett TPE 310, Honeywell T53 – L703, Pratt & Whitney PT6-3/3B/3BE/3BF/3BG, PT6 T-3D/3DE/3DF, PT6 A-68C, a la cámara presurizada.

- No se realizará la selección o diseño del sistema de evacuación y separación de los productos derivados de la mezcla generada durante el proceso de inyección.
- No se realizará el estudio de la caracterización del chorro de combustible ni su comportamiento dentro del recipiente.
- Durante el proyecto no se desarrollará ningún prototipo.
- No se contempla la interconexión de alimentación de potencia eléctrica de los sensores de presión y temperatura, del sistema de iluminación, del sistema adquisitivo de imágenes y de los demás componentes que requieran alimentación eléctrica.

2. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

Con el fin de contextualizar al lector se presenta a continuación la teoría que expone los temas tratados, el funcionamiento de los dispositivos y su importancia dentro de un sistema general que tiene el objetivo de captar la imagen del chorro de atomización de un inyector dentro de un espacio presurizado, con el objetivo de que, en conjunto con el glosario, se logre contextualizar al lector.

2.1. Sistema Óptico-Adquisitivo Teórico para la adquisición de imágenes del chorro de atomización de inyección en un espacio presurizado.

Los diseños internos de los motores a combustión, debido a la transmisión de calor, vibración, funcionamiento y espacio limitado y ocupado por los accesorios, no permiten observar la inyección del combustible dentro de las cámaras de combustión. Es por eso que algunos centros de investigación utilizan métodos de simulación de las condiciones internas de dichos motores, con el objetivo de observar y caracterizar los chorros de atomización por medio de sus características geométricas principales (Longitud de penetración, ángulo de apertura, tamaño de gota) las cuales tienen efecto directo sobre la eficiencia de combustión del motor. Una de las principales estrategias de visualización y captación de los fenómenos de la inyección, consiste en adaptar un sistema óptico al recipiente donde se simulan las condiciones internas de las cámaras de combustión y se realiza la inyección. Este sistema debe contener subsistemas de iluminación, de obtención de imágenes y de adquisición y visualización de ellas como se observa en la *Figura 4*.

El subsistema de iluminación es el encargado de iluminar el chorro de atomización u objeto de estudio, puede contener dispositivos de refinamiento y preparación de la luz para lograr a cabalidad con su objetivo. El subsistema de adquisición es quien se encarga de obtener, filtrar y captar la imagen para que, a través de cualquier dispositivo de visualización (monitor o pantalla), se pueda transmitir la información de la imagen del chorro de inyección (un sector de este u otro lugar de interés preestablecido según sea requerido) para ser estudiada y caracterizada por el usuario del sistema.

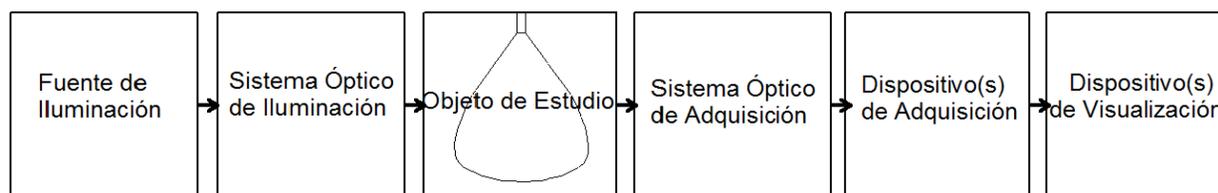


Figura 4. Sistema Óptico-Adquisitivo Teórico para la adquisición de imágenes del chorro de atomización de inyección en un espacio presurizado

A continuación, se presentan las secciones de recipientes a presión, por medio de los cuales se simulan las condiciones internas de los motores a reacción, y la sección del sistema óptico donde se entra en profundidad acerca de la teoría de los dispositivos e instrumentos requeridos.

2.2. Recipiente a presión.

2.2.1. Tipos de Recipiente.

Existen diferentes tipos de recipientes a presión, estos se pueden clasificar por su uso o por su forma:

- Recipientes por su uso: son aquellos recipientes a presión usados comúnmente para almacenamiento y procesos relacionados, dentro de un sistema hidráulico o neumático. Entre estos recipientes a presión se encuentran: torres de destilación, torres fraccionadoras, tanques de almacenamiento de fluidos a presión, entre otras.
- Recipientes por su forma: estos recipientes se clasifican por la geometría de diseño, pueden ser esféricos o cilíndricos. Los recipientes cilíndricos se clasifican en verticales u horizontales; mientras que los recipientes esféricos son comúnmente usados para almacenamiento de grandes volúmenes a grades presiones.

2.2.2. Tipos de Tapas en recipientes a presión.

Existen varios tipos de tapas, con las que se busca los recipientes cilíndricos, entre los cuales se encuentra las siguientes tapas:

- Tapas planas: generalmente son las más usadas para sellar recipientes sujetos a presión atmosférica; sin embargo, también son empleados en recipientes sujetos a diferentes presiones y contenidos. La diversidad de tapas permite implementarse en recipientes de grandes dimensiones y por la simplicidad de la geometría requiere menos maquinado para su fabricación y economía.

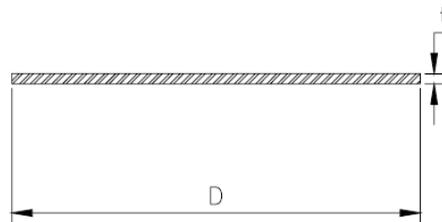


Figura 5. Vista lateral de la tapa plana. (León, 2001)

- Tapas planas con ceja: al igual que las tapas planas, las tapas con ceja se encuentran entre las más económicas, sin embargo, son usada para almacenar presiones atmosféricas y su

modo de sujeción al cilindro mediante la soldadura. Estas tapas tienen un límite dimensional de 6 metros de diámetro.

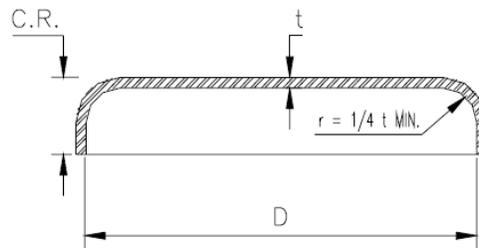


Figura 6. Vista lateral de la tapa plana con ceja. (León, 2001)

- Tapas únicamente abombadas: son tapas que soportan presiones manométricas relativamente bajas, sin embargo, se pueden diseñar para soportar presiones altas con las debidas consideraciones de concentración de esfuerzos.
- Tapas abombadas con ceja invertida: el uso es limitado y se debe a la difícil fabricación, por este motivo su manufactura es bastante costosa.
- Tapas toriesféricas: son las más usadas en la industria debido a que soportan altas presiones manométricas y son de muy bajo costo. Como característica principal presenta el radio de abombado (redondeo) con una aproximación muy cercana al diámetro del recipiente.

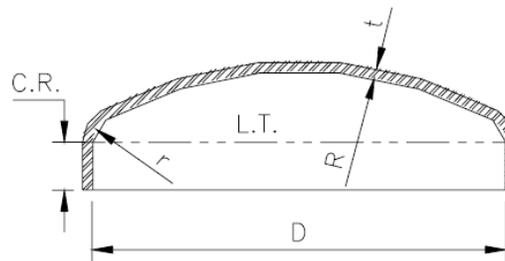


Figura 7. Vista lateral de la toriesférica. (León, 2001)

- Tapas semielípticas: son comúnmente empleadas cuando el cálculo de la presión es demasiado alto para una tapa toriesféricas. Por medio del troquelado se fabrican estas tapas y se caracteriza por tener una elipse con relación 2:1, se fabrican hasta un diámetro de 3 metros y su costo es elevado.

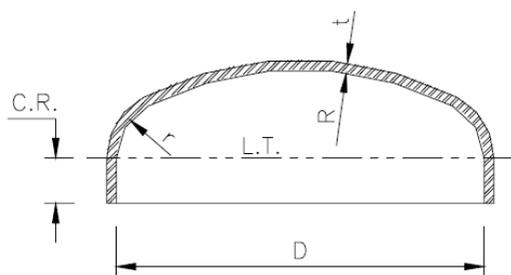


Figura 8. Vista lateral de la tapa semielíptica. (León, 2001)

- Tapas semiesféricas: son usadas para soportar presiones críticas y su silueta describe una media circunferencia. Esta es una tapa que no tiene límite dimensional.

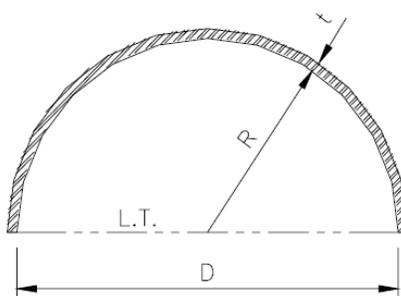


Figura 9. Vista lateral de la tapa semiesférica. (León, 2001)

- Tapas 80:10: estas tapas son de fabricación especial, debido a la dificultad de troquelar tapas semielípticas 2:1 en dimensiones grandes, las tapas 80:10 presenta una característica en donde el radio de abombado es el 80% del diámetro y el radio de esquina es del 10% del diámetro del recipiente.

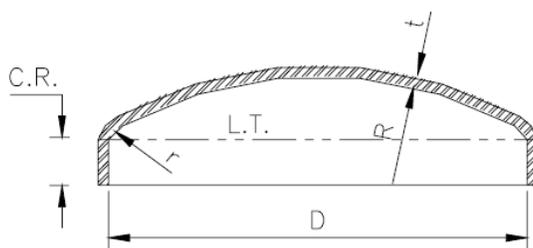


Figura 10. Vista lateral de la tapa 80:10. (León, 2001)

- Tapas cónicas: son recomendadas para la implementación en recipientes en donde se generan acumulación de sólidos, de igual manera son fundamentales donde hay variación en el diámetro de recipientes cilíndricos. Es comúnmente visto en recipientes fraccionados o de recipientes empleados en la destilación y no existe límite en las dimensiones de fabricación.

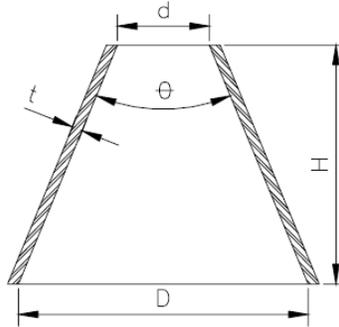


Figura 11. Vista lateral de la tapa c. (León, 2001)

2.2.3. Soldadura en recipientes a Presión

El desarrollo de recipientes a presión ha permitido emplear el uso de la soldadura para remplazar la unión de recipientes por medio de remachado. De acuerdo a la referencia literaria, todas las soldaduras serán aplicadas mediante el proceso de arco eléctrico sumergido, el cual puede ser manual o automático. En cualquiera de los dos casos, se deberá tener penetración completa y eliminar la escoria dejada por un cordón de soldadura (León, 2001). También se recomienda usar el método de pruebas no destructivas (NDT), como inspección visual, tintas penetrantes y radiografía, para el estudio y evaluación del buen estado de la soldadura, de esta manera se puede verificar si una soldadura ha sido bien aplicada por medio de métodos como el radiografiado, tintas penetrantes y el ultrasonido.

Antes de realizar el proceso de soldadura, en recipientes a presión, es necesario preparar un procedimiento de soldadura, en él se indica la preparación y diámetro del electrodo, para cada tipo y espesor de material. Estas pruebas y procedimientos deberán apearse estrictamente a las recomendaciones hechas por el Código A.S.M.E., Sección IX "Welding and Brazing Qualifications". También es necesario tener en cuenta el material el cual va a ser la base a soldar y este debe ser compatible con los electrodos a usar. Para aceros al carbón se recomienda usar electrodos 6010 y 7018. Para recipientes realizados en aceros inoxidable es necesario utilizar gas inerte y se recomienda cubrir con una solución de ácido nítrico y ácido clorhídrico.

2.2.4. Boquillas en Recipientes a Presión

Los recipientes sometidos a presión deben estar equipados de una o varias boquillas o accesos, para los cuales ha de existir una lista a partir de un diagrama de tubería e instrumentación que indique la cantidad, dimensiones y el servicio que prestará cada una al ser instalado en el recipiente. La variedad de boquillas o accesos que se presentan en los recipientes a presión son los siguientes:

- Entrada(s) del producto, salida del producto, drenaje, venteo, entrada(s) de hombre, conexión para válvulas de seguridad, conexión para manómetro, conexión para termómetro y conexión para indicadores de nivel.

De esta manera, los cálculos en referencia a los cuellos de boquilla deben ser determinados en función de la presión interna del recipiente, las fuerzas y los momentos a dilatación causados por el propio material.

2.2.5. **Bridas para boquillas.**

Existen varias formas de unir a los cuellos de las boquillas una brida, esto dependiendo del tipo de brida, ya sea:

- Brida de cuello soldable (Welding Neck): se distinguen de las demás por su cono largo y por su cambio gradual de espesor en la región de la soldadura que las une al tubo. Este tipo de brida se prefiere para todas las condiciones severas de trabajo, ya sea a presiones o temperaturas altas o menores de cero. Ya sea también para condiciones de carga que sean constantes o que fluctúen entre límites amplios. Las bridas de cuello soldable se recomiendan para el manejo de fluidos volátiles, inflamables o costosos, donde una falla puede ser acompañada de desastrosas consecuencias.
- Brida deslizable (Slip-on): a diferencia de las bridas de cuello soldable, están son más preferidas en el mercado por su bajo costo, de igual manera es versátil al momento de cortar los tubos a la medida y por su facilidad al momento de instalación.
- Brida de traslape (Lap-joint): generalmente se encuentran en tuberías de acero inoxidable y son comunes cuando las tuberías no son paralelas a los ejes del recipiente.
- Bridas roscadas (Threaded): son conocidas por su implementación en tuberías que son difícil de soldar, ya sea por las condiciones del recipiente, cómo el material o la geometría, por ello son las menos empleadas al momento de someterlas a condiciones de presiones altas o condiciones extremas, ya que su uso se encuentra enfocado a condiciones cíclicas en las cuales puede haber fugas y bajas temperaturas.
- Bridas de unión soldable (Socket welding): se implementan en recipientes cuyo contenido es tóxico, altamente explosivo, muy corrosivo o que al momento de una fuga involucran un gran riesgo. También se recomienda en tuberías que trabajan a altas presiones.
- Bridas ciegas (blind): se usan para cerrar los extremos de las boquillas, tuberías y válvulas, estas bridas están sujetas a esfuerzos mayores y se encuentran en presentaciones grandes.

- Bridas especiales: son bridas que son implementadas en trabajo especiales cómo en recipientes o tuberías con intercambiador de calor y sus dimensiones no corresponden a los estandarizados.

2.2.6. Tipos de caras de Bridas.

En función del tipo de fluido y presión que se maneja se debe seleccionar el tipo de cara que tendrá la brida en el recipiente a presión, estas caras corresponden a las siguientes categorías:

- a). Bridas Cara plana (Flat Face), b). Bridas de cara realzada (Raised Face), c). Cara Macho y hembra, d). Cara de ranura y lengüeta (Tongue and Groove), e). Cara de junta de anillo (Raing joint).

2.2.7. Propiedades de los materiales en recipientes a presión.

En el diseño de recipientes a presión, la selección del material es de gran importancia debido a que los componentes estarán sujetos a las condiciones de operación. Por ello, los materiales deben tener y cumplir los siguientes requisitos de acuerdo a diferentes propiedades:

- Propiedades mecánicas: cuando se consideran las propiedades mecánicas es necesario tener en cuenta la resistencia a la tensión, alto punto de cadencia, porcentaje de elasticidad alto y que sea un material con la mínima reducción de área, estas propiedades permitirán establecer los esfuerzos de diseño.
- Propiedades térmicas: en esta propiedad se busca que el material a emplear tenga un bajo coeficiente por dilatación térmica, permitiendo resistir altas temperaturas de operación.
- Propiedades químicas: en la manufactura de recipientes a presión se debe considerar un material que tenga propiedades anticorrosivas.
- Soldabilidad: los materiales deben tener buenas propiedades de soldabilidad, en caso de ser necesario, usar diferentes materiales en los componentes de recipientes a presión. Los materiales de las piezas deben tener características compatibles al momento de soldar. Esto se debe a que, en un material determinado, entre mayor número de elementos de aleación contenga, se deberán tener mayores precauciones al momento de realizar los procedimientos de soldadura.

Al momento de seleccionar el material se deberá tener en cuenta que sea el más adecuado de acuerdo a los requisitos técnicos y económicos. De esta selección depende el óptimo y seguro funcionamiento del equipo y de igual manera el desarrollo del recipiente implique menores gastos iniciales, de operación y mantenimiento.

2.2.8. Código A.S.M.E.

La norma que aplica en América y en muchos países del mundo en el diseño de recipientes a presión es el “Código A.S.M.E., Sección VIII, División 1”, también conocida como “Recipientes a presión (Pressure Vessels)” esta división es empleada para el diseño de recipientes a presión que no se encuentran sujetos a fuego directo. Este código es publicado por la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos.

2.3. Óptica

La luz es la porción del espectro electromagnético que es visible para los ojos de los seres humanos. Toda radiación electromagnética consiste en un rayo de ondas eléctricas y magnéticas perpendiculares entre sí, que se van generando a medida que se propagan por el espacio a la velocidad de la luz. Esto también es entendido como la dualidad onda-partícula de la física cuántica, ya que, debido a la naturaleza de la onda, la radiación se puede comportar como partícula o como onda dependiendo del punto de referencia escogido, sin embargo, ambas teorías son complementarias. Existen dos principales formas de abordar la óptica:

- La óptica geométrica: Permite el estudio de la luz asumiendo que ésta se propaga idealmente como un haz recto de rayos paralelos que experimentan cambios debido a objetos como lentes planas y espejos que, según sus características y distancias respectivas, crean imágenes calculables mediante ecuaciones geométricas. Permite el cálculo de la refracción y reflexión, por lo tanto, es utilizada principalmente para el diseño de sistemas ópticos.
- La óptica ondulatoria: Es más precisa al describir los fenómenos de la dualidad onda-partícula de la luz, asumiendo las dispersiones propias de las ondas y explicando fenómenos propios como la difracción, interferencia, transmitancia y reflectancia su cálculo es más complicado y es poco utilizada en el diseño. Sin embargo, es necesaria para explicar fenómenos como aberraciones ópticas y desviaciones presentes en los sistemas ópticos reales.

2.3.1. Óptica geométrica.

Para entender el análisis de la óptica geométrica, se enuncia el principio de Fermat:

“En cualquier situación óptica, de todos los posibles caminos que la luz pueda utilizar para viajar de un punto a otro, se elige aquel que consume menos tiempo”. (Mauldin, 1992)

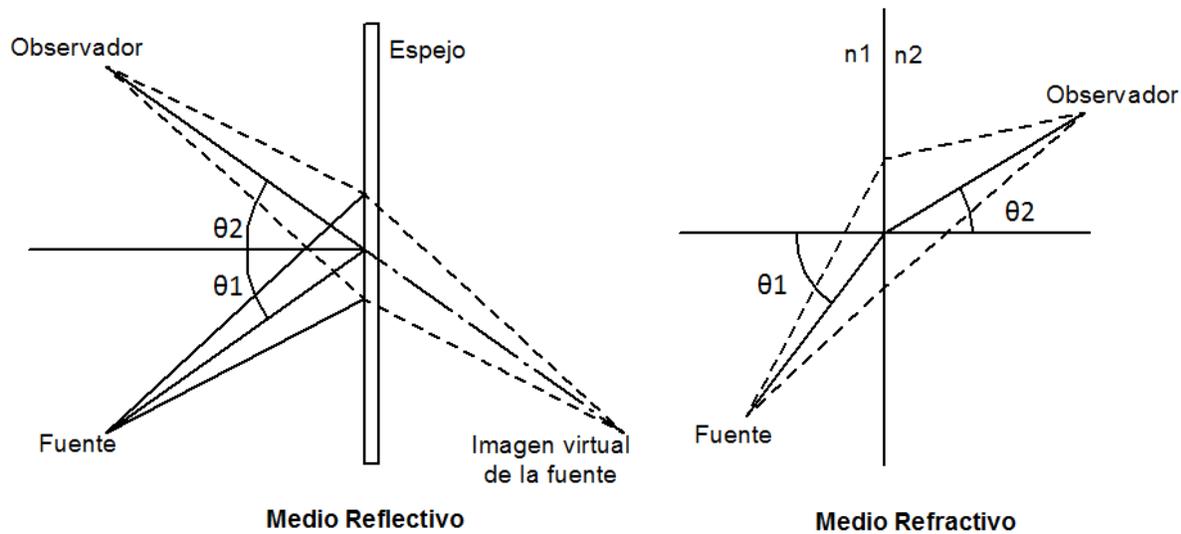


Figura 12. Principio del mínimo tiempo de Fermat para reflexión y refracción de la luz. En el medio reflectivo la luz se refleja en el mismo ángulo con el que incide sobre la superficie; mientras que el ángulo de refracción en el medio refractivo, depende del índice de refracción. (Autores).

El principio de Fermat permite demostrar la ley de la refracción, ya que un rayo de luz que se refleja en un espejo no lo atraviesa debido a que su distancia de recorrido es mayor. En cambio, el rayo de luz se refleja en el ángulo que recorre el menor camino que corresponde al ángulo con el que el rayo incide en el espejo (*Figura 12*). En el caso de un medio refractivo, el principio también se cumple ya que la luz se refracta en el cambio de material y se curva en un ángulo determinado por su índice de refracción. Dicho ángulo lo determina la ley de Snell que, por medio de una relación entre los índices de refracción y los ángulos de incidencia, permite predecir el ángulo en el que el rayo de luz se refracta:

$$n_1 \sin \theta_1 = \sin \theta_2 n_2 \quad (1)$$

Las lentes son objetos traslúcidos que convierten los rayos de luz en imágenes, pueden diferenciarse entre lentes positivas y lentes negativas. Las lentes positivas hacen converger la luz mientras que las negativas la hacen divergir. La refracción permite a una lente biconvexa (positiva) cumplir la ley de Snell, ya que desvían cada uno de los rayos de luz en una proporción dependiendo del ángulo de la superficie donde incida, que es mayor en los extremos de la lente y cero en el eje óptico Z (que atraviesa el centro de la lente). De esta forma los rayos confluyen en un punto del espacio determinado por el radio de curvatura de las superficies del lente. La distancia a ese punto se conoce como focal de la lente y es una de las distancias características que definen a la lente. La distancia es igual para ambos puntos focales, mientras en ambos lados de la lente se encuentre

el mismo medio. Se observa que, desde un punto del objeto, se toman tres rayos de luz, que atraviesan la lente y son desviados, cada uno en diferente proporción.

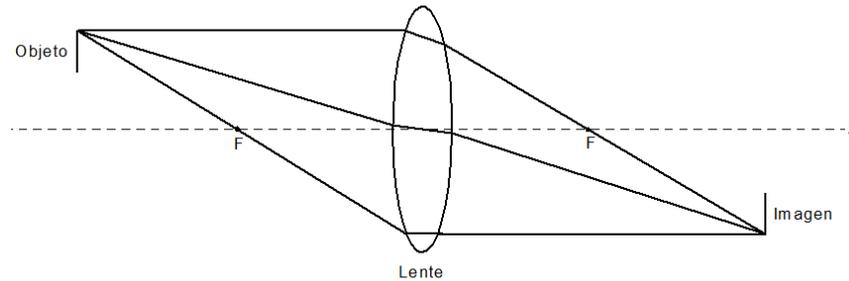


Figura 13. Formación de la imagen a través de una lente biconvexa explicada a través de tres rayos de luz que parten del objeto convergen en la imagen. (Autores).

La lente se puede analizar como una caja negra, que convierte la imagen desde el punto A en el objeto, a una imagen nítida en el sensor de la cámara en A' (Figura 16). El objetivo de la lente consiste en que los caminos ópticos de los rayos de luz, de cualquier longitud de onda, sean idénticos, converjan y se refracten para su corrección y enfoque en la formación de la imagen. El lente debe tener los bordes menos gruesos para que los rayos de luz que atravesen se curven bruscamente y lleguen a tiempo que los rayos de luz en el medio, donde la luz tarda más en atravesar el material por su espesor. Refinando el sistema se puede llegar a calcular el perfil del material traslúcido de la lente, para lograr el efecto deseado sobre la luz que conforma la imagen. Las leyes que se exponen a continuación, son utilizadas para determinar la forma que debe tener la lente y el efecto que se desea obtener de ella. Su propósito es de captar la mayor cantidad de luz y focalizarla en una imagen nítida, los rayos provienen de todas partes desde un punto luminoso y la lente los hace pasar por un punto llamado conjugado. Para simplicidad de cálculos, los haces de luz que inciden sobre los lentes se consideran formados por rayos paraxiales, los cuales son idealmente paralelos y permiten estimar la distancia de formación de una imagen a través de la ecuación (2) que describe su ley.

$$\frac{n_1}{x_o} + \frac{n_2}{x_i} = \frac{(n_2 - n_1)}{r} \quad (2)$$

- a) r : Radio de la superficie esférica, b) x_o : Distancia entre el objeto y la superficie.
 c) x_i : Distancia entre la superficie y la imagen, d) n_1 : Índice de refracción del aire, e) n_2 : Índice de refracción del vidrio.

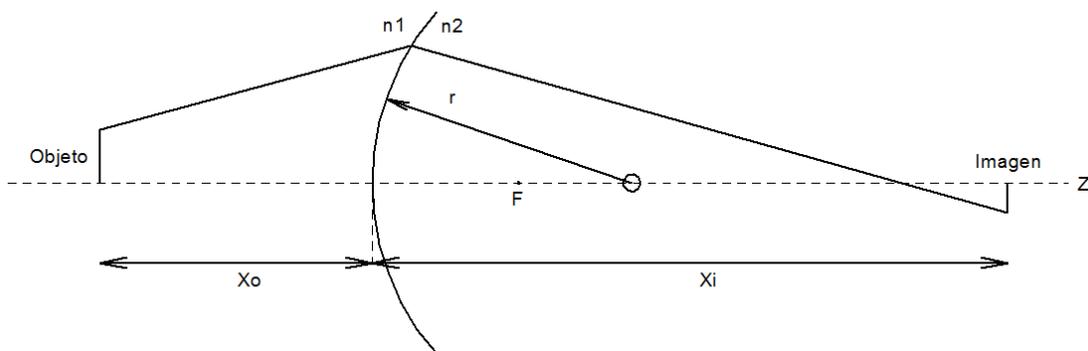


Figura 14. Interface esférica entre dos medios, cuyo radio determina las distancias de formación de imagen. (Autores).

Si la relación de la ecuación (2) no se cumple, la imagen no se focaliza adecuadamente. Cuando la distancia del objeto tiende al infinito, entonces la imagen se forma en un punto focal F , situado en una distancia f , según la ecuación (3).

$$f = \frac{n_2 r}{(n_2 - n_1)} \quad (3)$$

Dentro de la lente, se puede suponer que el resultado de la perturbación de la primera superficie de la lente actúa como un objeto para el cálculo del cambio debido a la segunda superficie, esto funciona en todos los casos sin importar que los rayos de luz converjan formando una imagen real o diverjan formando una imagen virtual. En la Figura 15 se muestra una lente biconvexa, para la cual se obtienen dos ecuaciones que la satisfacen (4) y (5).

$$\frac{1}{x_i} - \frac{1}{x_o} = \frac{1}{f} \quad (4)$$

Donde las distancias son medidas desde el centro de la lente delgada.

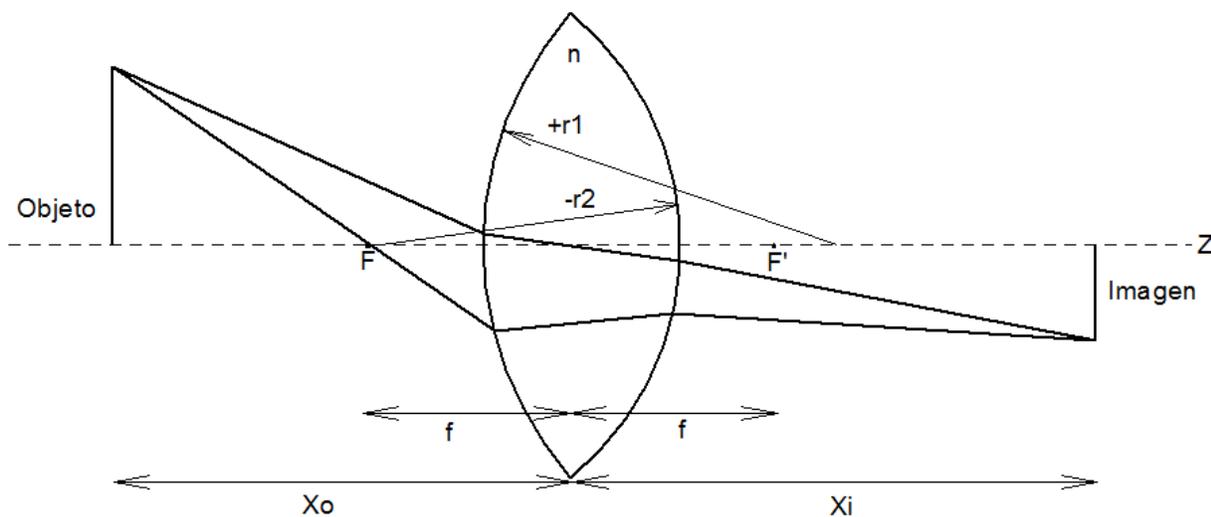


Figura 15. Lente delgada construida a partir de dos superficies esféricas, los radios y el índice de refracción determinan las distancias de focalización. (Autores).

La distancia focal también se relaciona con los radios de curvatura de las superficies de la lente por medio de la ecuación (5).

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

Donde se asume el material óptico con índice de refracción n rodeado por aire. Los radios son positivos si el centro se encuentra en el lado opuesto de entrada de los rayos. Por lo tanto r_1 es positivo y r_2 negativo. Según Mauldin (1992), la lente se analiza como un objeto con dos superficies curvas, cada una con una distancia focal independiente de la otra. Esta lente cumple con las condiciones de Gauss para una lente delgada, donde el ancho de la lente es despreciable con respecto a las distancias al objeto y la imagen. Para el modelo simplificado en la Figura 16, la lente se supone como una placa plana de vidrio que desvía la luz en menor o mayor proporción, las distancias focales se calculan para el objeto óptico completo. También se obtiene una relación aportada por Newton y comprobable geoméricamente por medio de la ecuación (6).

$$xx' = f^2 \quad (6)$$

Donde x es la distancia del objeto al punto focal F y x' la distancia del punto focal F' a la imagen.

Figura 16. Cálculo de una imagen mediante trazado de tres rayos a través de una lente delgada simétrica convergente. (Autores)

En la Figura 16 se puede observar un objeto de altura y que contiene un punto A , desde dicho punto se observa el recorrido de tres rayos de luz que son capturados por la lente, los rayos de los extremos son desviados mientras el rayo del centro pasa directo hasta el plano de formación de la imagen, en el punto A' donde los rayos externos convergen. La imagen que se forma tiene una altura y' lo que permite el definir la magnificación de la imagen M por medio de la ecuación (7), que es la relación entre la altura del objeto y la altura de la imagen.

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{-x'}{f} = \frac{-f}{x} \quad (7)$$

La magnificación es negativa cuando la imagen es invertida, se demuestra en la Figura 16, donde y' es medido sobre el eje $-y$ negativo.

La lente, además de los puntos focales, posee dos planos focales, donde las imágenes se proyectan y se enfocan correctamente. La distancia del plano focal depende de la distancia del objeto que se

pretende visualizar. Se debe tener en cuenta que el espacio es tridimensional y por lo tanto entre mayor sea el objeto, más planos focales tendrá, la distancia entre los máximos de estos planos se conoce como profundidad de campo.

2.3.2. Combinación de lentes

Al combinarse dos o más lentes el efecto combinado depende principalmente de los tipos de lentes que se combinen, de sus distancias focales y de la distancia que se encuentren una de la otra. Cabe resaltar que, para resolver un sistema de dos o más lentes se debe resolver cada una de las lentes y utilizar los datos de la primera como datos de entrada de la segunda. Esto se debe a que las distancias de los planos focales y tamaños de imagen se relacionan con las distancias de los puntos focales de la segunda lente para calcular la distancia final de la imagen formada por la combinación. Para hallar la distancia del punto focal de la combinación de las lentes, la cual es inversamente proporcional a la distancia entre ellas, se encuentra mediante la ecuación (8).

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (8)$$

Donde: d es la distancia entre las lentes.

En el caso de colocar la segunda lente en el punto focal de la primera, la imagen atraviesa la lente sin sufrir ninguna modificación, esto se puede comprobar mediante la ecuación (8), dando como resultado $f = f_1$ cuando $d = f_1$.

2.3.3. Aperturas y profundidad de campo

Las aperturas se añaden en un sistema óptico para limitar la cantidad de luz que entra al sistema, pueden ser aperturas fijas o variables, también llamadas diafragmas. Este componente permite eliminar la luz más difusa proveniente de los bordes de los lentes para lograr un correcto enfoque de la imagen, y aumentar el brillo. el cual es proporcional al cuadrado del diámetro expuesto de la lente. Ya que la magnificación de una lente depende de f , el brillo es proporcional a $(D/f)^2$, es por eso que los objetivos se comercializan dependiendo de su *número f*, el cual indica la relación (f/D) del conjunto de lentes del objetivo. Un número f pequeño, indica que el objetivo es capaz de captar más luz.

El tamaño finito de la fuente de entrada al sistema, generalmente es establecido por la variación de la apertura del diafragma, además de controlar la cantidad de luz que entra al Sistema Óptico, permite determinar la profundidad de campo del objeto. En la *Figura 17* se muestran dos imágenes de un chorro de aire comprimido obtenidas mediante una diferente configuración de Schlieren

(Sección 2.3.5.1) con diferentes tamaños finitos de fuente. La profundidad de campo aumenta en la segunda lente hasta el punto de poder observar suciedad o imperfecciones de su superficie.

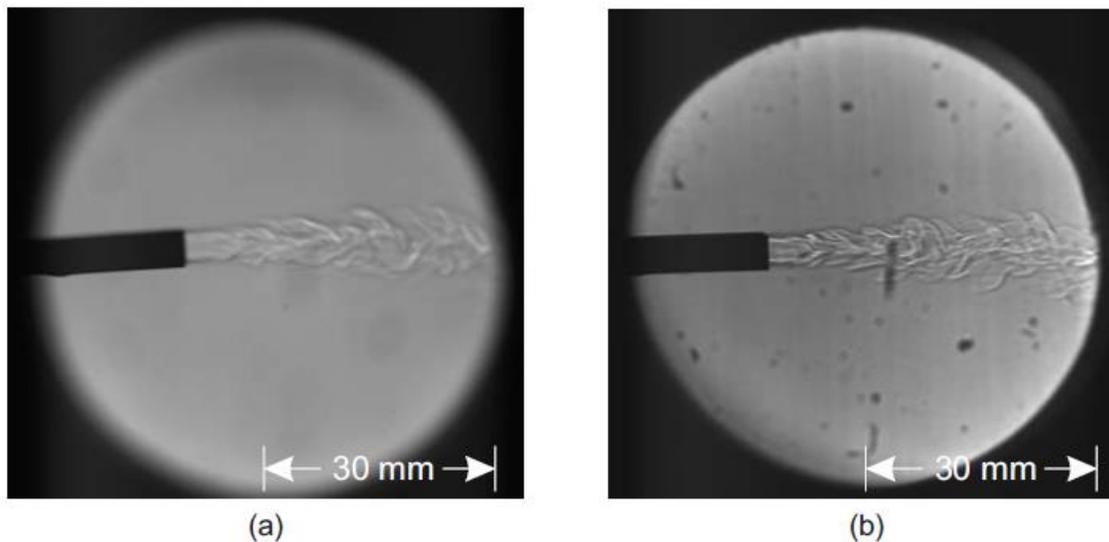


Figura 17. Imagen del chorro de aire comprimido obtenidas con la técnica de Schlieren doble paso con espejo convencional. La luz proviene de un sistema condensador con diafragma de apertura circular de 3 mm (a) y 500 μ (b) (Zapata L. D.,2010) Figura 5.6. Página 161.

2.3.4. Sistemas de Iluminación

El sistema de iluminación es aquél que cumple la función de emitir la radiación electromagnética mediante una fuente y llevar dicha radiación hasta el objeto de estudio mediante un arreglo de lentes. Las fuentes de iluminación se pueden clasificar en dos grupos: fuentes de luz puntuales y fuentes de luz extensas. Las fuentes de luz puntuales son aquellas que son del mismo tamaño de la longitud de onda de la luz que emiten. En la práctica no existen este tipo de fuentes, sólo se pueden manufacturar fuentes de luz extensas, que se pueden considerar como la suma de muchas fuentes puntuales.

Las fuentes también se diferencian por el tipo de luz que emiten, que va desde rayos gamma, pasando por rayos X, ultravioleta, la luz visible hasta microondas, la elección de tipo de radiación depende principalmente del fenómeno que se intente observar, limitado también por el funcionamiento de la fuente de luz y el sistema de captación de imagen. En (Zapata, 2010) se enlistan las técnicas de iluminación aplicables a los tipos de imágenes que se quieren obtener:

- **Iluminación láser monocromática:** este tipo de iluminación evita las aberraciones cromáticas al transmitir la luz en una banda de frecuencias baja, de un rango de longitudes de onda muy pequeño. Sus principales desventajas consisten en que el haz colimado

presenta algunas distorsiones por la superposición de los frentes de onda y además tiene precio elevado. Permite observar la geometría del chorro líquido y de su implementación se obtiene una imagen topográfica.

- **Illuminación de Luz Blanca:** proporciona mayor información de los cambios en el índice de refracción, las fuentes son de bajo costo y portables. Presentan menor potencia que las fuentes láser debido a que requiere de una lente condensadora, necesitan de una lente acromática para corrección de las aberraciones (ya que la distancia focal depende de la longitud de onda). Permite observar la geometría del chorro líquido, penetración, ángulo y volumen.
- **Illuminación trasera difusa:** se logra colocando un difusor óptico entre el chorro de combustible y la fuente de iluminación, esto permite que la cámara a presión se ilumine uniformemente antes de ser capturada la imagen, en la cual la sombra de la fase líquida chorro se observa ante un fondo uniformemente iluminado. Permite observar la geometría del chorro líquido, penetración, ángulo y volumen.

2.3.5. Propagación de luz en medios heterogéneos

Siguiendo la teoría de la óptica geométrica, la luz se propaga en el vacío y en los medios homogéneos en forma de rayos. Sin embargo, desde la teoría electromagnética de la luz, ésta se propaga en ondas desde una fuente puntual. Cuando los frentes de onda están suficientemente alejados de la fuente, la onda esférica se puede considerar plana y dichos frentes se pueden considerar planos perpendiculares a la dirección de los rayos. En un medio heterogéneo, los frentes de onda son perturbados y sufren cambios de fase y dirección con respecto a los frentes que no atraviesan dicho medio. Esta desviación es causada por los cambios del índice de refracción dentro del volumen del medio heterogéneo, la dirección de los rayos cambie en un ángulo ε (*Figura 18*). Esto permiten que el fenómeno estudiado dentro del sistema pueda llegar a ser visible ante un sistema de adquisición de imágenes, por medio de la implementación de la técnica de visualización de Schlieren.

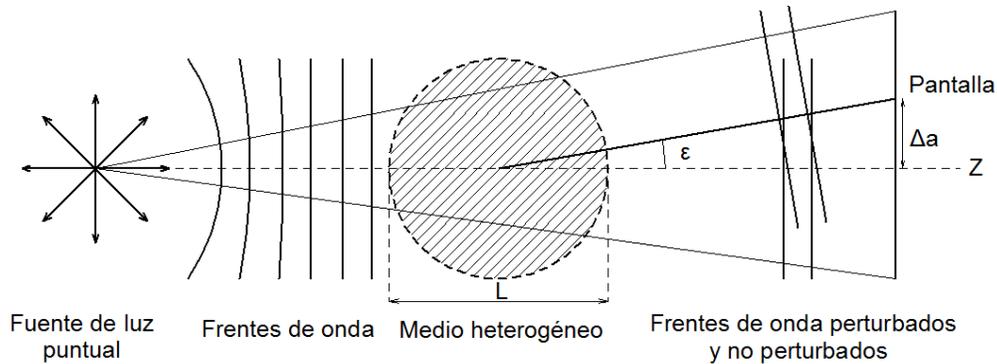


Figura 18. Desviación de los frentes de onda en un experimento sencillo de Shadowgraph. Las ondas de luz se consideran planas, que, al atravesar un medio heterogéneo, provoca desviaciones del patrón original. Fuente: Autores.

2.3.5.1. *Técnicas de visualización Shadowgraph y Schlieren*

Las técnicas de visualización Shadowgraph y Schlieren han sido durante años una valiosa herramienta en el estudio de los fluidos, permitiendo la visualización de fenómenos ocultos a la vista. Su principio de funcionamiento se basa en la detección de pequeñas perturbaciones de la radiación de la iluminación causadas por las heterogeneidades del medio que atraviesa. Por ejemplo, la visualización de gases se hace posible gracias a que el índice de refracción varía por los gradientes de densidad.

Según (Settles G, 2001), la técnica de Shadowgraph se puede describir sencillamente mediante un experimento fundamental llevada a cabo por primera vez por Hooke, llamado método shadow simple o directo, en donde se necesita una única fuente de luz que ilumine el objeto de estudio y cuya sombra es proyectada en una superficie plana como se observa en la *Figura 18*. En el experimento se observa que el cambio de medio en los bordes del objeto de estudio, provoca cambios en la trayectoria de la luz que son medidos en la pantalla como Δa .

En la *Figura 19* al experimento se le agrega una lente colimadora entre la fuente de luz y el objeto de estudio con la intención de crear un haz de rayos de luz paralelos y así medir la difracción de la luz. Las ecuaciones (9) y (10) permiten calcular, por medio de la óptica geométrica, el ángulo de difracción ε , medido desde el eje óptico z hacía x y y , respectivamente.

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_o} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{L}{n_o} \frac{\partial n}{\partial y} \quad (10)$$

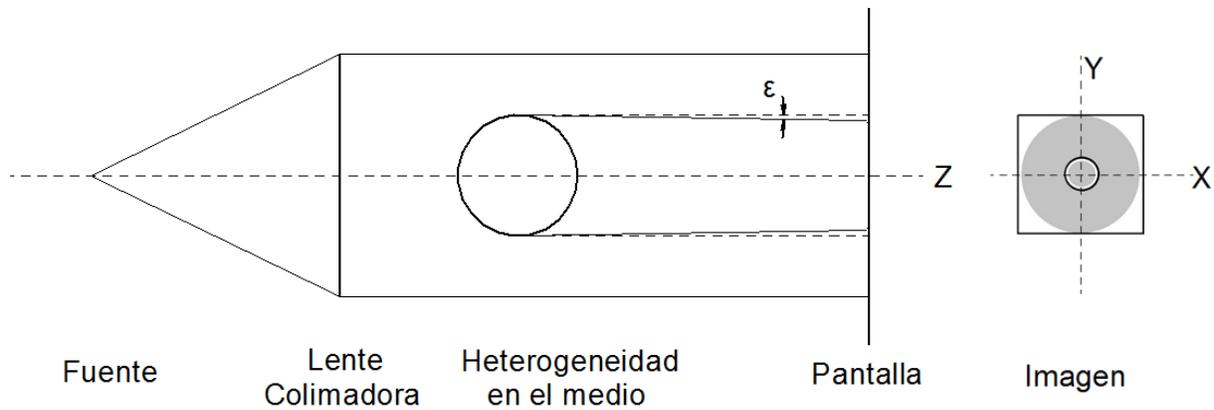


Figura 19. Experimento de Shadowgraph con lente colimadora. Se observa el efecto generado por los bordes de la heterogeneidad, provocando pequeños cambios en la luz y generando una imagen con borde blanco (convergencia de los rayos) y un borde oscuro (donde no convergen los rayos). Fuente: Autores.

Las heterogeneidades presentes en el volumen de control se deben a cambios de presión o de densidad en el objeto de estudio. Es preciso agregar que entre menores sean los cambios en el índice de refracción en el medio, más sensible tiene que ser el sistema de captación de imágenes para lograr una imagen de alto detalle. Para lograrlo, las variables principales que influyen son la profundidad de campo, el filtrado y la resolución espacial del sistema de adquisición de imágenes. En el caso del presente proyecto de grado, las principales causantes de heterogeneidades en el medio son las gotas del chorro de Naphtha provenientes de la boquilla de inyección, que desvían la luz y atraviesan el acceso óptico a la siguiente parte del sistema óptico. La visualización de estas gotas cuyo tamaño es de decenas de micras, se logra a través de magnificación por medio de lentes y zoom mecánico o digital por medio del sistema de captación.

La técnica de visualización Shadowgraph se utiliza para interpretar los cambios de fase que experimentan los frentes de onda de la luz en un medio heterogéneo, para mostrarlas como cambios de intensidad de luz en la imagen. En la *Figura 19* se muestra el efecto que adquiere la imagen sobre la pantalla, ya que, en la parte de la imagen correspondiente a los rayos principales, los rayos refractados y no refractados se concentran debido al efecto que tiene el cambio de densidad en el borde del objeto de estudio, tornándose en una zona iluminada en forma de anillo; en cambio en los bordes no alcanzan a llegar los rayos y por ese motivo tiende a ser más oscuro el anillo del medio circundante. La luminosidad en cualquier punto de la imagen depende de los gradientes de los ángulos refractados $\frac{\partial \epsilon}{\partial x}$ y por lo tanto de la derivada del índice de refracción $\frac{\partial n}{\partial x}$. La variante de

configuración de shadowgraphy, consiste en agregar un arreglo de lentes para modificar o adaptar el tamaño de la imagen para el instrumento de captación de imágenes.

2.3.5.2. Configuración de Schlieren por transmisión

La configuración de Schlieren básica por transmisión se muestra en la *Figura 20*, contiene los elementos del Shadowgraph con la diferencia que requiere de un filtrado espacial antes de la captación de la imagen. Esta técnica en particular requiere de dos accesos ópticos enfrentados, donde los rayos provenientes de la fuente o del diafragma, son colimados por una lente colimadora y atraviesan el medio heterogéneo. La lente decolimadora recoge la radiación y en su plano focal, por fuera del medio heterogéneo, se genera una imagen inversa del objeto de estudio. Según la teoría de difracción de Fraunhofer, la imagen proyectada en este punto es la transformada de Fourier de los patrones de frente de onda después de atravesar el medio heterogéneo, por lo que se refiere este lugar como el plano de Fourier. En este lugar se realiza el filtrado espacial, ya que se puede afectar directamente la formación de la imagen, realizando los efectos deseados y eliminando la radiación directa de la fuente, con el objetivo de refinar la luz que va a pasar al Sistema de Adquisición para formar la imagen.

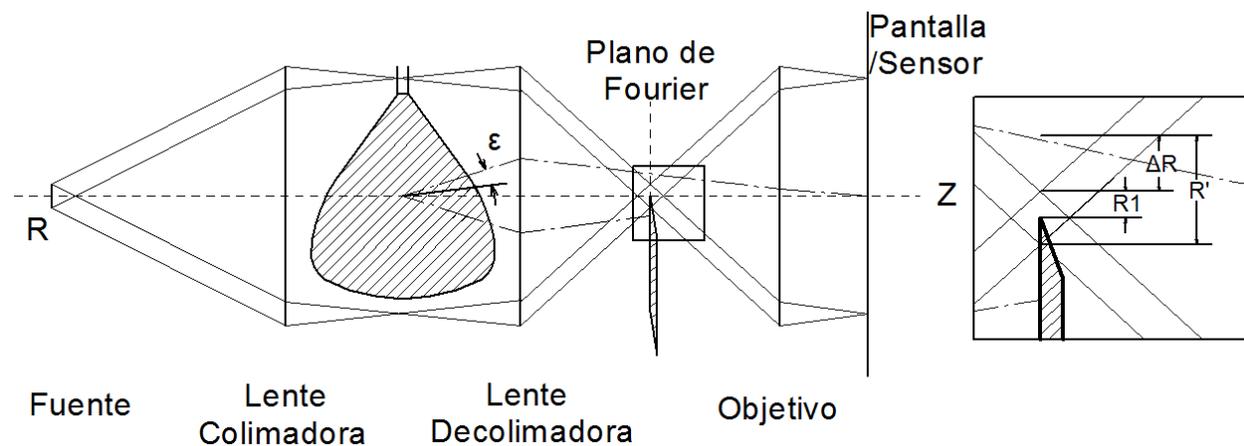


Figura 20. Configuración de Schlieren por transmisión, con fuente finita y filtrado espacial en el plano de Fourier. Se pueden observar las principales variables del filtrado espacial que generarán diferentes efectos en la imagen obtenida. Fuente: Autores.

La lente decolimadora transforma la imagen (que tiene principalmente la forma y tamaño de la fuente R') y la invierte, siendo enfocada la imagen en un tamaño y una posición determinada por la relación entre su distancia focal y la del objeto (Zapata, 2010). Los rayos refractados por el

objeto de estudio, junto al filtrado espacial de la imagen, se muestra como una imagen desplazada ΔR de la imagen original:

$$\Delta R = \varepsilon_y * f_{L3} \quad (11)$$

La luminosidad de la imagen se representa en el nivel de intensidad I , es equivalente a la cantidad de radiación registrada por el sensor del instrumento de captación de imágenes. El contraste se define como la relación de la cantidad de desplazamiento de la imagen con rayos desviados ΔR entre la cantidad de radiación no filtrada por la cuchilla:

$$C = \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta R}{R1} = \frac{\varepsilon_y * f_{L3}}{R1} \quad (12)$$

Cuando se aumenta el corte de la imagen con el filtrado espacial, el contraste aumenta. En el caso de que el corte sea muy pronunciado, la mayor parte de la imagen se va a oscurecer al igual que el fondo, por lo tanto, se debe tener en cuenta la medida y posición del filtrado para la obtención de una imagen adecuada para ser captada por medio del Sistema de Adquisición.

2.3.5.3. *Filtrado*

En el plano de Fourier confluyen las principales frentes de onda captadas por el lente, en cuyas frecuencias altas (o de orden cero) se encuentran los detalles generales de la imagen, mientras en las frecuencias bajas se encuentran los detalles finos causados por los gradientes de densidades. Un sistema de filtrado espacial con sistemas de diafragma o finas cuchillas, se pueden utilizar para eliminar las frecuencias altas provenientes del fondo y por lo tanto resaltar la intensidad de los efectos producidos por los gradientes de densidad. Las cuchillas pueden ser reemplazadas con cualquier otro material opaco (no traslúcido) que interrumpa el paso de la luz hacia el sensor del Sistema de Adquisición.

Gracias al filtrado, la técnica de Schlieren por transmisión permite que la luminosidad de la imagen dependa únicamente de la derivada del índice de refracción $\frac{\partial n}{\partial x}$ y no del ángulo de difracción ε , permitiendo el estudio de fenómenos de las perturbaciones pequeñas de la radiación, con bajos gradientes de intensidad y contraste. Hay que tener en cuenta que si el ángulo de difracción ε es demasiado grande, la radiación podría salirse del sistema óptico y no ser captada por el instrumento adquisición de imágenes.

En la *Figura 21* se puede observar tres casos de imágenes, dos con corte horizontal y uno con corte vertical, en donde observa el cambio según la cantidad de filtrado espacial que se aplique. En las dos primeras imágenes se aplica un filtrado que permite eliminar las componentes $\partial n / \partial y$ del

objeto. En la primera se aplica un porcentaje de filtrado que divide el chorro de aire para resaltar la vorticidad, la zona más iluminada corresponde al lugar donde llegan los rayos desviados y los que no han sido filtrados, mientras la otra zona se torna oscura por la ausencia de los rayos filtrados. En la segunda imagen el filtrado es aplicado casi a toda la imagen y el fondo aparece de la misma intensidad que la zona oscura del chorro; mientras en la tercera, al aplicarse el filtro vertical, se observa el chorro de manera simétrica, sin estar resaltada la vorticidad y comportándose como un cilindro que refleja la luz en el interior.

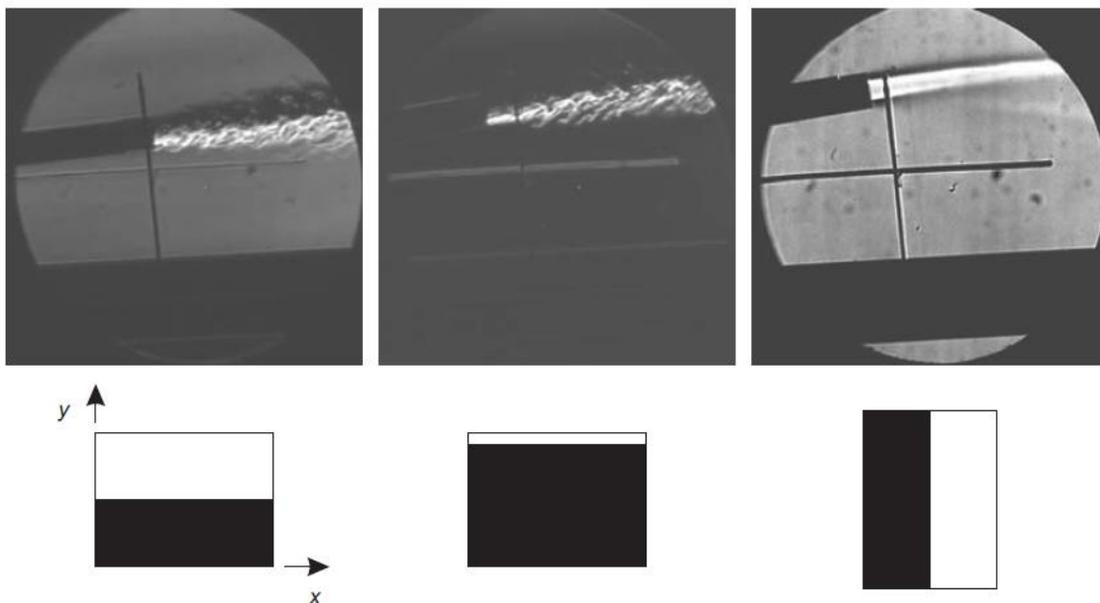


Figura 21. Imágenes de chorro de aire comprimido utilizando diferentes configuraciones de corte por filtrado espacial. (Zapata L. D., 2010) Figura 5.7. Página 162.

Se observa que al aumentar el corte y reducir $R1$ (*Figura 20*), se puede mejorar el contraste mientras se respeten los límites, ya que se pierden los detalles cuando se igualan las intensidades lumínicas del objeto con el fondo de la imagen.

2.3.6. Sistemas de Adquisición

El sistema de adquisición es aquél que contiene el sensor de la radiación emitida por la fuente. Consiste en un espacio cerrado, con un arreglo de lentes y/o espejos que se encargan de dirigir la radiación al sensor, un mecanismo que permite el paso de la luz por un determinado periodo de tiempo y un circuito electrónico que controla el dispositivo y se encarga de leer la información proveniente del sensor para convertirla en una imagen.

Para entender la formación de las imágenes, dentro del dispositivo, se debe analizar el concepto de la cámara oscura, el cual es el método más tradicional de su obtención. Mauldin (1992) explica

el concepto mediante un agujero entre un medio iluminado y un medio oscuro. Al agujero se le conoce como objetivo y controla la luz que entra al medio oscuro, hacia una placa donde la imagen se forma, más o menos nítida, según se cambie su distancia con respecto al objetivo. La cámara oscura es el experimento para explicar el funcionamiento del ojo humano y de las cámaras modernas, en las cuales se aprovecha al máximo para lograr características de mayor nitidez, mayor dispersión y menor número de errores en el color. El campo de la cámara oscura es enorme debido a que en cualquier distancia al objetivo se produce una imagen nítida, ya que a medida que se aumenta, se enfoca un objeto más lejano. La luz proviene de todas partes y por su paso en el objetivo se obtiene la imagen inversa.

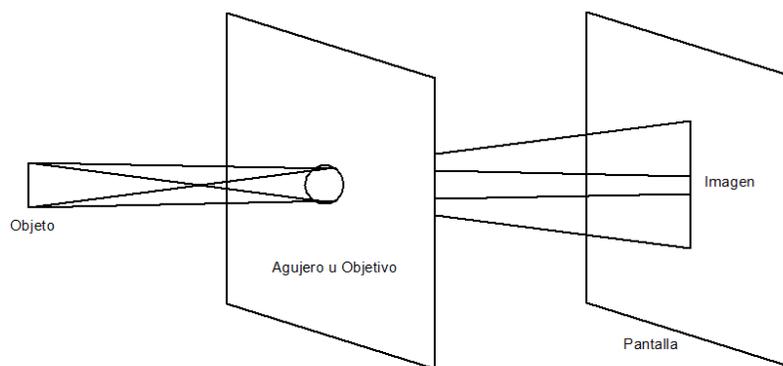


Figura 22. Representación de una cámara oscura simulada a partir de un agujero. En el entra un rayo de luz, que es proyectado en una pared, la imagen se forma en el plano de focalización que depende del diámetro. (Autores).

Los sistemas de adquisición contienen varias variables de construcción y diseño según la aplicación para la cual son construidas, el entendimiento de estas características determina la correcta elección del dispositivo de acuerdo a la aplicación requerida. Las principales variables dependen del sensor utilizado, la electrónica asociada a éste, los materiales ópticos y la velocidad del mecanismo de obturación, son listadas a continuación:

- **Resolución Espacial:** Es la medida determinada por la cantidad y el arreglo de los sensores del instrumento de captación de imágenes a utilizar, entre mayor número de píxeles, la calidad de la imagen y la cantidad de detalles será mejor.
- **Resolución Temporal:** Está determinada por el tiempo que tarda el sensor del instrumento de captación de imágenes en procesar la imagen captada, depende principalmente de la cantidad de fotorreceptores. La resolución temporal suele ser inversamente proporcional a

la resolución espacial, ya que un sensor que capta mayor detalle procesa más información, aumentando el tiempo de procesamiento y digitalización.

- **Tiempo de Obturación:** Está dado por el mecanismo de obturación del instrumento de captación de imágenes. Una mayor velocidad de obturación evita el efecto de movimiento en las imágenes, pero a su vez disminuye el tiempo que tiene el sensor para captar la luz de la imagen, por lo que disminuye su sensibilidad.
- **Rango y Sensibilidad Espectral:** El rango es la propiedad que determina las longitudes de onda que son posibles captar con el sistema de adquisición, mientras la sensibilidad espectral establece que tan bien se visualizan. Ambas están determinadas por las propiedades ópticas de los materiales que conforman el sistema.
- **Rango Dinámico:** Determina los niveles de intensidad de una imagen por medio de los valores máximos y mínimos que el dispositivo de fotorrecepción puede medir. Desde el negro absoluto o ausencia de radiación, al nivel de saturación o exceso de radiación.

Los sensores de los dispositivos de captura de imagen consisten en un arreglo de fotorreceptores puntuales, los cuales captan una porción de la luz de la imagen que llega a la cámara y representan cada uno, un pixel. En el momento del procesamiento, se une toda la información de los fotorreceptores y se recrea la imagen ubicando cada pixel en el mismo arreglo del sensor. Dave (2015) explique que actualmente la tecnología de construcción de los sensores bidimensionales de estos dispositivos ofrece dos tipos: CCD y CMOS:

- **CCD (Charged Coupled Device):** Es el tipo de sensor donde el arreglo de fotorreceptores es leído individualmente, fila a fila, transformando todas las cargas de los pixeles en una señal analógica finita de voltaje al momento de la digitalización de la imagen. La señal resultante es ampliada y procesada por un circuito externo destinado para tal fin. Este tipo de sensor es el más utilizado en las aplicaciones que requieren una mayor calidad de imagen y para aquellas de baja luminosidad.
- **CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor):** Es el tipo de sensor que tiene la capacidad de digitalizar la señal y ampliarla desde su circuito interno. Tiene una mayor velocidad de transferencia y un consumo menor de energía, también elimina el efecto de “blooming” el cual se presenta cuando en un punto se concentra mucha intensidad lumínica y afecta los pixeles adyacentes. Su desventaja consiste en que, en el área expuesta del sensor, entre los fotorreceptores, se encuentra también parte de la electrónica, por lo tanto,

tiene que ser corregida implementando una mayor densidad de integración electrónica y en algunas ocasiones micro lentes que concentran la luz en el fotorreceptor.

Los principales dispositivos de captura de imagen en la actualidad corresponden a las cámaras digitales, diseñadas para multitud de aplicaciones, con capacidad de captura de diferentes tipos de radiación, diferentes tiempos de obturación, tamaños de sensor y rangos de luminosidad. Las cámaras digitales, permiten a su vez la adición de diversos accesorios que potencializan diversas características tales como el zoom, la cantidad de luz, el tamaño de la imagen sobre el sensor, su calidad resultante, entre otros. Dichos accesorios son compatibles con los dispositivos a través de monturas estándar, que manejan una distancia fija al sensor de la cámara para mayor aprovechamiento de éste.

Uno de estos accesorios, el objetivo, permite captar la luz de la imagen y enfocarla en el sensor de la cámara, con un máximo aprovechamiento de la resolución espacial. Los objetivos están compuestos por varias lentes, que combinadas, transforman y corrigen la imagen de las aberraciones ópticas provocadas por el cambio de medio entre las lentes y el aire.

En la industria, se comercializan dos tipos de objetivos: de zoom y de focal fija. Los objetivos de zoom tienen la capacidad de variar su distancia focal por medio de mecanismos que modifican la distancia entre lentes y diafragmas de entrada de luz, para lograr un efecto de acercamiento de la imagen sin perder calidad; mientras que los objetivos de focal fija no pueden utilizarse por sí solos para generar zoom, pero permiten una mejor transmisión de la imagen debido a la menor cantidad de lentes, que al estar fijos, permiten ser diseñados detalladamente para la corrección de imperfecciones físicas y ópticas. Los objetivos de focal fija también son más livianos y están diseñados para tener una apertura mayor (menor *número f*) para fotografías con menor cantidad de luz y poca profundidad de campo, el zoom puede lograrse digitalmente por medio de la cámara.

3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque de investigación

El diseño de una máquina, consistirá en un recipiente a presión con la capacidad de adaptar inyectores en su interior para captar imágenes de los chorros de atomización generados. Inicialmente se realizará un diseño conceptual basado en el estudio de los requerimientos iniciales de la máquina para evaluar un análisis funcional y determinar las operaciones básicas, las cuales, en conjunto satisfacen dichos requerimientos. Para cada operación de la máquina existen múltiples soluciones propuestas, las cuales son sometidas a procesos de selección y filtración para lograr una calificación final y obtener el producto más adecuado, el cual pasará a la fase de diseño preliminar. El diseño preliminar de la máquina, consiste en el diseño de ingeniería que incluye los cálculos y dimensionamientos de los componentes principales de la máquina, que esencialmente necesita para la operación. En el diseño preliminar, por medio del estudio dimensional del chorro de combustible que proviene del conjunto de inyectores, se inicia el diseño estructural del recipiente y a partir de su dimensionamiento el análisis del acoplamiento de un sistema óptico adquisitivo a los accesos ópticos. Finalmente, en la fase de diseño detallado, se refinan los detalles de dichos componentes, se establecen los métodos de unión y formas de adaptación entre las partes que conforman el ensamble de la máquina, se seleccionan los componentes de los subsistemas necesarios para el funcionamiento y se realizan las simulaciones pertinentes a demostrar la confiabilidad y resistencia de la máquina.

En la sección de la selección de componentes, se realiza una revisión de los conceptos de diseño, operación y configuración para la determinación de las especificaciones deseadas de un producto, el cual es ofrecido comercialmente y puede ser adquirido.

3.1.1. Técnicas de recolección de información

La recopilación de información acerca de la variedad de temas utilizados en las fases de diseño de la máquina, como metodologías de diseño, óptica, diseño de cámaras presurizadas y sistemas ópticos, se realizará a través de los siguientes medios:

- a). Libros especializados.
- b). Revistas – papers – tesis – bases de datos.
- c). Consultoría de instituciones o empresas que trabajan en el medio.
- d). Internet (publicaciones)
- e). Consulta a personas especializadas en el tema y a docentes de facultad.

4. DISEÑO DE INGENIERÍA

Durante el proceso de un diseño de ingeniería existen varios métodos que permiten y facilitan al ingeniero el desarrollo de un problema. Los métodos de diseño son todos y cada uno de los procedimientos, técnicas, ayudas o herramientas para diseñar; es decir que existen diferentes clases de actividades que un diseñador puede utilizar y combinar para un proceso general de diseño, así se logran introducir procedimientos con un marco lógico (Cross, 2002).

Durante el desarrollo del diseño de la cámara presurizada se lleva a cabo un procedimiento el cual abarca la formulación del problema por medio de los requerimientos del cliente y los objetivos que se han planteado anteriormente, de esta manera se realiza el diseño conceptual como un método que abarca diferentes herramientas las cuales simplifican la tarea del diseño.

4.1. Diseño Conceptual

El diseño conceptual es un método fundamental para el desarrollo de un producto por medio de la formulación de un problema. En este caso, una máquina que permita visualizar y capturar la imagen del chorro de combustible generado por un inyector. El desarrollo de la metodología está enfocado en el análisis de las funciones necesarias que debe suplir el producto para visualizar el chorro de combustible en un inyector.

Por medio de diferentes métodos de filtración de conceptos se logra establecer los componentes de varias máquinas; es decir el desarrollo de un método que permita generar diferentes opciones de un producto con una misma función y finalidad. La filtración entrará a un despliegue de funciones de calidad (*QFD - Quality function Deployment*) para la selección adecuada de un único producto.

4.1.1. Requerimientos del cliente

Para el desarrollo del diseño conceptual, es necesario tener en cuenta los requerimientos del cliente, en este caso la Universidad de San Buenaventura. Para establecer las funciones que conllevan a la adquisición de la imagen del chorro de combustible, se establecen los siguientes requerimientos:

- La entrada de aire/gases inertes debe ser regulada.
- La cámara sólo debe permitir el ingreso de combustible.⁶
- La cámara presurizada debe permitir la salida de mezcla.
- El diseño debe adquirir una clara y definida captura de imagen del comportamiento del chorro inyectado.
- El diseño debe contener una fuente de iluminación para obtener una clara imagen del contenido de la cámara

- El diseño debe incluir una sección dedicada a la separación de la mezcla de combustible.
- El combustible debe retornar al depósito.
- El diseño de la cámara presurizada debe permitir una fácil operación
- El acceso para el mantenimiento de la cámara debe ser fácil.
- La cámara presurizada debe ser confiable y segura.

4.1.2. Análisis funcional

El análisis funcional se realiza en el diseño de un producto para determinar las principales funciones que debe llevar a cabo para cumplir con su objetivo, es decir que el producto debe realizar ciertos procesos para cumplir los requerimientos del cliente a partir de la información o materia que ingresa a su volumen de control. A partir del análisis de los requerimientos del cliente mencionados anteriormente, se deben determinar los pasos necesarios para alcanzar lo que a partir de ahora será el objetivo general del producto:

“Visualizar y capturar imágenes del chorro de combustible en inyectores”.

Con el objetivo claro el siguiente paso es continuar la metodología de la relación *inputs-outputs* (Vilchis, 1998), la cual requiere la elaboración de una cadena de especificaciones y predicciones interrelacionadas para crear respuestas a los requerimientos. Para dar inicio a la aplicación del método se establecen las entradas y salidas del producto, en el caso del presente proyecto, las entradas a la máquina son energía, combustible y aire/nitrógeno. Estas características de entrada permiten el funcionamiento de la máquina, entran a un proceso determinado de donde se obtienen la información requerida y subproductos, satisfaciendo los requerimientos del cliente. En este caso, los parámetros de salida son imagen e información, y los subproductos son gases residuales del proceso de inyección.

La presentación preliminar de la relación *inputs-outputs* se realiza mediante el desarrollo de una caja negra. La cual simula una máquina a la que entran determinados productos, sufren determinados procesos para lograr la satisfacción de los requerimientos y se extraen de dichos procesos la imagen/información de la prueba de inyección y se desechan los subproductos transformados.



Figura 23. Diagrama Caja Negra mostrando las entradas de energía y materia, y la salida de información y materia de desecho. Fuente: Autores.

Por medio del esquema de la *Figura 23*, se observa lo que se desea adquirir del producto en función de los parámetros o características que ingresan a realizar el proceso. Sin embargo, para expresar como el producto desarrollará el objetivo general se establecen las siguientes funciones secundarias o sub-funciones para ampliar el espacio de búsqueda y dar solución al problema de diseño. Partiendo de la siguiente función principal, “*Capturar la imagen del chorro de combustible*”, de esta manera se despliegan seis sub-funciones que describen el proceso que se planea desarrollar para alcanzar el *objetivo general del producto*:

- Permitir que la presión en el interior de la cámara varíe.
- Admitir la entrada de combustible.
- Conocer el estado en el interior de la cámara.
- Adquirir la imagen del chorro de combustible.
- Evacuar la mezcla aire/combustible de la cámara.
- Soportar las cargas.

Ya establecidas las funciones que debe cumplir el producto, se aprecia el conjunto de sub-funciones que conforman la caja transparente. Este método permite manejar apropiadamente la relación de entradas y salidas, mostrando una visión general en la distribución de las funciones para la adquisición de los datos, esto se logra realizando un diagrama de bloques.

En la *Figura 24*, se puede observar el diagrama de bloques, este permite organizar de manera coherente y consecuente las sub-funciones que relaciona la entrada y el resultado de la salida. Es una primera solución a la incertidumbre de los resultados consiguiendo un sistema factible y funcional. Sin embargo es necesario completar de manera más estructural las funciones que garanticen una solución a los requerimientos por medio de un diagrama de funciones. Es así que, considerando un despliegue de las funciones esenciales se sabe el nivel en que debe abordarse el problema de diseño, identificando necesidades que se deben satisfacer y describiendo el proceso que cumplirá la cámara presurizada.

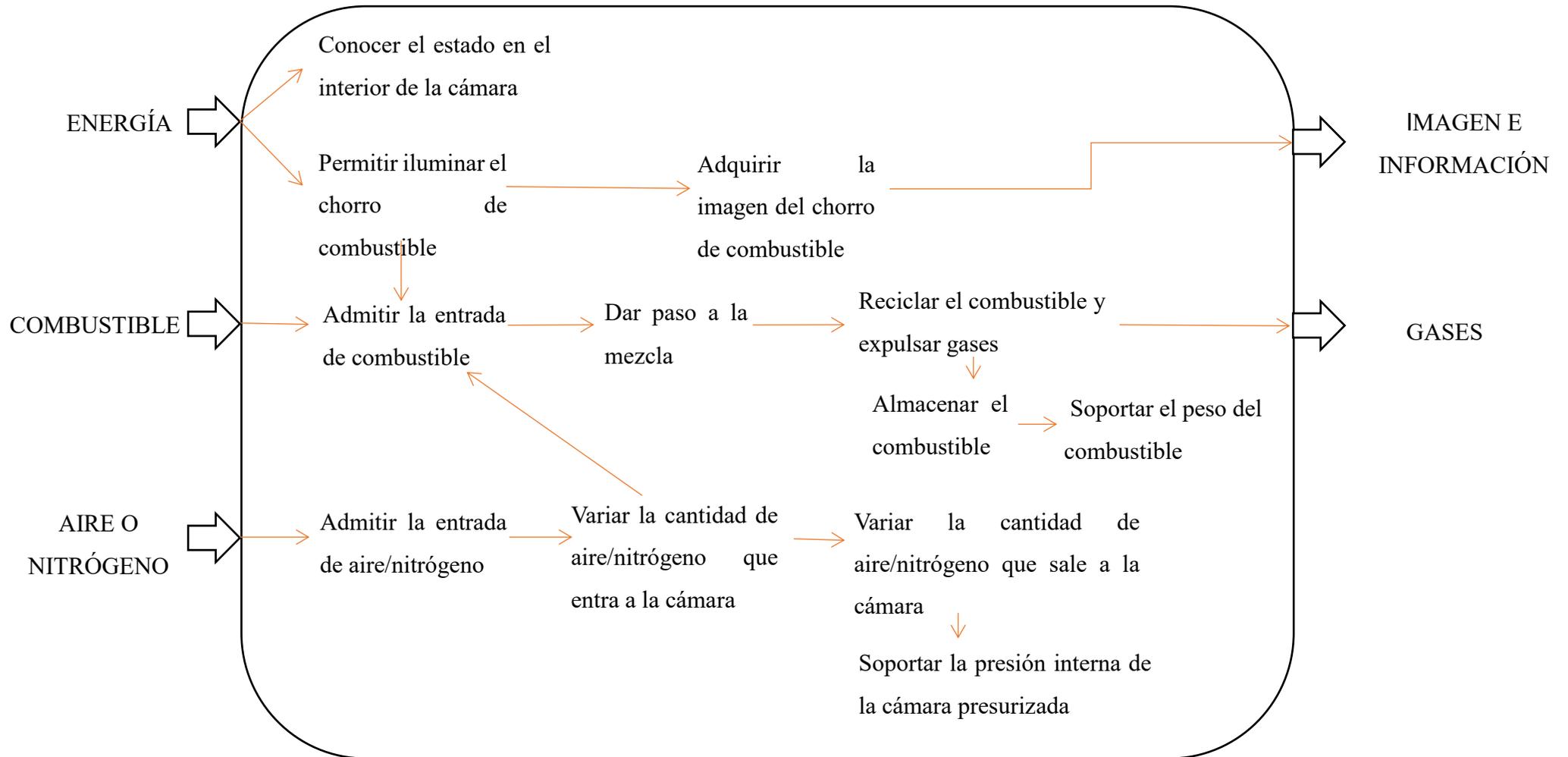


Figura 24. Diagrama de caja transparente.
Determinan las principales funciones que se deben llevar a cabo el (Autores).

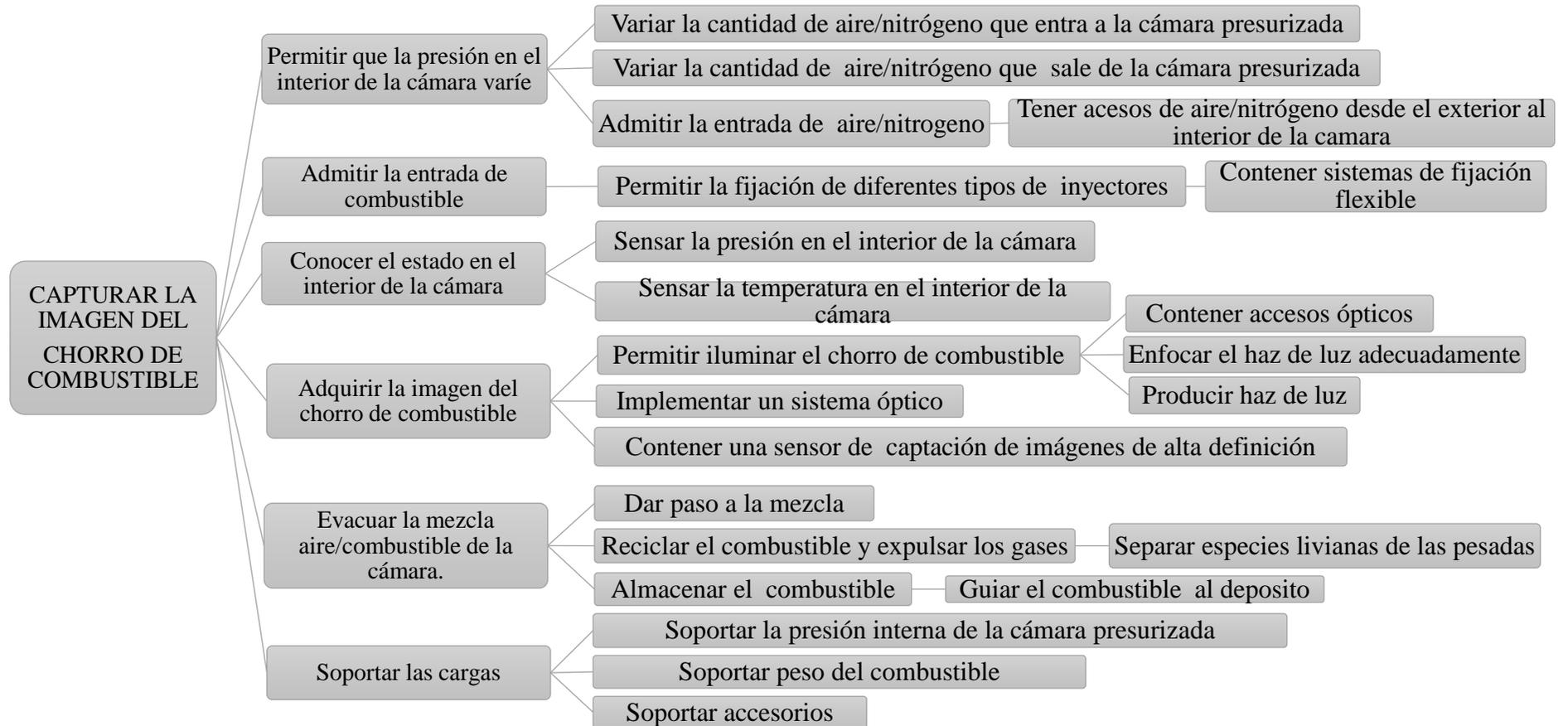


Figura 25. Diagrama funcional.

Se muestra el despliegue de la jerarquía de las funciones principales. (Autores).

De acuerdo a la *Figura 25*, se han definido por medio de la función principal las siguientes funciones críticas, estas permiten aclarar todos los procesos que debe desarrollar al final para dar solución a *objetivo general del producto* según los requerimientos del cliente:

- Variar la cantidad de aire/nitrógeno que entra a la cámara presurizada,
- Variar la cantidad de aire/nitrógeno que sale de la cámara presurizada.
- Tener accesos de aire/nitrógeno desde el exterior al interior de la cámara.
- Contener sistemas de fijación flexible.
- Sensar la presión en el interior de la cámara.
- Sensar la temperatura en el interior de la cámara.
- Contener accesos ópticos.
- Enfocar el haz de luz adecuadamente.
- Producir haz de luz.
- Implementar un sistema óptico.
- Contener un sensor de captación de imágenes de alta definición.
- Dar paso a la mezcla.
- Separar especies livianas de las pesadas.
- Guiar el combustible al depósito.
- Soportar la presión interna de la cámara presurizada.
- Soportar peso del combustible.
- Soportar accesorios.

Las funciones críticas amplifican una visión de desarrollo del producto que se espera obtener, de una manera más clara la función que el producto debe realizar para cumplir los requerimientos. Ahora es posible iniciar métodos que incentiven la generación de conceptos para el desarrollo de un concepto global que abarque el diseño teórico de la cámara presurizada.

4.1.3. **Generación de conceptos**

La generación de conceptos parte del desarrollo de las funciones críticas, en donde se inicia una lluvia de ideas e identificación de productos. Se denominarán conceptos a todas las alternativas que permitan la selección de diferentes componentes que pueden dar solución al objetivo de cada función crítica. En pocas palabras, un nuevo despliegue de las funciones críticas permite el desarrollo de conceptos en donde se analiza los atributos que faciliten una primera selección en la generación de combinaciones potenciales, como se muestra a continuación.

Tabla 1. Generación de conceptos específicos por cada función.

Permitir que la presión en el interior de la cámara varíe	
Variar la cantidad de aire/nitrógeno que entra a la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula de mariposa • Válvula reguladora de presión • Válvula de aguja • Válvula anti retorno • Bomba neumática de membrana • Compresor de pistón • Compresor axial • Compresor radial • Compresor celular • Compresor helicoidal bicelular • Compresor Roots
Variar la cantidad de aire/nitrógeno que sale de la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula de mariposa • Válvula reguladora de presión • Válvula de aguja • Válvula anti retorno
Tener accesos de aire/nitrógeno desde el exterior al interior de la cámara	<ul style="list-style-type: none"> • Tubería • Boquillas • Racor
Permitir la fijación de diferentes tipos de inyectores	
Contener sistemas de fijación flexible	<ul style="list-style-type: none"> • Pernos. • Tornillos. • Bisagras • Pegante • Bridas
Conocer el estado en el interior de la cámara	
Sensar la presión en el interior de la cámara	<ul style="list-style-type: none"> • Columna de agua • Manómetros • Sensor eléctrico de vacío • Transductores
Sensar la temperatura en el interior de la cámara	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor infrarrojo • Termopar
Adquirir la imagen del chorro de combustible	
Contener accesos ópticos	<ul style="list-style-type: none"> • Acrílico • Cuarzo • Metacrilato • Polipropileno • Poliestireno • Policarbonato • Vidrio
Enfocar el haz de luz adecuadamente	<ul style="list-style-type: none"> • Lente biconvexa • Lente planoconvexa • Lente cóncavo-convexas • Lente Fresnel
	<ul style="list-style-type: none"> • Lente bicóncava • Lente planocóncava • Lente convexo-cóncavas
Producir haz de luz	<ul style="list-style-type: none"> • Lámpara de tungsteno • Fluorescente • Lámpara fluorescente compacta • Lámpara de LED • Lámpara de vapor de sodio • Lámpara de vapor de mercurio • Bombillos Halógenos
Implementar un sistema óptico	<ul style="list-style-type: none"> • Lente biconvexa • Lente planoconvexa • Lente cóncavo-convexas • Lente Fresnel • Lente bicóncava • Lente planocóncava • Lente convexo-cóncavas
Contener un sensor de captación de imágenes de alta definición	<ul style="list-style-type: none"> • CMOS • CCD
Evacuar el combustible de la cámara	
Dar paso a la mezcla	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula de mariposa • Válvula reguladora de presión • Válvula reguladora de caudal • Válvula anti retorno
Separar especies livianas de las pesadas	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclón • Filtro • Decantación • Condensación
Guiar el combustible al deposito	<ul style="list-style-type: none"> • Tubería PVC • Tubería metálica • Mangueras
Soportar las cargas	
Soportar la presión interna de la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Sellos • Soldaduras • Tapas • Pernos • Juntas tóricas
Soportar peso del combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Soportes • Vigas • Depósito
Soportar accesorios	<ul style="list-style-type: none"> • Soportes • Tornillos • Pernos

La presente tabla muestra la primera generación de conceptos para cada una de las funciones especificadas en el diagrama de la *Figura 25*. Es decir que cada concepto da una solución general a la función que debe cumplir.

Por medio del este método de diseño creativo (*lluvia de ideas*), propone el incremento del flujo de ideas con el fin de desarrollar la primera combinación de conceptos. Cada combinación que se genera para cada función crítica es única y ofrece una alternativa de componentes para posibles productos finales, realizando la combinación se obtienen 54.765'849.600 combinaciones potenciales para el desarrollo del producto. Por ende, se emplearán diferentes métodos como, el juicio de fiabilidad, la revisión de la tecnología requerida, la matriz pasa – no pasa y la matriz de decisión (pugh), con el fin de desarrollar un filtro que permita la obtención de un concepto global dominante.

4.1.4. Juicios de fiabilidad

Considerando si funciona el concepto a partir de la aprobación según los requerimientos del cliente o si permite la generación de nuevos conceptos, se realiza el siguiente filtro de fiabilidad, en el cual se evalúan los parámetros como la coherencia del producto con la función a realizar, la fiabilidad, la seguridad y en algunos casos si permite el desarrollo y generación de nuevos conceptos.

Dentro de los parámetros evaluados en las funciones de entrada y salida para variar la cantidad de aire/nitrógenos, encontramos que los siguientes conceptos no justifican su aplicación para el desarrollo de un concepto global, es decir, quedan descartados en el proceso por no cumplir los requerimientos del cliente:

- **Válvula mariposa:** como característica principal, interrumpe o regula un flujo; sin embargo, no es recomendable para regular la presión o caudal.
- **Compresor de pistón:** es un dispositivo que no maneja presiones elevadas, lo cual requiere de otras etapas para lograr que el fluido a baja presión alcance la requerida.
- **Compresor axial:** se descarta debido a la cantidad de fluido que necesita para trabajar, la cantidad de piezas que maneja y la potencia necesaria para su funcionamiento.
- **Compresor radial:** a pesar de proporcionar un caudal mayor, requiere altos niveles de velocidad para un buen funcionamiento, además abarca un gran tamaño.
- **Compresor helicoidal bicelular:** está diseñado principalmente para entregar flujo y no presión.

- **Compresor Roots:** es un compresor que entrega flujo de aire, sin embargo, no presenta una reducción de volumen por lo tanto no genera una compresión mayor a 1.5 bar.
- **Válvula de aguja:** esta válvula no tiene aplicación aguas arriba de la cámara presurizada junto a una válvula reguladora de presión, una segunda válvula cumple también la función de la primera dentro de su funcionamiento.
- **Válvula reguladora de presión:** esta válvula debe ser usada aguas arriba de la zona en la cual la presión va a ser controlada, por lo que no es aplicable en la salida de la cámara presurizada.
- **Válvula anti retorno:** se encuentra dentro del sistema del funcionamiento de la válvula reguladora de presión.

En cuanto a la fijación de los diferentes tipos de inyectores, se descarta el pegante como un elemento no apropiado para una fijación flexible, debido a que no permitiría una variabilidad de uso para diversos inyectores. A su vez, las bisagras como un método de fijación flexible consideramos que no permitiría soportar la presión de la cámara.

Teniendo en cuenta que es necesario conocer el estado en el interior de la cámara se descarta los siguientes conceptos, siendo una alternativa no funcional:

- **Sensor eléctrico al vacío:** este sensor trabaja con características por debajo de la presión atmosférica, teniendo en cuenta que la cámara nunca trabajara en estas condiciones.
- **Columnas de agua:** requieren un espacio muy grande para medir la presión. También presentan una menor precisión en la medición.
- **Transductores:** los transductores necesitan de un sistema mecánico que varíe con la presión para realizar la correspondiente medición. Dicho sistema sólo haría más compleja el conjunto de la máquina y requeriría de mantenimiento adicional.

El uso de materiales para los accesos ópticos tiene que tener características que permitan no solo una clara imagen del contenido de la cámara, también es necesario un amplio conocimiento acerca de la resistencia que puede alcanzar el material a altas temperaturas, como a diferentes cargas y además el uso al que puede emplearse. En este caso se descartan los siguientes conceptos de acuerdo a sus propiedades:

- **Vidrio:** el vidrio al tener una red de fisuras a un nivel imperceptible lo hace poco viable, su dureza es media y se comporta plásticamente a altas temperaturas, teniendo una deformación plástica a 600°C.

- **Polipropileno:** es un material que presenta alta resistencias a los agrietamientos por cargas y al reblandecimiento por temperatura, trabaja a una temperatura máxima de 100°C, sin embargo, a bajas temperaturas es un material frágil.
- **Poliestireno:** el poliestireno presenta una variedad de usos en los cuales existe el poliestireno de alto impacto, el cual es fuerte, no quebradizo y capaz de soportar fuertes impactos sin romperse, sin embargo, presenta una característica no translúcida, siendo este un material opaco y poco útil para los accesos ópticos.

Para enfocar la luz adecuadamente en el interior de la cámara, se necesitan lentes positivas que recojan la luz y permitan su enfoque en un punto de interés donde se tomará la imagen. Por lo tanto, las lentes bicóncavas, planocóncavas y convexo-cóncavas no tendrían aplicación en este sector de la cámara.

Producir el haz de luz es de vital importancia para lograr visualizar el chorro de combustible adecuadamente, por lo cual pensando en la fiabilidad del producto se tienen en cuenta características como el color, el tamaño y resistencia, así se descartan los siguientes conceptos:

Lámpara fluorescente: a pesar de una luminosidad bastante fuerte, no da una luz continua, esto depende de la frecuencia de la corriente, por lo cual no es conveniente al generar problemas con la cámara fotográfica en donde el sensor presentaría fluctuaciones de acuerdo a la iluminación, además presenta un gran tamaño.

Lámparas de vapor de sodio: no tienen aplicación en la iluminación de la cámara presurizada porque su luz es amarillenta, tiene un tiempo de encendido de 9 – 10 min y la mitad de tiempo de reencendido.

En la implementación de un sistema óptico, el principal objetivo reside en llevar la imagen lo más clara posible desde el lugar de interés al dispositivo captador de imagen, evitando las aberraciones ópticas que se presentan en este tipo de sistemas. Las lentes negativas no permiten el enfoque de la imagen, es decir, que las lentes bicóncavas, planocóncavas y convexo-cóncavas se descartan para esta aplicación, al igual que la lente Fresnel, ya que su construcción provoca aberraciones en la imagen que afectan negativamente a la calidad.

Para separar especies livianas de las pesadas se descarta un método por decantación y condensación, en la cual el proceso que realiza no cumple las expectativas al separar la mezcla de combustible y aire/nitrógeno, siendo estos un cambio de fases de un estado líquido y gaseoso. De

igual manera los filtros no se consideran un método que logre separar la mezcla, sino limpiar el combustible de contaminantes.

Tabla 2. Conceptos restantes del filtro “Juicios de fiabilidad”

Permitir que la presión en el interior de la cámara varíe		
Variar la cantidad de aire/nitrógeno que entra a la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula reguladora de presión • Bomba neumática de membrana • Compresor celular 	
Variar la cantidad de aire/nitrógeno que sale de la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula de aguja • Válvula anti retorno 	
Tener accesos de aire/nitrógeno desde el exterior al interior de la cámara	<ul style="list-style-type: none"> • Tubería • Boquillas • Racor 	
Permitir la fijación de diferentes tipos de inyectores		
Contener sistemas de fijación flexible	<ul style="list-style-type: none"> • Pernos • Tornillos • Bridas 	
Conocer el estado en el interior de la cámara		
Sensar la presión en el interior de la cámara	<ul style="list-style-type: none"> • Manómetros 	
Sensar la temperatura en el interior de la cámara	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor infrarrojo • Termopar 	
Adquirir la imagen del chorro de combustible		
Contener accesos ópticos	<ul style="list-style-type: none"> • Acrílico • Cuarzo • Metacrilato • Policarbonato • Lente biconvexa • Lente planoconvexa • Lente cóncavo-convexas • Lente Fresnel 	<ul style="list-style-type: none"> • Lámpara de LED • Lámpara de vapor de mercurio • Lente biconvexa • Lente planoconvexa • Lente cóncavo-convexas
Enfocar el haz de luz adecuadamente	<ul style="list-style-type: none"> • Lente planoconvexa • Lente cóncavo-convexas • Lente Fresnel 	
Producir haz de luz	<ul style="list-style-type: none"> • Lámpara de tungsteno – halógena 	
	Implementar sistema óptico	
	Contener un sensor de captación de imágenes de alta definición	<ul style="list-style-type: none"> • CMOS • CCD
Evacuar el combustible de la cámara		
	Dar paso a la mezcla	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula reguladora de presión • Válvula reguladora de caudal • Válvula anti retorno
	Separar especies livianas de las pesadas	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclón
	Guiar el combustible al deposito	<ul style="list-style-type: none"> • Tubería PVC • Tubería metálica • Mangueras
Soportar las cargas		
	Soportar la presión interna de la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Sellos y empaques • Soldaduras • Pernos • Juntas tóricas
	Soportar peso del combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Soportes • Vigas • Depósito • Soportes
	Soportar accesorios	<ul style="list-style-type: none"> • Tornillos • Pernos

La tabla presenta los conceptos restantes de la *Tabla 1*, para cada una de las funciones y sub funciones del producto, después del primer proceso de filtrado. Es notable que basados en este primer filtro se evidencia una reducción considerable, en la que se obtiene un total de 10'077.696 conceptos globales.

4.1.5. Revisión de la tecnología requerida

De acuerdo a la información recopilada en un estado del arte, se realizó el siguiente filtro de acuerdo a conceptos viables para el desarrollo del diseño conceptual.

En el amplio ámbito de cámaras presurizadas, se observan diferentes usos para distintos contenidos a distintas presiones. De acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ASME (American Society of Mechanical Engineers), la cual se encarga de establecer reglas para la construcción de recipientes a presión, los soportes y sus conexiones. La ASME divide sus códigos de acuerdo a la presión del recipiente.

- Menor a 3000 psi (206.8 bar).
- Hasta 10000 psi (689.5 bar).
- Mayor 10000 psi (689.5 bar).

Sin embargo, los recipientes a presión presentan por lo general uniones soldadas, forjadas, uniones con bridas y pernos. Esto con el fin de permitir una mejor sujeción por medio del ajuste. Los sellos son necesarios en las conexiones entre tuberías y en las partes desmontables del sistema a presión, así como el reforzamiento de las paredes del recipiente alrededor de sus conexiones.

Actualmente en la aplicación de sensores se encuentran manómetros, termocuplas y sensores infrarrojos que trabajan a mayores temperaturas y presiones que las que pretende alcanzar la cámara presurizada y cualquier otra parte de su sistema.

Tabla 3. Conceptos específicos restantes después del filtro "Revisión de la tecnología requerida"

Permitir que la presión en el interior de la cámara varíe		Tener accesos de aire/nitrógeno desde el exterior al interior de la cámara	
Variar la cantidad de aire/nitrógeno que entra a la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula reguladora de presión • Bomba neumática de membrana • Compresor celular 		<ul style="list-style-type: none"> • Tubería • Boquillas • Racor
Variar la cantidad de aire/nitrógeno que sale de la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula de aguja • Válvula anti retorno 	Tener accesos de aire/nitrógeno desde el exterior al interior de la cámara	
		Contener sistemas de fijación flexible	<ul style="list-style-type: none"> • Pernos • Tornillos • Bridas

Conocer el estado en el interior de la cámara			
Sensar la presión en el interior de la cámara	<ul style="list-style-type: none"> • Manómetros 	Contener un sensor de captación de imágenes de alta definición	<ul style="list-style-type: none"> • CMOS • CCD
Sensar la temperatura en el interior de la cámara	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor infrarrojo • Termopar 	Evacuar el combustible de la cámara	
Adquirir la imagen del chorro de combustible		Dar paso a la mezcla	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula reguladora de caudal • Válvula anti retorno
Contener accesos ópticos	<ul style="list-style-type: none"> • Acrílico • Cuarzo • Metacrilato • Policarbonato • Lente biconvexa 	Separar especies livianas de las pesadas	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclón
Enfocar el haz de luz adecuadamente	<ul style="list-style-type: none"> • Lente planoconvexas • Lente cóncavo-convexas • Lente Fresnel • Lámpara de tungsteno – halógena 	Guiar el combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Tubería PVC • Tubería metálica • Mangueras
Producir haz de luz	<ul style="list-style-type: none"> • Lámpara de LED • Lámpara de vapor de mercurio 	Soportar las cargas	
Implementar un sistema óptico	<ul style="list-style-type: none"> • Lente biconvexa • Lente planoconvexa • Lente cóncavo-convexas 	Soportar la presión interna de la cámara presurizada	<ul style="list-style-type: none"> • Sellos y empaques • Soldaduras • Pernos • Juntas tóricas
		Soportar peso del combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Soportes • Vigas • Depósito • Soportes
		Soportar accesorios	<ul style="list-style-type: none"> • Tornillos • Pernos

La *Tabla 3*. Conceptos específicos restantes después del filtro "Revisión de la tecnología requerida" presenta los conceptos restantes de la *Tabla 2* después de ser filtrada mediante la revisión de la tecnología requerida, es decir los conceptos que cumplen con el desarrollo de cada función.

Durante el desarrollo del filtro se obtienen 3'359.232 conceptos globales, sin embargo, se han evidenciado algunos conjuntos de conceptos que permitirían la reducción de la cifra por medio de una combinación.

4.1.6. Combinación de conceptos

Para realizar una reducción de conceptos globales se crea una tabla de combinación de conceptos que permite una agrupación de soluciones aplicables a la máquina y a su vez proporcionar una simplificación de conceptos para ser evaluados posteriormente en la Matriz Pasa-No Pasa.

Para realizar la tabla de combinación, se agrupó algunos de los conceptos específicos cuya elección depende de factores que van a ser estudiados y determinados posteriormente. Es así como se decidió agrupar las lentes positivas y ciertas válvulas que son elementales en un sistema presurizado para evitar una extensión mayor en la combinación, dando un total de 4608 conceptos globales. En la *Tabla 4*. Combinación de conceptos. se puede observar la combinación de los tres primeros conceptos globales, resultado de la combinación.

Tabla 4. Combinación de conceptos.

Concepto Global 1	Concepto Global 2	Concepto Global 3
- Válvula reguladora de presión	- Válvula reguladora de presión	- Válvula reguladora de presión
- Bomba neumática de membrana	- Bomba neumática de membrana	- Bomba neumática de membrana
- Válvula de aguja	- Válvula de aguja	- Válvula de aguja
- Válvula anti retorno	- Válvula anti retorno	- Válvula anti retorno
- Boquillas	- Boquillas	- Boquillas
- Manómetros	- Manómetros	- Manómetros
- Ciclón	- Ciclón	- Ciclón
- CMOS	- CMOS	- CMOS
- Acrílico	- Acrílico	- Acrílico
- Sensor infrarrojo	- Sensor infrarrojo	- Sensor infrarrojo
- Lentes positivas	- Lentes positivas	- Lentes positivas
- Pernos	- Pernos	- Pernos
- Bridas	- Bridas	- Bridas
- Soportes	- Soportes	- Soportes
- Depósito	- Depósito	- Depósito
- Tubería PVC	- Tubería metálica	- Mangueras
- Juntas tóricas	- Juntas tóricas	- Juntas tóricas
- Luz LED	- Luz LED	- Luz LED

4.1.7. Matriz Pasa – No Pasa

Para la ejecución de la matriz pasa-no pasa dentro de la evaluación de los conceptos, se plantea una tabla con los requerimientos del cliente contra los conceptos globales, valorando de acuerdo a los componentes que lo conforman. A continuación, se enlistan los conceptos específicos que fueron descartados y los que quedan en consideración posterior.

- **Compresor celular:** el compresor celular, junto con cualquier otro compresor rotativo no es capaz de superar presiones de 4 a 10 bares a pesar de su número de etapas. Estas presiones están por debajo de la presión necesaria del funcionamiento de la cámara, por lo que se descartan.
- **Sensor infrarrojo:** debido a que la medición del sensor infrarrojo es instantánea y además necesitaría un acceso especial para que el láser no se vea afectado por las aberraciones ópticas. Debido a estas consideraciones y la necesidad de un sensor de temperatura que esté en contacto con el aire presurizado, el sensor infrarrojo no aplicaría como instrumento dentro la máquina en diseño.
- **Tornillos:** los tornillos son piezas de unión bastantes efectivas, que necesitan agujeros roscados para la sujeción, sin embargo, no soportan grandes presiones y no ofrecen un factor de seguridad alto en su uso. Los tornillos quedan en consideración para su uso en la unión de accesorios y soportes de los subsistemas, donde su uso se ve debidamente justificado.

- **Policarbonato:** el policarbonato es un material el cual presenta bajas propiedades de transmisión lumínica comprado con el resto de materiales.
- **Soldaduras:** a pesar de que las soldaduras son utilizadas frecuentemente en este tipo de recipientes, las uniones por este método propician oxido y limaduras de hierro en sistemas presurizados al no estar correctamente protegidas. Sin embargo, dentro de la matriz pasa-no pasa, no se descarta. A pesar de que la mayor parte de las piezas de la cámara presurizada deben ser desmontables para permitir el acceso al mantenimiento, la soldadura puede ser usada en la construcción de la cámara y en el refuerzo de las uniones
- **Boquillas:** las boquillas deben permitir el ingreso de aire ambiente y permitir el acople con botellas de nitrógeno presurizado. Tal es el caso de los racores; por lo tanto, se considera posteriormente evaluar los tipos de boquillas que se acoplarán para alimentar la cámara presurizada.

De acuerdo a estas consideraciones en la *Tabla 5*, se desarrolla la siguiente matriz para todos los conceptos globales restantes, en donde para cada requerimiento el color verde relaciona un concepto que pasa, el color amarillo relaciona “tal vez” y el color rojo un concepto que no pasa.

Tabla 5. Generación de la matriz Pasa – No pasa

Requerimientos \ Conceptos	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
La entrada de aire/gases inertes debe ser regulada.	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
La cámara sólo debe permitir el ingreso de combustible y nitrógeno/aire.	Amarillo	Amarillo	Amarillo	Amarillo	Amarillo
La cámara presurizada debe permitir la salida de mezcla.	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
El diseño debe adquirir una clara y definida captura de imagen del comportamiento del chorro inyectado.	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
El diseño debe contener una fuente de iluminación clara del contenido de la cámara.	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
El diseño debe incluir una sección dedicada a la separación de la mezcla de combustible.	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
El combustible debe retornar al depósito.	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
El diseño de la cámara presurizada debe permitir una fácil operación	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo
El acceso para el mantenimiento de la cámara debe ser fácil.	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
La cámara presurizada debe ser confiable y segura.	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

Evaluación de los conceptos combinados en la *Tabla 4*, mediante el filtro denominado “matriz pasa – no pasa”. Verde: Pasa; Amarillo: Tal vez; Rojo: No pasa.

Durante el desarrollo de esta matriz se filtra un total de 540 conceptos globales.

4.1.8. Matriz de Decisión o Método Pugh

Durante el proceso del método del Pugh o matriz de decisión, se tomaron como referencias los siguientes valores respecto a la importancia que se le ha otorgado a cada requerimiento de la máquina, establecidos como pesos según su importancia en el desarrollo funcional de la máquina, siendo evaluados de 1 a 10.

Tabla 6. "Peso" del requerimiento "Matriz de decisión"

Requerimientos del cliente	Peso (1-10)
La entrada de aire/gases inertes debe ser regulada.	7
La cámara sólo debe permitir el ingreso de combustible y nitrógeno/aire.	9
La cámara presurizada debe permitir la salida de mezcla.	7
El diseño debe adquirir una clara y definida captura de imagen del comportamiento del chorro inyectado.	10
El diseño debe contener una fuente de iluminación clara del contenido de la cámara.	9
El diseño debe incluir una sección dedicada a la separación de la mezcla de combustible.	6
El combustible debe retornar al depósito.	6
El diseño de la cámara presurizada debe permitir una fácil operación	9
El acceso para el mantenimiento de la cámara debe ser fácil.	8
La cámara presurizada debe ser confiable y segura.	10

La *Tabla 6* presenta la ponderación de las principales funciones para ser evaluados dentro del siguiente proceso de filtración, llamado método de Pugh.

Para el desarrollo de la matriz Pugh plantea una tabla con los requerimientos del cliente vs los conceptos globales – la ponderación de resultados y el total, valorando en un intervalo de aspectos negativos y positivos ($-1 \leq 0 \leq 1$). A continuación, se enlistan los conceptos específicos que fueron descartados.

- **Boquilla:** la evaluación de este concepto es muy general de acuerdo al nivel de detalle que se ha venido utilizando durante el desarrollo del diseño, generando como una opción más acertada y específica, el uso de racor.
- **CMOS:** este tipo de sensor presenta una mayor complejidad de debido a su diseño de fabricación. Es más lento el procesamiento de la señal capturada. En el área expuesta del sensor entre los fotorreceptores, se encuentran circuitos electrónicos; por lo tanto, requiere ser corregida implementando mayor densidad de integración de componentes y en algunas ocasiones micro lentes que concentran la luz en el fotorreceptor.
- **Lámpara de vapor de mercurio:** a pesar de la buena vida útil, variedad de colores y luminosidad, este tipo de iluminación no alcanza a cumplir con los tiempos de pulsación requeridos para obtener imágenes cuasi-estáticas de la inyección de combustible.

- **Tubería de PVC:** las tuberías de PVC presentan grandes características de presión, sin embargo, no es totalmente funcional en el desarrollo de elementos gaseosos.
- **Tornillos:** su uso como un sistema de sujeción macro en la máquina no se requiere para las presiones de operación. Su uso se verá limitado a aplicaciones secundarias en los subsistemas de la máquina.

El desarrollo y valoración de cada concepto de acuerdo al valor al que corresponde la ponderación facilita la filtración de los conceptos de acuerdo a la importancia de los requerimientos del cliente, donde se ha generado un valor máximo de 80 y equivale a 28 conceptos globales. Sin la necesidad de realizar una combinación de conceptos en la cual se abarca componentes que cumplen una misma función y pueden ser utilizados en conjunto para diferentes tareas, como lo son las vigas, los soportes, las tuberías metálicas y las mangueras. De esta manera se logran abarcar 3 conceptos globales los cuales serán evaluados en la casa de la calidad.

Tabla 7. Conceptos globales para el desarrollo de la casa de la calidad.

Concepto Global 1	Concepto Global 2	Concepto Global 3
- Válvula reguladora de presión	- Válvula reguladora de presión	- Válvula reguladora de presión
- Bomba neumática de membrana	- Bomba neumática de membrana	- Bomba neumática de membrana
- Válvula de aguja	- Válvula de aguja	- Válvula de aguja
- Válvula anti retorno	- Válvula anti retorno	- Válvula anti retorno
- Racor	- Racor	- Racor
- Manómetros	- Manómetros	- Manómetros
- Ciclón	- Ciclón	- Ciclón
- CCD	- CCD	- CCD
- Acrílico	- Cuarzo	- Metacrilato
- Termopar	- Termopar	- Termopar
- Lentes positivas	- Lentes positivas	- Lentes positivas
- Pernos	- Pernos	- Pernos
- Bridas	- Bridas	- Bridas
- Juntas tóricas	- Juntas tóricas	- Juntas tóricas
- Soportes	- Soportes	- Soportes
- Vigas	- Vigas	- Vigas
- Depósito	- Depósito	- Depósito
- Tubería metálica	- Tubería metálica	- Tubería metálica
- Mangueras	- Mangueras	- Mangueras
- Lámpara de LED	- Lámpara de LED	- Lámpara de LED

En la tabla se pueden observar los tres conceptos globales dominantes que serán evaluados en el despliegue de funciones de calidad (*QFD*).

4.1.9. Despliegue de las Funciones de Calidad - QFD

El *Despliegue de las Funciones de Calidad - QFD* es un método para el desarrollo del diseño de ingeniería, el cual permite una conclusión del diseño conceptual para destacar el concepto global dominante por medio de la evaluación de los requerimientos del cliente Vs. las especificaciones de ingeniería, es decir que este método permite un mejor entendimiento del problema desde su concepción estudiando los atributos del producto, lo que el consumidor desea y previsoramente convertirlos en los requerimientos de ingeniería necesarios para satisfacer dichos requerimientos. Además, se puede identificar las variables principales de diseño que utilizará el ingeniero para el desarrollo.

El método del *Despliegue de las Funciones de Calidad - QFD* se divide en 7 secciones para su elaboración, las cuales se definen a continuación

- **Identificación de los clientes:** para el diseño de la cámara presurizada el cliente será la Universidad de San Buenaventura, sin embargo, es un proyecto que va dirigido a toda la industria aeronáutica y automotriz que se encuentren interesados en el desarrollo e investigación en inyectores.
- **Determinación de los requerimientos del cliente:** como se ha venido desarrollando los requerimientos del cliente se establecieron en el inicio del proyecto. Sin embargo, para la QFD están sujetos a una reinterpretación de tal manera que se pueda asegurar que los requerimientos sean claros, concisos y permitan la fluencia en la identificación de las especificaciones de ingeniería. Para este caso, los requerimientos serán los siguientes:
 - Regular la entrada de gases inertes/aire.
 - Presurizar la cámara hermética.
 - Evacuar la mezcla aire/combustible.
 - Adquirir la imagen del combustible inyectado.
 - Enfocar el chorro de combustible inyectado.
 - Iluminar el contenido de la cámara presurizada.
 - Separar la mezcla de combustible.
 - Retorno del combustible al depósito.
 - Fácil operación.
 - Fácil mantenimiento.
 - Alta seguridad y confiabilidad.

- Número mínimo de piezas.
- Estanqueidad de la cámara presurizada.
- **Determinar la importancia relativa:** conociendo los requerimientos de la casa de la calidad en la Tabla 8 se les otorga un valor en función de la importancia relativa (en este caso la del diseñador), sustentado principalmente en la obtención de la imagen y en la seguridad de operación de la cámara presurizada:

Tabla 8. Importancia relativa.

Requerimientos de la casa de la calidad	Peso (1-10)
Regular la entrada de gases aire/nitrógeno	7
Presurizar la cámara hermética	9
Evacuar la mezcla aire/combustible	7
Adquirir la imagen del combustible inyectado	10
Enfocar el chorro de combustible inyectado	10
Iluminar el contenido de la cámara presurizada	9
Separar la mezcla de combustible	6
Retorno del combustible al depósito	6
Fácil operación	9
Fácil mantenimiento	8
Alta seguridad y confiabilidad	10
Número mínimo de piezas	7
Estanqueidad de la cámara presurizada	10

La tabla presenta la importancia relativa de las principales funciones para ser evaluados en el despliegue de la función de la calidad (QFD).

- **Especificaciones de ingeniería:** a partir de los requerimientos del cliente las especificaciones buscan ajustar las peticiones del cliente en características de ingeniería, de tal manera que sirvan de variables de los componentes. Las especificaciones de ingeniería son las siguientes:

- Caudal de entrada de aire.
- Caudal de salida de la mezcla.
- Presión interna de la cámara presurizada.
- Resolución del dispositivo óptico de captura de imagen.
- Tiempo de exposición del sensor.
- Índice de transmisión lumínica de la lente.
- Distancia focal de la lente.
- Eficiencia lumínica de la fuente.
- Distancia focal de iluminación.
- Porcentaje de recuperación de combustible.
- Caudal de combustible.
- Presión del flujo de combustible.
- Numero de pasos para obtener la imagen.
- Tiempo promedio de obtención de la imagen
- Numero de herramientas estándar usadas para el mantenimiento.
- Tiempo medio entre averías.
- Esfuerzos.
- Temperatura interna de la cámara presurizada.
- Peso total.
- Número de piezas que necesitan mantenimiento.
- Perdidas de presión por fugas.
- Factor de seguridad

Las especificaciones de ingeniería se evaluadas en la casa de la calidad indican si es necesario que las características aumenten, disminuyan o sean valores objetivos.

- **Matriz de correlación:** esta matriz relaciona los requerimientos del cliente con las especificaciones de ingeniería utilizando valores de correlación equivalentes a ninguna relación, una relación débil, una relación moderada y una relación fuerte.
- **Objetivos de las especificaciones de ingeniería y la importancia:** en esta sección del QFD se establece valores objetivos para cada uno de los requerimientos de ingeniería. Adicionalmente, se determina la importancia por medio de la suma de las multiplicaciones de los valores de correlación y la importancia relativa del requerimiento del cliente. El cual se compara con el total de los resultados para obtener su importancia relativa.
- **Relaciones entre especificaciones de ingeniería:** el manejo de las variables durante el proceso de diseño puede crear interferencias, es por eso que se determinan las relaciones que existen entre las especificaciones de ingeniería para observar como tienen efectos positivos o negativos entre ellas.

El *Despliegue de las Funciones de Calidad – QFD* para cada concepto global se evalúa en función del material de los accesos ópticos. A su vez, de acuerdo al índice de transmisión lumínica con el

fin de satisfacer los requerimientos que corresponden a enfocar el chorro de combustible y adquirir la imagen del chorro inyectado.

Analizando los 3 resultados del despliegue de las funciones de calidad, se puede observar que el acrílico no se relaciona bien con el requerimiento del cliente, debido a que interfiere con la adquisición de la imagen a medida que el material envejece. Por otra parte, el acrílico arroja un resultado con una importancia relativa mayor que los resultados del metacrilato, pero menor que el cuarzo.

Los resultados del metacrilato correspondientes al concepto global 2, demuestran que afectan dos de los requerimientos del cliente más importantes (adquirir la imagen del chorro inyectado y enfocar la imagen). Ya que, el acabado que se realiza en el material presenta mayores niveles de complejidad, por lo tanto, su importancia relativa es la menor de los resultados.

El cuarzo presenta el mayor de los puntajes comparados con los otros dos materiales, presenta un índice de transmisión lumínica mayor y por lo tanto se relaciona mejor con los requerimientos del cliente de mayor interés.

Se puede concluir que el desarrollo del diseño conceptual arroja como resultado el siguiente concepto global dominante, el cual abarca todos los componentes que debe incluir la cámara presurizada; como se enlista en la Tabla 9. El concepto global contiene todos componentes, que en conjunto y cómo una sola maquina logran satisfacer los requerimientos del cliente y permiten desarrollar adecuadamente cada una de sus funciones críticas, las cuales se exponen en la *Figura 25* que corresponde a el diagrama de funciones.

Tabla 9. Concepto global dominante.

Concepto Global Dominante
<ul style="list-style-type: none"> • Válvula reguladora de presión • Bomba neumática de membrana • Válvula de aguja • Válvula anti retorno • Racor • Manómetros • Ciclón • CCD • Cuarzo • Termopar • Lentes positivas • Pernos • Bridas • Juntas tóricas • Soportes • Vigas • Depósito • Tubería metálica • Mangueras • Lámpara de LED

El concepto global dominante es el objetivo del diseño conceptual y agrupa cada concepto específico necesario para llevar a cabo el diseño o la selección de los componentes necesarios para satisfacer cada función y sub función. Teniendo en cuenta los requerimientos del cliente cada concepto global es la mejor alternativa que se establece para desarrollar las funciones principales, a su vez las funciones críticas y el objetivo general del producto de acuerdo a los resultados obtenidos en el conjunto de conceptos globales:

- La entrada de aire/gases inertes debe ser regulada: por medio del concepto global bomba neumática de membrana se logra regular entregar aire/gases para presurizar el interior del recipiente hermético.
- La cámara sólo debe permitir el ingreso de combustible: para cumplir este requerimiento del cliente se estableció la función secundaria en donde el recipiente debe permitir que la presión en el interior de la cámara varíe, la válvula reguladora de presión permite regular la presión del fluido que entra al recipiente, así se tiene la certeza que el contenido no retornará. Además, el producto debe admitir la entrada del contenido, por medio de la válvula de aguja se puede direccionar el contenido y finalmente el racor y las mangueras permiten una conexión segura en la tapa.
- La cámara presurizada debe permitir la salida de mezcla: a partir de la función crítica en la cual se debe dar paso a la mezcla durante la filtración de conceptos la válvula antiretorno permite direccionar la salida del contenido para que no se genere un retorno, la válvula reguladora de presión permite variar las condiciones internas en el recipiente para variar la presión a la salida. Estos dos conceptos permiten tener un control del paso del caudal de la mezcla a la salida.
- El diseño debe adquirir una clara y definida captura de imagen del comportamiento del chorro inyectado: para cumplir con este requerimiento se establecieron las funciones críticas donde el producto debe implementar un sistema óptico y contener un sensor de captación de imágenes. Por medio de los conceptos globales cuarzo que permite una clara visualización dentro del recipiente y las lentes positivas que ayudan a mejorar la convergencia de la luz para obtener una imagen más clara; la CCD que permite captar la imagen y procesarla para su visualización estudio.

- El diseño debe contener una fuente de iluminación para obtener una clara imagen del contenido de la cámara: el concepto global de las lámparas led permite cumplir con la función de iluminar el chorro de combustible, este tipo de lámparas producen un haz de luz que ayuda a enfocar mejor el detalle de la imagen por medio del posicionamiento de lentes y un sistema óptico adquisitivo de imágenes.
- El diseño debe incluir una sección dedicada a la separación de la mezcla de combustible: desde un principio se estableció cómo la mejor alternativa para cumplir la función de expulsar los gases separando especies livianas de las pesadas el concepto del ciclón.
- El combustible debe retornar al depósito: las tuberías metálicas son la mejor configuración en las alternativas para direccionar el combustible que sale de la separación de la mezcla en el ciclón, una buena configuración permitirá dimensionar y ajustar las tuberías al depósito.
- El diseño de la cámara presurizada debe permitir una fácil operación: los conceptos globales que se escogieron presentan características que facilitan desarrollar las funciones del producto, haciendo que su operación no sea complicada.
- El acceso para el mantenimiento de la cámara debe ser fácil: para tener un buen acceso al mantenimiento del recipiente se establecieron métodos de sujeción cómo bridas y pernos que facilitan desmontar el producto sin inconvenientes.
- La cámara presurizada debe ser confiable y segura: mantener un buen control del contenido del recipiente es de vital importancia, esto debe permitir soportar diferentes cargas cómo lo es la presión interna. Los conceptos globales que se nombra a continuación se destacaron al tener índices de seguridad al momento de desarrollar su respectiva función; las juntas tóricas permiten asegurar la estanqueidad del recipiente evitando cualquier tipo de fugas, pernos presentan características de ajuste y resistencia a la fluencia de acuerdo a las condiciones mecánicas del material y de las características propias en el ajuste, las bridas presentan características en donde de acuerdo a su función y diseño soportan diferentes niveles de presión según las necesidades, el racor permite realizar uniones de mangueras y presentando niveles seguros de ajuste, las tuberías metálicas presentan diferentes propiedades geométricas y del material que facilitan transportar de manera segura un contenido a condiciones de temperatura y presión variables, los manómetros y el termopar son elementos muy importantes para conocer el estado en el interior de la cámara.

4.2. Diseño Preliminar.

El diseño preliminar tiene como fin realizar los cálculos teóricos, dimensionamiento y estimación de los componentes principales de la máquina, en este caso el recipiente a presión. A partir del diseño conceptual.

Culminado el desarrollo del diseño conceptual, se puede dar campo al diseño preliminar, el cual busca realizar el diseño de los componentes principales que permitirán desarrollar correctamente el despliegue de funciones de la máquina,

4.2.1. Diseño Estructural del Recipiente a presión

Para iniciar con el desarrollo detallado de la cámara, es necesario tener en cuenta los requerimientos del cliente, en los cuales se solicita que el recipiente sea versátil, permitiendo tener un fácil acceso a mantenimiento y el acoplamiento de varios inyectores de motores a reacción. Por tal motivo, se realizó la visita a las instalaciones del taller aeronáutico “AeroTecnica, Motores & Sistemas Aeronáuticos”, en la cual, se realizó una recopilación de datos por medio de los manuales de overhaul en diferentes motores a reacción, con el interés de conocer la presión con la cual operan los inyectores y el ángulo de apertura del chorro atomizado con el que trabajan regularmente.

El manual del operador indica que para realizar la verificación del funcionamiento del chorro es necesario realizar unas pruebas que logran simular la operación de los inyectores. En él, se indica la presión con la cual se debe realizar las pruebas de inyección y la inspección del combustible atomizado, esto con el fin de prevenir irregularidades y obstrucciones que conllevan a una incorrecta atomización del chorro. De esta manera se presenta a continuación la información de cada motor a reacción:

- Garrett TPE 310: los inyectores de este motor tienen la particularidad de trabajar con doble flujo de combustible, es decir, tienen una boquilla dual la cual trabaja dos chorros a diferentes ángulos de apertura y que trabajan con dos líneas independientes de combustible. Los inyectores de Garrett trabajan en un rango de presión de 50 (3,4 bar) a 570 psig (39.3 bar), en lo cual durante la atomización los orificios se enfrentan a un ángulo de apertura de 40° hasta 100° dependiendo de la presión del chorro inyectado.



Figura 26. Inyector de un motor Garrett TPE 310. Contiene entrada de combustible y entrada de aire a presión.

- Honeywell T53 – L703: para la serie de motores Honeywell según el manual de overhaul, se realiza una variación de presión para apreciar la variación del chorro de combustible. En este caso, los motores Honeywell tienen dos tipos de inyectores en sus motores, un inyector primario, el que genera la ignición del combustible y el resto lo replica. En el manual se recomiendan diferentes presiones para apreciar los cambios en el ángulo de apertura, así a 25 psig (1,72 bar) se podrá obtener una atomización del combustible con un ángulo de apertura de 60°, a una presión constante de 100 psig (6.9 bar). Se puede apreciar una variación del chorro y apreciar una apertura de chorro entre 72° a 98°, con una presión del chorro de 135 psig (9,3 bar) el ángulo de apertura se estima entre 84° a 98° y finalmente recomiendan evaluar los inyectores a 400psig (27.57 bar) obteniendo su máximo ángulo de apertura del chorro atomizado a 98°.



Figura 27. Inyector de un motor Honeywell T53 – L703.



Figura 28. Inyector de inicio de ignición de un motor Honeywell T53 – L703.

- Pratt & Whitney PT6-3/3B/3BE/3BF/3BG, PT6 T-3D/3DE/3DF, PT6 A-68C: en la línea de motores Pratt & Whitney es muy común encontrar características similares durante la operación de atomización de combustible en sus inyectores. Según las recomendaciones que se aprecian en el manual de overhaul, para las pruebas a inyectores recomienda realizarse a una presión constante de 125psig (8,62 bar). Para evidenciar que el chorro está siendo atomizado correctamente, se corrobora que el ángulo de apertura del chorro es apropiado cuando se encuentra entre 39° a un máximo de 46°.



Figura 29. Inyector de motores Pratt & Whitney PT6.

De acuerdo a la información recopilada del conjunto de inyectores trabajan a un rango de presión de operación entre 50psig (3,44 bar) a 570psig (39,3 bar). Es por ello que, el recipiente debe ser diseñado para soportar la máxima presión con la que operan los inyectores, en este caso para los inyectores de motores Garrett TPE 310 trabajando a una presión máxima de 570psig (39,3 bar). Para este punto se tiene un parámetro de diseño en función de la presión de operación. Ahora es necesario tener en cuenta el tamaño del recipiente, el correcto dimensionamiento permitirá tener en cuenta el contacto que puede ejercer el chorro de combustible con las paredes internas del recipiente, generando una mala captación de la imagen debido a la obstrucción de partículas sobre los accesos ópticos. Por este motivo, se realiza una relación trigonométrica del ángulo de apertura del chorro que es atomizado, con el fin de saber a qué distancia el chorro de combustible haría contacto con las paredes del recipiente en función del diámetro interno, cómo se muestra a continuación:

$$L = \frac{R_i}{2 \sin \alpha_c} \quad (13)$$

Función trigonométrica de la longitud.

De acuerdo a la ecuación (13) tenemos que la longitud se encuentra en función del radio interno del recipiente y el ángulo de apertura del chorro a partir del eje de simetría, como se muestra en la imagen a continuación.

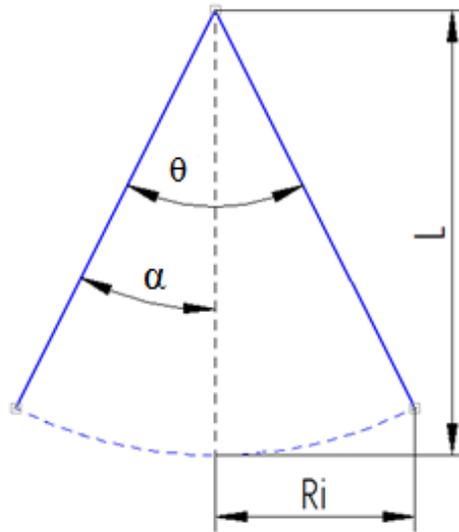


Figura 30. Esquema de apertura del chorro de combustible. Se utiliza como referencia de los datos presentados por la Tabla 10.

De esta manera si se aplica la fórmula para los ángulos de apertura críticos; es decir, el ángulo mínimo y máximo de apertura con el que trabaja el conjunto de inyectores, se podrá tener una idea de la longitud con la cual el chorro realiza el contacto con la pared del recipiente para diferentes diámetros, es decir se analiza el cateto opuesto al ángulo de apertura del chorro, cómo se muestra a continuación:

Tabla 10. Longitud del chorro para $\alpha=19,5^\circ$ y $\alpha=50^\circ$

D (in)	$\alpha=19,5^\circ$		$\alpha=50^\circ$	
	L (in)	L (mm)	L (in)	L (mm)
5	3,74	9,51	1,63	4,14
7	5,24	13,32	2,28	5,8
10	7,49	19,02	3,26	8,29
15	11,23	28,53	4,9	12,43
20	14,98	38,04	6,58	16,71

Se aprecia que durante una prueba en la que el ángulo de apertura del chorro es de 100° , es necesario aprovechar el espacio para provisionar de un acceso óptico que permita captar la imagen de manera clara. Por este motivo el diámetro interno para el recipiente será asumido en función del contacto de chorro inyectado con la pared, observamos en la anterior tabla que la longitud del chorro para el mayor ángulo de exposición se logra un contacto con la pared a un diámetro de 15in, óptimo para el ajuste del espacio en los accesos ópticos, por este motivo en función del

dimensionamiento del recipiente se establece un diámetro interno de diseño de 14 in ($355,6\text{ mm}$), este tamaño permite aprovechar el espacio para inyectores con ángulos de apertura menores a 100° . Dentro del análisis de las condiciones de operación se evalúa el comportamiento de la temperatura en función de la presión de operación máxima con la que podrá trabajar el recipiente, esto de acuerdo a el trabajo de la presión de operación de los inyectores; con el fin de tener una estimación de la temperatura que puede alcanzar el recipiente a presión en caso de que el sistema de alimentación no contenga elementos neumáticos necesarios para acondicionar el aire. El análisis se presenta bajo condiciones atmosféricas hasta una operación máxima de 40 bar, como se muestra a continuación.

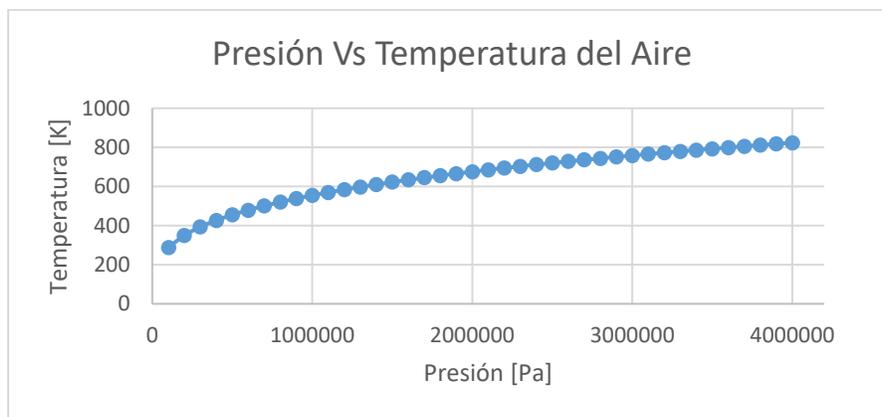


Figura 31. Presión Vs Temperatura del aire.

En la Figura 31. se presenta el incremento de la temperatura hasta el máximo punto crítico de operación posible, alcanzando una temperatura máxima de $823,6\text{K}$. Cabe resaltar que la presión de operación en el interior del recipiente debe variar a un nivel menor que la presión de operación del inyector, cómo se mencionó dentro de la configuración presentada en el diseño conceptual para el concepto global dominante, se tiene como objetivo variar las condiciones internas del recipiente para obtener un correcto flujo del combustible dentro de él.

4.2.1.1. *Calculo del recipiente por presión interna.*

Cómo se mencionó anteriormente, el diseño de los recipientes está sometido a la norma ASME Sección VIII, división I. De recipientes y calderas sometidos a presión, referenciado en las obras “Manual de Recipientes a Presión, Diseño y Cálculo”, de Megyesy y “Diseño y cálculo de Recipientes a Presión”, de León. En las obras se explica el paso a paso de los cálculos y recomendaciones al momento de emplear el diseño de un recipiente sometido a presión, teniendo en cuenta la forma, su operación y condiciones a las cuales se encontrará sometido. En este caso se partirá seleccionando una configuración de recipiente vertical, con el fin de mejorar los estados

de estanqueidad, evitar que el chorro no se vea afectado por la gravedad y permitiendo evacuar mejor el contenido, y de acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente, el manual indica el inicio del diseño efectuándose el cálculo del espesor requerido en el casco y tapas para recipientes de pared delgada, Megyesy (1992) expresa el inicio del diseño calculando el espesor del casco en función de las dimensiones interiores por medio de la ecuación (14). En esta se encuentra en función de la presión de diseño, el dimensionamiento del que se desea el recipiente y las propiedades del material.

$$t = \frac{PR}{SE * 0,6P} \quad (14)$$

La presión de diseño se asume en función de la presión máxima de operación de los inyectores, con el fin de obtener un máximo de operación en donde se permita realizar las respectivas variaciones a las condiciones internas por debajo de la misma, para este caso el trabajo para el conjunto de inyectores corresponde a 570psi lo equivalente a 39,3 bar y para lo cual es necesario tener en cuenta que las primeras 14,7psi de la escala corresponden a la presión atmosférica, asumiremos la presión de operación a 40 bar (4MPa) para trabajar sobre el límite se define por medio de la siguiente ecuación la presión de diseño para el recipiente:

$$P = P_o + P_H + 30psi \quad (15)$$

En este caso la configuración del recipiente vertical requiere sumar a la presión de operación la presión hidrostática del fluido a manejar, en este caso la Naphtha. Para calcular la presión hidrostática es necesario tener en cuenta la altura que va tener el recipiente y a su vez el peso específico del fluido como se muestra a continuación:

$$P_H = P_e H \quad (16)$$

En el manual de diseño de recipientes de León (2001), se recomienda que, si el peso específico del producto es menor que el del agua se usará el peso específico del agua para calcular la presión hidrostática, de esta manera:

$$P_e = \rho g \quad (17)$$

Resolviendo la ecuación (17) tenemos que el peso específico de la Naphtha y del agua son los siguientes:

$$P_{e_{Naphtha}} = \rho_{Naphtha} g = \left(810 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 7946,1 N/m^3 \quad (18)$$

$$P_{e_{Agua}} = \rho_{Agua} g = \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 9810 N/m^3 \quad (19)$$

Podemos observar que el peso específico de la Naphtha es menor con respecto al peso específico del agua, de acuerdo al resultado de la ecuación (18) – (19), por este motivo para dar solución a la ecuación (17) se calcula la presión hidrostática en función del peso específico de agua. Para una altura de torre de 14in (355,6mm) se da solución a la ecuación (16), se obtiene que la solución de la presión hidrostática equivale 0,5059 *psi* (3488,43 *Pa*). Ahora se puede calcular la presión de diseño aplicando la ecuación (15), teniendo como resultado una presión de diseño de 610,50 *psi* (4209290 *Pa*).

La presión de diseño del recipiente cubre un margen de seguridad bastante amplio con respecto a la presión de operación; continuando con los parámetros de entrada para calcular el espesor del casco, el diámetro interno del recipiente equivale a 14in (355,6 mm). Sin embargo de acuerdo a las condiciones de temperatura que puede soportar el material se tiene en cuenta el esfuerzo máximo a tensión y estará en base a la flamabilidad del producto que va contener, en este caso Naphtha que tiene una temperatura de auto ignición a 437°F. Megyesy (1992, P. 157) reúne de la norma ASME, sección II y VIII, una lista de materiales al carbón y de bajo contenido de elementos de aleación denominada propiedades de los materiales, en la lista se muestra la selección del material para los diferentes componentes del recipiente cómo lo es el cilindro, las tapas, las bridas, tornillería y tubería, en este caso la serie SA-515 es una selección apropiada del material para el recipiente por presentar propiedades elevadas en la resistencia a la tensión; de igual manera León (2001) entrega un listado de propiedades a partir de la que denomina “Figura 7”. En la cual se destaca el esfuerzo máximo permisible a tensión que se debe asumir de acuerdo a la temperatura de diseño que se tomará en cuenta a la temperatura de flamabilidad de la Naphtha.

Para el recipiente se usará el grado 65 con un porcentaje de carbón del 0,33% y así se obtendrá mayor resistencia a la tensión, el esfuerzo máximo a tensión para una temperatura de diseño de -550°C (1022°F) es de 20800 *psi* (143410952*Pa*). Para finalizar y poder calcular el espesor requerido de operación para el cilindro del recipiente es necesario tener en cuenta la eficiencia de la soldadura, que en este caso es de 1 para un radiografiado completo. Así si se aplica la ecuación (14), el espesor del cilindro corresponde a $5,6089 * 10^{-3} in$ (0,105mm), este sería el espesor mínimo que se requiere para soportar una presión en el cilindro de 40 bar. Ahora es necesario sumar un margen por corrosión, Megyesy (1992), establece que para todos los recipientes que se van a

ver enfrentados a un producto corrosivo es necesario mantener un margen por corrosión que permita la corrección de imperfecciones que surgen con el tiempo. De este modo el margen por corrosión corresponde a $1/8 \text{ in}$ ($3,175 \text{ mm}$), así el espesor del cilindro del recipiente es de $0,1255 \text{ in}$ (3.18 mm).

De acuerdo al espesor del recipiente se puede calcular los esfuerzos circunferencial y longitudinal que soportaría el recipiente por medio de las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$S_1 = \frac{PD}{2t} = \frac{(610,5059 \text{ psi})(15 \text{ in})}{2(0,1255 \text{ in})} = 33085,48 \text{ psi} \quad (20)$$

$$S_2 = \frac{PD}{4t} = \frac{(610,5059 \text{ psi})(15 \text{ in})}{4(0,1255 \text{ in})} = 16542,72 \text{ psi} \quad (21)$$

Calculado el cilindro del recipiente se puede calcular las tapas. Para la tapa superior se ha escogido el diseño de una tapa plana. De acuerdo a León (2011), el diseño de tapas planas se encuentra en función de dos modos de empleo, las tapas planas soldadas y las tapas planas que se encuentran por sujeción pernada. En este caso se emplea bajo la siguiente ecuación:

$$t_{tp} = \sqrt{\left(\frac{C'P}{SE}\right) + \frac{1.9W hg}{SEd^3}} \quad (22)$$

Para calcular el espesor de la tapa plana se tendrá en cuenta el detalle de unión que se desea, con el fin de mantener un fácil acceso para inspección visual y acceso al interior del recipiente se asumirá la configuración que se muestra en la *Figura 32*.

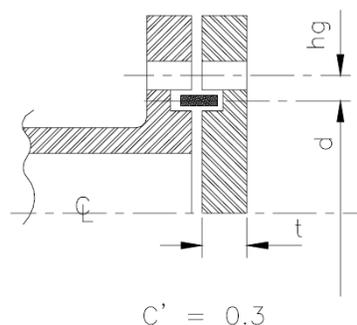


Figura 32. Detalle de unión para tapas planas.

Se presenta el sellado y las perforaciones para pernos (León, 2011).

La *Figura 32* muestra las características de sujeción e indica el uso exclusivo para tapas circulares, para las condiciones de operación la presión será dada por la presión de diseño del recipiente. El valor del esfuerzo a tensión del material seguirá siendo para el acero al carbón SA-515, grado 65,

acorde a la temperatura de diseño y el valor “W” que corresponde a la carga total de los tornillos se encuentra en función de:

$$W = \frac{(A_m + A_b)}{2} S_a \quad (23)$$

Para resolver la ecuación (23) es necesario tener en cuenta el área transversal requerida de los tornillos “Am” que en este caso dependerá del resultado mayor de las siguientes ecuaciones:

$$A_{m_1} = \frac{W_{m_1}}{S_b} \quad (24)$$

$$A_{m_2} = \frac{W_{m_2}}{S_a} \quad (25)$$

Se observa que la ecuación (24) y (25) se encuentra sujetos al esfuerzo máximo permisible del material de los pernos, a la temperatura de diseño y temperatura ambiente respectivamente, de acuerdo a las condiciones de temperatura y operación y a su vez se encuentra sujeto a las condiciones del sello en el empaque que tendrá el recipiente:

$$W_{m_1} = 0.785G^2P + 2b(\pi)GmP \quad (26)$$

$$W_{m_2} = (\pi)bGy \quad (27)$$

Para dar solución a las ecuaciones (26) y (27), se establece el ancho efectivo de contacto del empaque “b” el cual se encuentra en función del ancho básico del empaque “bo”, tomando en cuenta la configuración de la *Figura 33*.

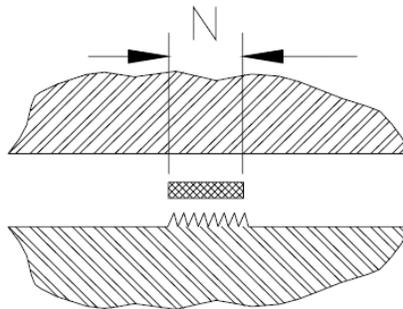


Figura 33. Tipo de cara para el asentamiento del empaque.

Se destaca la geometría del asentamiento del sello para asegurar la estanquidad al interior de la cámara presurizada (León, 2011).

Se calcula el ancho efectivo del empaque de acuerdo a una condición en la cual si el ancho básico del empaque es mayor o menor a ¼ in por medio de la siguiente ecuación:

$$b = b_o, \text{ cuando } b \leq 1/4 \quad (28)$$

$$b = \frac{\sqrt{b_o}}{2}, \text{ cuando } b > 1/4 \quad (29)$$

De la *Figura 33* el ancho del empaque “N” permite calcular el ancho básico del empaque:

$$b_o = \frac{7N}{16} \quad (30)$$

Sin embargo, se sugiere que para las condiciones de sello del empaque y la configuración del ajuste de la tapa con respecto al recipiente se usará el máximo valor del ancho efectivo, es decir que para el ancho básico se usará la condición de la ecuación (28) por lo cual $b = 1/4$ in, así el ancho del empaque N despejando de la ecuación (30) corresponde a 0,57in.

Teniendo en cuenta el ancho efectivo del empaque, León (2001, P.16, Figura.6, Tabla.1) por medio de la tabla 1, reseña la selección del material para el empaque en función de la cara de contacto para así seleccionar la carga máxima permisible en la superficie de sello “y” y el factor del empaque “m”. Para la configuración seleccionada la tabla indica que un empaque de hule con tejido de asbesto insertado con refuerzo de alambre es la mejor opción, en donde, el factor del empaque corresponde a 2,5 y el esfuerzo 2900 lb/pulg². De acuerdo al ancho del empaque es necesario establecer el diámetro en donde se localiza la reacción del empaque “G”, que se encuentra localizado en el centro.

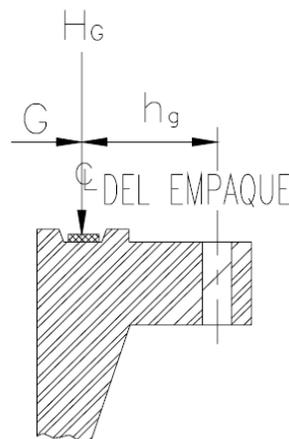


Figura 34. Localización de la carga de reacción del empaque.

Fuente: León, 2011.

De acuerdo con la *Figura 34* y las características del empaque la localización de la reacción G se localizaría a 8,188976378 in. Con todos los parámetros que abarcan las ecuaciones para calcular la carga total de los pernos se da solución a las ecuaciones (26) y (27) obteniendo cómo resultado

$W_{m_1} = 51771,21107 \text{ lb}$ y $W_{m_2} = 18651,66032 \text{ lb}$, ahora para calcular el área transversal requerida es necesario establecer el material del perno y la tuerca de sujeción de la tapa plana, Megyesy (1992, P. 157) sugiere un acero al carbón SA-193 grado B7 como la mejor alternativa para materiales sujetos a altas temperaturas y tornillos pasantes menores a $2 \frac{1}{2} \text{ in}$, de esta manera se desarrolla las ecuaciones (24) y (25) que permiten calcular el área transversal requerida para los pernos donde .

$$A_{m_1} = \frac{110669,8442 \text{ lb}}{62366,2272239 \text{ lb/in}^2} = 0,83 \text{ in}^2 \quad (31)$$

$$A_{m_2} = \frac{18651,66032 \text{ lb}}{73534,13302911 \text{ lb/in}^2} = 0,25 \text{ in}^2 \quad (32)$$

De acuerdo a los resultados de la ecuación (31) y (32) el área transversal requerida de los tornillos será la que resulte mayor, en este caso corresponde a $0,83 \text{ in}^2$, sin embargo para dar solución a la ecuación (23) estableceremos el área neta que en consideración se apreciará el mismo valor que el área requerida, así la carga total de los tornillos es de $61041,86 \text{ lbf}$ ($271527,76 \text{ N}$).

Una vez calculada la carga total de los tornillos, es posible calcular el espesor mínimo requerido de la tapa sin considerar corrosión. Se asumirá una distancia de brazo de palanca “hg” la cual consiste en una distancia radial de la línea de barrenos a la línea de reacción del empaque de $0,73 \text{ in}$ ($18,6 \text{ mm}$) y una eficiencia de soldadura de 0,7 teniendo en cuenta que no se realizará unión por soldadura. Así se obtiene como resultado de la ecuación (22) un espesor para la tapa plana de $0,6 \text{ in}$ ($15,26 \text{ mm}$), el espesor mínimo que se requiere soporta una presión de 40 Bar. Este es el espesor mínimo que debe tener la tapa para su correcta operación, añadiendo el margen por corrosión el espesor de la tapa corresponde a $0,72 \text{ in}$ ($18,42 \text{ mm}$).

Para terminar, se establecerá el cálculo de la tapa inferior, la cual tendrá una configuración toriesférica con el fin de establecer una salida del fluido sin retroceso y permitiendo acoplar una tubería a la salida según las necesidades, en la *Figura 35* se puede apreciar una característica que abarca esta configuración, donde el abombado dependerá de la longitud del arco de la circunferencia.

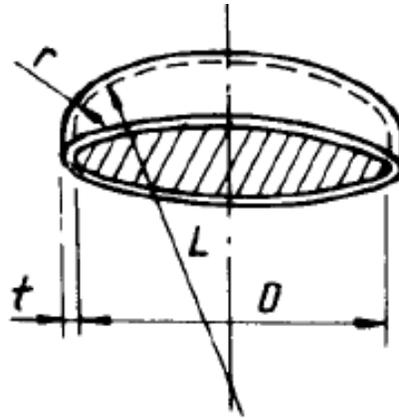


Figura 35. Esquema de la configuración de una tapa tori esférica.

Donde se presentan sus principales variables geométricas. (Megyesy, 1992)

Teniendo en cuenta dicha restricción y asumiendo como máximo ángulo de vértice 30° se puede calcular el espesor mínimo que requiere esta configuración de tapa por medio de la siguiente ecuación:

$$t_t = \frac{PLM}{2SE + P(M - 0,2)} \quad (33)$$

El material que se implementará seguirá siendo el acero al carbón SA-515, grado 65, para el valor del esfuerzo a tensión del material y se usará una eficiencia de soldadura para un radiografiado completo, Megyesy (1992), Para calcular el espesor es necesario tener en cuenta un factor adimensional M, el cual se expresa bajo la relación del radio interior del casquete L y el radio interior de la curvatura r_{ic} . El radio interior del casquete es de 14in, lo que equivale a la longitud del recipiente y el radio interior de la curvatura es de 1in, con esta relación y de acuerdo a unas tablas, Megyesy (1992), expresa diferentes factores, en donde para una relación L/r de 11,63 el factor M será de 1,58. Con estos datos se da solución a la ecuación (33), el espesor para la tapa tori esférica corresponde a 0,3937in (10 mm), siendo este el espesor mínimo que debe tener la tapa.

Debido a que la diferencia del espesor entre la tapa tori esférica y el cilindro es grande, preliminarmente se puede deducir que el cilindro es la parte más débil del recipiente y la cual tiene la mayor tendencia a la falla. Debido a esta razón, y teniendo en cuenta que estos dos componentes se deben unir mediante soldadura, se decide asumir el espesor del cilindro igual al espesor mínimo de la tapa tori esférica. Con este nuevo espesor, los esfuerzos calculados a partir de las ecuaciones (16) y (17) se reducen considerablemente ya que se distribuyen entre un área transversal mayor del cilindro, aumentando la resistencia a la fluencia y consecuentemente el factor de seguridad.

4.2.1.2. *Análisis de Esfuerzos y deformaciones.*

El análisis de esfuerzos principales del recipiente presurizado, se realiza a partir de los cálculos de las ecuaciones (16) y (17) para el nuevo espesor del cilindro. Se considera también la presión interna del recipiente, que a pesar de tener un valor tan relativamente pequeño y ser despreciado en la aproximación para recipientes de pared delgada, se requiere para un análisis completo del estado de esfuerzos y la deformación. La presión interna del recipiente es negativa ya que actúa a compresión, causando una disminución en el espesor del recipiente; mientras los esfuerzos principales causan una dilatación en la longitud y diámetro del recipiente.

El estado general de esfuerzos de un volumen diferencial de la pared del cilindro, da como resultado una carga de tensores puros, por lo que no existen esfuerzos cortantes cuando dicho volumen es alineado con los ejes principales. Gracias a lo anterior y asumiendo un material homogéneo e isotrópico, se puede utilizar la ley de Hooke para realizar un análisis de deformaciones regido por las ecuaciones (34), (35) y (36) presentadas por Budinas y Nisbett (2008), mediante las cuales se construye la gráfica presentada en la Figura 36.

$$\varepsilon_1 = \frac{S_1}{E} - \frac{\nu S_2}{E} - \frac{\nu S_3}{E} \quad (34)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{\nu S_1}{E} + \frac{S_2}{E} - \frac{\nu S_3}{E} \quad (35)$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu S_1}{E} - \frac{\nu S_2}{E} + \frac{S_3}{E} \quad (36)$$

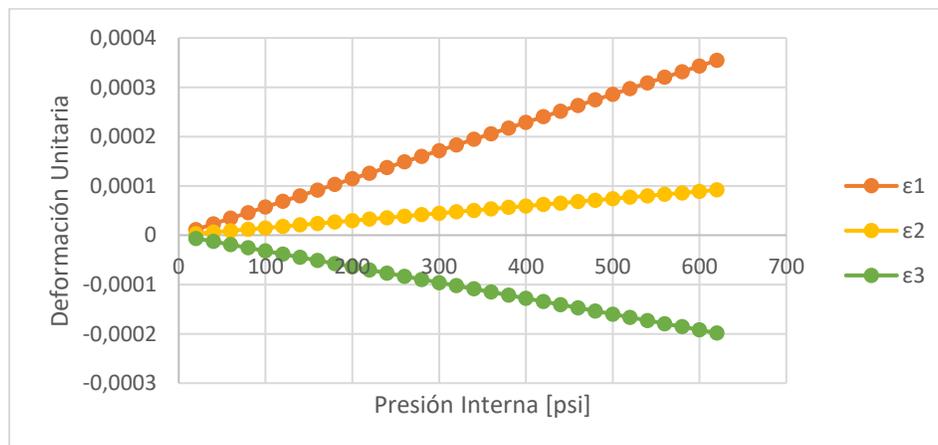


Figura 36. Deformación Unitaria del cilindro Vs Presión interna del recipiente a presión.

En la Figura 36, se muestra la linealidad correspondiente a un material dúctil cargado dentro de su límite elástico. Las deformaciones calculadas corresponden a los ejes principales: circunferencial (tangencial o hoop), longitudinal (axial) y radial. Dichas deformaciones al ser tan pequeñas, se

encuentran lejos de las elongaciones de ruptura para las probetas de material elegido, que rondan el 20% para el esfuerzo último.

4.2.1.3. *Diseño de los pernos*

De acuerdo a la configuración inicial que se estimó para el recipiente la tapa plana y el cilindro están unidos por medio de un sistema pernado. Esto con el fin de realizar una conexión que se pueda desensamblar y a su vez que sea suficientemente fuerte para resistir los esfuerzos de operación. Se empleará el diseño en función de los parámetros geométricos y el paso que se desea para el tipo de rosca. Budinas y Nisbett (2008), presentan la guía para desarrollar el diseño partiendo por la evaluación de la rigidez del perno, para ello se debe tener en cuenta que en este caso los miembros que se están sujetando se encuentran sometidos bajo una fuerza de sujeción que produce tensión en el perno lo que induce una compresión en la tapa y en el cilindro. Por este motivo se deberá asumir una relación de resorte, según Budinas y Nisbett (2008), la relación resorte es la relación entre la fuerza aplicada al elemento y la deflexión que se produce por esa fuerza según la ley de Hooke. De este modo se lograría estimar la rigidez del elemento y la rigidez del sujetador.

La rigidez de un perno consiste en la parte del cuerpo sin rosca y la de la parte roscada, de este modo se iniciará el diseño del perno destacando el agarre de la conexión. El agarre corresponde al espesor total del material sujetado, es decir la sumatoria del espesor de la tapa plana, el cilindro y la arandela; por medio de las dimensiones básicas entregadas por Budinas y Nisbett (2008, P. 1036, Tabla A-32), se presentan las medidas básicas para una arandela según el diámetro del sujetador que para nuestro diseño equivale a $\frac{1}{2}$ in, el dimensionamiento de la arandela corresponde a un diámetro interno de 0,562in, un diámetro externo de 1,375in y un espesor de 0,109in.

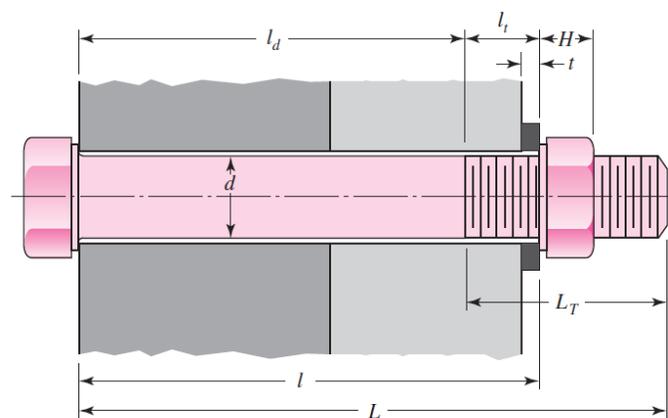


Figura 37. Relación geométrica de la longitud del sujetador. (Budinas y Nisbett, 2008)

Sin embargo, es necesario tener en cuenta el espesor de la tuerca, esta permitirá tener una idea de la longitud ideal del perno, para este caso *Budinas y Nisbett* (2008, P. 1035, Tabla A-31) permite recopilar el espesor de la tuerca y el ancho de acuerdo al diámetro del sujetador, para el diseño se empleará un ancho de tuerca equivalente a 7/16in. Si se asume que la sumatoria del agarre con respecto a dos veces el espesor de la tuerca se obtiene que la longitud ideal del perno equivale a 3,73in (94,84mm). Se estimará la longitud roscada L_T del sujetador por medio de la ecuación (37), que se encuentra bajo la restricción de sujetadores menores a 6in de longitud, teniendo como resultado una longitud de 1,25in (31,75mm)

$$L_T = 2d_p + \frac{1}{4} \quad (37)$$

La longitud de la parte útil sin rosca (l_d) se calcula por medio de la resta entre la longitud roscada y la longitud de sujetador, teniendo una longitud de 2,48in (63,09mm). La longitud de la parte que es roscada (l_t) se define cómo la resta entre el agarre y la parte útil sin rosca, lo cual equivale a 0,125in(3,175 mm). Este dimensionamiento del perno permite dar partida al cálculo de la rigidez del perno y a el cálculo de la relación resorte; por medio del cálculo de la rigidez del perno cómo se muestra en la ecuación (38), esta ecuación se encuentra en función del área de la parte roscada y el área de la parte sin rosca.

$$k_b = \frac{A_d * A_t * E}{A_d * l_t + A_t l_d} \quad (38)$$

Para calcular el área de la parte sin rosca se aplica la ecuación (39) que se encuentra en función del diámetro del sujetador, así se tiene que, el área de la parte sin rosca es de $0,1963in^2$ ($126,644 mm^2$), ahora es necesario estimar el área de la parte roscada y el número de rosca por pulgada en donde *Budinas y Nisbett* (2008, P. 399, Tabla 8-2) muestra la designación y área de roscas unificadas para tornillos de rosca gruesa y fina, teniendo en cuenta el diámetro del sujetador el área de la parte roscada para una rosca fina es de $0,1599in^2$ ($103,161mm^2$), el número de rosca por pulgada es de 20 y el paso es de 1/10in.

$$A_d = \pi \frac{d_p^2}{4} \quad (39)$$

Ahora se cumplen con todos los parámetros geométricos para poder calcular la rigidez de la ecuación, para dar solución se evalúa bajo un módulo de elasticidad de 27000 ksi, lo que da como resultado una rigidez del perno de $2010,0282 klbf/in$. La relación resorte del perno se muestra en la ecuación (40), para esta ecuación el módulo de elasticidad según *Budinas y Nisbett* (2008,

P. 1027, Tabla A-24) estará en función de un aluminio 2017 presentando una buena resistencia a la fatiga.

$$k_m = \frac{0,5774\pi * E * d_p}{2 \ln \left(5 \frac{(0,5774 * l) + (0,5 * d_p)}{(0,5774 * l) + (2,5 * d_p)} \right)} \quad (40)$$

La relación resorte da como resultado 4099,097 *klbf/in*, esto permite evaluar la constante de rigidez cómo se muestra en la ecuación (41), esto con el fin de estimar el número de pernos que se requiere para la sujeción de los dos elementos cómo se muestra en la ecuación.

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (41)$$

El resultado de la constante de rigidez es de 0,329, ahora se calculará la precarga que aplica el perno con el fin de completar los parámetros que evalúan el número de pernos.

$$N_p = \frac{C * n * p}{(S_p * A_t) + F_i} \quad (42)$$

Es necesario tener en cuenta la resistencia del material y la parte sin rosca como se muestra en la ecuación.

$$F_i = 0,75(S_p * A_t) \quad (43)$$

La resistencia a la tensión del material del perno es de 125ksi, dando solución a la ecuación (43) tenemos que la precarga equivale a 14990,6psi (1,03Pa). Evaluando la ecuación (42) para un factor de carga de 1 se obtiene que el número de pernos para la sujeción de la tapa y el cilindro es de $6,58 * 10^{-6}$. Al tener un resultado tan reducido del número de pernos se concluye que el material y los esfuerzos a los cuales van a estar sometidos los pernos no van a permitir una fluctuación del material al enfrentarse a la presión de operación del recipiente permitiendo tener una configuración mínima para la sujeción.

4.2.1.4. **Registros**

En el desarrollo de los recipientes sujetos a presión, cuyo interior contenga aire comprimido y se encuentren sometidos a corrosión interna debe estar provisto de un registro de inspección que permita ser revisado y limpiado. En esta ocasión, la configuración de la tapa superior del recipiente permite el control del mantenimiento; sin embargo, es necesario la instalación de una sección bridada con accesos ópticos para la obtención de la imagen del chorro de combustible y de igual manera para la evacuación del contenido en el recipiente.

De acuerdo al manual de recipientes Megyesy (1992), inicia la selección de la brida partiendo del tipo de saliente que se va implementar en el recipiente. En este caso, se establecerá la saliente que abarcará la salida del combustible en la parte inferior de la tapa cónica, sea para una brida de cuello soldable o una brida deslizable, para la comodidad del desarrollo del registro se seleccionará la configuración deslizable, León (2001, P.55, Figura 35), se presenta la mínima extensión de acuerdo al diámetro nominal del tubo que en consideración se establecerá de 4in (102 mm) y de acuerdo a la presión de diseño la saliente corresponde a 8in (203 mm) cómo se muestra en la *Figura 38*.

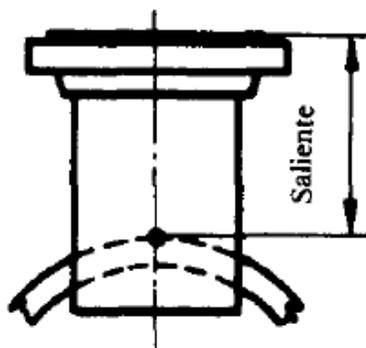


Figura 38. Saliente usando brida slip-on (Megyesy, 1992).

Ahora se establecerá las dimensiones del registro, es necesario tener en cuenta que el registro abarcará un área del cilindro del recipiente es por eso que se ve en la necesidad de evaluar si el recipiente requiere un parche de refuerzo para complementar la sección que se ha quitado para hacer la abertura. Este refuerzo puede ser un parche adicional o formar parte del recipiente. Sin embargo, no es necesario reponer toda la sección que se quitó sino la que requiere en el recipiente de acuerdo a las condiciones de operación siempre y cuando el espesor requerido del recipiente en la abertura es menor que en otros puntos del casco del recipiente. Debido a que la placa que se emplea en la boquilla es por lo general de mayor espesor que el que se requiere por calculo y se puede seleccionar en función del diámetro nominal escogiendo el espesor nominal de la pared, por este motivo se tendrán en cuenta los siguientes parámetros de diseño en función de las características dimensionales de la boquilla.

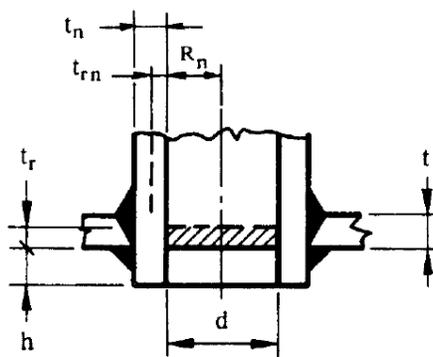


Figura 39. Esquema de las características geométricas de la conexión de la boquilla y el recipiente. (Megyesy, 1992)

Se establece cual es el diámetro externo que corresponde al diámetro nominal, en este caso para la boquilla “d” de 4 in se indica que el diámetro exterior es de 4,5in (114,3 mm) así el espesor nominal de la pared de la boquilla “ t_n ” es de 0,5in (12,7 mm), teniendo en cuenta esta consideración se puede calcular la extensión de la boquilla hacia el interior del recipiente “h” asumiendo el espesor nominal sin el margen de corrosión, es decir que $t_n = 0,375$ in (9,52 mm), de esta manera la extensión de la boquilla se puede calcular de la siguiente manera.

$$h = 2,5t_n = 2,5 * 0,375in = 0,93in \quad (44)$$

El espesor requerido de la pared de la boquilla se rige por la ecuación para recipientes cilíndricos, en este caso se encontrará en función del diámetro nominal y el máximo esfuerzo a tensión del material, dentro del listado de materiales que se aconsejan para los accesorios de boquillas y bridas se establecerá el acero SA-53-B el cual opera para una temperatura de diseño entre -20 (-29°C) a 650°F (343°C) y su esfuerzo máximo a tensión es de 15000psi (1034 bar), aplicando la ecuación el espesor requerido de la pared de la boquilla se puede observar en la ecuación (45).

$$t_{rn} = \frac{(610,51235553 \text{ psi})(2in)}{(15000psi)(1) * 0,6(610,51235553 \text{ psi})} = 0,083in \quad (45)$$

El área transversal requerida para el refuerzo en el casco se encuentra en función del área requerida en el casco para lo que se restan las áreas del exceso que hay en la pared del recipiente “ A_1 ” y el que hay en la pared de la boquilla “ A_2 ”, la extensión interior de la abertura “ A_3 ” y el área del metal de la soldadura “ A_4 ”. Si la suma de las áreas disponibles para esfuerzo es igual o mayor que el área que debe reponerse, la abertura no necesitará de un refuerzo de lo contrario debe complementarse la diferencia, el área transversal que abarcará la boquilla se evalúa a continuación.

$$A = d * t_r = 4in * 0,1257668712in = 0,503in^2 \quad (46)$$

Ahora se analizará el área de los excedentes iniciando con el are del espesor de la pared del recipiente que se encuentra en función del espesor requerido del casco, el espesor nominal y el espesor real del casco, asumiendo el resultado mayor entre las siguientes ecuaciones.

$$A_{1_1} = (t - t_r)d = (0,5in - 0,1257668712in) * 4in = 1,49in^2 \quad (47)$$

$$A_{1_2} = (t - t_r)(t + t_n)2 \quad (48)$$

$$A_{1_2} = (0,5in - 0,1257668712in)(0,5in + 0,375in) * 2 = 0,65in^2$$

En este caso usaremos el resultado de la ecuación (47) para el área del espesor excedente de la pared del recipiente, ahora el área del excedente de la pared de la boquilla será el resultado menor entre las siguientes ecuaciones.

$$A_{2_1} = (t_n - t_{rn})5t = (0,375in - 0,08343927575in) * 5(0,5in) = 0,72in^2 \quad (49)$$

$$A_{2_2} = (t_n - t_{rn})5t_n = (0,375in - 0,08343927575in) * 5(0,375in) = 0,54in^2 \quad (50)$$

El área del excedente de la pared de la boquilla será el resultado de la ecuación (50), ahora el área de extensión de la boquilla hacia el interior se encuentra en función del margen de corrosión por el espesor nominal de la pared y la extensión de la boquilla aplicando la siguiente ecuación.

$$A_3 = t_n * 2h = (0,375in)(2 * 0,9375in) = 0,7in^2 \quad (51)$$

Finalmente, el área de la soldadura del filete interior se encuentra en función del tamaño de cordón de soldadura que por defecto corresponde a 0,375 in (9,5 mm) y el área será el cuadrado de este valor teniendo como resultado 0,14in² (90,7 mm²). Realizando la sumatoria de los resultados del área excedente tenemos que es 3,027in² (1953,5 mm²). Si se tiene presente el resultado de la ecuación (46) el resultado obtenido de la sumatoria es mayor que la requerida para el refuerzo, es por esta razón que el recipiente no necesita de un refuerzo adicional.

4.3. Diseño Detallado

En este módulo se presenta la culminación de los pasos planteados por la metodología de diseño implementada en el proyecto. Se analiza la condición máxima de operación del recipiente por medio de criterios de falla, se realiza el modelamiento de los componentes en el software CATIA y se evalúa el comportamiento por medio de ANSYS Workbench. También se realiza la selección de componentes del sistema óptico adquisitivo y los sensores, los pasos propuestos de manufactura

y ensamble del recipiente y las consideraciones necesarias para el diseño y acople del sistema neumático asociado.

4.3.1. Diseño detallado del recipiente a presión

4.3.1.1. *Análisis de criterios de falla*

El material SA-515 gr 65 presenta las características de un material dúctil, debido a que la deformación de fluencia es mayor a 0,05%, Budinas y Nisbett (2008). Es por eso que se pueden utilizar los criterios de falla de Tresca y Von Misses para predecir la fluencia del cilindro, la parte más débil del recipiente a presión. El criterio de falla por buckling queda descartado debido a que sólo se presenta bajo fallas compresivas.

En el caso de la teoría del esfuerzo cortante máximo (ECM), o teoría de Tresca, un material cargado falla cuando el esfuerzo cortante máximo generado alcanza un medio del esfuerzo de fluencia, ya este es calculado para un esfuerzo a tensión; y teniendo en cuenta que el esfuerzo cortante máximo que se puede generar corresponde a la mitad de la diferencia entre el esfuerzo principal máximo y mínimo, se presenta la ecuación.

$$\frac{S_1 - S_3}{2} < \frac{S_y}{2} \quad (52)$$

Al realizar los cálculos correspondientes de la Ecuación (10), se observa que el máximo esfuerzo cortante generado es de 12240 *psi* (84 *MPa*), frente a los 34800 *psi* (450 *MPa*) de esfuerzo de fluencia, dando un factor de seguridad de 2.84 por medio de este criterio de falla.

El criterio de falla de la energía de distorsión o de Von Misses, está basado en la teoría de que un material falla cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza la energía de deformación de la resistencia a la fluencia en tensión o compresión del mismo material. Este criterio de falla utiliza un esfuerzo equivalente o efectivo calculado a partir de los tres esfuerzos principales, que es comparado con el esfuerzo de fluencia por medio la Ecuación (53). A partir de la ecuación se logra establecer que el esfuerzo de Von Misses es 10605 *psi* (73 *MPa*), al compararlo con el esfuerzo de fluencia da un factor de seguridad de 3.28.

$$\sqrt{\frac{(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2}{2}} < S_y \quad (53)$$

Por medio de los criterios de falla aceptados para materiales dúctiles, se logra establecer que el recipiente a presión soporta las condiciones de operación estáticas esperadas durante la presurización máxima.

4.3.1.2. Modelamiento del recipiente en CATIA

Se iniciará presentando el modelamiento que se realizó para el cilindro de acuerdo a los resultados presentados en el diseño preliminar y en función del análisis estructural. El cilindro se ajusta a una brida, esto en función del acoplamiento de la tapa plana, se realiza por medio del ajuste soldado con una brida slip-on. El espesor del recipiente es de 0,3937in (≈ 10 mm), y cuenta con dos perforaciones paralelas para integrar los accesos ópticos con un diámetro de 5 in (127 mm), cuenta con una distancia de desde el centro de la circunferencia al borde del recipiente de 5,256in (133,5 mm), con el fin que los accesos ópticos no tengan contacto con los pernos en el ajuste de la tapa plana.

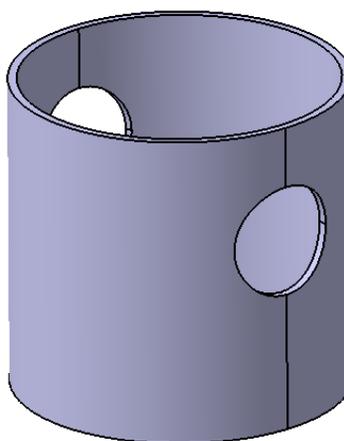


Figura 40. Diseño en CATIA del cilindro del recipiente.

El dimensionamiento de la brida “*Slip on*” de 150 lb se basa en la selección del componente en función del diámetro nominal del cilindro, su espesor es de 2,2 in y el espesor de la ceja para el acoplamiento pernado es de 1,31 in. La brida tiene 12 orificios de 0,5 in para los pernos.

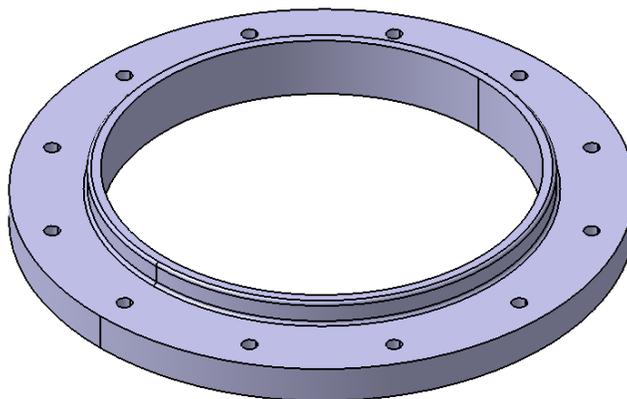


Figura 41. Modelamiento en CATIA de la brida.

La tapa plana cuenta con una ceja macho de 0,2 in (5,08 mm) de espesor y 0,1 in (2,54 mm) de extrusión, cuenta con 12 agujeros para el acople pernado de 0,5in (12,7 mm) de diámetro.

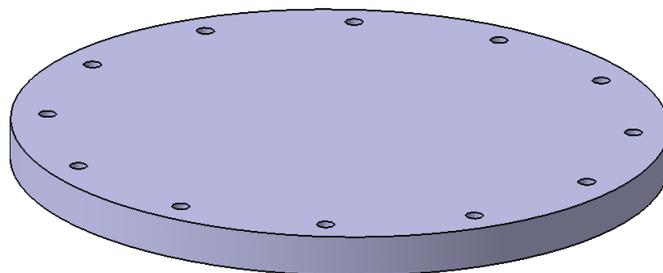


Figura 42. Diseño en CATIA de la tapa plana.

La tapa toriesférica tiene 15 in (381 mm) de diámetro y se une al cilindro por medio de soldadura a tope.

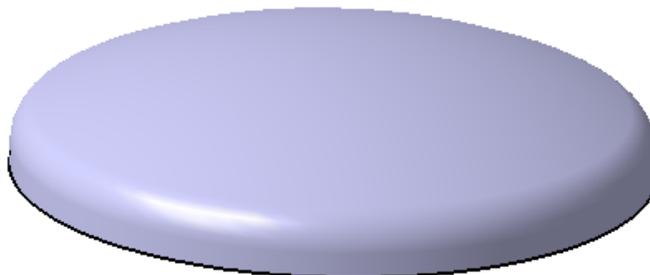


Figura 43. Diseño en CATIA de la tapa cónica.

El acceso óptico se compone de 12 piezas: el cuerpo del acceso, el retenedor, 4 tuercas, 4 vástagos, dos empaques y un vidrio de cuarzo. Este ensamble presenta la característica de ser sujeto por medio de un esparrago (prisionero) que aprisiona el cristal de cuarzo con los sellos entre el retenedor y el cuerpo. El cuerpo tiene una sección roscada para el acoplamiento con los espárragos y se sujeta al cilindro por medio de soldadura. El cuerpo y el retenedor tiene un diámetro de 5 in (127 mm) El cuarzo es de 80mm de diámetro y tiene un espesor de 10mm, la altura del cuerpo es de 67mm y el retenedor tiene una altura de 20mm. Estas dimensiones son aproximaciones a partir de un producto de la empresa Jacoby-Tarbox[®], una división de ©Clark-Reliance Corp. y se encuentran en función de la norma UG-44 de la ASTM.

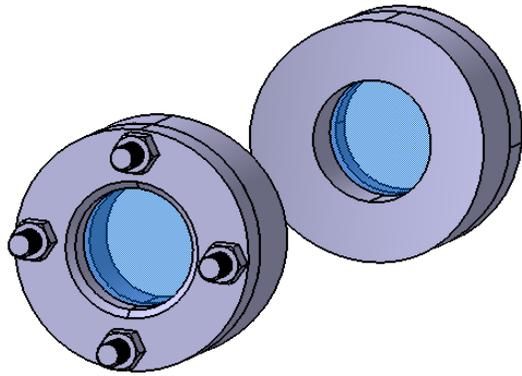


Figura 44. Diseño en CATIA del acceso óptico

El perno cómo se estableció en el diseño preliminar es de cabeza hexagonal, Budinas y Nisbett (2008. P.1033, Tabla A-29) enlista las dimensiones del tamaño de las cabezas cuadradas y hexagonales para pernos cómo se muestra en la Figura 45.

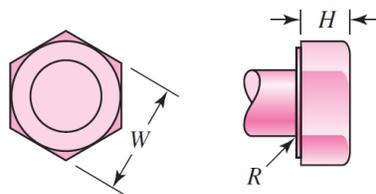


Figura 45. Dimensiones de la cabeza hexagonal de un perno. (Budinas y Nisbett, 2008)

Se establecen parámetros de dimensionamiento del perno, la tuerca y la arandela, con el fin de facilitar la sección de la pieza. De acuerdo a la *Figura 45*, el ancho de la cabeza para un diámetro de ajuste del perno de media pulgada corresponde a $\frac{7}{8}$ in (22,22mm), el espesor es de $\frac{11}{32}$ in (8,73mm), estas medidas corresponden a una configuración de cabeza de tipo pesada. El paso para esta rosca es de $\frac{1}{10}$ in (2,54mm).

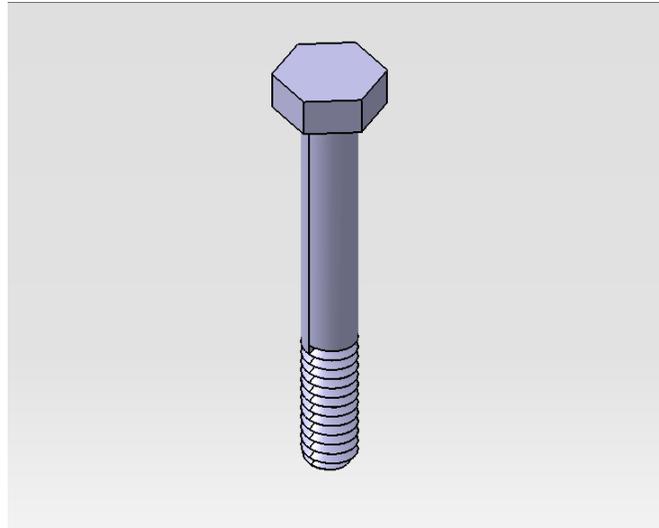


Figura 46. Diseño en CATIA del cilindro del perno.

En el modelamiento de la tuerca hexagonal se tomó un paso de $\frac{1}{10}$ in (2,54mm), para la rosca invertida, Budinas y Nisbett (2008. P.1035, Tabla A-31) el ancho de la tuerca corresponde a $\frac{3}{4}$ in (19,05 mm) , el espesor es de $\frac{7}{16}$ in (11,11 mm) . En la Figura 48 se muestra la representación de la arandela, que como se mencionó en el diseño preliminar del perno tiene un diámetro interno de 0,562 in(14,274 mm), un diámetro externo de 1,375 in (34,925 mm) y un espesor de 0,109in(2,7686 mm).

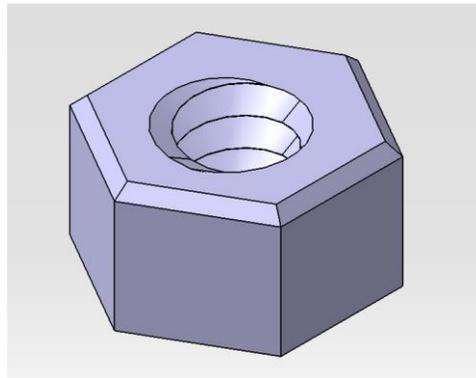


Figura 47. Diseño en CATIA de la tuerca.

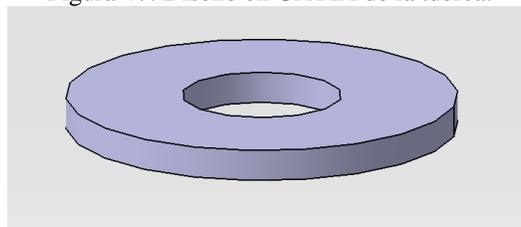


Figura 48. Diseño en CATIA de la arandela.

Por último, se presenta todos los componentes del recipiente en un ensamble cómo se muestra en la Figura 49.



Figura 49. Ensamble en CATIA del recipiente.

4.3.1.3. *Análisis estructural en ANSYS Workbench*

En esta sección se presenta el análisis estructural del recipiente que estará sometido a presión interna. La simulación en la herramienta Workbench tiene como objetivo analizar el comportamiento estructural bajo una condición máxima de operación, con el fin de comprobar si el diseño del recipiente y el sistema de sujeción seleccionado soportan las condiciones de trabajo. Se inicia estableciendo las características del enmallado del recipiente y posteriormente se realizan las restricciones estructurales para el ajuste de la simulación. Los resultados obtenidos se corroboran por medio del análisis estructural de los esfuerzos a los que se encuentra sometido.

El primer análisis corresponde a la simulación estructural para el recipiente, en función del espesor requerido para el correcto funcionamiento del recipiente, que corresponde a 0,1255 in (3,18 mm). Las secciones que se analizarán se encuentra en función del esfuerzo a presión en el que se encuentran las paredes internas del recipiente. Los datos son tomados a través de la sección del refinamiento de malla, inicialmente el mesh inicial con 125.247 nodos y 90.043 elementos, como se muestra en la Figura 50. Primer refinamiento de malla.

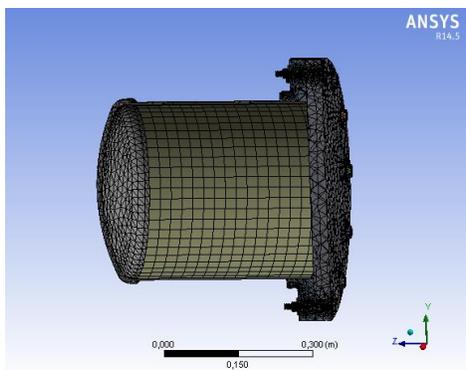


Figura 50. Primer refinamiento de malla.

Se establece el análisis a partir de un soporte fijo localizado en la tapa toriesférica del recipiente, ya que este es el lugar donde se debe ubicar el soporte de anclaje al suelo; en el interior del recipiente se aplica la presión máxima de operación que equivale a 4 MPa, con el fin de evaluar el comportamiento a presión constante de la máxima presión permisible, cómo se muestra en la Figura 51, respectivamente.

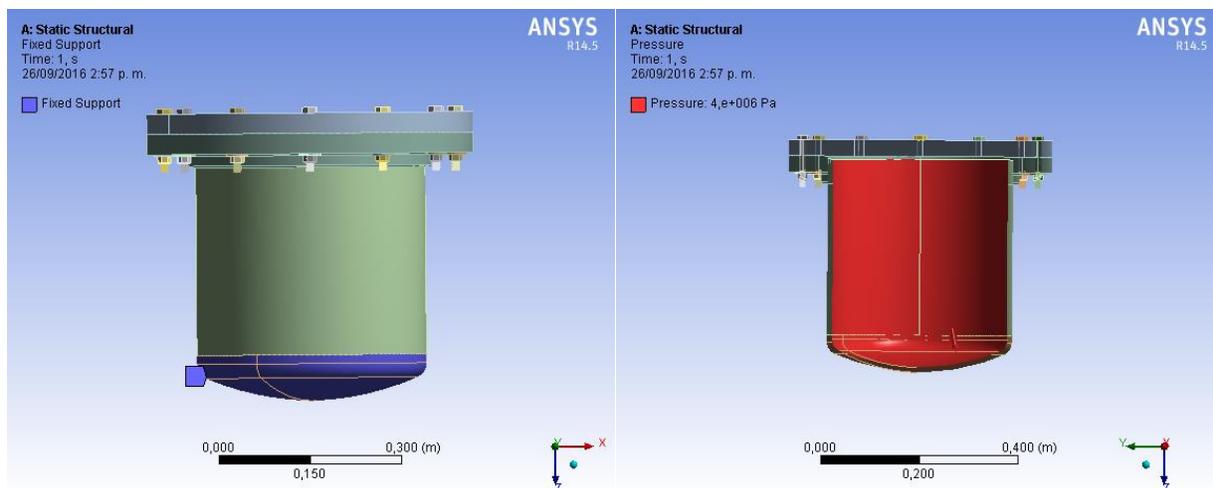


Figura 51. Soporte fijo y presión interna en el conjunto del recipiente.

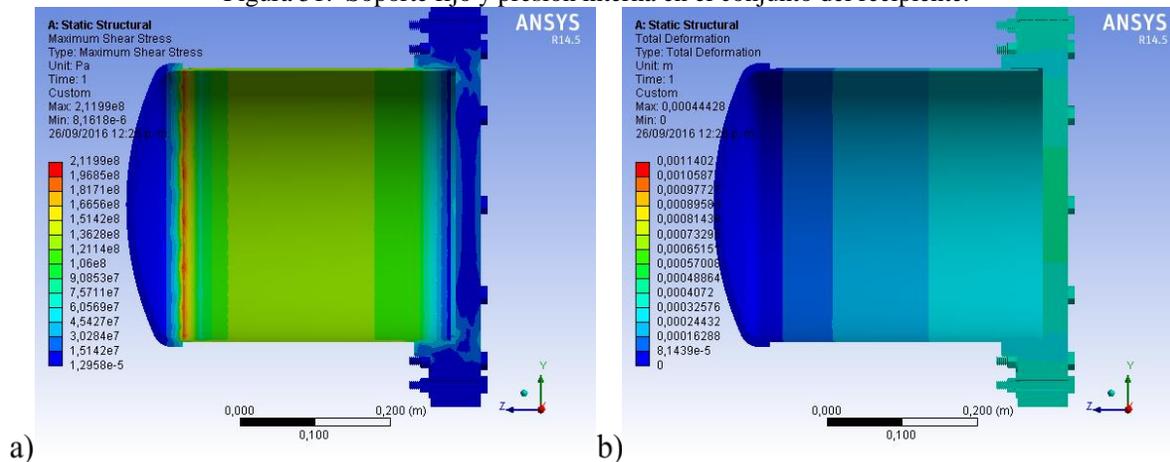


Figura 52. a) Máximo esfuerzo cortante y b) Deformación total del recipiente.

En la Figura 52 podemos observar que el máximo esfuerzo cortante, que es de 21,199MPa y la deformación máxima que alcanza el recipiente es de 0,00044mm, lo que demuestra que el recipiente no sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material. En la Figura 53 se evalúa el Factor de seguridad para el esfuerzo que enfrenta el recipiente durante la operación. Se pueden observar que la zona donde se evidencia menor factor de seguridad se encuentra en el cilindro, esto se debe a que tiene el espesor mínimo requerido para su funcionamiento, por este motivo, el punto de operación máxima el cilindro sufre su mayor resistencia a la ruptura debido a los momentos que genera el esfuerzo en las uniones soldadas. Es necesario mejorar la resistencia a los esfuerzos por la presión interna del recipiente, se establece un espesor del cilindro de 0,3937in conforme a el espesor de la tapa toriesférica, esto permitirá mejorar el refuerzo por unión soldada a tope y le entregará mayor resistencia al material bajo presión constante.

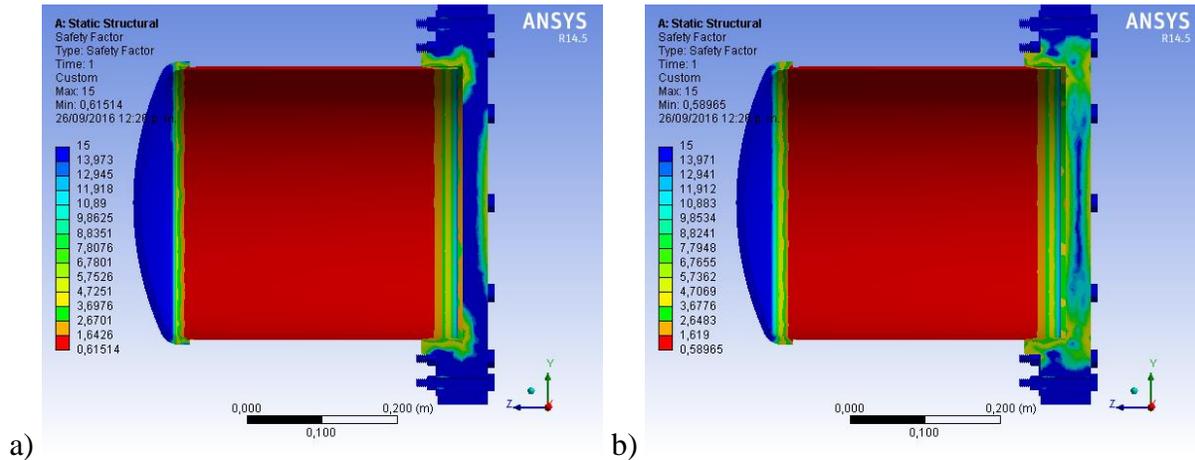


Figura 53. a) Factor de seguridad por Tresca y b) Von Mises.

El máximo esfuerzo se evidencia en el punto de contacto entre la tapa toriesférica y el cilindro del recipiente, por este motivo, se evalúa el comportamiento en un área denominada Path., y localizada en el punto de contacto interno del cilindro a la tapa toriesférica. En la Figura 54, se realiza inicialmente un análisis con el fin de evaluar la independencia de malla, con la finalidad de que el resultado que se obtenga sea relevante respecto al enmallado del análisis en Ansys. El *Mesh Independency Study* se obtiene a través del análisis de la deformación total en la sección del Path. El primer análisis se encuentra en función de un refinamiento de malla con 187165 nodos, el segundo refinamiento de malla se analiza a 310550 nodos y finalmente un tercer refinamiento de malla con 663045 nodos.

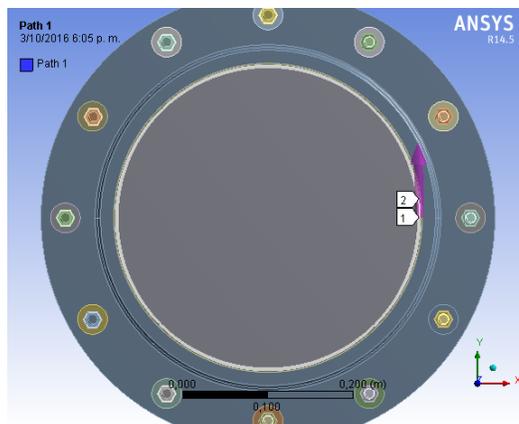


Figura 54. Sección del Path.

La Figura 55 corresponde a la diferencia del resultado en el análisis de la independencia de malla, del margen de error en el número de nodos para la estabilidad entre el resultado del Mesh1 al Mesh3. Sin embargo, el resultado que se refleja entre el Mesh1 y el Mesh2 refleja el desfase en la exactitud de los puntos de presión. Se observa que a diferencia del resultado entre el Mesh2 y el Mesh3 se ha reducido el desfase en la precisión de los puntos de contacto de presión, se puede decir en este caso que a partir de los 300000 nodos del mesh se puede obtener un resultado preciso, y a partir de ese punto el incremento del refinamiento de malla permitirá tener un análisis detallado independiente del número de nodos.

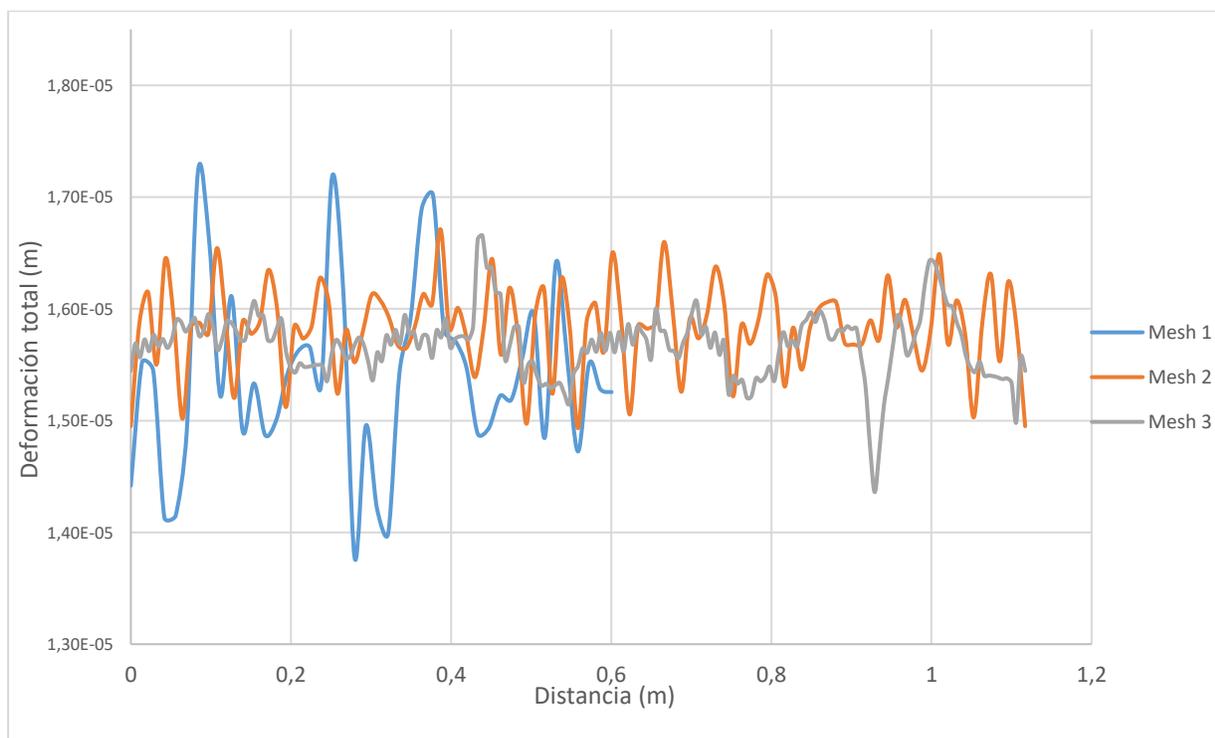


Figura 55. Mesh independency study. Path.

Cerciorándose de que el resultado de la simulación ya no va depender del enmallado, para el análisis del recipiente con el espesor corregido y el posicionamiento de los accesos ópticos, se tendrá en cuenta un refinamiento de malla de 659696 nodos para todo el conjunto de componentes del recipiente, el refinamiento de malla se puede observar en la *Figura 56*. Se realiza un análisis completo del máximo esfuerzo cortante y la deformación total a la que se enfrenta el recipiente. Para este análisis se tiene en cuenta la configuración de cada pieza según su material, que corresponden a SA-515 Gr65 para la tapa plana, la brida slip-on, el cilindro y la tapa toriesférica, el material SA-193 GrB7 que se emplea para los pernos y espárragos (prisioneros), el material SA-192 2H que se emplea para todas las tuercas, el material F436 corresponde a las arandelas y finalmente el vidrio del acceso óptico que es de cuarzo.

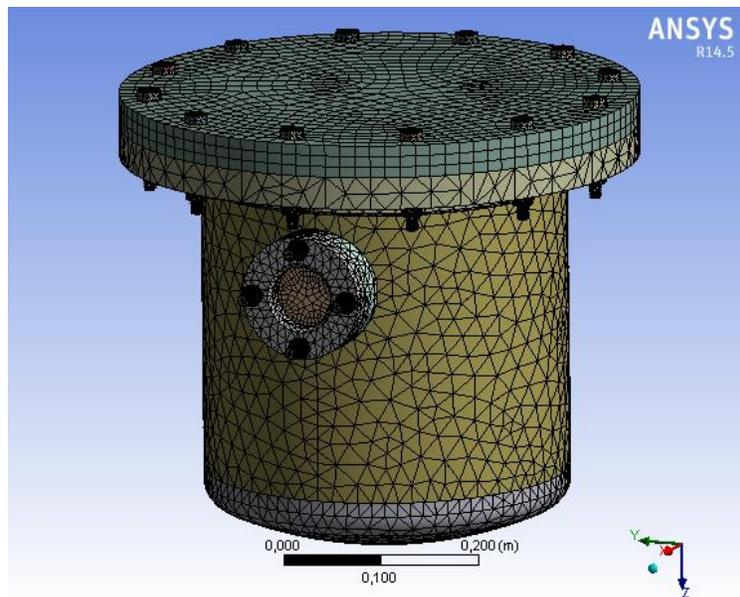


Figura 56. Refinamiento de Malla con espesor corregido.

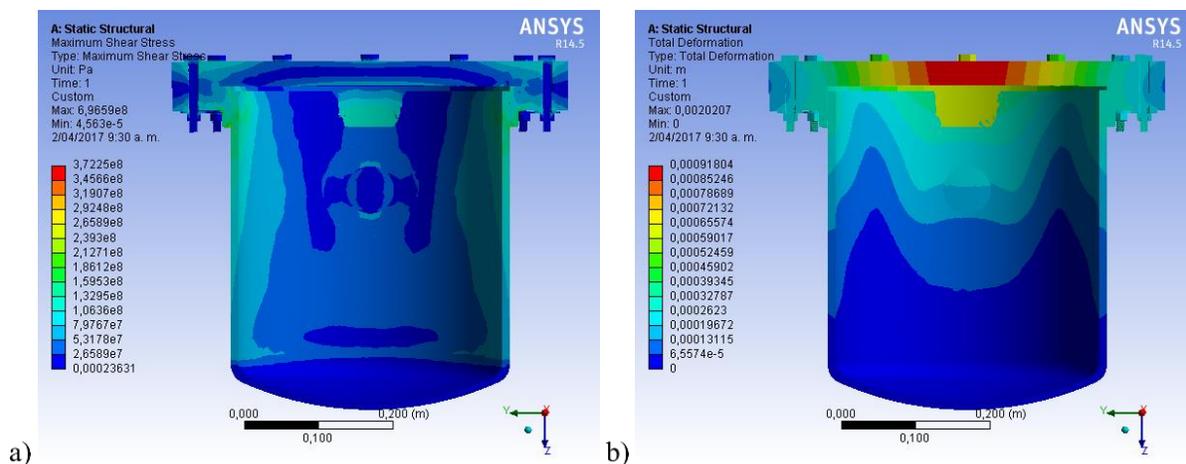


Figura 57. a) Máximo esfuerzo cortante y b) Deformación total del recipiente con espesor corregido.

En la Figura 57, se observa que el máximo esfuerzo cortante corresponde a 69,659 MPa se genera en la unión del cilindro y la brida slip-on, este esfuerzo se acumula en esta zona por el momento que genera la presión en el centro de la tapa, en donde se acumula como un esfuerzo puntual, la contra presión que realizan los pernos en conjunto con las tuercas y el aprisionamiento en los bordes del recipiente hacen que la zona de la unión sea la sección donde se evidencia la máxima acumulación por esfuerzos cortantes, comparando con el esfuerzo del primer análisis se ha reducido notoriamente y el acoplamiento de los accesos ópticos refuerza el área removida en el cilindro conforme la estructura del accesos óptico y el refuerzo de la unión pos soldadura, que corresponde a 211,99 MPa. La deformación máxima que alcanza el recipiente es de 2,0207mm, lo que nos demuestra que el recipiente no sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material y cómo se observa en a la Figura 57, la imagen detalla que el centro de la tapa es donde se genera la acumulación de esfuerzos por presión. En la Figura 58 se evalúa el Factor de seguridad para el esfuerzo que enfrenta el recipiente durante la operación.

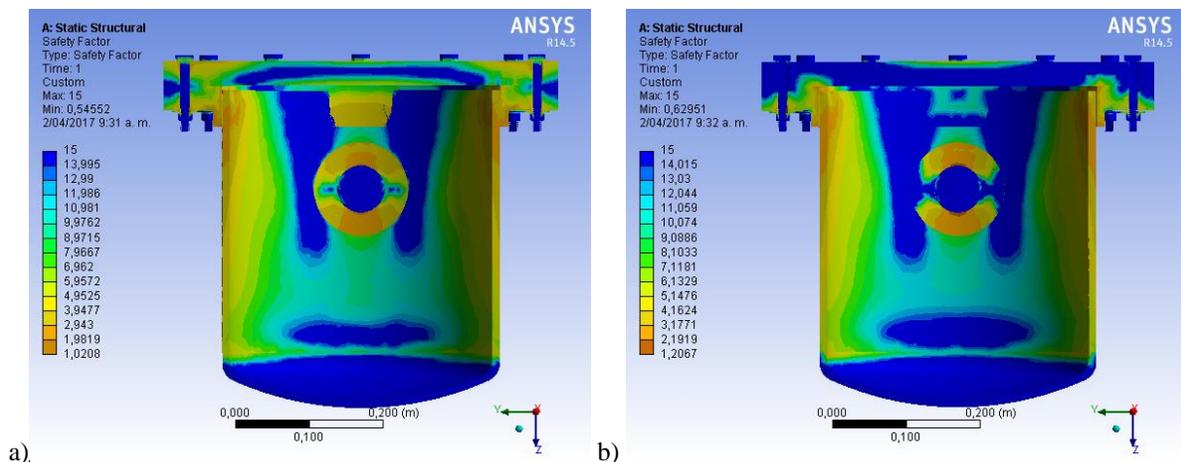


Figura 58. Factor de seguridad por a) Tresca y b) Von Mises, con espesor corregido(Autores).

El incremento del espesor ha permitido incrementar el factor de seguridad del recipiente, teniendo un factor de seguridad por Von Mises de 0,6295 como mínimo, si se tiene en cuenta el detalle de la imagen a pesar de ser menor a uno es poco significativo en la ruptura o falla del recipiente a presión constante, este resultado corresponde al momento y acumulación de esfuerzos que se generan en la unión de la brida slip-on y el cilindro, para mejorar este resultado se puede mejorar el refuerzo por soldadura en esta unión por prevención, sin embargo el resultado en general del recipiente no sobrepasa los esfuerzos generados a una presión constante de 40Bar teniendo un resultado del factor de seguridad mayor a 1,2. El factor de seguridad por Tresca es de 0,54, sin embargo en el matiz general de la imagen esta acumulación no es significativa en los resultados, en general y en las zonas más críticas del recipiente cómo lo son las uniones soldadas y pernadas el factor de seguridad es mayor a 1,02.

Los accesos ópticos fueron simulados mediante la herramienta Ansys Workbench, con el objetivo de analizar los esfuerzos máximos generados y el factor de seguridad de Tresca y Von Misses. Dichos accesos fueron realizados por aproximación geométrica de un diseño comercial, sostenidos mediante el borde exterior del cuerpo de los accesos, ya que es la parte que va soldada al cilindro del recipiente a presión. La presión de diseño es aplicada en las caras interiores del recipiente y sobre la ventana de cuarzo.

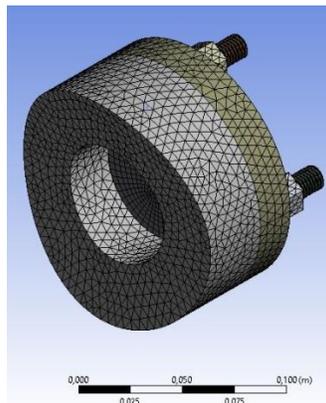


Figura 59. Enmallado del ensamble de un acceso óptico.

En la Figura 60 se puede observar la deformación total del acceso óptico bajo las cargas de operación del recipiente a presión, la deformación máxima se presenta en la ventana de cuarzo y corresponde a 0,03 mm, muy por debajo de las deformaciones últimas del material. El máximo esfuerzo equivalente generado es 170 MPa, ubicado en la zona de la soldadura del cilindro del recipiente, siendo distribuido uniformemente por esta.

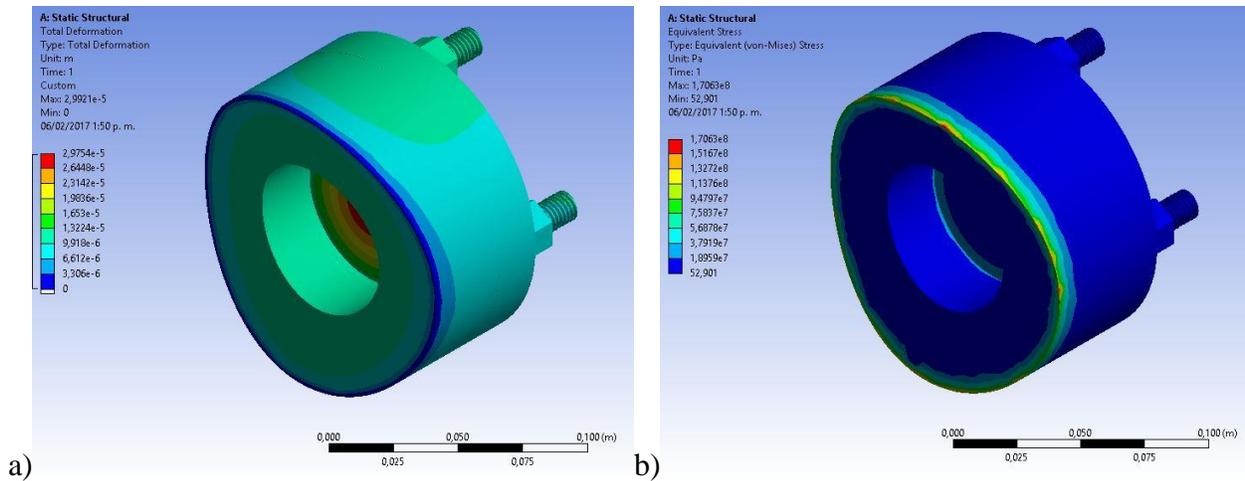


Figura 60. Deformación total a) y máximo esfuerzo equivalente b) del ensamblaje del acceso óptico.

En la Figura 61, se puede observar los factores de seguridad del acceso óptico, que corresponden a 1,64 por Tresca y 1,45 de Von Misses, demostrando la resistencia del material del cuerpo del acceso ante la presión máxima de operación

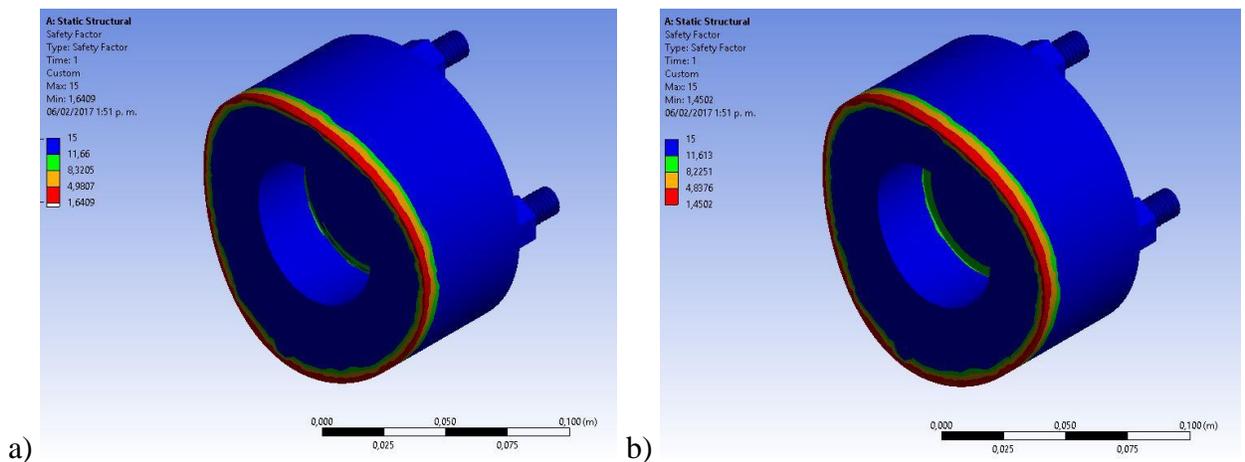


Figura 61. Factores de seguridad por a) Tresca y b) Von Misses del ensamblaje del acceso óptico.

4.3.1.4. *Manufactura del recipiente a presión.*

En el proceso de manufactura de un recipiente a presión se deben tener en cuenta los lineamientos contenidos en la norma ASME, donde se presentan diferentes consideraciones para la construcción y soldadura de las distintas partes a ensamblar. Cabe la pena resaltar que en caso de que el recipiente a presión quiera ser certificado bajo esta normatividad, los procedimientos de soldadura deben de estar acordes a lo descrito en la Sección IX, además de cumplir a cabalidad lo descrito en la Sección VIII. Las referencias más útiles para determinar las uniones soldadas son:

Tabla UW-12 y Figura UW-3 de la subsección D, de la división 1 de la sección VIII.

Tabla UCS-56 de la subsección C, de la división 1 de la sección VIII.

El cilindro, que es el cuerpo del recipiente, debe ser manufacturado a partir de una lámina de 14 X 47.12 in, doblada en forma cilíndrica. Debe ser troquelada con agujeros de intersección de cilindros de diámetros desiguales a 90° (como lo sugiere la página 275 de Megyesy (1992)) de modo que al ser construido queden los dos agujeros opuestos, para permitir la técnica de visualización de Schlieren a través de los accesos ópticos soldados. Ambos extremos de la placa deben ser fijados por medio de una soldadura de tope de 7 mm de espesor. Los accesos ópticos deben ser soldados al cilindro por medio de una unión tipo D (Fig UW-3) la cual tiene como requerimiento que tenga una penetración completa del material.

La tapa toriesférica debe ser construida por una fábrica especializada para que sea entregada en una sola pieza, lista para soldarse. La construcción debe ser por un proceso de abombado y uno de cejado para cumplir con las medidas descritas en los planos. La unión con la parte inferior del cilindro debe ser por medio de una soldadura de tope de 7 mm de espesor, con penetración completa del material.

Para el caso de la brida “*Slip on*” debe ser adquirida junto a la tapa plana correspondiente con las medidas entregadas por los planos y con los agujeros de sujeción correspondientes. La unión entre la brida el cilindro debe llevarse a cabo mediante una soldadura de traslape de doble filete completo de 6.3 mm, que permite una adecuada unión de las piezas y garantiza la estanqueidad del contenido presurizado.

Por último, la norma exige para el tipo de acero usado en el recipiente se debe realizar un tratamiento térmico post-soldadura que consiste en sostener la pieza a 595°C por 1 hora por cada pulgada de espesor de la placa (o 15 minutos mínimo), según lo indicado por la tabla UCS-56.

4.3.2. Diseño detallado del Sistema Óptico-Adquisitivo

En esta sección se realiza la descripción general de los requerimientos del Sistema Óptico-Adquisitivo para la aplicación requerida por el presente proyecto de grado: “Obtener la imagen del chorro de atomización generado por un inyector ubicado en el interior de la cámara presurizada”. Este objetivo se logra mediante la descripción de las necesidades de cada componente/dispositivo y la selección de los mismos en cada uno de los subsistemas de Iluminación, Óptico y Adquisitivo. Cada uno de estos subsistemas agrupa una serie de componentes que tienen un objetivo común y que actúan como eslabones para lograr el objetivo general del sistema. El Subsistema de Iluminación se encarga de entregar la radiación electromagnética adecuada para iluminar el objeto

y lograr una técnica de visualización de Schlieren adecuada; el Subsistema Óptico es el encargado de la conformación de la imagen y el filtrado de la radiación que la conforma, para ser captado por el siguiente subsistema; por último, el Subsistema de Adquisición es el encargado de la obtención de la imagen por medio del sensor adecuado para el tipo de radiación emitida.

4.3.2.1. *Subsistema de Iluminación*

El Subsistema de Iluminación del Sistema Óptico-Adquisitivo es aquél que entrega la radiación necesaria para iluminar el chorro de inyección del inyector dentro de la cámara presurizada, de acuerdo a las necesidades de la configuración de Schlieren. El tipo de iluminación que mejor se acomoda a la aplicación en particular es la luz visible, ya que mediante un sistema relativamente sencillo permite la obtención de imágenes de calidad. La utilización de otra fuente de radiación para iluminar el chorro de combustible no es justificada, ya que, en caso de utilizar radiación de longitud de onda más larga (infrarrojo, radar, microondas), se perderían detalles que la luz puede entregar debido a su menor frecuencia; por otro lado, al utilizar radiación de frecuencia mayor (ultravioleta, rayos x, rayos gamma), además de requerir instrumentación más sensible y económicamente menos viable, no se lograría un mayor detalle del objeto debido al tamaño macroscópico de las gotas producidas por la atomización, comparadas con las longitudes de onda de dicha radiación.

La luz visible también es la más compatible con la técnica de visualización de Schlieren, permite hacer cálculos sencillos con las aproximaciones de la óptica geométrica, permite observar directamente las características geométricas del chorro de inyección y para su captación existe la mayor diversidad de sensores comerciales disponibles.

La iluminación trasera difusa se deja como una configuración opcional ya que sólo requiere de colocar un difusor óptico antes de la entrada de luz a la cámara presurizada para lograr imágenes como la de la *Figura 3* (derecha). Un difusor óptico del tamaño del acceso óptico y recubrimiento de ópalo blanco, permite crear un fondo uniforme gracias a que actúa como una fuente Lambertiana, disipando la luz uniformemente por medio de la difusión a través del material y consecuentemente evitando cambios bruscos de iluminación.

4.3.2.1.1. *Selección de componentes del Subsistema de Iluminación*

El Subsistema de Iluminación, debe contener la fuente de iluminación, la lente condensadora, el diafragma y lente colimadora para acondicionar correctamente la luz para la técnica de visualización de Schlieren.

La fuente de iluminación ideal como entrada sistema, debe ser de luz visible y estroboscópica. La luz estroboscópica permite, junto al mecanismo de obturación del Subsistema de Adquisición, lograr imágenes cuasiestáticas al exponerse el sensor sólo a la radiación lumínica por el menor tiempo determinado entre la frecuencia de la luz y la obturación. La fuente de iluminación más adecuada es la luz blanca tipo *spot light* estroboscópica de 2,1 in (53,34 mm) ofrecida por ©Edmund Optics. Esta luz es escogida entre la familia de productos ya que es la de mayor tamaño, contiene más LED's y es relativamente compacta comparado con los otros tipos de luz estroboscópicas ofrecidas por esta empresa.

La lente condensadora es necesaria para el funcionamiento de la lente colimadora, ya que ésta colima los rayos a partir de un punto de condensación lumínica. Este punto de condensación se logra mediante una lente biconvexa ($L1$ en la *Figura 62*) ubicada después de la fuente. La lente biconvexa elegida tiene 50 mm de diámetro y 50 mm de focal (f_{L1}), ya que aprovecha el diámetro máximo de la fuente de luz y condensa los rayos en el punto más cercano, debido a su corta distancia focal.

El diafragma de apertura variable, cumple la función de eliminar la luz difusa de los bordes de la lente condensadora y establecer el tamaño R (*Figura 62*) de la fuente finita para el Sistema Óptico-Adquisitivo. El diafragma escogido tiene una apertura máxima de 25 mm y una posición mínima totalmente cerrada, por lo que su variación incide en la profundidad de campo de la imagen tomada por el Subsistema Adquisitivo y permite establecer diferentes configuraciones de acuerdo al tipo de imagen que se quiera obtener. Este diafragma debe ser ubicado sobre el punto donde coinciden los puntos focales de la lente condensadora $L1$ y la lente decolimadora $L2$, para cumplir correctamente con su función.

Por último, la lente colimadora ($L2$) debe ser tipo plano convexa, ubicando su extremo plano hacia el objeto para lograr un haz de rayos de luz colimados a partir del punto de condensación de la luz en el diafragma, que debe coincidir con su distancia focal. Se escoge la lente plano-convexa de 75 mm de diámetro y 75 mm de distancia focal (f_{L2}), ya que su diámetro aprovecha totalmente el espacio del acceso óptico de entrada a la cámara presurizada y su distancia focal corta permite que no se sobredimensione el espacio requerido para el Subsistema de Iluminación.

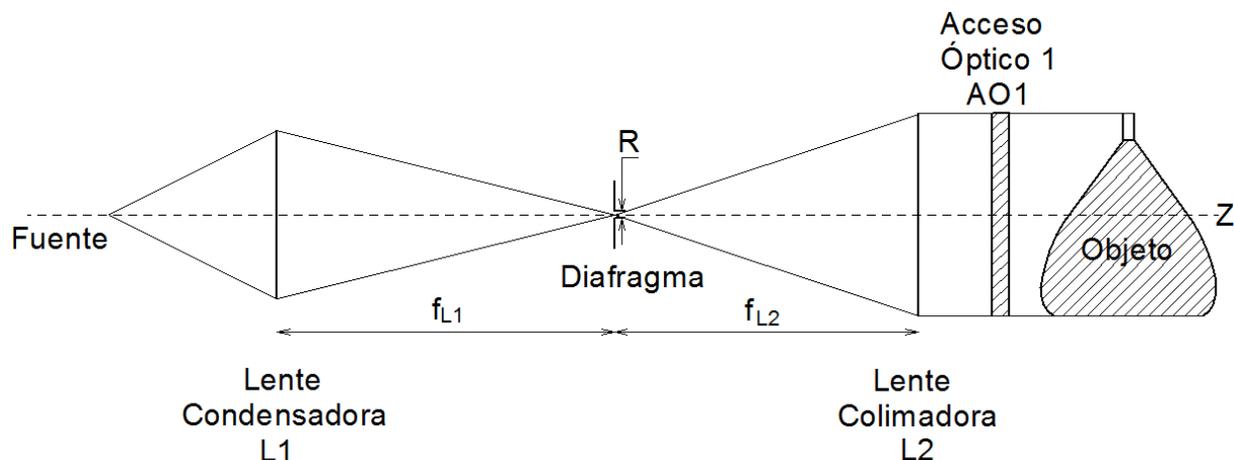


Figura 62. Subsistema de iluminación del chorro de combustible/nafta. Se observa la fuente de iluminación, la lente condensadora L1, la rendija de radio R, la lente colimadora plano-convexa L2 y el acceso óptico 1 (se omite el difusor óptico). Fuente: Autores.

4.3.2.2. *Accesos ópticos*

Los accesos ópticos son elegidos a partir de las propiedades de operación de la cámara presurizada y los requerimientos de tamaño de las ventanas para asegurar la correcta integración con el Sistema Óptico-Adquisitivo, tanto para iluminación como para captación de imagen. La empresa encargada de manufacturar los accesos ópticos escogida es Jacoby-Tarbox[®] una división de ©Clark-Reliance Corp., la cual ofrece ventanas pernadas y roscadas de diversos tamaños. El tamaño escogido para el acceso óptico pernado es el #3 (*Size #3*) (Anexo), el cual necesita de un agujero en el recipiente de 5 in (127 mm) donde se encaja la pieza completa y se suelda por el borde exterior. La pieza cumple con los materiales propuestos por la ASME y debe ser unida al recipiente por medio del tipo de soldadura propuesta por la sección de recipientes a presión.

Los accesos ópticos elegidos constan cada uno de una tapa de retención de la ventana, el sello y el cojinete, unida al cuerpo soldado mediante 4 pernos. El diámetro de la ventana es de 64 mm y la altura del acceso óptico sobre el borde del recipiente presurizado es de 67 mm. Esta altura, sumada a la mitad del diámetro interno de la cámara presurizada (177,8 mm) y a la longitud sobresaliente de los espárragos, fija un límite mínimo de 271.63 mm como distancia mínima entre el objeto (ubicado en el centro del recipiente) y la lente decolimadora (L_3), x_o en la Figura 63. Esta distancia actúa como limitante de las configuraciones posibles del sistema, sin embargo, como su valor es cercano a la distancia focal de la lente decolimadora no se ven afectados los parámetros calculados como se observa posteriormente en la Figura 64.

4.3.2.3. *Subsistema Óptico*

El Subsistema Óptico es el encargado de captar la luz proveniente del objeto de estudio por medio de una lente y convertirla en una imagen que será filtrada para realzar los fenómenos del estudio, que corresponde a los cambios de densidad del fluido inyectado. Se compone de una lente decolimadora y un filtrado espacial.

4.3.2.4. *Selección de Componentes del Subsistema Óptico*

Para la conformación del Sistema Óptico, se propone la técnica de visualización de Schlieren para ser aplicada a la obtención de la imagen del chorro de combustible. Por lo tanto, se realiza el análisis del Sistema Óptico tomando como entrada el Sistema de Iluminación, desde el objeto iluminado, hasta la proyección de la imagen en el plano de Fourier, donde se define el tipo de filtrado.

La lente decolimadora ($L3$) debe ser del tipo plano-convexa, con su lado plano apuntando hacia el acceso óptico para lograr la decolimación del haz de rayos de luz paralelos que provienen de la lente colimadora ($L2$). Se escoge una lente de 75 mm de diámetro para aprovechar al máximo la ventana del acceso óptico y una distancia focal (f_{L3}) de 250 mm debido a que este valor es cercano a la distancia mínima x_o de la lente $L3$ al objeto.

La formación de la imagen, gracias a la parte convexa de la lente, hace converger los rayos y permite la formación de la imagen en el plano de Fourier. Una gráfica en la Figura 64, representa los cálculos para la imagen a partir de las ecuaciones (4) y (7). Donde el tamaño del objeto corresponde al diámetro máximo aprovechable de los accesos ópticos de la cámara presurizada (64 mm). Como se observa, el objeto se encuentra a una mayor distancia que el punto focal de la lente $L3$, limitada por los accesos ópticos, por lo que la imagen que genera es real, invertida y aumentada. En el caso de que la distancia de la lente al objeto sea de $2f$, cabe destacar que la imagen se crea a la misma distancia por delante de la lente y tiene las dimensiones del objeto.

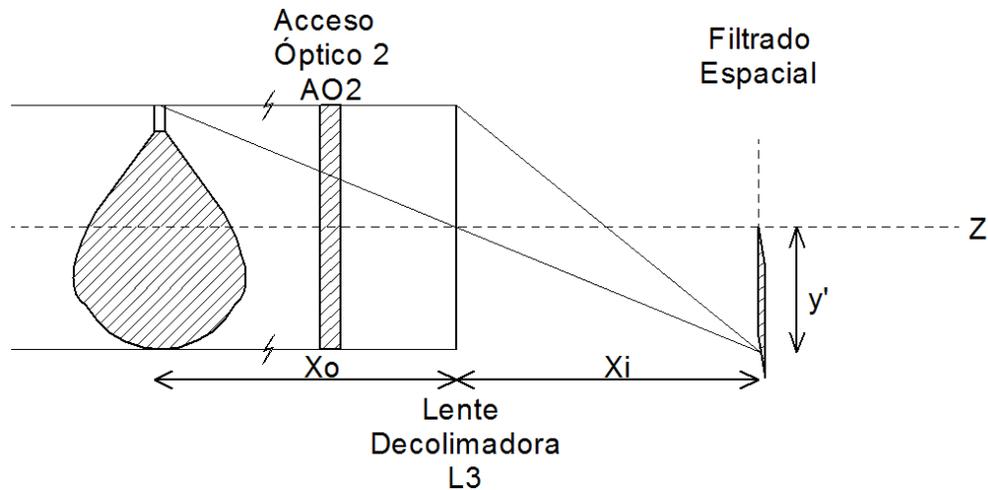


Figura 63. Subsistema óptico: Consiste en el Acceso Óptico 2, la lente decolimadora que conforma la imagen en el plano de Fourier, y el filtrado espacial. Fuente: Autores.

La lente decolimadora $L3$ tiene una distancia x_o que varía entre un mínimo de $271,63 \text{ mm}$, desde la entrada del acceso óptico, hasta la máxima posición dentro de la mesa óptica que sostiene las lentes. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la imagen también se debe generar dentro de las dimensiones de esta mesa para realizar el montaje del filtrado espacial. La elección de las monturas, mesas ópticas y otros accesorios, se discute en la sección de Accesorios.

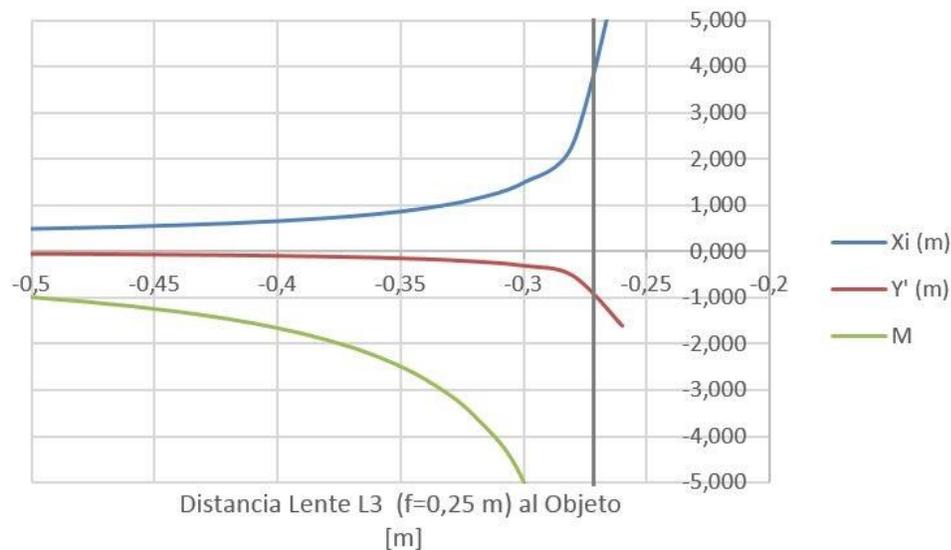


Figura 64. Posición de la lente (m) Vs Ubicación, Altura y magnificación de la imagen. (Magnificación M en potencias). Ecuaciones (4) y (7). Fuente: Autores.

El filtrado espacial se realiza por medio de unas cuchillas que se ubican en el plano de Fourier. Estas cuchillas puede ser cualquier material no traslúcido que permita interrumpir el paso de los rayos de luz, para formar una imagen con distintas intensidades de sombras. También, para lograr imágenes con mayor diferenciación de los gradientes de densidad, se deja como una configuración

adicional la utilización de filtros de color, los cuales, dependiendo de la frecuencia con la que son refractados los rayos de luz, permiten ser filtrados y coloreados para la posterior conformación de la imagen.

4.3.2.5. *Selección de componentes del Subsistema de Adquisición*

El Subsistema de Adquisición es la parte del Sistema Óptico-Adquisitivo encargada de tomar los rayos de luz de la imagen (filtrada o no filtrada) formada por la lente decolimadora $L3$ y enfocarlos sobre el sensor del instrumento de captación de imágenes para finalmente obtener una imagen del objeto de estudio por medio de la digitalización.

Como se evidencia a lo largo del capítulo, la cámara debe cumplir con ciertos requerimientos para acoplarse la frecuencia de irradiación de los pulsos de la fuente de iluminación, a la velocidad de inyección y al filtrado espacial. La cámara debe ser ubicada sobre el trípode o sobre un montaje en la mesa óptica, ser alineada con el sistema óptico para recibir la luz filtrada y lograr capturar la imagen. El objetivo es un accesorio necesario para la proyección de la imagen sobre el sensor.

La cámara digital comercial pco.pixelfly USB[®], propiedad de ©PCO, posee los requerimientos necesarios para ser aplicada en el Sistema de Adquisición, ya que gracias a su sensor CCD de 2/3" de una resolución de 1392x1040 pixeles y tiempos de exposición desde 1 μ s hasta 60 segundos, tiene la capacidad de captar los fenómenos de la inyección en una imagen de exposición cuasi-estática, lograda por los pulsos de radiación de la fuente de iluminación. Este dispositivo cuenta con aplicaciones como visualización de dinámica de flúidos, análisis de combustión, imágenes microscópicas e inyección de combustible, entre otras.

Esta cámara digital guarda las imágenes en formatos .tif y .b16 (formato propio de la empresa) y tiene la capacidad de exportar imágenes en los formatos fts, tif, bmp, asc, jpg y jp2, permitiendo compatibilidad con cualquier aplicación de visualización de imágenes. Los videos se pueden exportar en los formatos fts,tif, bmp, asc, avi, mpg, jpg, jp2 y wmv. Esto se logra a través de un software actualizado de la empresa compatible con cualquier sistema operativo. Se debe tener en cuenta que los formatos de mayor calidad son .tif y .b16, de 16 bits y que la conversión a otro formato requiere de compresión de imagen y por lo tanto pérdida de calidad.

La cámara cuenta con una montura estándar que permite la compatibilidad con accesorios ópticos, entre ellos se encuentran los objetivos, los cuales son vitales para el funcionamiento de las cámaras. El objetivo comercial más adecuado para la aplicación, es de focal fija de 50 mm y apertura $f/2.8 - f/16$, ya que ofrece una calidad de imagen de 10 mega pixeles y distorsión baja para

aplicaciones de alta velocidad, con una distancia mínima de trabajo de 100 mm. El objetivo permite a la cámara funcionar correctamente, al atrapar la luz y proyectarla en forma de imagen sobre su sensor, a la vez que la hace compatible con los distintos tipos de filtrado espacial, con la luz uniforme del difusor óptico y con posibilidad de captar las variaciones de los índices de densidad dentro de la cámara presurizada. Su bajo número f permite la captación de bajos niveles de luz, presentes en la toma de imágenes estroboscópicas debido a que la velocidad de obturación sacrifica iluminación.

En la *Figura 65* se puede observar la configuración general del Sistema Óptico-Adquisitivo con las distancias especificadas en milímetros para cada uno de los componentes de los subsistemas.

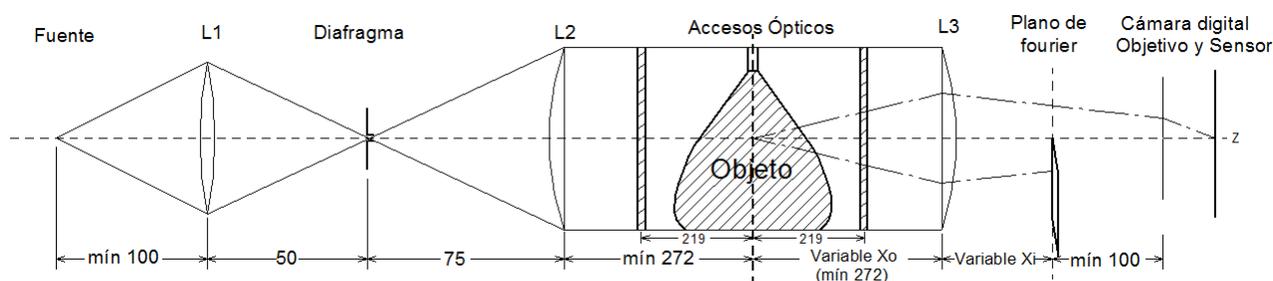


Figura 65. Configuración general del Sistema Óptico-Adquisitivo de imágenes.

4.3.2.6. Accesorios

Una vez concluido el proceso de selección de dispositivos de los sub sistemas del Sistema Óptico-Adquisitivo, se deben elegir todos aquellos accesorios que permitirán la integración, soporte y adaptación de dichos componentes al medio de soporte y a la cámara presurizada, a través de los accesos ópticos. En las anteriores subsecciones, se tomó el cuidado de elegir lentes, diafragmas, filtros y difusores de la empresa para asegurar la correcta integración de dichos componentes, asegurándose de elegir accesorios que también permitieran el movimiento y ajuste necesario para conformar varias configuraciones y así obtener diversas imágenes del proceso. La empresa ©Edmund Optics fue elegida por su experiencia en el comercio e industria del campo debido a su amplia variedad y experiencia en soluciones ópticas, ofreciendo la mayoría de componentes y accesorios necesarios para la aplicación particular que se está detallando. La base es la mesa óptica, donde se apoya un riel y sobre los cuales se mueven bases con perillas de ajuste de distancia. Sobre las bases están ubicados porta postes de altura variable, con postes de 304 mm de altura, para permitir la formación de imágenes grandes. Sostenido por cada poste se encuentra el alojamiento de cada uno de los lentes, del diafragma, del difusor y del filtrado. La cámara digital, con el objetivo

montado, está sostenida por un trípode de altura variable y de libre posicionamiento para obtener la imagen deseada por el usuario.

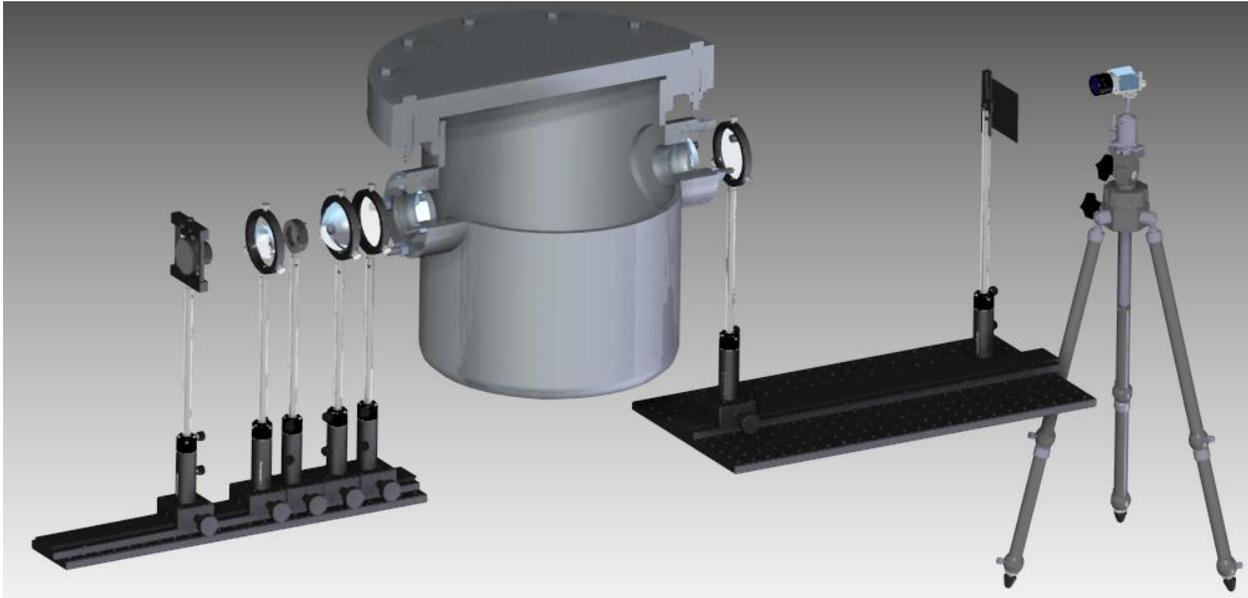


Figura 66. Configuración General del Sistema de Visualización de chorro de atomización de un inyector. (Tabla de componentes Anexo 3)

4.3.3. Selección de sensores

Los sensores requeridos para conocer el estado interno del recipiente presurizado son de temperatura y presión según el diseño conceptual. Se requiere la selección de sensores de aplicación industrial con rangos de operación acordes con los de la máquina, por lo tanto, se consultó la página web de ©Baumer, una empresa multinacional especializada en la manufactura de sensores con proveedores en el país, la cual posee una gran variedad de dispositivos medidores de presión y temperatura. Estos dispositivos se ofrecen con varias opciones de adaptación para sistemas neumáticos a través de conexiones roscadas estándar. Los dispositivos elegidos se encuentran listados en el anexo, en la correspondiente sección de la tabla.

4.3.4. Consideraciones para el diseño del sistema neumático asociado al recipiente presurizado.

El sistema neumático de alimentación y desagüe del recipiente a presión, debe ser diseñado para soportar las condiciones de operación, resistir el contacto con el fluido de operación de la máquina y contener los componentes del concepto global dominante determinado a partir del diseño conceptual (Tabla 9). Adicionalmente, el sistema neumático también debe contener componentes claves para la alimentación, funcionamiento y protección del recipiente presión, que garantizarán el correcto funcionamiento y nivel de seguridad durante la presurización y despresurización. Los componentes mínimos necesarios, son:

- Bomba de membrana (en caso de no ser determinada otra fuente de aire presurizado).
- Racor o racores de entrada de aire/nitrógeno.
- Filtro de impurezas y humedad.
- Válvula reguladora de presión y caudal de entrada.
- Conexiones para los sensores de presión y temperatura.
- Válvula anti retorno.
- Válvula reguladora de presión y caudal tipo aguja para desagüe.
- Conexión con el separador ciclónico y el depósito para el fluido de operación.

Los componentes deben ser conectados por medio de tubería metálica, de alta resistencia a la presión y mangueras para aplicaciones de menor presión, como la conexión al depósito. Las uniones de la tubería con el recipiente a presión deben ser soldadas, preferiblemente mediante filete, para asegurar la resistencia de la unión bajo las condiciones de operación y la estanqueidad del contenido. Los puntos desde UG-125, hasta UG-40 de la subsección A, División 1, Sección VIII del código de calderas y recipientes a presión de la ASME, presenta los componentes mandatorios para protección de sobrepresiones.

Se recomienda como proveedores ©Baumer y ©Parker, los cuales proveen componentes neumáticos de alta resistencia, distintos rangos de operación, diferentes tipos de conexiones y de aplicación industrial en química, alimentos, petróleo y gas, entre otros.

5. DESARROLLOS FUTUROS

- Se debe realizar la alteración de la tapa plana superior, de acuerdo al punto UG-39 de la subsección A, División 1, Sección VIII. La alteración debe solucionar el medio de sujeción del inyector, soportar las condiciones de presión interna, evitar fugas y permitir la operación del sistema de alimentación asociado a dicho inyector.
- Se deben determinar los procedimientos de soldadura de unión del cilindro y la tapa toriesférica inferior, junto a la unión de los accesos ópticos al cilindro; en concordancia con puntos de la parte UW, subsección B, División 1, Sección VIII. Permitiendo la correcta elección de los electrodos de soldadura, posición y métodos de fabricación.
- Determinación de la necesidad de aplicación de tratamientos térmicos a las uniones soldadas de acuerdo al punto UW-10 de la subsección B, División 1, Sección VIII.
- Calculo de los soportes del recipiente a presión, de acuerdo al punto UG-54, subsección A, División 1, Sección VIII. Es necesario tener en cuenta el peso toda la estructura, lo cual involucra las ventanas del recipiente y el acoplamiento del sistema de inyección.
- Aplicación de los perfiles ©Bosch para la integración y soporte de los subsistemas de alimentación y desagüe.
- Diseño del sistema neumático de alimentación y desagüe del contenido del recipiente presurizado, incluyendo la determinación y conexión con el separador ciclónico de partículas y el depósito del fluido recuperado. La unión entre la tapa toriesférica inferior y la tubería de dicho sistema se debe ser soldada y los materiales elegidos a partir de las consideraciones expuestas en el punto UCS-9, subsección C, División 1, Sección VIII.
- Se debe crear un manual de ensamble, alineación, operación e inspección de los componentes que conforman el sistema óptico. Se deben incluir pruebas de contraste y focalización aplicables a la cámara fotográfica para asegurar el correcto funcionamiento.
- Se propone el estudio de la aplicación de algoritmos de procesamiento de las imágenes: pre-procesado, segmentación y post-procesado, para lograr el análisis automático y estadístico de las imágenes de los chorros de atomización captados. Al igual que se realiza en la tesis de maestría de Zapata (2011).
- Se propone la determinación de la aplicabilidad de la máquina para la toma de imágenes termográficas y para la caracterización óptica de materiales, ya que la técnica de visualización de Schlieren y la cámara pc.pixelfly usb[®] son compatibles con estos métodos.

6. CONCLUSIONES

- Por medio del Diseño conceptual se logró el desarrollo de un producto a través de un análisis de requerimientos, seguido de un análisis funcional encaminado a determinar y filtrar cada uno de los conceptos. Teniendo en cuenta los requerimientos del cliente cada concepto global es la mejor alternativa que se establece para desarrollar las funciones principales, a su vez las funciones críticas para cumplir con el objetivo general del producto. Al finalizar se logra definir un concepto global dominante que cumple con los requerimientos funcionales para desarrollar un producto capaz de adquirir y evaluar los chorros de combustible, este concepto global dominante sirve de guía en las posteriores fases de diseño.
- El componente estructural diseñado durante el proceso preliminar permitió el desarrollo de una estructura con una alta resistencia bajo las condiciones de operación de los inyectores, ya que el diseño está basado en las aproximaciones para recipientes de pared delgada. El espesor asumido respecto al calculado, los materiales seleccionados y los tipos de unión permanentes y no permanentes propuestos, aseguran la correcta estanqueidad del contenido presurizado, brindan un mayor factor de seguridad y aumenta la confiabilidad del producto.
- Los resultados obtenidos durante el análisis de las simulaciones en ANSYS Workbench permiten la corroboración de los análisis de deformación y criterios de falla efectuados durante el diseño preliminar y detallado del recipiente, dando certeza que los parámetros de diseño seleccionados son confiables para los procesos de operación. El máximo esfuerzo cortante se genera en la unión del cilindro y la brida slip-on, este esfuerzo se acumula en esta zona por el momento que genera la presión en el centro de la tapa, en donde se acumula como un esfuerzo puntual, este corresponde a 69,659 Mpa; sin embargo, el esfuerzo al que es sometido el recipiente genera una deformación que no es significativa, equivale a 2,0207mm. El resultado apreciado en las simulaciones realizadas permite tener certeza que los materiales seleccionados y las configuraciones realizadas en el recipiente no sobrepasan los niveles de ruptura para las áreas donde se observan la mayor acumulación de esfuerzos cortantes.
- El incremento del espesor ha permitido mejorar el factor de seguridad del recipiente, obtenidos por Von Mises y por Tresca a presión constante, este resultado en general y en las zonas más críticas del recipiente cómo lo son las uniones soldadas y pernadas el factor

de seguridad es mayor a 1, lo que permite asegurar la fiabilidad del material contra rupturas y el ensamble del conjunto del recipiente.

- El Sistema Óptico Adquisitivo se determinó a partir de un proceso de selección de componentes basado en el estudio detallado de los principios ópticos de funcionamiento y la relación de cada uno de los componentes con la sensibilidad total del sistema, enfocándose en la generación de imágenes de alta calidad. Esto se logra a partir de la combinación de una profundidad de campo amplia, un filtrado adecuado y un sensor óptico con alta resolución espacial con obturación en el orden de los microsegundos.
- El Sistema Óptico Adquisitivo tiene la capacidad de aplicar la técnica de visualización de Schlieren gracias a sus componentes de iluminación colimada y su sistema de filtrado espacial en el plano de Fourier, lo cual hace posible medir el tamaño de las gotas del proceso de inyección y distinguir las heterogeneidades que se generan en el interior del recipiente presurizado para su correcto proceso de caracterización.
- Las mesas ópticas, postes, monturas de lentes y demás accesorios al ser desmontables y ensamblables permiten desarrollar configuraciones diferentes que permiten la versatilidad del sistema y la fácil adaptación al recipiente presurizado a través de los accesos ópticos. Se permite también la obtención de imágenes de diversos sectores del chorro de inyección de acuerdo al previo requerimiento del usuario de la máquina y el correcto enfoque de la zona de interés.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Data sheets de materiales metalicos, ceramicos y compuestos. (2016). *Matweb, Material property data*. Recuperado de: <http://www.matweb.com/>
- León, J (2001). *Diseño y cálculo de recipientes a presión*. Inglesa. Mexico, D.F. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/74197620/Diseno-Y-Calculo-de-Recipientes-a-Presion-Juan-Manuel-Leon-Estrada>
- Megyesy, E (1992). *Manual de recipientes a presión, diseño y calculo*. Limusa. MExico, D.F. Disponible en: <http://www.fiuxy.net/ebooks-gratis/1555888-descargar-manual-de-recipientes-presion-en-pdf-espanol.html>
- Baert, R., Frijters, P., Somers, B., Luijten, C., Boer, W. (2009). *Design and operation of a high pressure, high temperature cell for HD diesel spray diagnostics: guidelines and results*. Eindhoven University of Technology, Estados Unidos. Disponible en: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/10279.pdf>
- Budinas, R. G. y Nisbett, J. K. (2008) *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shingley* 8ª Ed. Mexico D.F., Mexico: McGraw Hill.
- Payri, F., Bermúdez, V., Salvador, F. (2003). *The influence of cavitation on internal flow and the spray characteristics in diésel injection nozzles*. Universidad Politecnica de Valencia, España. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/R_Payri/publication/223283585_The_influence_of_cavitation_on_the_internal_flow_and_the_spray_characteristics_in_the_diesel_injection_nozzle_Fuel_834-5419-431/links/54ad71100cf2828b29fc9cb4.pdf/download?version=vtp
- Cross, N (2002). *Métodos de Diseño: Estrategias para el Diseño de Productos*. Limusa Wiley. ISBN 968-18-5302-4. México, D.F.
- Vilchis, Luz del Carmen (1998) *Metodología del diseño: Fundamentos Teóricos*. ISBN – 968-843-172-9. Mexico.
- Guillén A. (1993) *Introducción a la Neumática. Productica*. ISBN: 84-267-092-4. España
- Laboratorio Pedagógico (2010). *Aire Comprimido – Compresores. Escuela de Educación Técnica 642 – Mercedes San Martín de Balcarce*. Argentina. Disponible en: <https://sites.google.com/site/642primertrabajo/compresores>

- Estrada J. M. (2001). *Diseño y Cálculo de Recipientes Sujetos a Presión. Inglesa*. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/17247549/disen-y-calculo-de-recipientes-a-presion>
- Facultad de Química. *Materiales poliméricos de mayor interés industrial*. Universidad de Oviedo. España. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AP.T8.1-MPyC.Tema8.MaterialesPolimericosInteresIndustrial.pdf>
- Vitroflex Advanced Plastics. *Propiedades de Acrílico*. Disponible en: [http://www.polimertecnic.com/files/FT/FT_PMMA_colada\(ES\).pdf](http://www.polimertecnic.com/files/FT/FT_PMMA_colada(ES).pdf)
- Depto. Técnico EMAC (2010). *Ficha Técnica Metacrilato*. España. Disponible en: http://www.construnario.com/bc3/3647/ft_metacrilato.pdf
- Electricidad Lynch. *Lámparas de Vapor de Sodio*. Disponible en: <http://www.electricidadlynch.com/lamparasodio.htm>
- Davidson M. W. *Tungsten-Halogen Incandescent Lamps*. National High Magnetic Field Laboratory, The Florida State University. Tallahassee, Florida. Disponible en: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>
- González J. *Transductores de Presión*. Área de Electrónica, Universidad de Cádiz. España. Disponible en: http://www2.uca.es/grup-invest/instrument_electro/ppjjgdr/Electronics_Instrum/Electronics_Instrum_Files/temas/T17_Pressure.PDF
- Deshmukh, D. D., & Ravikrishna, R. V. (2014). *Studies on microscopic structure of diesel sprays under atmospheric and high gas pressures*. International Journal of Spray & Combustion Dynamics, 6(2), 199-220. doi:10.1260/1756-8277.6.2.199
- JASÍKOVÁ, D., KOTEK, M., LENC, T., & KOPECKÝ, V. (2012). *The Study of Full Cone Spray Using Interferometric Particle Imaging Method*. EPJ Web of Conferences, (25), 01032-p.1-01032-p.8. doi:10.1051/epjconf/20122501033
- Müller, R., & Kleinebudde, P. (2006). *Comparison Study of Laboratory and Production Spray Guns in Film Coating: Effect of Pattern Air and Nozzle Diameter*. Pharmaceutical Development & Technology, 11(4), 425-433. doi:10.1080/10837450600770205
- Prat, M., Rodrigues, G., & Teixeira, M. (2008). *Características operacionales de las boquillas de pulverización hidráulica de chorro plano y cónico hueco*. (Spanish). Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 17(3), 61-67.

- Wu, K. J., Reitz, R. D., & Bracco, F. V. (1986). *Measurements of drop size at the spray edge near the nozzle in atomizing liquid jets*. *Physics of Fluids* (00319171), 29(4), 941.
- Settles, G. (2001) *Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media*. Springer–Verlag, ISBN 3-540-66155-7.
- Zapata, L. (2010). *Caracterización de los procesos de combustión diésel mediante visualización y procesado digital de imágenes*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Mauldin J. (1992) *Luz, láser y óptica*. Madrid, España: McGraw-Hill. ISBN 0-8306-9338-6.
- Dave, L. *CCD Vs CMOS: Facts and fictions*. Consultado: junio 23, 2015, de Dalsa Sitio web: https://teledynedalsa.com/public/corp/Photonics_Spectra_CCDvsCMOS_Litwiller.pdf

9. GLOSARIO

Aberración Cromática: Aberración óptica que causan los instrumentos ópticos refractivos, ya que la luz es desviada por el cambio del índice de refracción del medio y dividida en las frecuencias de los distintos colores. Cada frecuencia tiene un punto focal distinto e imposibilita la formación de una imagen de calidad. Existen aberraciones cromáticas longitudinales y laterales.

Aberración Esférica: Es la aberración óptica que afecta a los rayos de luz que atraviesan la superficie curvada de una lente. Dependiendo de la frecuencia de la luz, la aberración esférica es refractada en un ángulo diferente. La aberración es directamente proporcional a la distancia del eje óptico.

Acromática: Propiedad de una lente o sistema de lentes diseñado para corregir la aberración óptica cromática.

ASC: Formato de imagen de la ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) de 16 bits compatible con programas matemáticos.

Asférica: Propiedad de una lente o sistema de lentes diseñado para corregir la aberración óptica esférica.

AVI: Formato multimedia desarrollado por Microsoft en 1992, sus siglas significan *Audio Video Interleave*.

AWS: Sociedad americana de soldadura (*American Welding Society*).

BMP: Es un formato de mapa de 8 bits desarrollado por Microsoft que soporta imágenes en blanco y negro y a color.

Colimador: Lente que permite obtener un haz de rayos de luz paralelos a partir de una fuente lumínica.

Condensador: Lente que hace converger los rayos provenientes de la fuente de luz en un punto específico.

Conjugado: Punto por donde todos los rayos son concentrados por una lente.

Contraste: Diferencia relativa de intensidad en la imagen. Dos objetos superpuestos de igual brillo tendrán un contraste nulo, si alguno de los objetos sobrepasa el umbral de contraste, estas se vuelven perceptibles.

Difusor óptico: Pantalla de material óptico especial para difractar la luz y homogenizarla, aumentando así la eficiencia de transmisión.

Dispersión: Fenómeno de separación de las ondas de radiación cuando ésta atraviesa de un medio a otro.

Eficiencia de las Soldaduras (E): Se define cómo el grado de confiabilidad que puede tener la soldadura.

Electrodo: Vara de material de soldadura que se acopla a la máquina para transmitir la corriente eléctrica necesaria hasta el punto o trayecto de soldadura, logrando la fundición con el material.

Esfuerzo de Diseño a la Tensión (S): Es el valor máximo al que se puede someter el recipiente de acuerdo al material en el que está construido. Los recipientes cilíndricos se encuentran sometidos bajo un esfuerzo longitudinal y transversal.

Exposición: Medida del tiempo en el que se recibe la luminosidad. Está directamente ligado con el tiempo de obturación.

Filtrado Espacial: Filtrado que se realiza de una imagen en el lugar de formación causado por la lente.

Focalización: Propiedad de una lente o una combinación de lentes para obtener una imagen nítida.

Fotorreceptor: Unidad mínima de los elementos que conforman el sensor, cada fotorreceptor convierte la frecuencia que irradia en él para convertirlo en color para cada pixel de la imagen digital.

FTS: Formato de imagen de 16 bits cuyo acrónimo significa *Flexible Image Transport System*. Utilizado como formato estándar de la NASA.

Fuente Lambertiana: Fuente de luz secundaria, irradiando luz enteramente por difusión proveniente de una fuente de luz primaria que incide sobre ella.

Fuente Luminosa: Es cualquier objeto que pueda producir luz visible. Existen dos clases de fuentes: las naturales como el sol y las artificiales como bombillas, halógenas, LED, entre otras.

Garganta: Distancia más corta entre el vértice del ángulo recto y el cateto, de una sección transversal triangular de una soldadura de bisel sencilla.

Imagen: Arreglo de luz captado en un espacio y un tiempo por el sensor de un instrumento de adquisición, que representa la apariencia visual de un objeto real.

Intensidad: La intensidad lumínica se define como la cantidad de flujo luminoso por unidad de ángulo sólido. Su unidad de medida en sistema internacional es candela (cd)

ISO: Variable de la cámara digital que permite ajustar la sensibilidad a la luz. Un número ISO bajo, significa que la cámara es menos sensible a la luz y viceversa.

Lente: Objeto transparente, cuya sección varía de manera que transforma los rayos de luz de los objetos en imágenes bidimensionales.

Luminosidad: También conocida como claridad, es la propiedad de los colores que permite indicar el brillo de un color, cuanto más oscuro es el color, menos luminoso es.

Luz: Zona del espectro electromagnético que corresponde a la radiación en la frecuencia que es visible para los ojos humanos.

JP2: Formato de imagen estándar actualizado en el 2000, por su grupo creador donde la compresión se realiza por medio de la codificación y de la función *wavelet*.

JPG: Formato creado por la *Joint Photographic Experts Group* en 1992 como un método de compresión de imágenes a través de una transformada discreta cosenoidal ajustable.

MPG: Formato de compresión de video desarrollado por la *Moving Picture Experts Group*.

Número F ($f/\#$): Distancia focal del objetivo sobre el diámetro efectivo del lente, determina la cantidad de luz que pasa a través del dispositivo, a mayor *número f* la cantidad de luz por unidad de área que alcanza el sensor es menor.

Objetivo: Lente de la cámara fotográfica encargado de enfocar la imagen en el sensor. En ocasiones tiene diafragma.

Objeto: Cuerpo (ente) que se estudia por medio del sistema óptico y desde el cual se refleja o refleja la luz a capturar.

Pixel: Unidad mínima de formación de una imagen digital.

Plano Focal: Es el plano paralelo a la lente y perpendicular a su eje óptico, donde la imagen es proyectada.

Presión de Diseño (P): Presión que debe utilizarse para el cálculo de las piezas en conjunto del recipiente, la presión dependerá de la presión manométrica cuando:

$$\text{Si } > 300 \text{ psi (2068 KPa).}$$

$$P = 1.1 P_o.$$

$$\text{Si } \geq 300 \text{ psi (2068 KPa).}$$

$$P = P_o + 30 \text{ lb/pulg}^2.$$

Presión de Operación (P_o): Presión de trabajo y presión manométrica a la cual estará sometido un equipo en condiciones de operación normal.

Presión de trabajo máximo permisible: Máxima presión a la que se puede someter un recipiente en condiciones de operación. Con frecuencia es usado el término “Máxima presión de trabajo permisible nuevo y frío”, que se cumple cuando el recipiente se encuentra en las siguientes condiciones: El recipiente es nuevo y no se encuentra corroído, la temperatura no afecta la

resistencia por tensión del material en condiciones ambiente, no se consideran los efectos producidos por la acción del viento.

Profundidad de campo: Región alrededor del plano de prueba, donde la imagen se puede enfocar correctamente.

Rayo paraxial: Haz de rayos casi paralelos.

Recipiente a Presión: Vasija cerrada y hermética que se encuentre en la capacidad de almacenar un fluido a presión manométrica, la presión a la cual puede encontrarse sometido puede ser tanto interna como externa.

Soldadura: Medio de sujeción de piezas de manera permanente, realizado por medio de la fundición de un material aportante combinado con el material base de las piezas. El método más común de soldadura para metales es por arco eléctrico, requiriendo una máquina generadora de corriente y un electrodo.

TIF: Formato de imagen de alta calidad de 16 bits que soporta imágenes monocromáticas y a color. Sus siglas significan *Tag Image File Format*.

Traslúcido o Translúcido: Es la propiedad de un cuerpo de permitir el paso de luz.

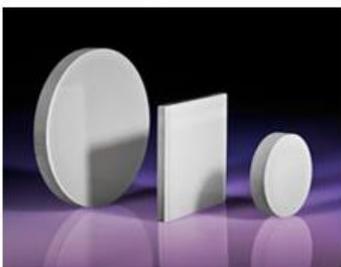
WMV: Formato de compresión de videos desarrollado por Microsoft, son las siglas de *Windows Media Video*.

Zoom: Método para disminuir el ángulo de visión de una imagen, consiguiendo acercar una sección de la imagen deseada sacrificando calidad en el proceso. Se puede lograr por medio de la variación de las distancias focales de un conjunto de lentes de un objetivo o mediante arreglo digital interpolando la luz por medio de software.

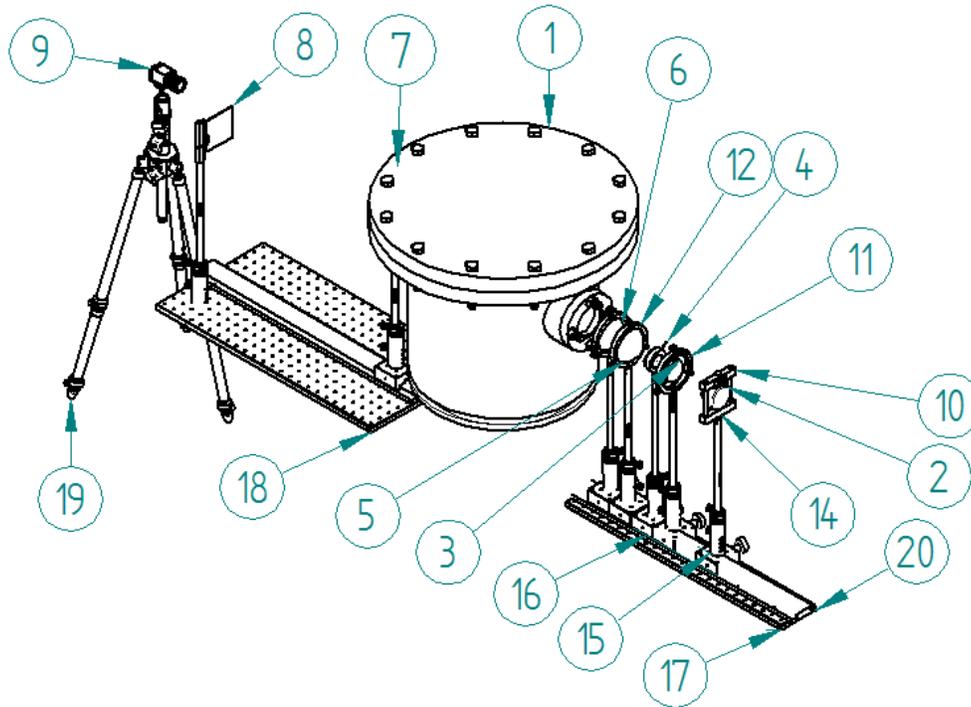
10. ANEXOS

	COMPONENTE	DETALLE	REFERENCIA	#	USD	URL
1	Fuente de Luz	Haz de luz blanca - 36 LED - pulso 0,5 μ s	83-277 ⁽¹⁾	1	875	Link
2	Lente Condensadora (L1)	Biconvexa 50 mm Dia. - f=50 mm - N-BK7	32-978 ⁽¹⁾	1	38,5	Link
3	Diafragma con Montura	Apertura máx 30 mm - min 1,2 mm	37-919 ⁽¹⁾	1	85	Link
4	Lente Colimadora (L2)	Plano Convexa 75 mm Dia - f=75 mm - N-BK7	45-367 ⁽¹⁾	1	58,5	Link
5	Difusor Óptico	75 mm Dia. - 3 mm espesor - Ópalo Blanco	46-662 ⁽¹⁾	1	33	Link
6	Accesos Ópticos	Size # 3 - 67 mm Dia. ventana - 4 Pernos	Size #3 ⁽⁴⁾	2	-	Link
7	Lente Decolimadora (L3)	Plano Convexa 75 mm Dia - f=250 mm - N-BK7	63-482 ⁽¹⁾	1	58,5	Link
8	Filtro Espacial	Filtro de Color (familia de productos)	Varios ⁽¹⁾	3	210	Link
9	Objetivo Focal Fija 50 mm	Mínima distancia de trabajo 100 mm, f/2.8	68-687 ⁽¹⁾	1	1.250	Link
10	Cámara pco.pixelfly USB	CCD 2/3", 1392x1040 pixel, exposición 1 μ s - 60 s	pix-usb-m-qe ⁽²⁾	1	4.900	Link
11	Montura Iluminación	Hasta 60 mm de diámetro.	55-530 ⁽¹⁾	1	99	Link
12	Montura L1, L2, L3y difusor óptico	Lentes de 12.7 mm a 77 mm	36-605 ⁽¹⁾	4	220	Link
13	Montura Filtro Espacial	Posición Horizontal o vertical – Máx. 3 mm espesor	53-272 ⁽¹⁾	1	80	Link
14	Poste	304.8 mm de largo - Acero	59-766 ⁽¹⁾	7	117,3	Link
15	Porta poste de altura ajustable	101.6 mm - 30 mm de distancia ajuste - Rosca M6	84-354 ⁽¹⁾	7	354	Link
16	Perilla de ajuste de riel	0.1 - 0.25 μ m de precisión – Roscado M4x8 M6x1	56-793 ⁽¹⁾	6	594	Link
17	Riel para ajuste y focalización	550 mm de largo - ajuste	56-797 ⁽¹⁾	2	590	Link
18	Mesa Óptica 1	600 x 100 mm – Rosca M6	34-347 ⁽¹⁾	1	189	Link
19	Mesa Óptica 2	600 x 300 mm – Rosca M6	54-641 ⁽¹⁾	1	390	Link
20	Tornillos x50	Rosca M6x1,0 x 10 mm largo - llave Allen	55-450 ⁽¹⁾	1	12,5	Link
21	Tornillos x50	Rosca M6x1,0 x 20 mm largo - llave Allen	55-194 ⁽¹⁾	1	14,5	Link
22	Soportes de mesa óptica	Paquete x4, Rosca M6 - Sorbotano	56-923 ⁽¹⁾	4	104	Link

23	Adaptador de Rosca	Adaptador Rosca M4 Macho a M6 Macho	58-985 ⁽¹⁾	2	12	Link
24	Adaptador de Rosca	Adaptador Rosca M6 Macho a 1/4-20 Macho	58-988 ⁽¹⁾	1	6	Link
25	Fuente de poder iluminación	24 V, conductores de estaño.	66-855 ⁽¹⁾	1	95	Link
26	Obturador de la Cámara	N/A	⁽²⁾	1	80	N/A
27	Banco de Carga Cámara	N/A	⁽²⁾	1	80	N/A
28	Trípode Cámara Digital	Min. Altura 444,5 mm - Max. Altura 1651mm	⁽²⁾	1	700	N/A
29	Sensor de presión	Sensor mecánico de acero inoxidable. Hasta 1600 bar.	MEP ⁽⁵⁾	1	-	Link
31	Sensor de temperatura	Termómetro de gas de acero inoxidable	TSS ⁽⁵⁾	1	-	Link
TOTAL				58	11.246	
⁽¹⁾ Edmund Optics, ⁽²⁾ PCO, ⁽³⁾ Newport, ⁽⁴⁾ Jacoby Tarbox, ⁽⁵⁾ Baumer						

Fuente de Luz. [Link](#)**Accesos ópticos****Mesas ópticas** [Link](#)**Lente Condensadora (L1).** [Link](#)**Lente Decolimadora (L3).** [Link](#)**Montura Iluminación** [Link](#)**Diafragma con montura.** [Link](#)**Filtro Espacial** [Link](#)**Montura L1, L2, L3.** [Link](#)**Lente colimadora (L2).** [Link](#)**Objetivo Focal Fija 50mm** [Link](#)**Montura Filtro Espacial** [Link](#)**Difusor óptico.** [Link](#)**Cámara pco.pixelfly USB** [Link](#)**Porta Poste Itura ajustable** [Link](#)

Riel [Link](#)**Tornillosx50-10mm y 20mm**[Link](#)**Soporte de mesa óptica****Perilla ajuste de riel**[Link](#)**Adaptador de rosca** [Link](#)**Fuente de poder Iluminación**[Link](#)**Trípode Cámara Digital****Sensor de presión** [Link](#)**Sensor de temperatura** [Link](#)**Poste** [Link](#)



#	Componente	Cantidad	Origen CAD
1	Ensamble recipiente a presión con accesos ópticos	1	Autores
2	Fuente Iluminación	1	Autores
3	Lente L1 (32978)	1	Edmund Optics
4	Diafragma	1	Autores
5	Lente L2 (45367)	1	Edmund Optics
6	Difusor Óptico (46662)	1	Edmund Optics
7	Lente L3 (63482)	1	Edmund Optics
8	Filtro Espacial	1	Autores
9	Cámara digital y Objetivo	1	GrabCAD by 3DGEN
10	Montura Fuente	1	Autores
11	Montura L1 (36605)	1	Edmund Optics
12	Montura L2, L3 y L4 (36605)	3	Edmund Optics
13	Montura Filtro	1	Autores
14	Poste (59766)	7	Edmund Optics
15	Porta Poste Ajustable (84354)	7	Edmund Optics
16	Perilla de Ajuste de riel	6	Autores
17	Mesa Iluminación (34347)	1	Edmund Optics
18	Mesa Óptica (54641)	1	Edmund Optics
19	Trípode	1	GrabCAD by Rezső Dér
20	Riel	2	Autores