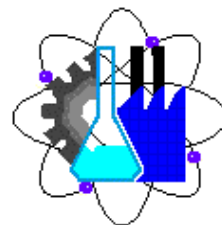




U.A.E.M

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA
INERTE PARA EL LABORATORIO NACIONAL DE
SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR Y
QUÍMICA SOLAR**

T E S I S P R O F E S I O N A L
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O I N D U S T R I A L
P R E S E N T A:
R O D R I G O R U B Í D E L G A D O

Asesor interno: **Dr. Moisés Montiel González**

Asesor externo: **Dra. Heidi Isabel Villafán Vidales**

CUERNAVACA, MORELOS

2014

Agradecimientos

A todos los miembros de la coordinación de Concentración Solar del Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

Al proyecto de CONACYT "Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar, segunda etapa" proyecto número 123767.

A todas las personas que brindaron su apoyo para realizar este proyecto.

Índice

Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1. Situación Actual	1
1.2. Energía en México	5
1.3. Energía Solar	6
1.4. Combustibles Solares	8
1.5. Reactores Químicos Solares	9
1.6. Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar	11
1.6.1. Horno Solar del Instituto de Energías Renovables (HoSIER)	11
1.7. Comentarios	13
1.8. Objetivo	14
1.9. Objetivos particulares	14
1.10. Alcance	14
1.11. Aportación	14
1.12. Estructura general del trabajo	15
Capítulo 2	16
Estudios preliminares para el diseño y construcción de la Cámara Inerte	16
2.1. Presión	16
2.2. Descripción de un gas ideal	22
2.3. Vacío	23
2.3.1. Producción de vacío	24
2.3.2. Cámaras de vacío	24
2.3.3. Selección de Materiales	25
2.3.4. Medición de vacío	26
2.3.5. Medidores de temperatura	27
2.4. Bridas	28

2.4.1. Bridas de vacío CF.....	28
2.4.2. Bridas de vacío KF.....	29
2.4.3. Pasamuros eléctrico.....	30
Capítulo 3.....	31
Diseño de las piezas de la Cámara Inerte.....	31
4.1. Base de la Cámara Inerte.....	31
4.2. Apoyo de la Cámara Inerte.....	35
4.3. Soportes Cámara Inerte.....	37
4.4. Brida CF 2 3/4".....	37
4.5. Brida ciega CF 2 3/4".....	39
4.6. Brida CF 1 1/3".....	40
4.7. Brida ciega CF 1 1/3".....	42
4.8. Brida KF 25.....	42
4.9. Brida KF 25 a NPT hembra 1/4".....	43
4.10. Brida ciega KF 25.....	44
4.11. Brida KF 16.....	45
4.12. Brida KF 16 a NPT hembra 1/4".....	46
4.13. Brida ciega KF 16.....	47
4.14. Pasa-tubbing.....	47
4.15. Soporte Bridas.....	48
4.16. Piezas para sellar la esfera.....	49
4.16.1. Empaque plano.....	49
3.14.3. Brida de esfera sin ranura.....	49
3.14.4. Brida de esfera con ranura.....	50
3.15. Piezas para sellar la boquilla.....	51
3.15.1. Empaque plano de boquilla.....	51
3.15.2. Brida de boquilla sin ranura.....	52
3.15.2. Brida de boquilla con ranura.....	52
3.15.3. Brida ciega de la boquilla.....	53
3.16. Porta muestra.....	54
3.16.1. Ángulo del porta muestra.....	54

3.16.2.	Arenero del porta muestra.....	55
3.16.3.	Horquilla del porta muestra	57
3.16.4.	Postes de la horquilla	58
3.16.5.	Sistema de inyección de gases.....	59
3.17.	Regaderas del sistema de inyección de gases.....	59
3.18.	Esfera de la Cámara Inerte.....	61
3.18.1.	Análisis de esfuerzos de la esfera	61
Capítulo 4.....		63
Ensamble de la Cámara Inerte		63
4.1.	Ensamble de bridas.....	63
4.2.	Ensamble de bridas con la base de la Cámara Inerte	65
4.3.	Ensamble de apoyo de la Cámara Inerte	65
4.4.	Ensamble de la base con el apoyo de la Cámara Inerte	67
4.5.	Ensamble de bridas y sellos	68
4.6.	Ensamble sistema de inyección de gases.....	71
4.7.	Ensamble porta muestra y receptor de productos	72
4.8.	Ensamble de la esfera de la Cámara Inerte	74
4.9.	Ensamble de la brida ciega de la boquilla	75
Capítulo 5.....		78
Instalación de la Cámara Inerte en el HoSIER.....		78
5.1.	Mesa de perfiles modulares de aluminio	78
5.2.	Instalación en la mesa de trabajo del HoSIER.....	79
5.3.	Instalación de inyección de gases	79
5.4.	Caracterización de la Cámara Inerte	83
5.5.	Sistema de adquisición de datos.....	86
5.6.	Software de monitoreo y control	87
5.7.	Pruebas preliminares de vacío	92
5.8.	Prueba preliminar de síntesis de óxidos de tungsteno	93
Capítulo 6.....		97
Higiene y seguridad en la operación de la Cámara Inerte		97
6.1.	Normas de seguridad acerca de la presión	97

6.2. Medidas de seguridad acerca de la presión	99
6.3. Medidas de seguridad en el manejo de materiales.....	99
6.3.1. Tungsteno	100
6.4. Información de seguridad acerca del tungsteno	100
6.4.1. Incendio y explosión.....	100
6.4.2. Riesgo a la salud.....	100
6.4.3. Equipo de protección personal.....	101
6.5. Trióxido de tungsteno	101
Capítulo 7	102
Conclusiones	102
Trabajos Futuros.....	103
Bibliografía	104

Lista de figuras

Fig. 1. 1	Consumo final total mundial de 1971 a 2010.	2
Fig. 1. 2	Consumo final total mundial de combustibles de 1973 a 2010.	2
Fig. 1. 3	Participación estimada de energías renovables del consumo final mundial en 2011.	3
Fig. 1. 4	Estructura de producción de energía primaria en México en el año 2011.	5
Fig. 1. 5	Escenario de planeación de generación eléctrica por combustible en México en el año 2027.	6
Fig. 1. 6	Sistemas de concentración solar. a. Sistema de enfoque puntual. b. Sistema de enfoque puntual parabólico. c. Sistema de enfoque lineal con concentradores cilíndrico-parabólico. d. Sistema de enfoque lineal Fresnel.	8
Fig. 1. 7	Consumo total mundial de energía por sector en 2010.	9
Fig. 1. 8	Esquema del funcionamiento de un reactor químico solar (Steinfeld, 2003).	10
Fig. 1. 9	Esquema de un reactor químico solar rotativo para la disociación de ZnO (Chambon, 2010).	10
Fig. 1. 10	Horno Solar del Laboratorio Nacional de Concentración y Química Solar.	11
Fig. 1. 11	Distribución de facetas del HoSIER (Licurgo,2012).	12
Fig. 1. 12	Heliostato del HoSIER.	12
Fig. 1. 13	Mesa de trabajo del HoSIER.	13
Fig. 2. 1	Esquema de la fuerza que ejerce un fluido.	17
Fig. 2. 2	Esquema de la fuerza que ejerce una partícula de gas en la pared de un recipiente.	18
Fig. 2. 3	Capacidad de las diferentes bombas de vacío.	24
Fig. 2. 4	Medidor Pirani.	26
Fig. 2. 5	Esquema de brida CF.	28
Fig. 2. 6	Esquema de una brida KF.	30
Fig. 2. 7	Pasamuros eléctrico CF.	30
Fig. 3.1	Vista superior de la base de la Cámara Inerte.	31
Fig. 3.2	Vista del ángulo de desfase de los barrenos de 7.14 mm.	32
Fig. 3.3	Vista del diámetro interior y exterior que definen el canal de la base.	32
Fig. 3.4	Vista de sección del canal de la base.	33
Fig. 3.5	Especificaciones de los barrenos para sujetar bridas.	33
Fig. 3.6	Especificaciones de 4 barrenos de 12.70 mm de diámetro.	34
Fig. 3.7	Especificaciones del último grupo de barrenos.	34
Fig. 3.8	Especificaciones del barreno central.	35
Fig. 3.9	Especificaciones del apoyo de la cámara.	35
Fig. 3.10	Mesa de trabajo del HoSIER.	36
Fig. 3.11	Especificaciones de barrenos para soportes del apoyo.	36
Fig. 3.12	Vista dimétrica y vista de sección de un soporte de la Cámara Inerte.	37
Fig. 3.13	Diámetro interior y exterior de la brida CF 2 ¼".	37
Fig. 3.14	Vista de sección de la brida.	38

Fig. 3.15	Diámetro interior y exterior de la pestaña de la brida CF 2 ¾".	38
Fig. 3.16	Ranuras de la brida CF 2 ¾".	39
Fig. 3.17	Brida ciega CF 2 ¾".	39
Fig. 3.18	Diámetro interior y exterior de la brida CF 1 ½".	40
Fig. 3.19	Vista de sección de la brida CF 1 ½".	40
Fig. 3.20	Diámetro interior y exterior de la pestaña de la brida CF 1 ½".	41
Fig. 3.21	Vista de sección del cuerpo de la brida CF 1 ½".	41
Fig. 3.22	Brida ciega CF 1 ½".	42
Fig. 3.23	Diámetro interior y exterior de la brida KF 25.	42
Fig. 3.24	Vista de sección de la brida KF 25.	43
Fig. 3.25	Vista lateral de la brida KF 25 a NPT hembra ¼".	43
Fig. 3.26	Vista de sección y vista inferior de la brida KF 25 a NPT hembra ¼".	44
Fig. 3.27	Brida ciega KF 25.	44
Fig. 3.28	Diámetro interior y exterior de brida KF 16.	45
Fig. 3.29	Vista de sección de brida KF 16.	45
Fig. 3.30	Vista lateral de la brida KF 16 a NPT hembra ¼".	46
Fig. 3.31	Vista de sección y vista inferior de la Brida KF 16 a NPT hembra ¼".	46
Fig. 3.32	Brida ciega KF 16.	47
Fig. 3.33	Vista lateral y de sección del pasa-tubbing.	47
Fig. 3.34	Vista superior del pasa-tubbing.	48
Fig. 3.35	Vista superior de los soportes para bridas.	48
Fig. 3.36	Empaque plano.	49
Fig. 3.37	Brida sin ranura de esfera.	50
Fig. 3.38	Especificaciones de la brida de esfera con ranura.	50
Fig. 3.39	Vista de la sección del diseño de la ranura.	51
Fig. 3.40	Empaque plano de la boquilla.	51
Fig. 3.41	Brida de boquilla sin ranura.	52
Fig. 3.42	Brida de boquilla con ranura para anillo tórico.	53
Fig. 3.43	Vista de la sección del diseño de la ranura.	53
Fig. 3.44	Brida ciega de la boquilla.	54
Fig. 3.45	Vista dimétrica y vista lateral del ángulo.	54
Fig. 3.46	Barrenos del ángulo del porta muestra.	55
Fig. 3.47	Vista frontal y lateral del soporte del arenero.	55
Fig. 3.48	Vista frontal del cuerpo del arenero.	56
Fig. 3.49	Vista lateral del cuerpo del arenero.	56
Fig. 3.50	Vista lateral del soporte con ranura para la horquilla.	57
Fig. 3.51	Arenero completamente ensamblado.	57
Fig. 3.52	Horquilla del porta muestra.	58
Fig. 3.53	Especificaciones del poste de la horquilla.	58
Fig. 3.54	Vista frontal de la regadera de gas.	59
Fig. 3.55	Vista superior de la regadera inferior de gas.	59
Fig. 3.56	Vista lateral de la regadera de gas superior de la Cámara Inerte.	60
Fig. 3.57	Vista superior de la regadera superior.	60

Fig. 3.58	Esfera de la Cámara Inerte.	61
Fig. 3.59	Esfuerzos presentes en la esfera.	62
Fig. 3.60	Vista de la sección del análisis de esfuerzo.	62
Fig. 4.1	Ensamble brida KF 25.	63
Fig. 4.2	Ensamble brida KF 16.	64
Fig. 4.3	Ensamble brida CF 2 ¾".	64
Fig. 4.4	Ensamble brida CF 1 ⅓".	64
Fig. 4.5	Distribución de conexiones en la base de la Cámara Inerte.	65
Fig. 4.6	Distribución de soportes de bridas y conexiones.	65
Fig. 4.7	Vista dimétrica del ensamble de soportes.	66
Fig. 4.8	Vista dimétrica del ensamble de los pernos.	66
Fig. 4.9	Vista de la sección de los pernos enroscados.	66
Fig. 4.10	Ensamble base con apoyo.	67
Fig. 4.11	Vista de la sección del ensamble de la base con el apoyo.	67
Fig. 4.12	Ensamble de tornillos de cabeza hueca en la base de la Cámara Inerte.	68
Fig. 4.13	Vista de la sección del ensamble de los tornillos de cabeza hueca.	68
Fig. 4.14	Vista dimétrica del empaque plano colocado en la base de la Cámara Inerte. ...	69
Fig. 4.15	Vista dimétrica del ensamble de la brida de aluminio.	69
Fig. 4.16	O-ring colocado sobre la brida sin ranura.	70
Fig. 4.17	Cámara Inerte con sellos ensamblados.	70
Fig. 4.18	Vista de la sección de la Cámara Inerte con sellos ensamblados.	71
Fig. 4.19	Regaderas instaladas en la base de la cámara.	71
Fig. 4.20	Alineación del ángulo del porta muestra.	72
Fig. 4.21	Vista de la sección de la unión del ángulo del porta muestra.	72
Fig. 4.22	Alineación de porta muestra.	73
Fig. 4.23	Horquilla con muestras.	73
Fig. 4.24	Porta muestra con horquilla.	74
Fig. 4.25	Ensamble de la base de la Cámara Inerte con la esfera.	74
Fig. 4.26	Vista de la sección del ensamble de la base con la esfera.	75
Fig. 4.27	Brida con ranura colocada en la boquilla de la esfera.	75
Fig. 4.28	Vista de la sección del anillo de viton colocado en la ranura de la brida.	76
Fig. 4.29	Vista de la sección de la boquilla con la segunda brida.	76
Fig. 4.30	Vista de la sección de la boquilla completamente sellada.	77
Fig. 4.31	Cámara Inerte completamente ensamblada.	77
Fig. 5.1	Mesa de perfiles modulares de aluminio.	78
Fig. 5.2	Alineación de la Cámara Inerte.	79
Fig. 5.3	Racores swagelok para vacío.	80
Fig. 5.4	Tubbing deformado por una férula swagelok.	80
Fig. 5.5	Válvula antirretorno.	81
Fig. 5.6	Válvula de paso.	81
Fig. 5.7	Válvula de regulación.	82
Fig. 5.8	Relaciones de Coeficiente de caudal.	83
Fig. 5.9	Diagrama de la instalación de gases.	83

Fig. 5.10	Medidor Pirani.	84
Fig. 5.11	Sensor Cole-Parmer.	85
Fig. 5.12	Termopares colocados sobre una muestra de tungsteno.	85
Fig. 5.13	Termopares en la pared exterior de la esfera de la Cámara Inerte.	86
Fig. 5.14	Chasis CompactRIO con 8 espacios para módulos de señales.	86
Fig. 5.15	Módulo 9205 para señales de voltaje.	87
Fig. 5.16	Diagrama de bloques del instrumento virtual de monitoreo y control.	90
Fig. 5.17	SubVi de conversión de datos flotantes a datos de texto.	90
Fig. 5.18	Ventana del software de control de la Cámara Inerte.	92
Fig. 5.19	Racores swagelok sellados.	92
Fig. 5.20	Cámara Inerte preparada para una prueba de vacío.	93
Fig. 5.21	Gráfica de registros de temperatura de la prueba de síntesis de óxidos de tungsteno.	94
Fig. 5.22	Gráfica de registros de temperatura.	95
Fig. 5.23	Gráfica de registro de radiación directa.	95
Fig. 5.24	Gráfica de temperaturas registradas por los termopares externos.	96
Fig. 5.25	Barras de tungsteno con óxidos.	96

Lista de tablas

Tabla 1.1	Indicadores económicos (REN21,2013).	4
Tabla 2.1	Tipos de termopares.	28
Tabla 2.2	Bridas CF.	29
Tabla 2.3	Bridas KF.	30
Tabla 3.1	Especificaciones de ranura AS-568-4461.	51
Tabla 3.2	Especificaciones ranura Ansi Inch AS-568-3401.	53
Tabla 5.1	Conexión de instrumentos en chasis del CompactRIO.	87
Tabla 5.2	Tipos de datos y operadores utilizados en el diagrama de bloques.	88
Tabla 6.1	Clasificación de recipientes sujetos a presión.	100
Tabla 6.2	Ficha técnica de la Cámara Inerte.	101
Tabla 6.3	Tipos de electrodo de tungsteno.	101
Tabla 6.4	Propiedades físicas del tungsteno.	102
Tabla 6.5	Propiedades físicas del trióxido de tungsteno (Sigma-Aldrich, 2013).	103

Lista de siglas y abreviaturas

ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (American National Standards Institute)
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers)
CF	ConFlat es una marca registrada de Varian Associates
KF	Klein Flange (Klein Flange: Brida pequeña)
CompactRIO	Salidas y entradas reprogramables (Reprogrammable inputs/outputs)
HoSIER	Horno Solar del Instituto de Energías Renovables
IDN	Radiación solar directa neta
IEA	Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency)
IER	Instituto de Energías Renovables
ISO	Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization)
MSDS	Hoja de datos de seguridad del material (Material Safety Data Sheet)
Mtoe	Equivalente a millones de toneladas de petróleo
NOM	Norma Oficial Mexicana
NPT	Rosca Nacional de tubos o Rosca americana cónica de tubos (National Pipe Thread)
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (The Organisation for Economic Co-operation and Development)
OSHA	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (Occupational Safety & Health Administration)
REN21	Red Política de Energía Renovable para el siglo 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century)
SENER	Secretaría de Energía
VI	Instrumento Virtual (Virtual Instrument)

Capítulo 1

Introducción

1.1. Situación Actual

En la revisión histórica entre la humanidad y la energía podemos resaltar que cada cambio significativo en la vida del hombre está estrechamente relacionado con la energía que necesita, siendo la necesidad de ésta cada vez mayor. El aumento en la necesidad energética es causado por nuevos desarrollos tecnológicos.

La demanda energética alrededor del mundo ha aumentado de gran manera debido al crecimiento de su población, cada uno de los nuevos pobladores requiere de productos y servicios, por lo tanto también han aumentado las actividades industriales, el transporte y los servicios requeridos para mantener un nivel de vida adecuado. La energía necesaria para suplir estas necesidades es suministrada en su mayoría por combustibles fósiles en consecuencia a nivel global existe una dependencia energética y económica a estos combustibles.

Económicamente se empezó a depender del petróleo en los años 50's después de la segunda Guerra Mundial. El petróleo fue el combustible que hizo posible reactivar la industria e iniciar el crecimiento económico. Para la década de los 70's el petróleo suplía un tercio de la energía para la industria y un cuarto de la generación de energía eléctrica.

En 1973 el consumo energético mundial fue de 4,672 Mtoe (equivalente a millones de toneladas de petróleo) desde entonces ha incrementado gradualmente (figuras 1.1 y 1.2) y en menos de 40 años se ha doblado. En 2010 el suministro fue de 8,677 Mtoe (OECD/IEA, 2012).

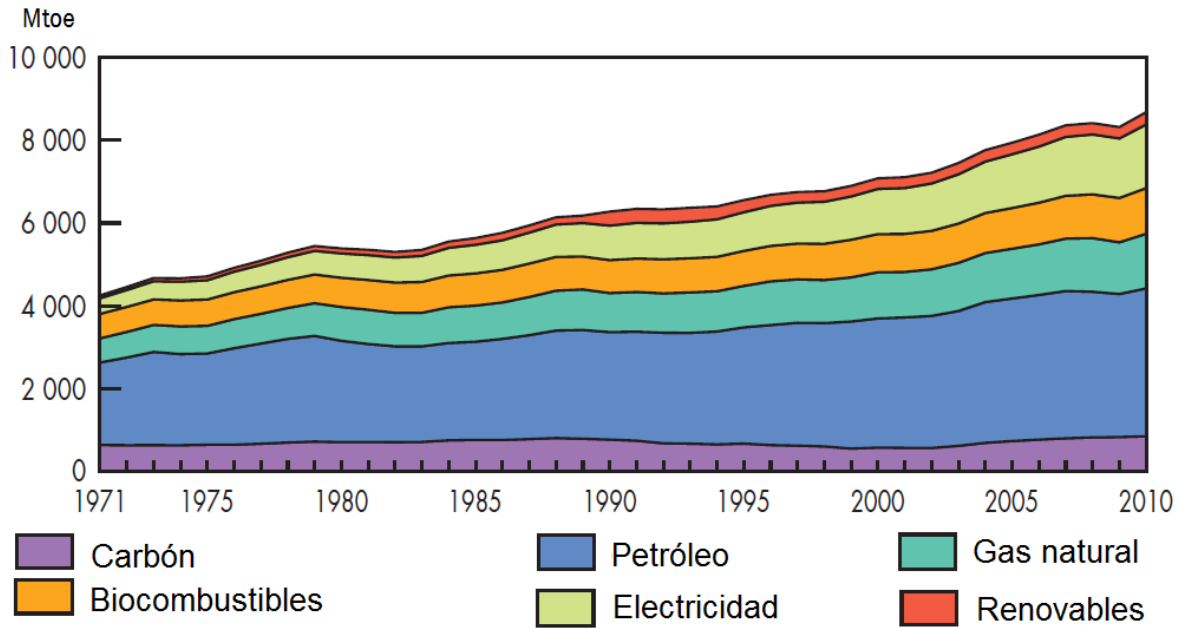


Fig. 1.1 Consumo final total mundial de 1971 a 2010.

Del total del suministro más del 80% se obtiene de 3 combustibles, el carbón, petróleo y gas natural. El porcentaje restante es proporcionado por energía Hidráulica, Biocombustibles, plantas Nucleares y energías renovables (Solar, Hidráulica, Eólica, Geoenergía, etc).

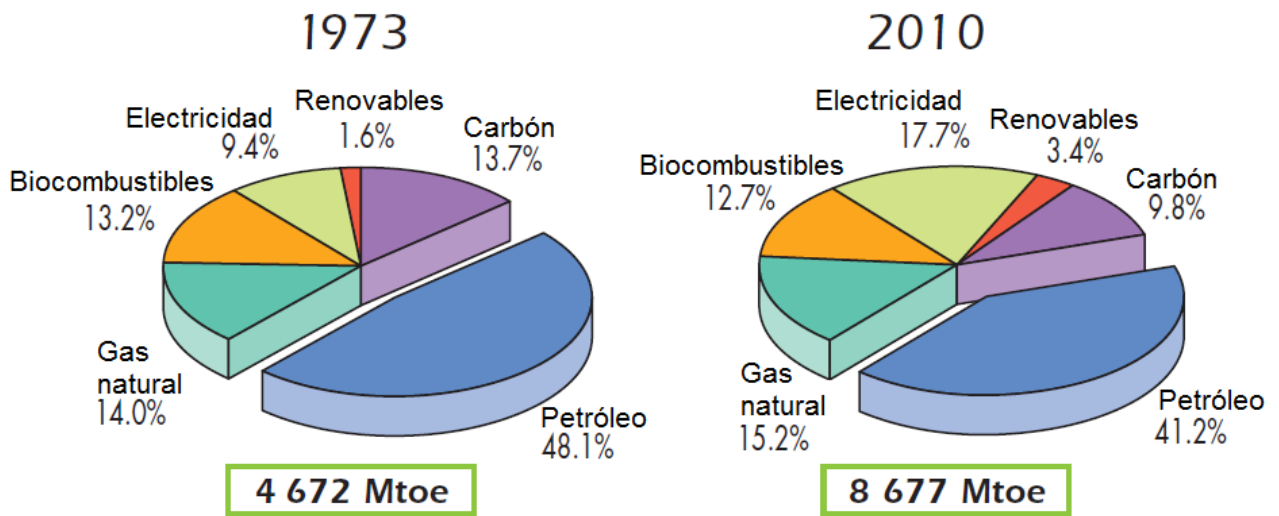


Fig. 1.2 Consumo final total mundial de combustibles de 1973 a 2010.

Hoy en día no existe un panorama favorable en el que no se exploten los combustibles fósiles, es tal la importancia de estos combustibles que su disponibilidad define el nivel de seguridad energética y económica de un país.

Los combustibles fósiles pueden abastecer la demanda actual, sin embargo se cuenta con reserva limitadas de ellos. Además el uso de estos combustibles tiene como resultado la emisión de gases de efecto invernadero provocando el cambio climático.

Las crecientes necesidades de energía y las limitaciones que representan el cuidado ambiental son los aspectos más importantes a considerar para determinar como suplir la demanda de energía. Es por eso que se debe buscar una alternativa que permita un desarrollo sustentable, asegurando la seguridad energética, económica y ambiental, una de estas alternativas es el uso de energías renovables. Las energías renovables tienen la capacidad de cumplir con la demanda de energía actual, además de que administradas adecuadamente pueden explotarse cuidando el medio ambiente.

Su uso puede ser solución para los problemas energéticos presentes, sin embargo la capacidad instalada de producción de energía de estas fuentes aún es muy baja.

A partir de políticas se busca promover el uso de energías renovables y su desarrollo tecnológico, para lograr una competitividad en costos que incentive la inversión para su explotación, tanto en sectores públicos como privados.

La participación de las energías renovables en el consumo de energía mundial ha aumentado en los últimos años. Estimaciones muestran que en el 2011 el consumo de energías renovables alcanzó un 9.7% (Fig. 1.3), casi un 2% más que el año anterior (REN21, 2013).

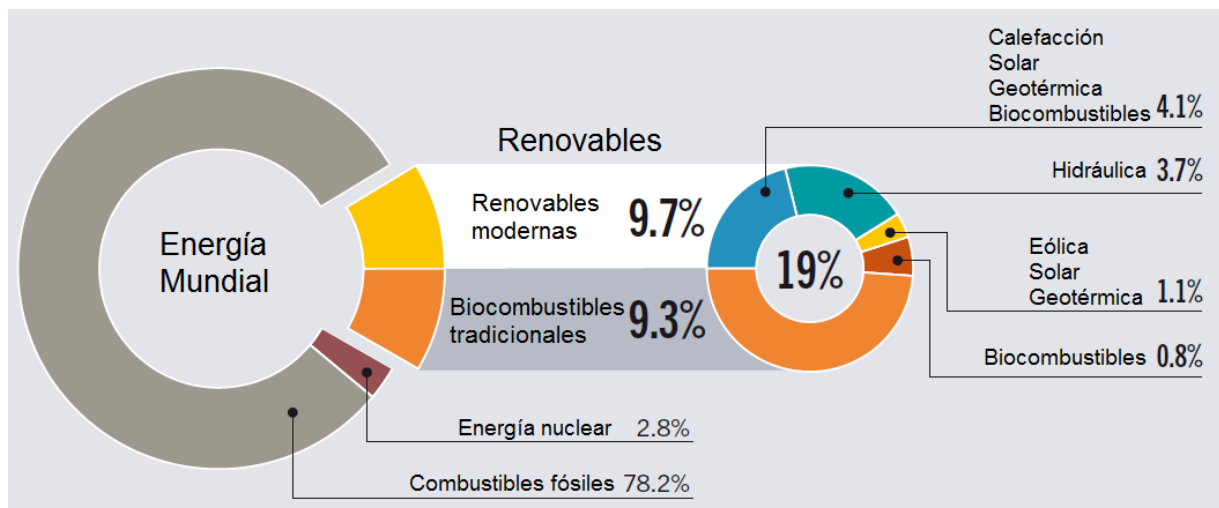


Fig. 1.3 Participación estimada de energías renovables del consumo final mundial en 2011.

En el año 2012 la capacidad total de energías renovables alrededor del mundo excedió 1,470 GW, un 8.5% más que en 2011. Se espera que este crecimiento siga por los siguientes años e incluso sea mayor por la reducción de costos que generarán los avances tecnológicos y las políticas de desarrollo.

A pesar de la crisis económica mundial siguió la tendencia de invertir en energías renovables, ya que es una opción para el desarrollo económico de un país y en el caso de los países con economías desarrolladas, es una manera de tener seguridad económica a partir de nuevos modelos económicos, un ejemplo de esto es Islandia en la década de los 70's estaba clasificado como un país en desarrollo, su economía estaba basada en la pesca y el ganado, su principal fuente de energía eran combustibles fósiles importados. En las siguientes décadas se transformó rápidamente todo el sistema de energía, el cual ahora cubre el 100% del suministro de energía eléctrica y el 100% de la energía de calefacción a partir de recursos renovables domésticos, hidroeléctricas y geotermia. Esto permite que los costos de energía sean bastantes bajos comparados con los de otros países lo que hace de Islandia un lugar atractivo para inversionistas (Ragnar, 2013).

El modelo económico de energías sustentables de Islandia le ha dado seguridad económica y energética, le permitió sobrellevar la crisis económica que sufrieron en 2008 cuando su sistema bancario colapsó, además de que el ahorro de 10 años de no exportar combustibles fósiles para la calefacción de hogares representa un monto igual al PIB de un año.

Un reflejo de esto es que los países desarrollados invirtieron en energías renovables 2.5 veces más que los países en desarrollo.

Actualmente, por lo menos hay 138 países con objetivos y políticas de apoyo para la explotación de estos recursos, como resultado de esto hay 5.7 millones de personas en el mundo trabajando directa e indirectamente en el sector de las energías renovables (REN21, 2013).

La reducción de costos y el subsidio a estos proyectos se ve reflejado en la relación de la inversión en la capacidad de energías renovables (Tabla 1.1) y el total de capacidad de energías renovables instaladas en los últimos años.

Tabla 1.1 Indicadores económicos (REN21,2013).

Indicadores económicos anuales de la nueva capacidad instalada de energías renovables				
		2010	2011	2012
Inversión en nuevas instalaciones	Billones de USD	227	279	244
Nueva capacidad total instalada (sin hidráulica)	GW	315	195	480
Nueva capacidad total instalada (con hidráulica)	GW	1,250	1,355	1,470

1.2. Energía en México

México es uno de los mayores productores de energías primarias a nivel mundial, en el 2011 la producción nacional de energía primaria fue de 9,190 PJ (Fig.1.4), de esta energía un 88.1% fue aportada por hidrocarburos (SENER, 2012).

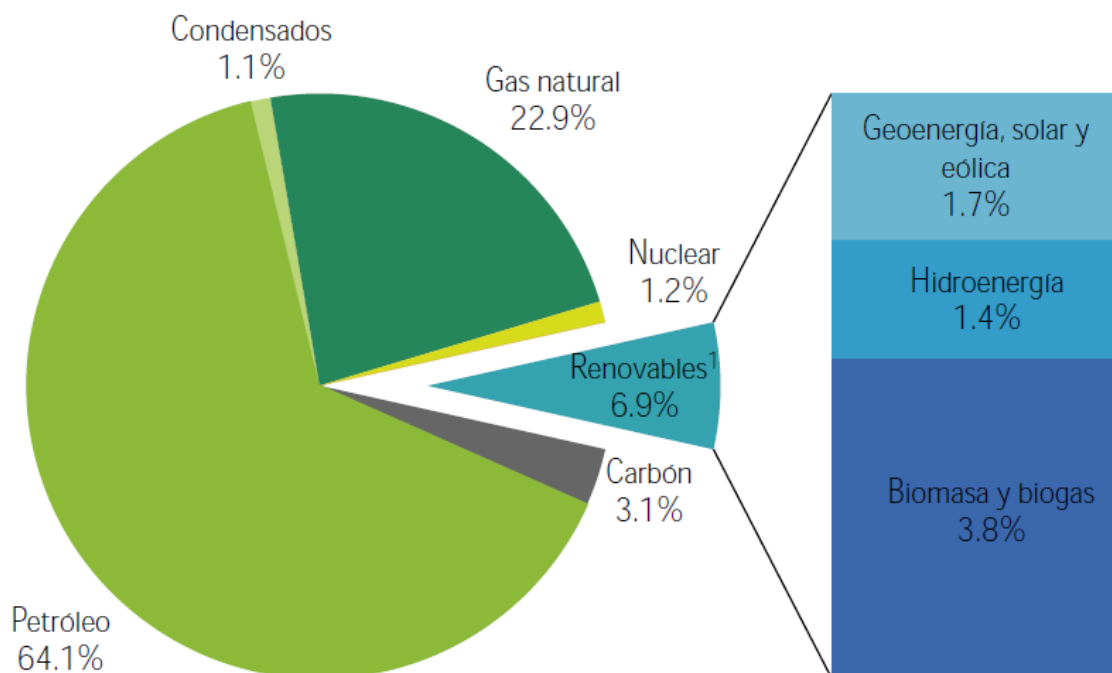


Fig. 1.4 Estructura de producción de energía primaria en México en el año 2011.

Las energías renovables sólo aportaron un 6.9% a pesar de que el país cuenta con un enorme potencial para explotar las energías renovables, además de que existe un marco legal que regula y fomenta el uso de estas fuentes.

El país depende del uso de combustibles fósiles, en los últimos 10 años el uso de hidrocarburos ha aportado más del 80% de la energía y la energía renovable menos del 8%. Esta tendencia no ha cambiado desde entonces, la aportación anual de las energía renovables ha crecido en promedio sólo un 0.8% (SENER,2013).

Al parecer se seguirá con estas tendencias por los próximos años, ya que la estrategia nacional de Energía 2013-2027 pronostica que para el año 2027 un 84% (Fig. 1.5) de la energía eléctrica nacional será producida por combustibles fósiles, un 72% será aportado por el gas natural, combustible que ha bajado notablemente su costo por las nuevas tecnologías de perforación (SENER,2013).

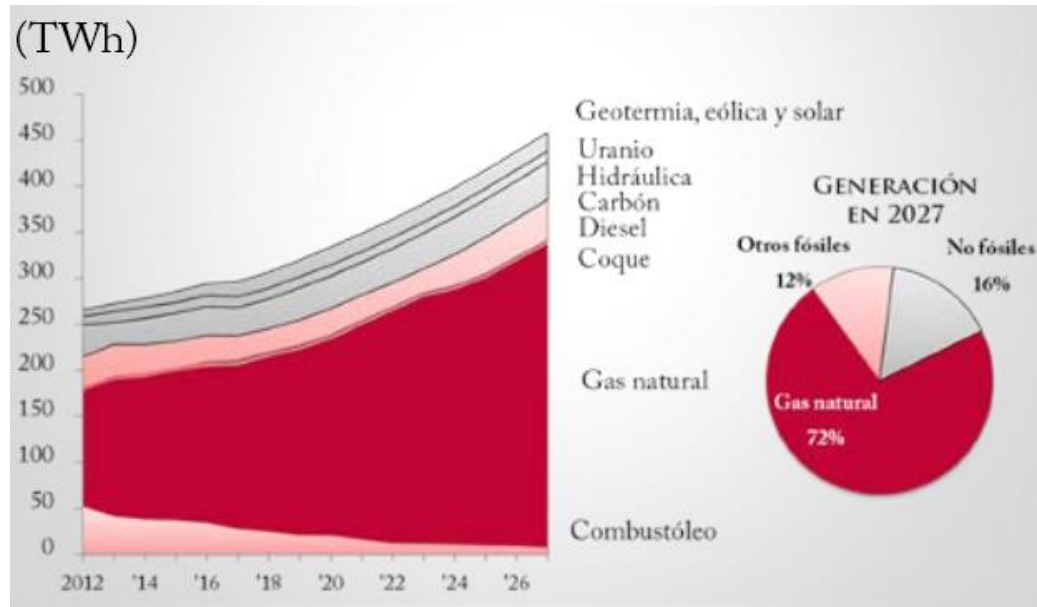


Fig. 1.5 Escenario de planeación de generación eléctrica por combustible en México en el año 2027.

1.3. Energía Solar

La energía solar es la mayor fuente de energía que puede aprovechar el hombre, usando 0.1% de la superficie de la tierra con colectores solares se puede recolectar toda la energía necesaria para suministrar las necesidades anuales de energía de todos los habitantes del planeta (Steinfeld, 2004).

El sol es esencialmente una fuente de energía ilimitada, sin embargo se deben considerar ciertas limitantes, que la radiación solar esta diluida, es intermitente y no está distribuida equitativamente sobre la superficie de la tierra.

Por esto se debe de buscar alternativas de aprovechar esta energía, este es el caso de los combustibles solares. Los combustibles solares pueden ser usados para todo tipo de aplicaciones, para generar calefacción, trabajo mecánico o eléctrico, usarse directamente para generar electricidad en celdas de combustible o baterías.

Para producir combustibles solares es necesario concentrar la energía solar. La luz solar se puede concentrar a partir de espejos o lentes, estos reciben la luz sobre toda su superficie para después reflejarla a un área más pequeña para obtener un flujo radiativo concentrado.

Existen cuatro configuraciones básicas para concentrar la energía solar (Fig. 1.6).

- a. Sistemas de enfoque puntual con espejos concentradores múltiples (heliostatos) enfocados sobre una torre. Como se muestra en la figura 1.6 a, en estas plantas los heliostatos concentran la radiación solar directa sobre un receptor localizado en la parte superior de una torre.
- b. Sistemas de enfoque puntual con concentradores tipo platos o discos parabólicos de revolución. En estos sistemas se concentra la radiación solar directa en un receptor de cavidad colocado en la zona focal del paraboloide, el receptor se encuentra acoplado a un motor Stirling que a su vez se conecta a un generador para producir directamente electricidad (Fig. 1.6 b).
- c. Sistemas de enfoque lineal con concentradores cilindro-parabólicos. Estos sistemas, como el mostrado en la figura 1.6 c representan la tecnología más madura. Consiste en hacer circular un fluido térmico por un tubo cilíndrico metálico (por ejemplo, acero cubierto por una película óptica muy absorbente) subtendido a lo largo de la línea focal de un canal parabólico que capta la radiación solar directa.
- d. Sistemas de enfoque lineal con concentradores de reflexión tipo Fresnel, donde las superficies están colocadas de tal manera que la radiación solar incide sobre los espejos dispuestos en la parte inferior del concentrador (Fig. 1.6 d). (Montiel,2013)

A partir de los concentradores se puede conseguir la energía necesaria para llevar a cabo los procesos químicos para obtener combustibles solares o para diseñar, probar, analizar y producir nuevos materiales (Flamant, 2010).

La industria de extracción metalúrgica es una de las de mayor consumo de calor y energía. Un proceso solar térmico reduciría las emisiones de gases invernadero para esta actividad. La temperatura para reducir minerales de aluminio es de 2400K a 2600 K, una temperatura que un horno solar puede alcanzar fácilmente en pocos segundos.

A partir de la concentración solar se puede dar tratamientos térmicos a metales, producirse materiales cerámicos, síntesis de nano materiales, sinterizado o degradación de compuestos.

La concentración solar puede utilizarse directamente para generar trabajo mecánico para producir electricidad, calentando un fluido y usándolo en un ciclo Rankine, Brayton o Stirling.

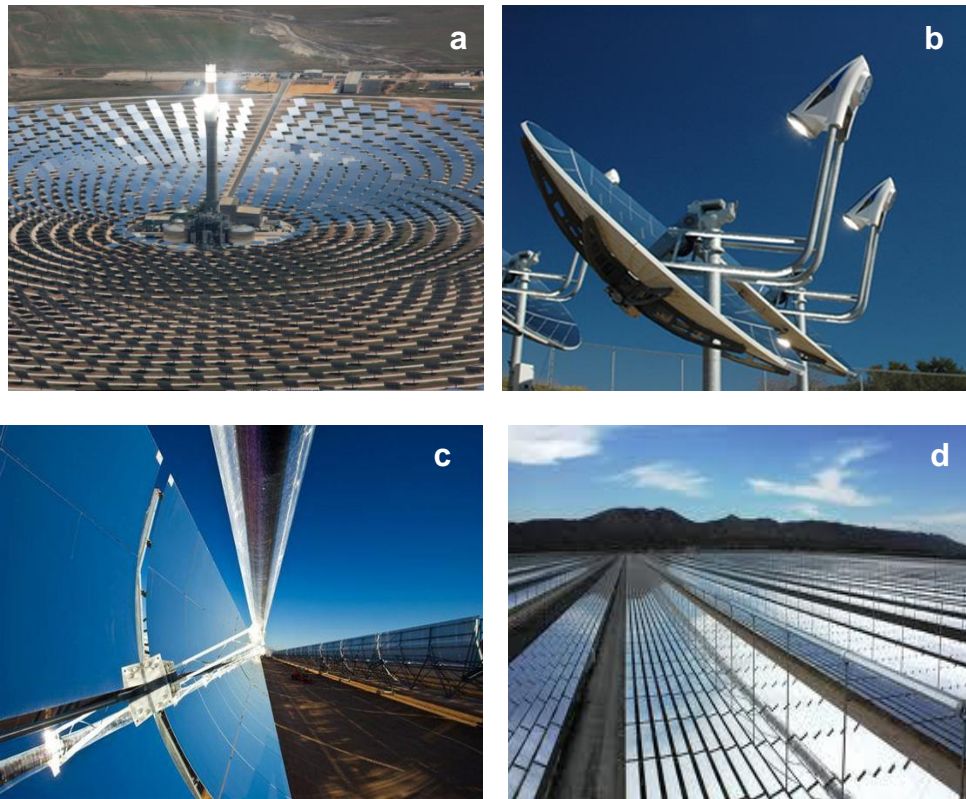


Fig. 1.6 Sistemas de concentración solar. a. Sistema de enfoque puntual. b. Sistema de enfoque puntual parabólico. c. Sistema de enfoque lineal con concentradores cilindrico-parabólico. d. Sistema de enfoque lineal Fresnel.

1.4. Combustibles Solares

Los combustibles solares, son portadores de energía químicos, que pueden ser almacenados y transportados por largos periodos, son llamados solares por que la fuente de energía primaria para producirlos es la radiación solar.

Estos combustibles son la alternativa para suplir la necesidad energética en las zonas geográficas donde no es tan alta la radiación solar (30° norte y 30° sur de latitud). Los combustibles solares pueden usarse para producir calor, procesarse para generar trabajo mecánico o eléctrico, usarse en celdas de combustible para impulsar vehículos eléctricos, etc.

Con los combustibles solares se evitaría el uso de combustibles fósiles para el transporte y la industria, esto representa un 55.2% (Fig. 1.7) del consumo total (SENER, 2012).

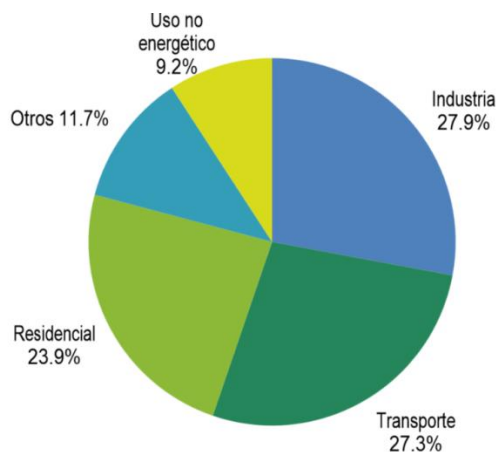


Fig. 1.7 Consumo total mundial de energía por sector en 2010.

Existen tres maneras de obtener combustibles a partir de la concentración solar.

- Electroquímica Solar
- Fotoquímica Solar
- Termoquímica Solar

Los hornos Solares son muy útiles para la Termoquímica solar ya que alcanzan grandes temperaturas, hasta 3000 K en pocos segundos, estos hornos tienen dos principales componentes, un heliostato con dos grados de libertad encargado de seguir al sol para reflejar la luz solar a un sistema paraboloide que concentra la radiación en una zona focal.

El tener una zona focal facilita la instalación de dispositivos, reactores e instrumentos para la realización de experimentos, por lo tanto, los hornos solares son la mejor opción para la experimentación con flujos concentrados de energía solar.

Para llevar a cabo este proceso se requiere un reactor químico, los reactores pueden ser de diferentes tipos, pero deben ser fabricados con materiales con altos puntos de fusión para soportar las grandes temperaturas a las cuales se llevan a cabo los procesos.

1.5. Reactores Químicos Solares

Los reactores químicos son el equipo donde se realizan las reacciones químicas, son la parte fundamental de todo proceso químico. Para su diseño se debe considerar las características de la reacción, las condiciones de operación, además de la instrumentación y los medios de control. Los reactores químicos son mayormente utilizados en industrias químicas, farmacéuticas, alimentos, metalúrgicas y de refinación.

Los reactores termoquímicos solares convierten la energía solar en combustibles. La radiación solar concentrada es usada como fuente de energía para producir reacciones

químicas en los reactores, la radiación concentrada transmite calor al reactor en el cual se encuentran los reactivos necesarios para producir la reacción química como se observa en la figura 1.8. El producto de ésta reacción son los combustibles solares que pueden ser usados en celdas de combustibles.

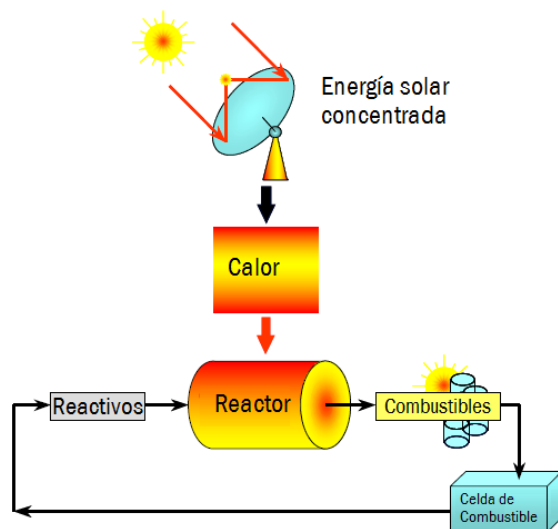


Fig. 1.8 Esquema del funcionamiento de un reactor químico solar (Steinfeld, 2003).

Los procesos que se llevan a cabo en los reactores químicos solares (Fig. 1.9) se llevan a cabo a altas temperaturas, de 1200 a 2500 K, por lo tanto se debe asegurar que los materiales con los que son construidos tengan un punto de fusión alto, los materiales cerámicos son una buena opción para la construcción de estos reactores, pero su costo es elevado y algunos son difíciles de trabajar debido a su dureza.

Otro punto importante es la manera en que se monitorearan las condiciones de operación, se debe considerar en el diseño que instrumentos serán ocupados para hacerlo.

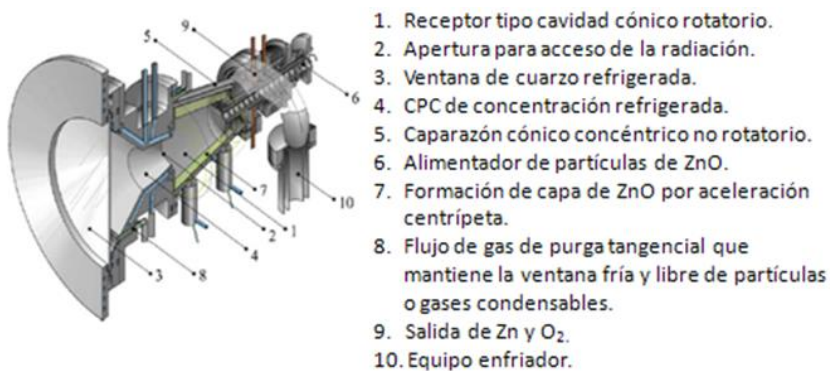


Fig. 1.9 Esquema de un reactor químico solar rotativo para la disociación de ZnO (Chambon, 2010).

1.6. Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar

El Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar tiene como objetivo avanzar en el desarrollo de tecnologías de concentración solar y química en México.

El laboratorio está compuesto por tres instalaciones de sistemas solares: un horno solar de alto flujo radiativo, una planta solar para el tratamiento fotocatalítico de aguas residuales y un campo de pruebas para heliostatos.

1.6.1. Horno Solar del Instituto de Energías Renovables (HoSIER).

El HoSIER (Fig.1.10), es un concentrador compuesto por 409 espejos de primera superficie con aluminio depositado por evaporación, los espejos tienen una forma hexagonal de 20.00 cm de radio y superficie esférica. Estos espejos se encuentran montados en una estructura esférica de 6.72 m x 6.20 m. La ventaja de esta configuración es que cada espejo puede orientarse individualmente para corregir errores de aberración esférica (Licurgo, 2012).



Fig. 1.10 Horno Solar del Laboratorio Nacional de Concentración y Química Solar.

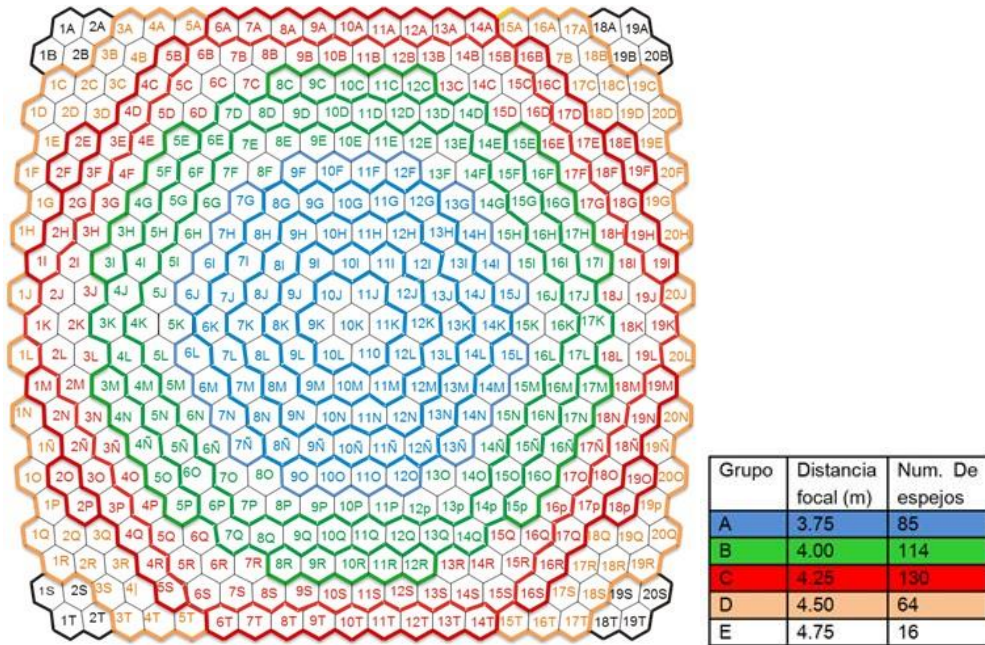


Fig. 1.11 Distribución de facetas del HoSIER (Licurgo,2012).

La luz solar es reflejada hacia el concentrador por el Heliostato que se muestra en la figura 1.12, las dimensiones del heliostato son de 9.00 m x 9.00 m y su superficie reflectora está conformada por treinta espejos planos de segunda superficie de 6.00 mm de espesor, con dos grupos de espejos con dimensiones diferentes: un grupo de 20 espejos con dimensiones de 1.80 m x 1.30 m y 10 espejos de 1.80 m x 1.90 m.

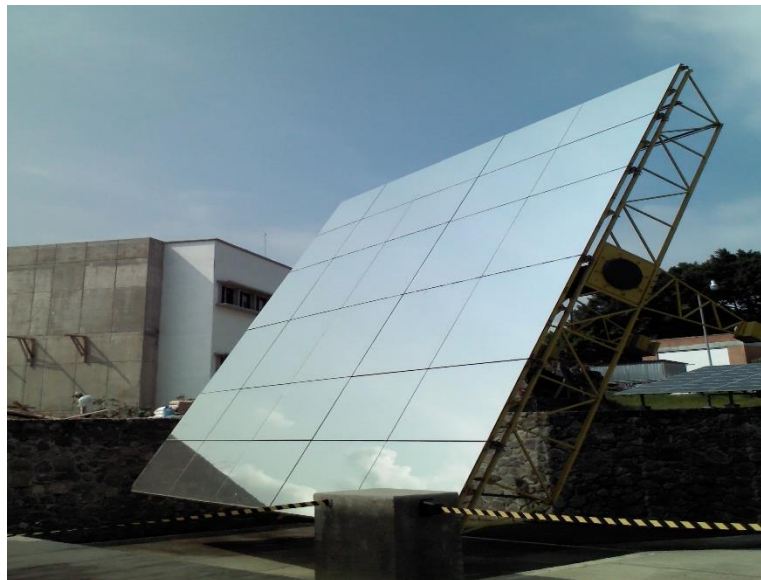


Fig. 1.12 Heliostato del HoSIER.

El Heliostato cuenta con dos grados de libertad y su función es la de seguir el aparente movimiento del sol a lo largo del día para reflejar la luz hacia el concentrador, el movimiento se realiza con base a ecuaciones solares y sistemas de control.

La luz concentrada por el horno tiene una distancia focal de 3.68 m, a esta distancia se deben colocar los receptores de los dispositivos de experimentación; en el horno solar se cuenta con una mesa de trabajo capaz de desplazarse en tres ejes (fig. 1.13), con precisión de una décima de milímetro con la finalidad de posicionar los receptores sobre la zona focal.



Fig. 1.13 Mesa de trabajo del HoSIER.

1.7. Comentarios

La concentración solar no es una tecnología madura por lo tanto a pesar de que existen varios trabajos previos respecto al diseño y construcción de reactores químicos solares aún no se puede decir con seguridad cual es el diseño más eficiente, considerando las variables involucradas en el diseño, además del control y monitoreo de las variables experimentales.

1.8. Objetivo

El objetivo de esta tesis es diseñar, construir y caracterizar una cámara inerte para el laboratorio nacional de concentración y química solar para la realización de experimentos de procesos termoquímicos solares, producción de combustibles solares, materiales cerámicos, óxidos metálicos.

El resultado del trabajo es un reactor químico que se montó en la mesa de trabajo del HoSIER donde se realizaron experimentos en los cuales se mantuvo una atmosfera controlada.

1.9. Objetivos particulares

- a) Documentar de manera clara las especificaciones de piezas estandarizadas.
- b) Determinar cómo monitorear las variables involucradas en un proceso termoquímico solar.
- c) Instalar la Cámara Inerte en la mesa de trabajo del HoSIER.

1.10. Alcance

En el presente trabajo se estudian los temas necesarios para el diseño y construcción de un reactor termoquímico solar hasta la realización de pruebas de síntesis de materiales con éste. El estudio para el diseño y construcción de la cámara inicia con el estudio de los conceptos físicos que se necesitan comprender para el diseño y construcción de las piezas de la cámara, la selección de materiales, las piezas necesarias para la realización de pruebas, el diseño de las piezas y el ensamble de las piezas.

La instalación de la cámara en la mesa de trabajo del HoSIER, la instrumentación de la cámara, el sistema de adquisición de datos, las pruebas preliminares realizadas con la cámara y un estudio de seguridad en la operación de la cámara también son parte del estudio realizado en este trabajo.

1.11. Aportación

La aportación de este trabajo es un enfoque para el diseño de reactores termoquímicos solares que abarca todo el proceso de diseño y construcción hasta la realización de pruebas preliminares. Se presenta de una manera detallada el diseño de todas las piezas que se requieren para la construcción de un reactor. También se presentan información acerca de los instrumentos de medición involucrados en las variables experimentales y la implementación de un sistema de adquisición de datos

1.12. Estructura general del trabajo

En este capítulo se ha descrito el panorama energético mundial además de los retos que representa un desarrollo sustentable en el futuro.

En el Capítulo 2: se estudian los conceptos teóricos que se necesitan para comprender los requerimientos necesarios para el correcto diseño y construcción de la cámara, además de entender las variables relacionadas en el sistema.

En el Capítulo 3: se presentan todas las piezas que componen la cámara inerte con sus especificaciones explicando la función de cada una.

En el Capítulo 4: se enlista toda la información necesaria para ensamblar las piezas de la cámara inerte.

En el Capítulo 5: se describe la manera en que fue instalada la Cámara Inerte en la mesa de trabajo del HoSIER y las pruebas preliminares realizadas.

En el Capítulo 6: se expone un estudio de higiene y seguridad para la operación de la Cámara Inerte.

En el Capítulo 7: se encuentran las conclusiones del trabajo y los trabajos propuestos para desarrollarse en el futuro.

Capítulo 2

Estudios preliminares para el diseño y construcción de la Cámara Inerte

En este capítulo se estudian conceptos para entender mejor las funciones y requerimientos de la cámara inerte.

2.1. Presión

La fuerza que ejerce un fluido no puede ser medida directamente, por eso se utiliza el concepto de presión. Un fluido es un conjunto de moléculas que se ordenan aleatoriamente y se mantienen juntas a partir de fuerzas cohesivas débiles y fuerzas que ejercen las paredes de un contenedor.

Los líquidos y los gases son fluidos, los líquidos tienen un volumen definido y adoptan la forma del contenedor, los gases pueden ser comprimidos y se expanden hasta ocupar por completo el volumen del contenedor.

La presión se define como la cantidad de fuerza que se ejerce sobre unidad de área (Formula 1).

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

P = presión

F = fuerza

A = área

En los fluidos contenidos en un recipiente, se ejerce una presión uniforme sobre la superficie del recipiente.

Este principio se define en la ecuación básica de la estática de fluidos, en la cual se muestra la relación que tiene la presión que ejerce un fluido con la magnitud de su altura (Fig. 2.1).

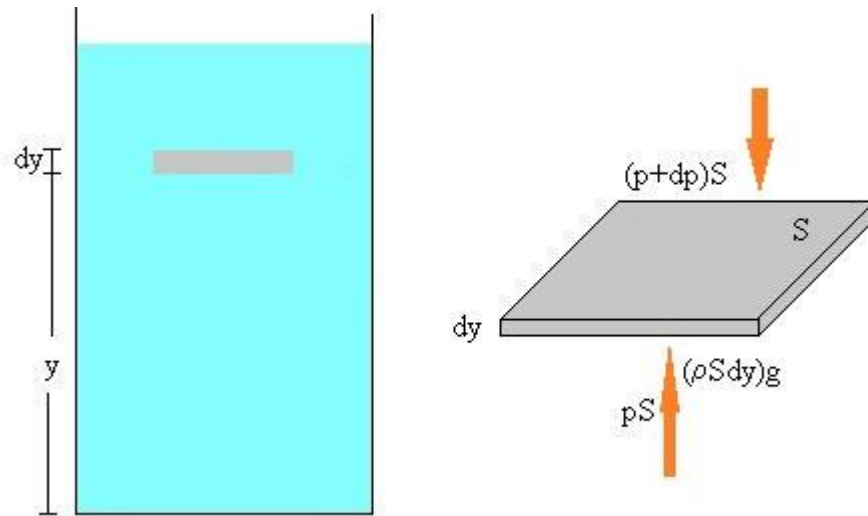


Fig. 2.1 Esquema de la fuerza que ejerce un fluido.

$$pS = (p + dp)S + (pSdy) \quad (2)$$

$$pS = pS + dpS + pSdy \quad (3)$$

$$pS - pS = dpS + pSdy \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dy} = -(\rho g) \quad (5)$$

$$\int dp = - \int \rho g dy \quad (6)$$

$$p = \rho gy \quad (7)$$

Donde:

S = área

$(p+dp)S$ = fuerza ejercida en la superficie superior

$(pSdy)g$ = peso del elemento

pS = fuerza ejercida sobre la cara inferior

dy = Diferencia de altura

Con la ecuación 7 se puede determinar la presión que ejercerá una columna de fluido dada, comprobando que la presión atmosférica no es igual a diferentes altitudes debido a la presión que ejerce la columna de aire.

En el caso de los gases contenidos en un recipiente cerrado, la presión que ejerce el gas sobre las paredes está definida por la teoría cinética de los gases.

La teoría cinética de los gases explica el comportamiento y las propiedades de los gases, establece que existe una relación entre la temperatura y la velocidad de las moléculas de un gas, además de que las trayectorias de las partículas se rigen por las leyes de los gases ideales. En los gases las moléculas son numerosas y la separación promedio entre ellas es grande en comparación con sus dimensiones, estas moléculas obedecen las leyes de movimiento de Newton, pero su movimiento es aleatorio, por lo que puede ser en cualquier dirección.

Al moverse en cualquier dirección, las moléculas colisionan entre sí además de tener colisiones elásticas contra las paredes del recipiente, estas colisiones son las que producen la presión sobre las paredes del contenedor.

Para desarrollar este modelo el gas del recipiente debe considerarse ideal, por lo tanto se supone que todas las moléculas son idénticas. Para conocer la presión que ejerce un gas sobre las paredes de un recipiente consideremos N moléculas de un gas ideal contenidas en un volumen V . El contenedor es un cubo con bordes de longitud d , las moléculas de masa m_0 tienen un componente de velocidad en la dirección x v_{xi} (Fig. 2.2) (Serwey,2008).

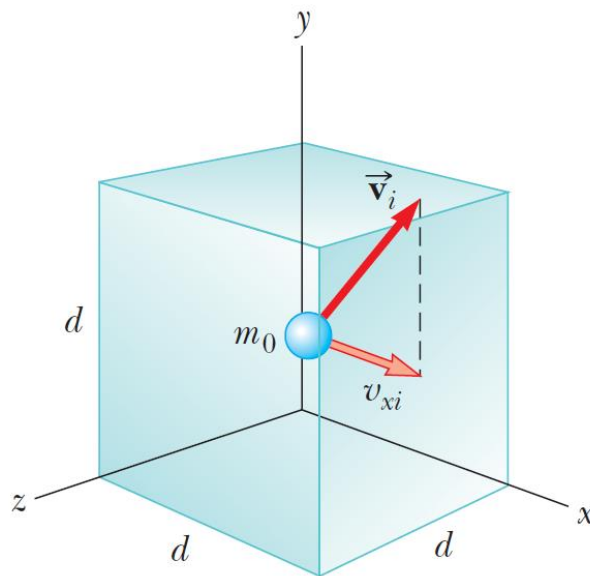


Fig. 2.2 Esquema de la fuerza que ejerce una partícula de gas en la pared de un recipiente.

Cada que la molécula colisiona con cualquier pared, su componente de velocidad perpendicular se invierte. Ya que la componente de la cantidad de movimiento p_{xi} de la molécula es $m_0 v_{xi}$ (ecuación 8) antes de la colisión, después de la colisión será $-m_0 v_{xi}$ (ecuación 9), así podemos definir el cambio en el componente x del movimiento:

$$\Delta p_{xi} = -m_0 v_{xi} - (m_0 v_{xi}) \quad (8)$$

$$\Delta p_{xi} = -2m_0 v_{xi} \quad (9)$$

Ya que las moléculas cumplen con las leyes de Newton (ecuación 10), se aplica el teorema impulso-cantidad de movimiento a la molécula para obtener:

$$\bar{F}_i \Delta t = \Delta p_{xi} = -2m_0 v_{xi} \quad (10)$$

En la ecuación 11 donde \bar{F}_i es la componente x de la fuerza promedio que la pared ejerce sobre la molécula durante la colisión y Δt es la duración de la colisión. Para que la molécula vuelva a colisionar con la misma pared debe viajar una distancia de $2d$ en la dirección x . Por lo tanto el intervalo de tiempo entre dos colisiones contra la misma pared es:

$$\Delta t = \frac{2d}{v_{xi}} \quad (11)$$

\bar{F}_i es la fuerza que causa el cambio en cantidad de movimiento de la molécula en la colisión contra la pared se presenta sólo durante la colisión, se puede promediar la fuerza durante el intervalo de tiempo para que la molécula se traslade a través del cubo y regrese.

Ya que se presenta una colisión por cada uno de los intervalos de tiempo, este resultado también es la fuerza promedio a largo plazo en la molécula durante largos intervalos de tiempo que contienen cualquier número de múltiplos de Δt .

Sustituyendo la ecuación 11 en la ecuación 10 obtenemos:

$$\bar{F}_i = -\frac{m_0 v_{xi}^2}{d} \quad (12)$$

Ahora por la tercera ley de Newton, la componente x de la fuerza promedio a largo plazo que ejerce la molécula sobre la pared es igual en magnitud y opuesta en dirección como se muestra en la ecuación 13:

$$\bar{F}_i = -\bar{F}_i = -\left(-\frac{m_0 v_{xi}^2}{d}\right) = \frac{m_0 v_{xi}^2}{d} \quad (13)$$

La fuerza promedio total \bar{F} que el gas ejerce sobre la pared puede obtenerse al sumar la fuerza promedio ejercida por las moléculas individualmente (ecuación 14). Al sumar el valor de la fuerza ejercida por todas las moléculas se obtiene la fuerza resultante que ejercen contra la pared del recipiente:

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^N \frac{m_0 v_{xi}^2}{d} \quad (14)$$

$$F = \frac{m_0}{d} \sum_{i=1}^N v_{xi}^2 \quad (15)$$

Se debe considerar el valor promedio de la componente x de la velocidad de todas las moléculas (ecuación 16):

$$\overline{v_x^2} = \sum_{i=1}^N \frac{v_{xi}^2}{N} \quad (16)$$

Teniendo el valor promedio de la componente x de la velocidad de las moléculas se puede calcular la fuerza resultante que ejercen sobre la pared del recipiente (ecuación 17):

$$F = \frac{m_0}{d} N \overline{v_x^2} \quad (17)$$

Pero las moléculas pueden tener un movimiento en cualquier dirección dentro del recipiente, su componente de velocidad puede ser expresado en tres ejes (x,y,z) , para conocer el componente de la velocidad en este caso se debe de obtener el total del componente de la velocidad con el teorema de Pitágoras (ecuación 18).

$$v_i^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (18)$$

Y utilizando la ecuación 16 podemos conocer los valores promedio de velocidad en las tres direcciones:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} \quad (19)$$

Conociendo que el movimiento es completamente aleatorio podemos suponer que los valores promedio de velocidad en las tres ecuaciones son iguales, por lo tanto:

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2} \quad (20)$$

Sustituyendo la ecuación 20 en la ecuación 17 podemos conocer la fuerza que ejercen las partículas de gas sobre la pared del recipiente:

$$F = \frac{1}{3} N \frac{m_0 \overline{v^2}}{d} \quad (21)$$

Sustituyendo la ecuación 21 en la ecuación 1 podemos conocer la presión que ejerce el gas en el recipiente.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{d^2} = \frac{1}{3} N \frac{m_0 \overline{v^2}}{d^3} \quad (22)$$

$$P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 \overline{v^2} \quad (23)$$

$$P = \frac{2 N m_0 \overline{v^2}}{3 V} \quad (24)$$

Donde:

P = presión

N = número de moléculas del gas

V = volumen del recipiente

m_0 = masa de las moléculas

$\overline{v^2}$ = velocidad promedio de las moléculas.

De la ecuación podemos deducir que la presión que ejerce un gas sobre las paredes de un recipiente es proporcional al número de moléculas que contiene por unidad de volumen y a la energía cinética promedio de las moléculas.

2.2. Descripción de un gas ideal

De un gas ideal podemos afirmar tres características:

- Cuando el gas se mantiene a una temperatura constante, su presión es inversamente proporcional al volumen.
- Cuando la presión del gas se mantiene constante, el volumen es directamente proporcional a la temperatura.
- Cuando el volumen del gas se mantiene constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura.

Estas tres observaciones se resumen mediante la ecuación 25 de estado para un gas ideal:

$$PV = nRT \quad (25)$$

Esta ley puede expresarse en términos del número total de moléculas N , ya que el número de moles n es igual a la razón del número total de moléculas y el número de Avogadro N_A , por lo que se puede escribir la ecuación 26:

$$PV = \frac{N}{N_A} RT \quad (26)$$

Esta ley afirma que si el volumen y la temperatura de una cantidad fija de gas no cambia, la presión también permanece constante.

Al utilizar una bomba de vacío en un recipiente cerrado, teniendo un volumen y temperatura constante, obtenemos un ΔN esto quiere decir que hemos extraído materia de nuestro sistema. Podemos saber la diferencia entre moléculas a partir del cambio de presión.

Así podemos conocer el número de moléculas en el sistema con la siguiente expresión:

$$N = \frac{PV N_A}{RT} \quad (29)$$

Donde:

N = número de moléculas

P = presión

V = volumen

N_A = número de Avogadro

R = constante universal de los gases ideales

T = temperatura

2.3. Vacío

El vacío se define como la ausencia de materia en un espacio, de acuerdo con la definición de la Sociedad Americana de Vacío (1958), el término vacío se refiere a cierto espacio lleno con gases a una presión total menor que la presión atmosférica, por lo que el grado de vacío se incrementa en relación directa con la disminución de presión del gas residual.

En cuanto más disminuya la presión dentro de un sistema se considera que se obtendrá un mayor vacío, esto nos permite clasificar el grado de vacío.

Existen tres tipos diferentes de vacío y se clasifican por la presión del gas residual:

1) Bajo vacío. El intervalo de presión atmosférica con estas características se manifiesta desde un poco menos de 760 torr hasta 1×10^{-3} Torr ($1 \text{ Torr} = 1.31 \times 10^{-3} \text{ atm}$). En un recipiente en vacío, el número de moléculas en fase gaseosa es grande comparado con el número de moléculas que pudieran saturar la superficie del material en forma de monocapa.

2) Ultra vacío. El intervalo de presión se extiende desde cerca de 1×10^{-3} hasta 1×10^{-7} Torr. Las moléculas de gas en el sistema son localizadas principalmente adheridas en las superficies del recipiente, y el camino libre medio de las moléculas es igual o es tan grande como las dimensiones del recipiente. En este rango de vacío las partículas pueden viajar en el recipiente sin colisionar con otras partículas

3) Ultra alto vacío. El intervalo de presión es menor a 1×10^{-10} Torr. Las superficies internas del recipiente se mantienen limpias de gas. En este régimen de vacío la desorción de gases del

recipiente es tan baja que las señales predominantes se deben principalmente al hidrógeno (Villalobos, 2000).

2.3.1. Producción de vacío

Para producir vacío se requiere de un sistema adecuado compuesto por una cámara, sellos, bridas, instrumentos de medición, una bomba, etc. Estos componentes permiten obtener, controlar, monitorear, medir y mantener un vacío.

En la etapa de diseño de estos sistemas se debe considerar el vacío que se quiera alcanzar y las variables que se requieran medir para obtener los mejores resultados.

Como se puede ver en la figura 2.3 existen parámetros definidos para la selección del tipo de bomba como la presión que se quiere alcanzar, el rango de presión de trabajo, la velocidad de bombeo.

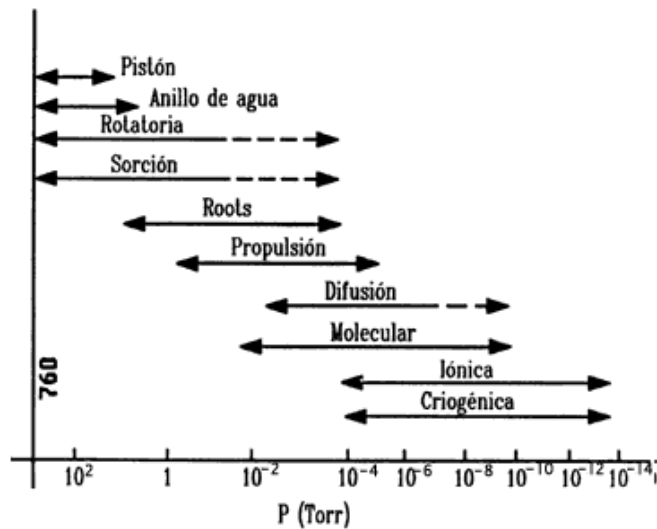


Fig. 2.3 Capacidad de las diferentes bombas de vacío.

2.3.2. Cámaras de vacío

Las cámaras son los contenedores en los cuales se desarrolla el vacío, se construyen generalmente de vidrio o acero inoxidable. Estas cámaras deben ser diseñadas para soportar la presión atmosférica, por ejemplo: la presión atmosférica a nivel del mar es de 101325 Pa, considerando este valor, una cámara con una superficie de 1.00 m² tiene que soportar una fuerza de más de 10 toneladas. Por lo tanto el aspecto más importante para elegir un material para la construcción de una cámara es considerar la fuerza que la presión atmosférica ejercerá sobre la superficie.

La capacidad de una cámara de no colapsar por la presión atmosférica dependerá de su geometría, del espesor de sus paredes y del material con que está construida.

2.3.3. Selección de Materiales.

Para seleccionar los materiales de construcción de la Cámara Inerte se consideraron las siguientes restricciones:

- El material debe ser estable cuando esté en contacto con cualquier reactivo, es decir no debe de reaccionar con los materiales con los que tenga contacto.
- Debe ser lo suficientemente denso para prevenir la difusión de los productos gaseosos.
- Debe ser estable a las temperaturas más altas de la reacción.
- Debe de tener buena resistencia a los choques térmicos.
- Debe soportar un bajo vacío.

Existen varios materiales que se utilizan en tecnología de vacío, entre ellos están aceros, cobre, cerámicos, vidrio, cuarzo, etc.

1) Acero inoxidable

Aceros resistentes a la corrosión y al calor. Ciertas aleaciones de hierro y cromo poseen resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas y mantienen una resistencia considerable a esas temperaturas. Estas aleaciones a veces contienen níquel y pequeños porcentajes de silicio, molibdeno, tungsteno, cobre y otros elementos.

2) Vidrio de Borosilicato

El vidrio borosilicato se fabrica mediante la sustitución de grandes cantidades de álcali y, con frecuencia, de toda la cal con B_2O_3 . Aunque este último producto es un formador de redes (y no modificador sustituyente), reacciona también con el SiO_2 , casi de la misma forma que el sodio y la cal, que son modificadores.

En una prueba que se realizó en el Horno Solar del IER-UNAM (HoSIER) con un molde de vidrio de borosilicato, éste soportó el 100% de irradiación ($IDN=840-850 \text{ kW/m}^2$) hasta una distancia de 13.00 cm fuera de foco.

2.3.4. Medición de vacío

El vacío alcanzado en las diferentes tecnologías de vacío ha alcanzado hasta 19 órdenes de magnitud por debajo de la presión atmosférica, actualmente no existe un equipo que pueda medir todos los rangos de vacío sin embargo existen equipos diseñados específicamente para ciertos rangos. Estos instrumentos miden la presión total o la presión manométrica del sistema. Alguno de estos equipos se describe a continuación:

1) Medidor de vacío por conductividad térmica

Los medidores por conductividad térmica basan su principio de operación en un filamento montado en un vidrio o metal sellado y unido al sistema de vacío, estando el filamento calentado por el paso de una corriente eléctrica. La temperatura del filamento depende de la razón de energía eléctrica suministrada al filamento, del calor que disipa por conducción a través del gas circundante, del calor disipado debido a la convección, radiación y del calor por efecto Joule que se disipa al mantener el filamento caliente.

Si el suministro de energía eléctrica se mantiene constante, la radiación y la pérdida por efecto Joule se mantiene constantes, la temperatura del alambre depende de la disipación de energía por conductividad térmica del gas, ya que esa razón de disipación de energía está en función directa de la presión (J.Villalobos, 2000).

2) Medidor Pirani

Es un vidrio o metal envolviendo un filamento metálico caliente con un coeficiente de resistencia a la temperatura. El filamento puede ser de platino o tungsteno ya que su resistencia varía mucho con la temperatura (Figura 2.5). Al disminuir la presión generando vacío se extrae gas del sistema, por lo tanto se reduce la pérdida de calor por conducción a través del gas aumentando la temperatura del filamento y su resistencia, las variaciones de la resistencia hacen que varíe el voltaje en función de la presión.

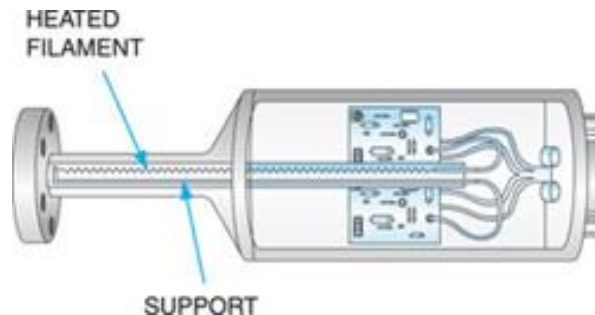


Fig. 2.5 Medidor Pirani.

2.3.5. Medidores de temperatura

La temperatura es una medición de la energía cinética promedio de las partículas en una muestra de materia, que se expresa en unidades de grados o en una escala estándar. Para medir temperatura por medio de contacto existen varios sensores dentro de los cuales se encuentran:

1) Termopares

Los termopares son unos de los sensores más comunes empleados en la medición de temperatura, ya que son relativamente económicos brindando exactitud y además pueden operar sobre un amplio rango de temperaturas.

Cuando se expone un conductor eléctrico a un gradiente de temperatura el flujo de calor está asociado al flujo de electrones

Un termopar se crea siempre que dos metales diferentes se tocan y el punto de contacto produce un pequeño voltaje en circuito abierto como una función de la temperatura. Este voltaje termoeléctrico se conoce como el voltaje de Seebeck (NI, 2013). El voltaje es no lineal con respecto a la temperatura. Sin embargo, para pequeños cambios en temperatura, el voltaje es aproximadamente lineal, es decir:

$$\Delta V = S\Delta T \quad (30)$$

Donde:

ΔV = cambio de voltaje

S = coeficiente de Seebeck

ΔT = cambio de temperatura

Existen diferentes tipos de termopares y se tienen que seguir algunos criterios para su selección, para seleccionar un termopar se debe considerar el rango de temperaturas en el cual se va a trabajar y las condiciones de trabajo.

Comercialmente están disponibles muchos tipos de termopares, se designan mediante letras mayúsculas que indican la composición de acuerdo con las normas del American National Standards Institute (ANSI). Cada tipo de termopar trabaja a diferentes rangos de temperatura y en diferentes condiciones.

Tabla 2.1 Tipos de termopares.

Termopar	Conductor +	Conductor -	Rango de Temperatura
K	Níquel – Cromo	Níquel - Aluminio	0 a 1100 °C
T	Cobre	Cobre - Níquel	-185 a 300 °C
J	Hierro	Cobre - Níquel	20 a 70 °C
N	Níquel - Cromo - Silicio	Níquel - Silicio - Magnesio	0 a 1150 °C
E	Níquel – Cromo	Cobre - Níquel	0 a 800 °C
R	Platino - 13% Rodio	Platino	0 a 1600 °C
S	Platino - 10% Rodio	Platino	0 a 1550 °C
B	Platino - 30% Rodio	Platino - Rodio	100 a 1600 °C
G	Tungsteno	Tungsteno - Renio	20 a 2320 °C
C	Tungsteno - 5% Renio	Tungsteno - 26% Renio	50 a 1820 °C
D	Tungsteno – 3% Renio	Tungsteno - 25% Renio	20 a 2320 °C

2.4. Bridas

Son accesorios para conectar tuberías con equipos (Bombas, intercambiadores de calor, calderas, tanques, instrumentos, etc.) o accesorios (codos, válvulas, etc.). La unión se hace por medio de dos bridas, en la cual una de ellas pertenece a la tubería y la otra al equipo o accesorio a ser conectado.

La ventaja de la unión por medio de bridas es el rápido montaje y desmontaje para adaptar cualquier tipo de instrumento al sistema.

2.4.1. Bridas de vacío CF

Este tipo de bridas son usadas para aplicaciones de alto vacío, funcionan creando un sello mecánico al presionar un metal contra un metal más blando hasta deformarlo para crear el sello, tienen una permeabilidad baja, además de tener buenas propiedades térmicas y de desgasificación que las bridas selladas con juntas tóricas de elastómero (Bridas KF).

El sello se consigue utilizando una pestaña maquinada en cada una de las bridas que deforma la junta metálica, la junta al deformarse rellena cualquier defecto en la superficie de los bordes de las pestañas de la brida, como se muestra en la figura 2.5. Las juntas están hechas normalmente de cobre de alta conductividad. Las juntas sólo pueden usarse una vez ya que son deformadas en el momento de sellar la brida.

Al momento de sellar la brida se debe tener cuidado de que la fuerza aplicada para atornillar las bridas sea uniforme, para evitar cualquier distorsión y que la junta se deforme uniformemente. Para atornillar las bridas se debe utilizar tornillería de acero inoxidable, se deben apretar los tornillos alternándolos y utilizando un torquimetro.

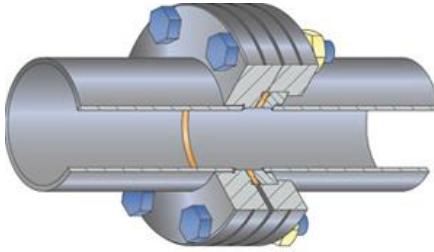


Fig. 2.5 Esquema de brida CF.

Este tipo de bridas son fabricadas a partir de cilindros macizos de acero inoxidable por procesos de corte con máquinas herramienta, bajo el estándar internacional ISO 3669, las diferentes especificaciones de las bridas CF se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Bridas CF.

Diámetro Nominal	Diámetro mm (inch)	Espesor mm	Diámetro Junta mm	Diámetro Interior mm	Número de tornillos
DN 10	25.4 (1")	6	13.4	18	6 x M3
DN 16	34 (1.33")	8	21	27	6 x M4
DN 25	54 (2.12")	12	33	41	6 x M4
DN 35	70 (2.75")	13	48	59	6 x M6
DN 50	86 (3.38")	16	61	72	6 x M6
DN 63	114 (4.5")	17	82	92	8 x M8
DN 75	117 (4.62")	18	92	102	10 x M8
DN 100	154 (6")	20	120	130	16 x M8
DN 125	171 (6.75")	21	142	152	18 x M8
DN 150	203 (8")	22	171	181	20 x M8
DN 200	254 (10")	25	222	232	24 x M8
DN 250	305 (12")	25	272.7	284	32 x M8
DN 250 "imperial"	305 (12")	27	270	283	32 x M10

2.4.2. Bridas de vacío KF

Las bridas KF para abrazadera son la conexión estándar para las bombas de vacío y muchos instrumentos para monitorear presión, son usadas en medio y alto vacío. Este tipo de brida está estandarizada, utilizan las iniciales KF o QC para este tipo de diseño de brida.

El sello se produce por medio de un anillo tórico que suele ser de viton, este anillo se coloca en el centro de las bridas por medio de un anillo de centrado que tiene una ranura en su diámetro exterior sobre la cual se coloca el anillo tórico.

Las bridas tienen una ranura en la cual se coloca un anillo de centrado y un anillo tórico, el sello se realiza cuando las dos bridas son presionadas por medio de la abrazadera deformando así el anillo tórico. Las bridas se sujetan firmemente de manera externa, usando

una abrazadera de bisagra con una tuerca mariposa, los componentes para realizar el sello se muestran en la figura 2.6.

Son fabricadas a partir de cilindros macizos de acero inoxidable por procesos de corte con máquinas herramienta, bajo el estándar internacional ISO 2861, las diferentes especificaciones de las bridas KF se muestran en la tabla 2.3.

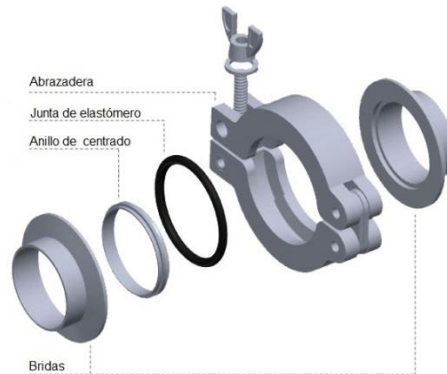


Fig. 2.6 Esquema de una brida KF.

Tabla 2.3 Bridas KF.

Diámetro nominal	Diámetro mm	Diámetro ranura mm	Espesor mm
DN 10	30	12.2	5
DN 16	30	17.2	5
DN 25	40	26.2	5
DN 40	55	41.2	5
DN 50	75	52.4	6

2.4.3. Pasamuros eléctrico

Los pasamuros eléctricos (Fig. 2.7) se usan para crear una conexión a través de una cámara de vacío y el exterior. Se fabrican de uno o más conductores que pasan por una brida de vacío y están aislados de la brida. El material de aislamiento necesita poder resistir una presión de 1 bar, cuando exista vacío en la cámara, el pasamuros puede ser diseñado para conectarse a una brida CF o KF.

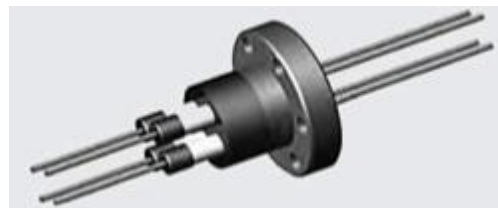


Fig. 2.7 Pasamuros eléctrico CF.

Capítulo 3

Diseño de las piezas de la Cámara Inerte

3.1. Base de la Cámara Inerte

Esta pieza es fundamental en el diseño, ya que sobre ella se ensamblarán todas las piezas que conforman el ensamble final. Esta pieza fue hecha de acero inoxidable por su resistencia a la corrosión y al calor.

La pieza (Fig. 3.1) es un disco de 360.00 mm de diámetro con un espesor de $\frac{1}{2}$ “.

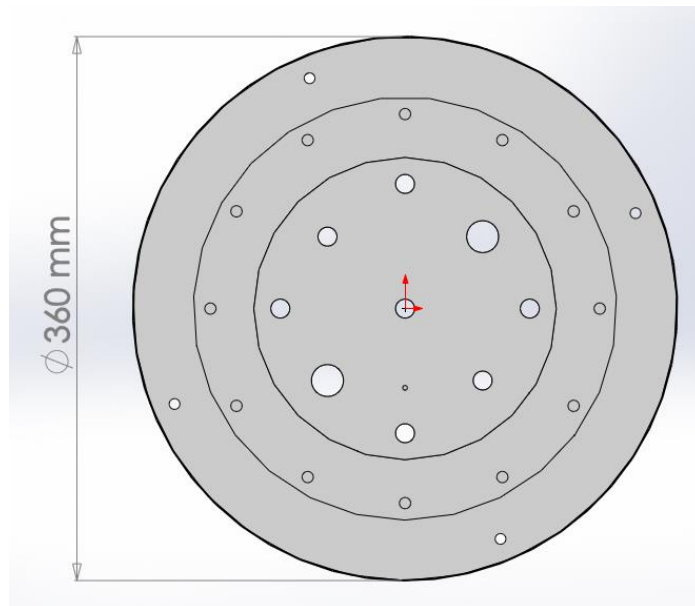


Fig. 3.1 Vista superior de la base de la Cámara Inerte.

Cuenta con barrenos para ensamblar las diferentes piezas que conformaran el ensamble final. El primer grupo de barrenos se encuentra en un radio 165.00 mm, en estos barrenos se

atornillaran unos soportes que serán usados para unir la base a un disco que servirá como apoyo para asegurar la Cámara Inerte a la mesa de trabajo del HoSIER. Estos cuatro barrenos tienen un diámetro de 7.14 mm y tienen una separación de 90°. Los barrenos del primer grupo están a 22.50° de los ejes del disco (Fig. 3.2.).

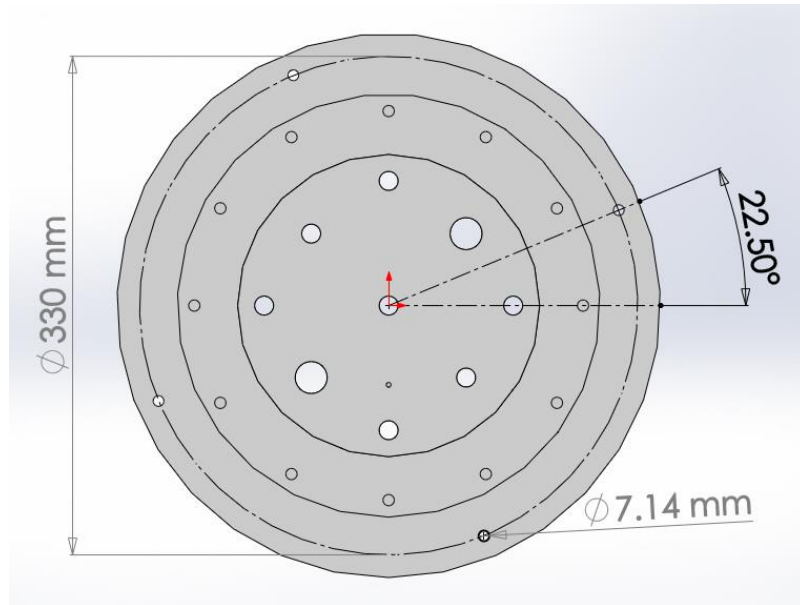


Fig. 3.2 Vista del ángulo de desfase de los barrenos de 7.14 mm.

El disco tiene un canal sobre el cual se colocará un empaque plano de neopreno para sellar la cámara al realizar el vacío (Figuras 3.3 y 3.4). Este canal tiene una profundidad de 1.00 mm y está definido por dos diámetros, el exterior de 280.00 mm y el interior de 200.00 mm.

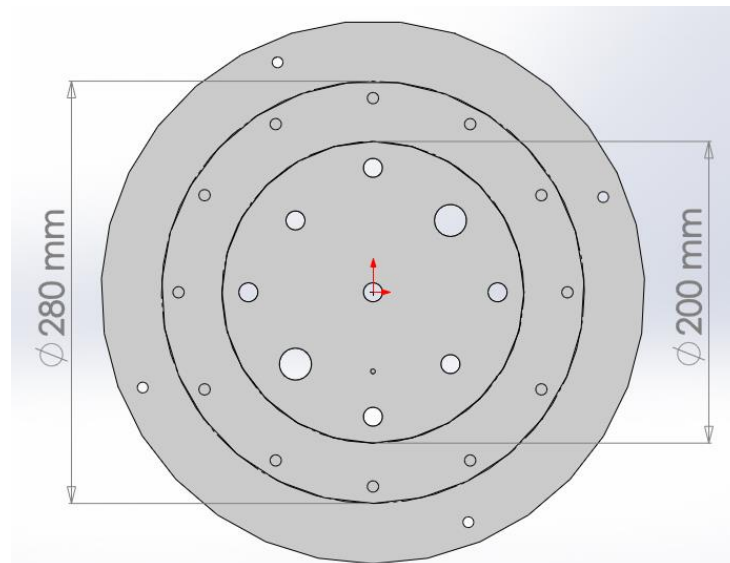


Fig. 3.3 Vista del diámetro interior y exterior que definen el canal de la base.

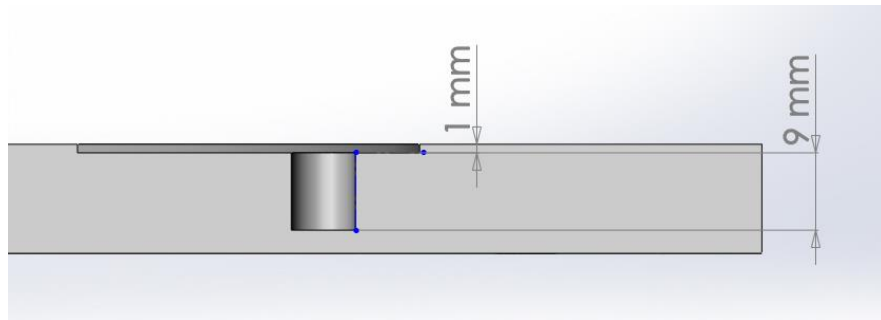


Fig. 3.4 Vista de sección del canal de la base.

La función del canal es la de evitar que el sello plano de neopreno pueda desplazarse, evitando fugas y asegurando que la esfera de vidrio se encuentre siempre concéntrica a la base de la Cámara Inerte.

El siguiente grupo de barrenos se encuentra a un radio de 128.75 mm dentro del canal, estos son 12 barrenos distribuidos equitativamente de 9 mm de profundidad y un diámetro de 7.50 mm con rosca estándar (Fig. 3.5). La función de estos barrenos es la de sujetar las bridas de aluminio con las que se sujetara la esfera de vidrio.

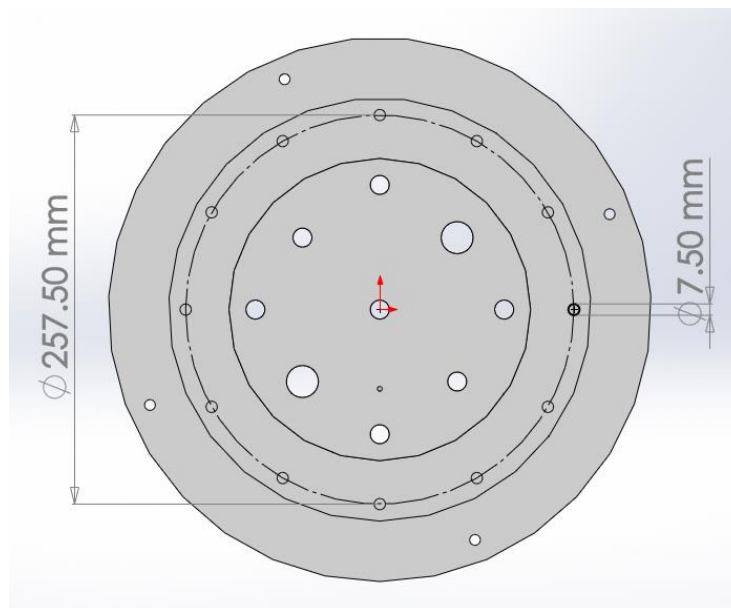


Fig 3.5 Especificaciones de los barrenos para sujetar bridas.

El siguiente grupo de barrenos se encuentra a un radio de 82.50 mm, son 4 barrenos con diámetro de $\frac{1}{2}$ " , en los cuales se soldarán componentes de la cámara (Fig. 3.6).

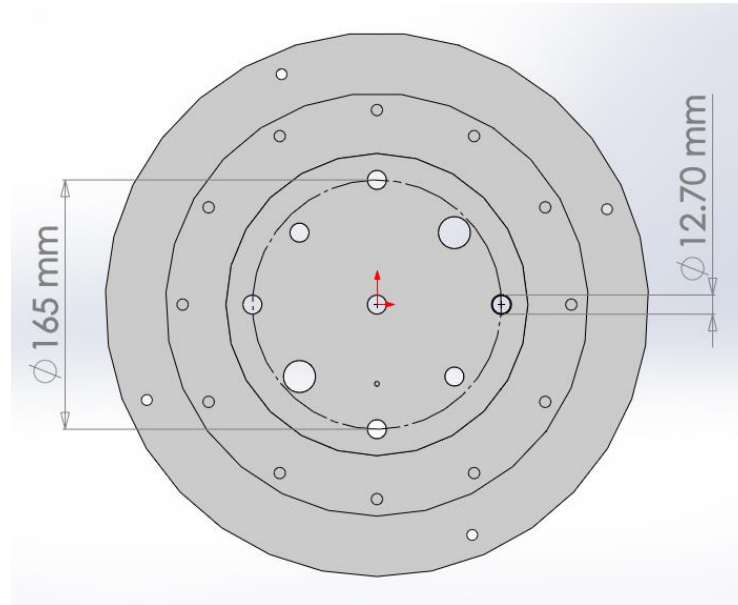


Fig. 3.6 Especificaciones de 4 barrenos de 12.70 mm de diámetro.

El siguiente grupo de barrenos se muestra en la figura 3.7 y encuentra en un radio de 70.00 mm separados por 90°. El grupo está compuesto por dos barrenos pasados de 1/2" de diámetro y dos barrenos pasados de 21.33 mm de diámetro, en estos barrenos se soldarán componentes de la cámara.

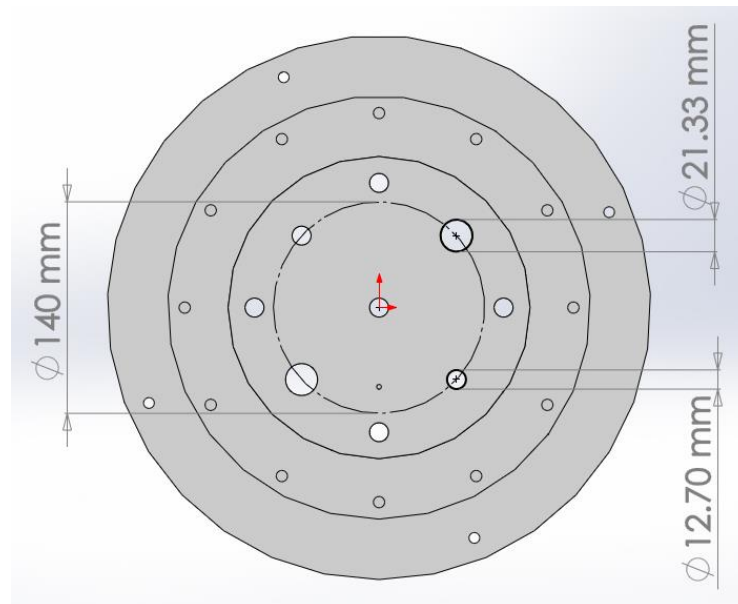


Fig. 3.7 Especificaciones del último grupo de barrenos.

Por último, en el centro del disco (Fig. 3.8) se encuentra un barreno pasado de 1/2" de diámetro y a una distancia de 52.43 mm de centro a centro, un barreno de 1/8" de diámetro

de 5.00 mm de profundidad con rosca estándar, este último barreno sirve para sujetar la muestra que será procesada en la Cámara Inerte.

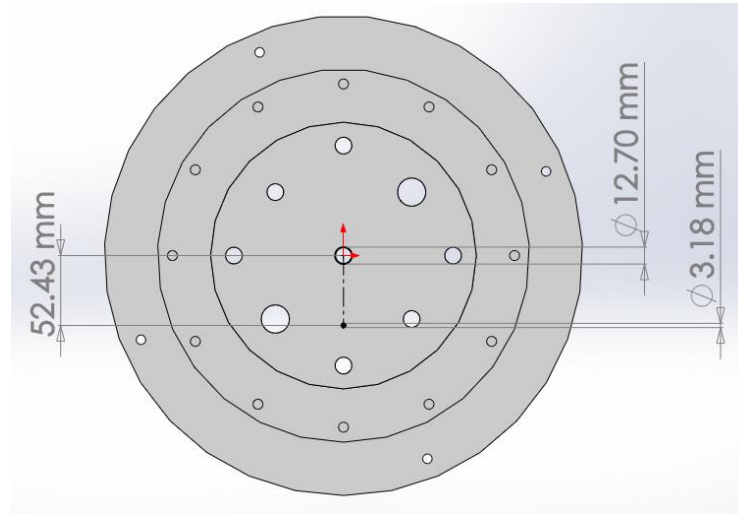


Fig. 3.8 Especificaciones del barreno central.

3.2. Apoyo de la Cámara Inerte

La pieza que se muestra en la figura 3.9 es la que sujeta la Cámara Inerte con la mesa de trabajo del HoSIER, es un anillo plano de acero inoxidable con un diámetro interior de 264.00 mm y un diámetro exterior de 380.00 mm.

Cuenta con 2 grupos de barrenos: el primero está compuesto por 6 barrenos de 1/2" de diámetro, dos de ellos pasados e inscritos en una circunferencia de 358.30 mm de diámetro y los restantes cuatro inscritos en una circunferencia de 295.50 mm de diámetro.

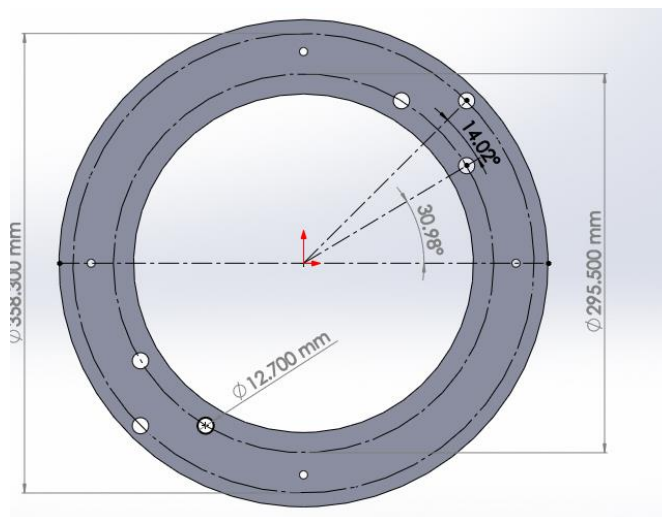


Fig. 3.9 Especificaciones del apoyo de la cámara.

Los barrenos inscritos en la circunferencia de 358.30 mm se encuentran a 45° del eje del anillo y los de la circunferencia de 295.50 mm se encuentran a 14.02° de los barrenos externos.

La función de estos barrenos es la de fijar la Cámara Inerte en la mesa de trabajo del HoSIER que se representa en la figura 3.10.

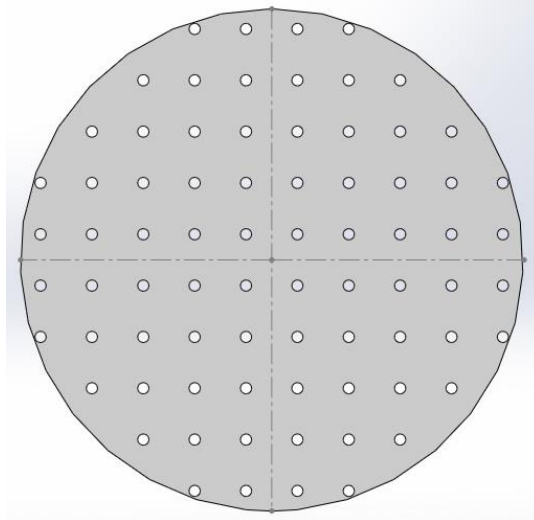


Fig. 3.10 Mesa de trabajo del HoSIER.

El segundo grupo de barrenos de esta pieza (Fig. 3.11) se encuentran en un radio de 165.00 mm del centro y coinciden con los del primer grupo de la base de la Cámara Inerte.

Estos barrenos son de $\frac{1}{4}$ " de diámetro con rosca estándar y alojarán los soportes que unirán esta pieza con la base de la Cámara Inerte.

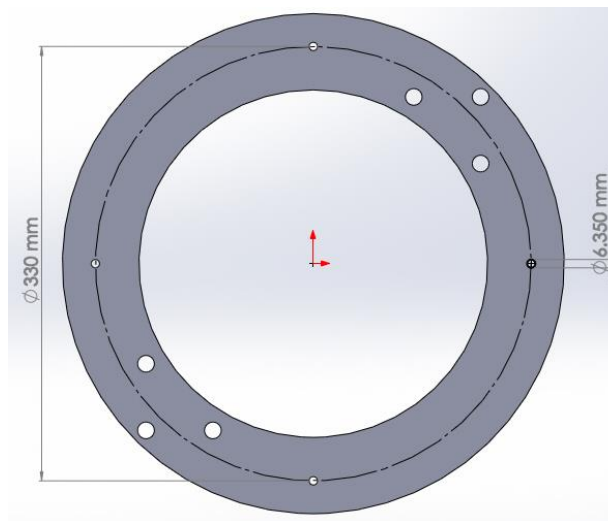


Fig. 3.11 Especificaciones de barrenos para soportes del apoyo.

3.3. Soportes Cámara Inerte

Estas piezas se muestran en la figura 3.12 y son cilindros sólidos de acero inoxidable, con una altura de 100.00 mm. En la parte superior tienen un barreno de $\frac{1}{4}$ " con rosca estándar con una profundidad de 40.00mm para unirlos con tornillos a la base de la Cámara Inerte. En la parte inferior cuenta con una base de $\frac{1}{4}$ " de pulgada de largo y $\frac{1}{4}$ " de diámetro con rosca estándar. Esta parte del soporte se enroscara en los del apoyo de la Cámara Inerte.

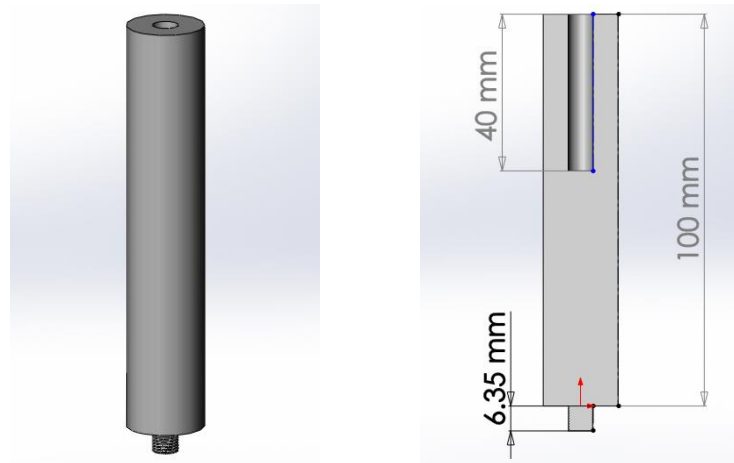


Fig. 3.12 Vista dimétrica y vista de sección de un soporte de la Cámara Inerte.

3.4. Brida CF 2 $\frac{3}{4}$ "

La brida CF 2 $\frac{3}{4}$ ", figura 3.13, es una pieza de conexión, es un disco de 11.88 mm de espesor con un diámetro exterior de 69.40 mm y un diámetro interior de 21.33 mm, el diámetro interior debe ser igual a la tubería que se utilizará para conectar la brida.

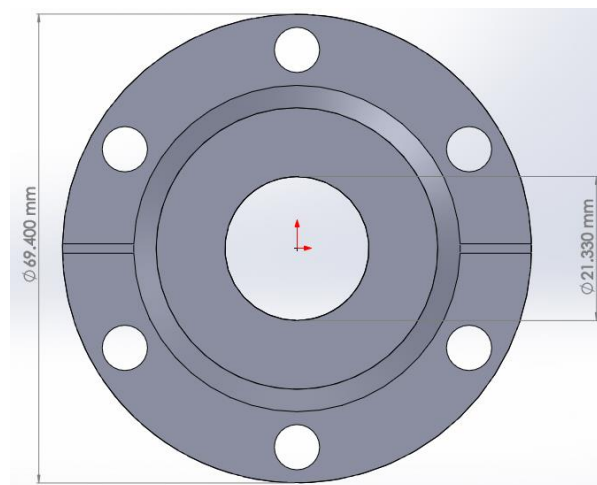


Fig. 3.13 Diámetro interior y exterior de la brida CF 2 $\frac{3}{4}$ ".

En la vista de sección de la brida CF 2 3/4" (Fig. 3.14) se observa la cuña que deforma el anillo de cobre al conectarla con otra brida CF 2 3/4". Esta cuña está definida por una línea a 70° del eje de la brida y la conicidad está dada entre un diámetro exterior de 48.30 mm y un diámetro interior de 41.70 mm con las respectivas profundidades (Fig. 3.15).

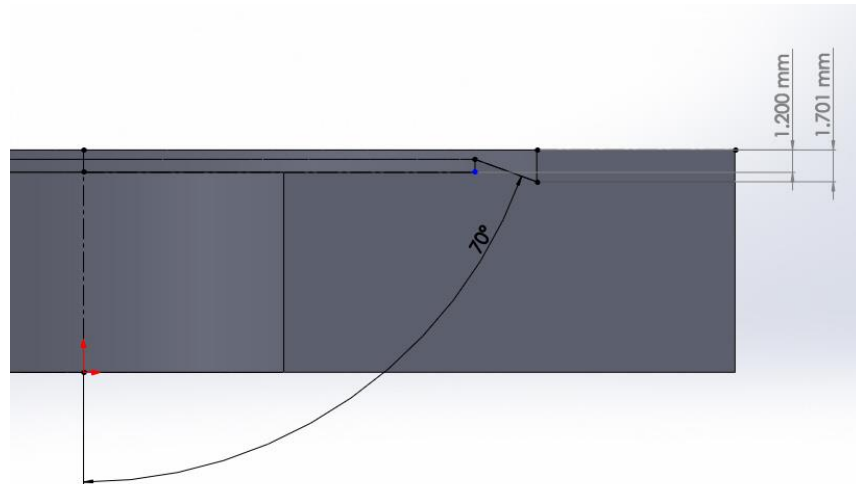


Fig. 3.14 Vista de sección de la brida CF 2 3/4".

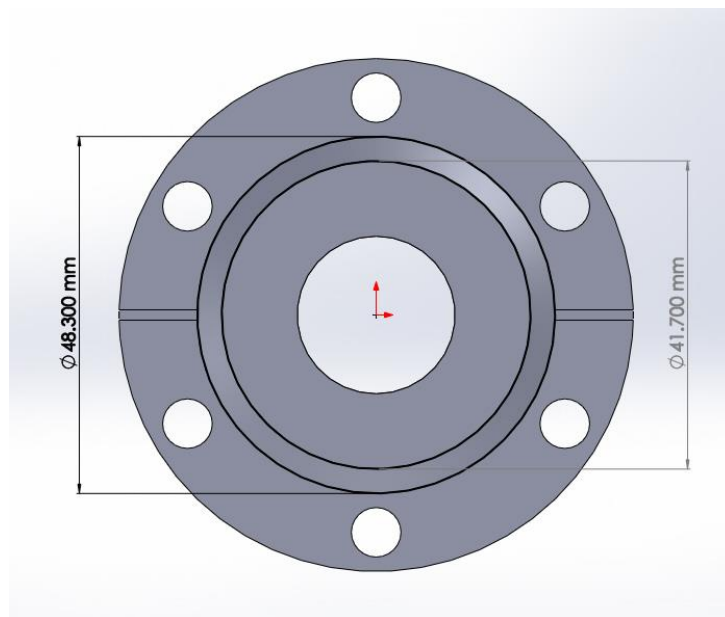


Fig. 3.15 Diámetro interior y exterior de la pestaña de la brida CF 2 3/4".

Las ranuras en la brida que se muestran en la figura 3.16 sirven para remover los anillos de cobre deformados al momento de sellar la brida.

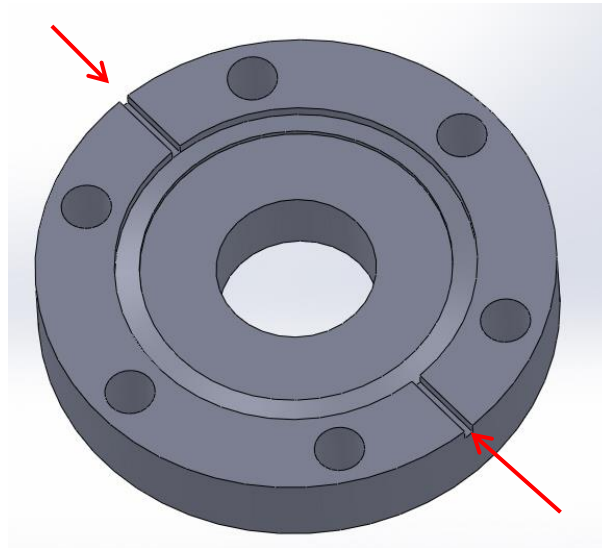


Fig. 3.16 Ranuras de la brida CF 2 $\frac{3}{4}$ ".

3.5. Brida ciega CF 2 $\frac{3}{4}$ "

Su diseño es casi idéntico que la brida CF 2 $\frac{3}{4}$ ", la única diferencia es que la brida ciega no tiene un barreno en el centro, es totalmente sólida y su función es la de sellar por completo cuando no se necesite conectar nada a la brida CF 2 $\frac{3}{4}$ " de la Cámara Inerte (Fig.3.17).

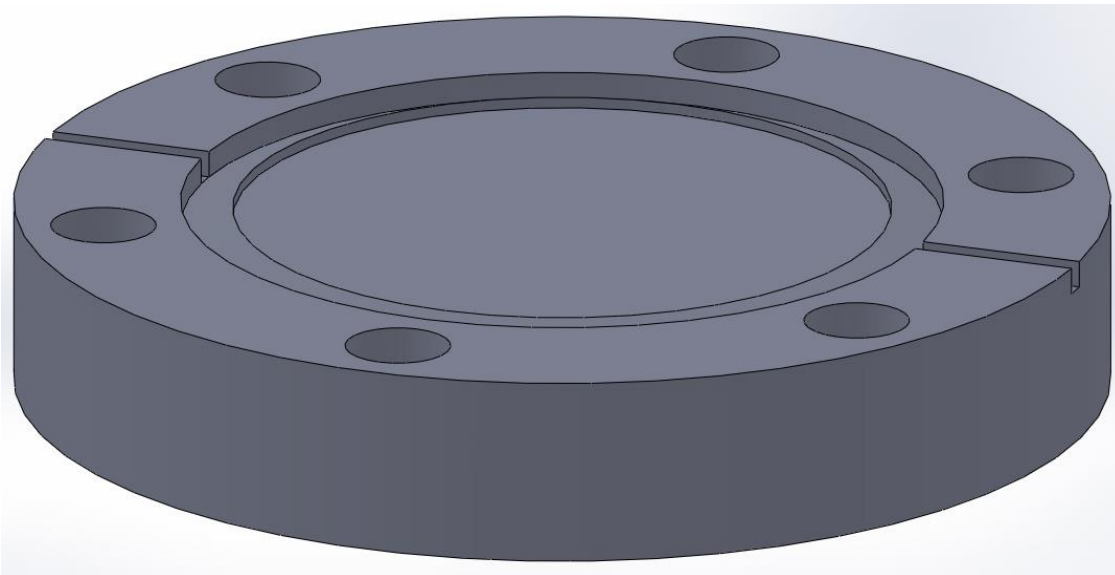


Fig. 3.17 Brida ciega CF 2 $\frac{3}{4}$ ".

3.6. Brida CF 1 1/3"

La brida CF 1 1/3" es una pieza de conexión (Fig. 3.18). Esta pieza es un disco de 11.88 mm de espesor con un diámetro exterior de 69.40 mm y un diámetro interior de 16.00 mm.

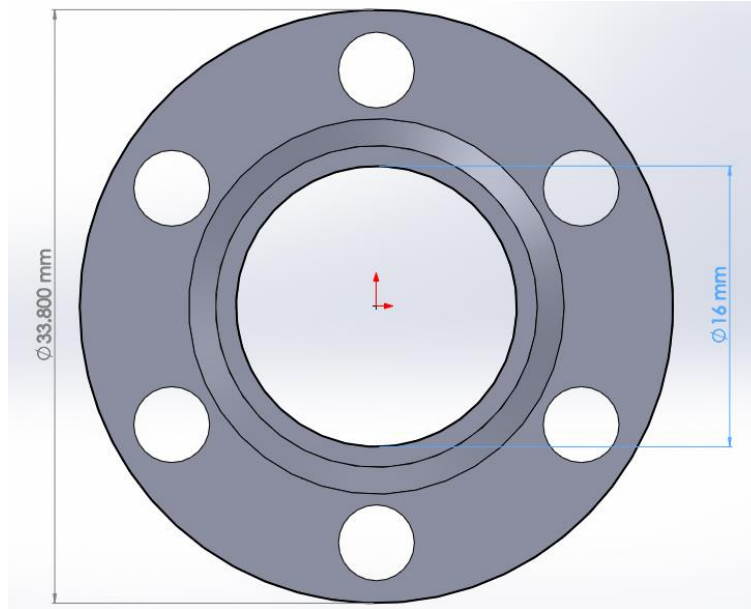


Fig. 3.18 Diámetro interior y exterior de la brida CF 1 1/3".

La brida tiene una cuña para deformar el anillo de cobre que se muestra en la figura 3.19 de la vista de sección de la brida. La cuña está definida por una línea a 70° del eje de la pieza y una conicidad entre un diámetro exterior de 21.40 mm y un diámetro interior de 18.34 mm (Fig. 3.20).

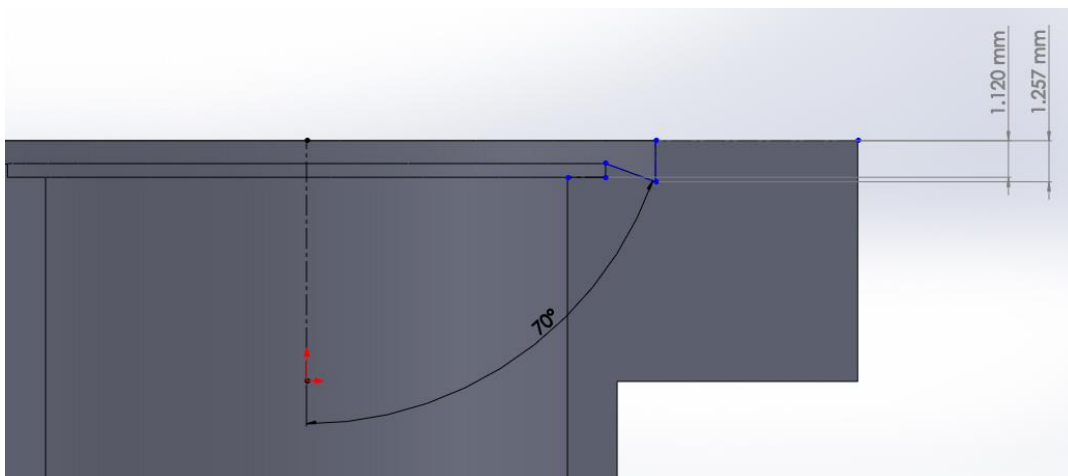


Fig. 3.19 Vista de sección de la brida CF 1 1/3".

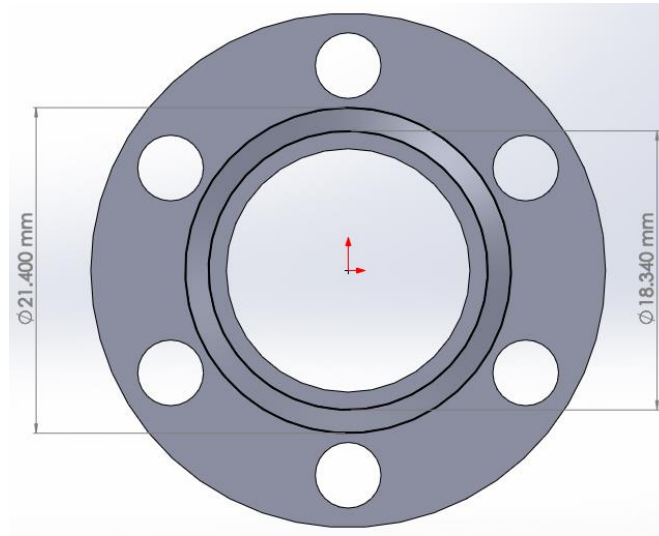


Fig. 3.20 Diámetro interior y exterior de la pestaña de la brida CF 1 $\frac{1}{8}$ ".

Debido a que la tubería de conexión es muy gruesa se tuvo que maquinar la pieza con dos diferentes diámetros como se muestra en la figura 3.21 para que no hubiera problemas al momento de colocar los tornillos para sellar la brida.

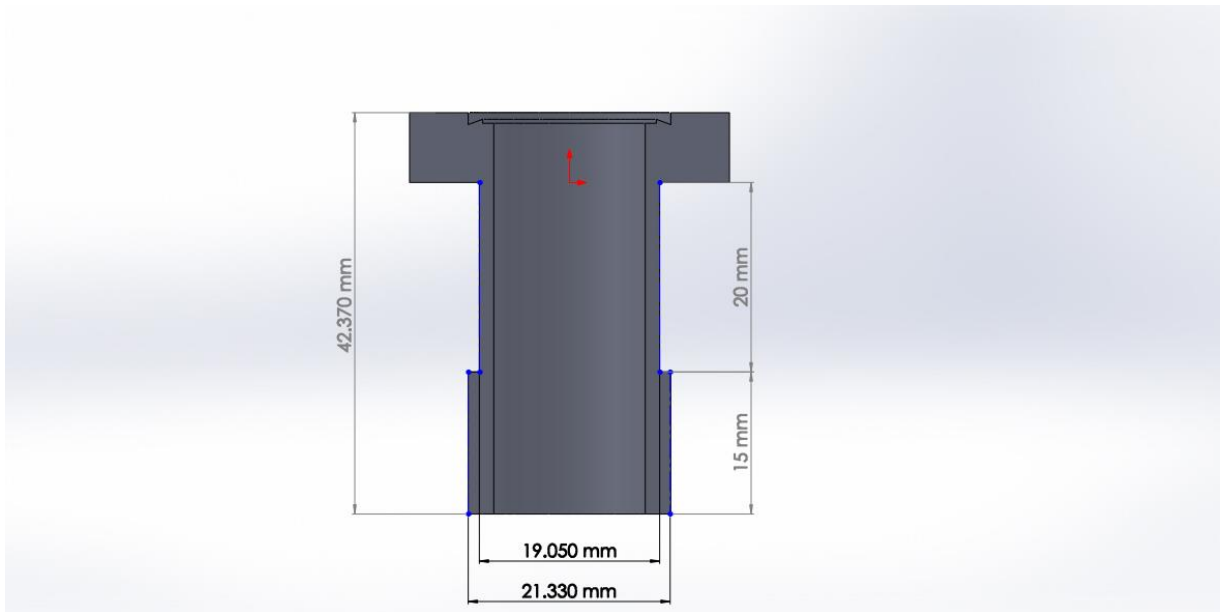


Fig. 3.21 Vista de sección del cuerpo de la brida CF 1 $\frac{1}{8}$ ".

3.7. Brida ciega CF 1 1/8"

La brida ciega CF 1 1/8" (Fig. 3.22) tiene un diseño casi igual a la brida CF 1 1/8", la única diferencia es que la brida ciega es sólida en el centro para evitar que entre materia a la cámara cuando no se tiene nada conectado a la brida CF 1 1/8".

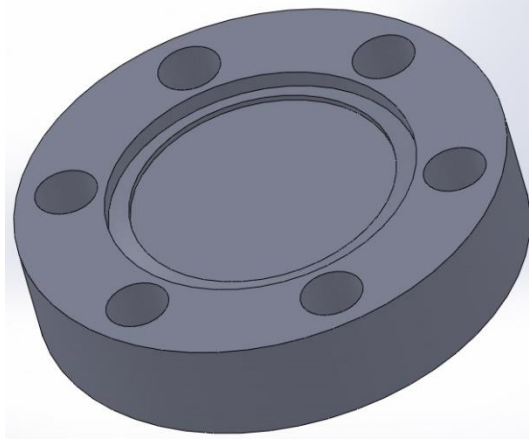


Fig. 3.22 Brida ciega CF 1 1/8".

3.8. Brida KF 25

Esta brida tiene un diámetro exterior de 40.00 mm y un diámetro interior de 12.64 mm, además tiene un canal sobre el cual se ubica el anillo de centrado para sellar la conexión (Fig. 3.23).

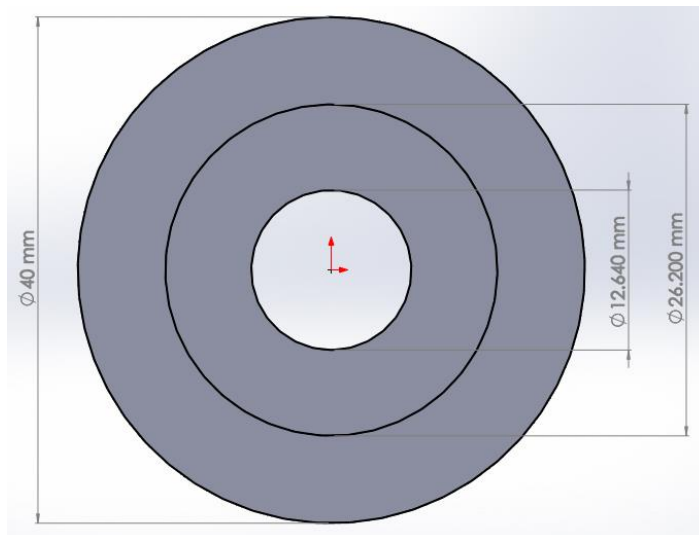


Fig. 3.23 Diámetro interior y exterior de la brida KF 25.

El canal para el anillo de centrado tiene una profundidad de 2.54 mm, tiene una conicidad definida por una línea a 15° respecto a la cara superior de la brida (Fig. 3.24). La conicidad es presionada por las abrazaderas para sellar la brida.



Fig. 3.24 Vista de sección de la brida KF 25.

3.9. Brida KF 25 a NPT hembra 1/4"

Esta brida sirve para adaptar cualquier Instrumento de medición o control con una conexión NPT macho de 1/4" a la base de la Cámara Inerte.

El diseño de la brida KF 25 con una conexión NPT hembra 1/4" (Fig. 3.25) es igual a la brida KF 25, con la diferencia que tiene un cuerpo alargado de 41.27 mm para la fácil manipulación de la brida. El cuerpo tiene un diámetro de 3/4", además de contar con un hexágono de 3/4" a 9.52 mm en la base que sirve para enroscar fácilmente con una llave estándar el instrumento que se va a conectar.

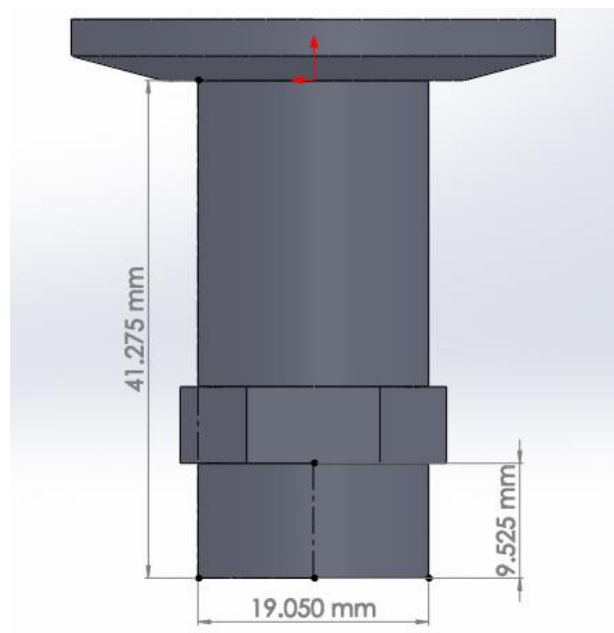


Fig. 3.25 Vista lateral de la brida KF 25 a NPT hembra 1/4".

La brida tiene en su parte inferior un barreno de $\frac{1}{4}$ " con una cuerda hembra estándar NPT de profundidad de 9.52 mm (Fig. 3.26). Estas roscas son el estándar para conexión de tubo americana (National Pipe Tread) según la norma ANSI/ASME B .1.20.1.

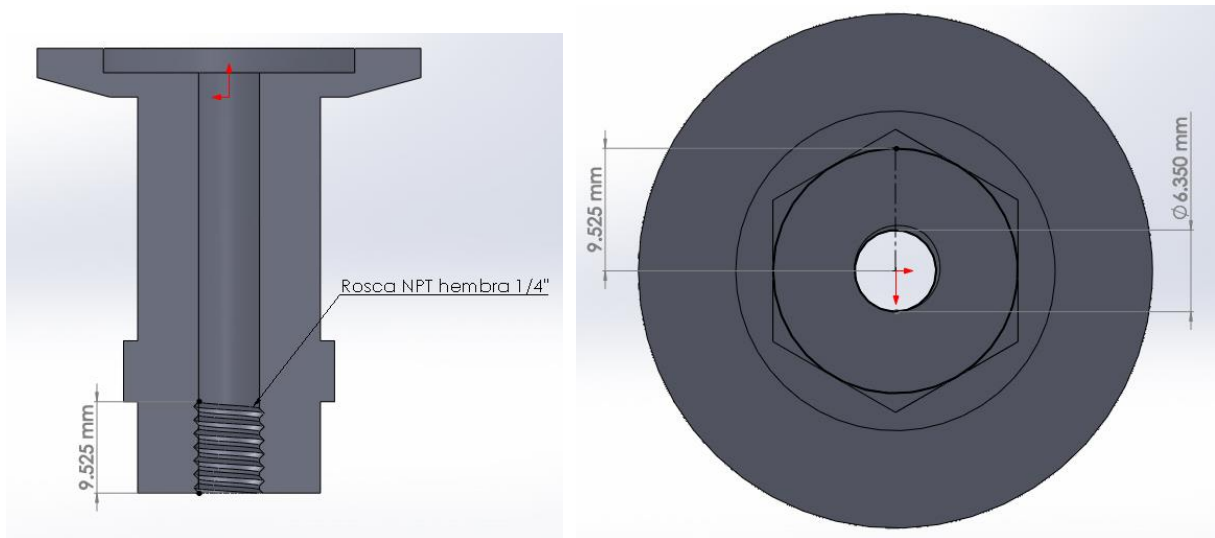


Fig. 3.26 Vista de sección y vista inferior de la brida KF 25 a NPT hembra $\frac{1}{4}$ ".

3.10. Brida ciega KF 25

Su diseño es el mismo que el de la brida KF 25, la única diferencia es que la brida ciega es completamente sólida y su función es sellar cuando no exista nada conectado a la brida KF 25 de la Cámara Inerte (Fig. 3.27).

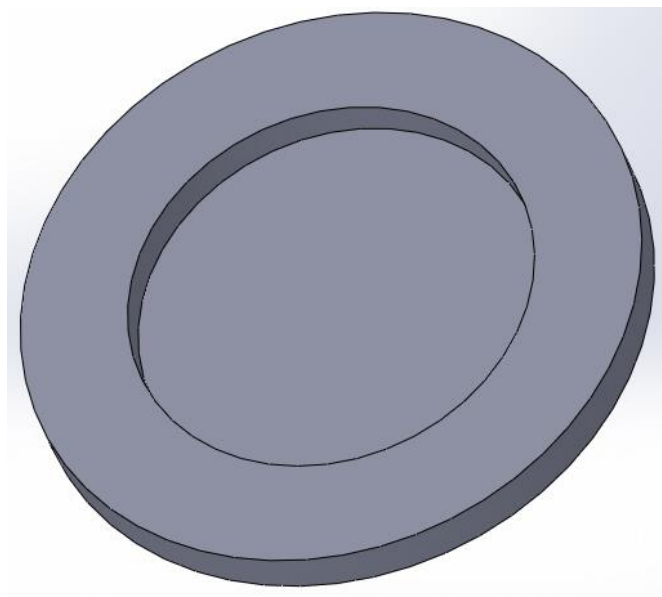


Fig. 3.27 Brida ciega KF 25.

3.11. Brida KF 16

La brida KF 16 se muestra en la figura 3.28, ésta es una brida KF de menor tamaño. Tiene un diámetro exterior de 30.00 mm y un diámetro interior de 12.64 mm, el mismo que la brida KF 25 ya que serán conectadas con el mismo tipo de tuberías.

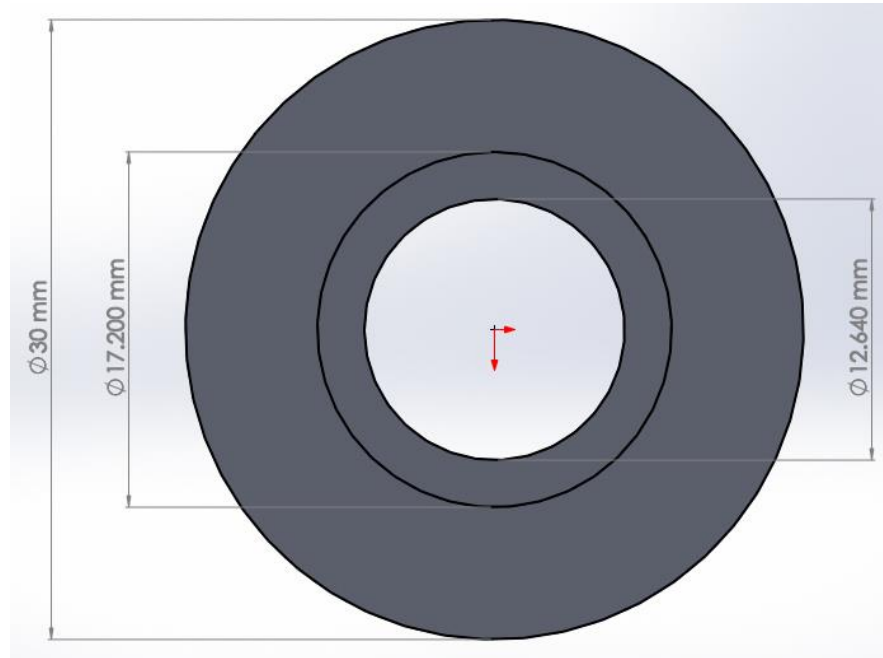


Fig. 3.28 Diámetro interior y exterior de brida KF 16.

El canal para el anillo de centrado de la brida KF 16 tiene un diámetro exterior de 17.20 mm y una profundidad de 2.54 mm. La conicidad está definida por una línea a 15° de la cara superior de la brida (Fig. 3.29).

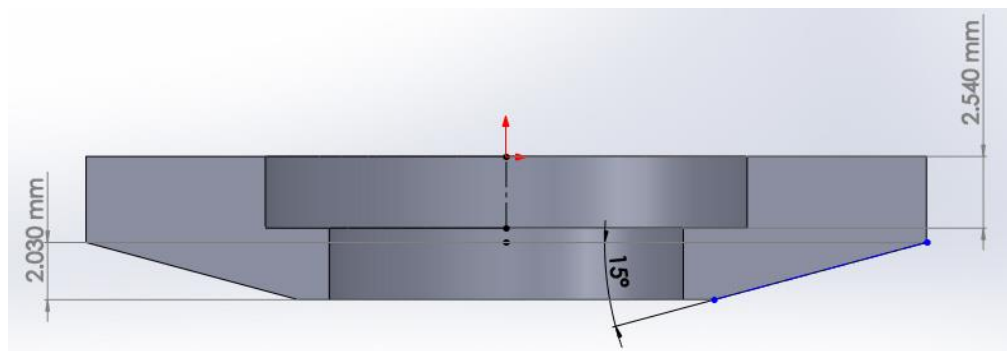


Fig. 3.29 Vista de sección de brida KF 16.

3.12. Brida KF 16 a NPT hembra 1/4"

Esta brida sirve para adaptar cualquier Instrumento de medición o control con una conexión NPT macho de 1/4" a la base de la Cámara Inerte.

El diseño de la brida KF 16 es igual, con la diferencia que tiene un cuerpo alargado de 41.83 mm para la fácil manipulación de la brida KF 16 (Fig. 3.30). El cuerpo tiene un diámetro de 1/2", además de contar con un hexágono de 1/2" a 9.52 mm de la base para enroscar con una llave estándar al instrumento que se va a conectar.

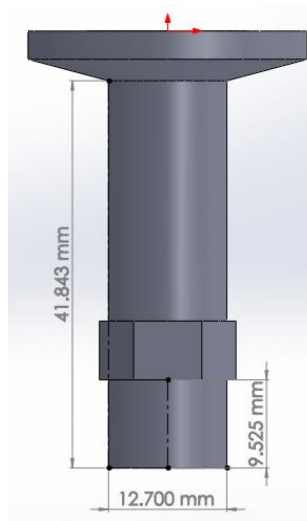


Fig. 3.30 Vista lateral de la brida KF 16 a NPT hembra 1/4".

Esta brida tiene en su parte inferior un barreno de 1/4" con una cuerda hembra estándar NPT de profundidad de 9.52 mm (Fig. 3.31). Estas roscas son el estándar para conexión de tubo americana (National Pipe Tread) según la norma ANSI/ASME B .1.20.1.

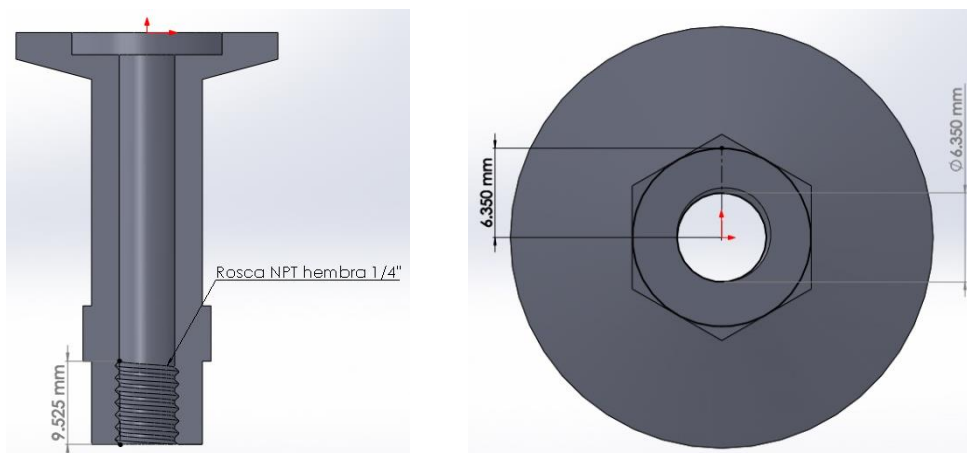


Fig. 3.31 Vista de sección y vista inferior de la Brida KF 16 a NPT hembra 1/4".

3.13. Brida ciega KF 16

Esta brida es una brida sólida con el mismo diseño que la brida KF 16 con la función de sellar la cámara cuando no es necesario conectar ningún equipo (Fig. 3.32).

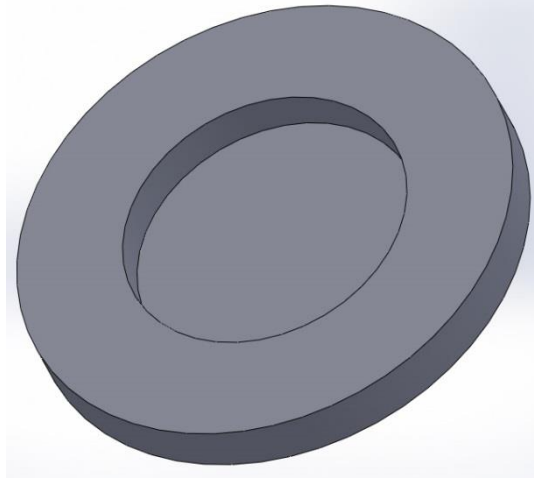


Fig. 3.32 Brida ciega KF 16.

3.14. Pasa-tubbing

El pasa-tubbing es una pieza cilíndrica hueca de acero inoxidable con dos diferentes diámetros, cuya función es inyectar gases a la cámara (Fig. 3.33).

En la parte central tiene un diámetro de $\frac{1}{2}$ " y en los extremos un diámetro de $\frac{1}{4}$ ".

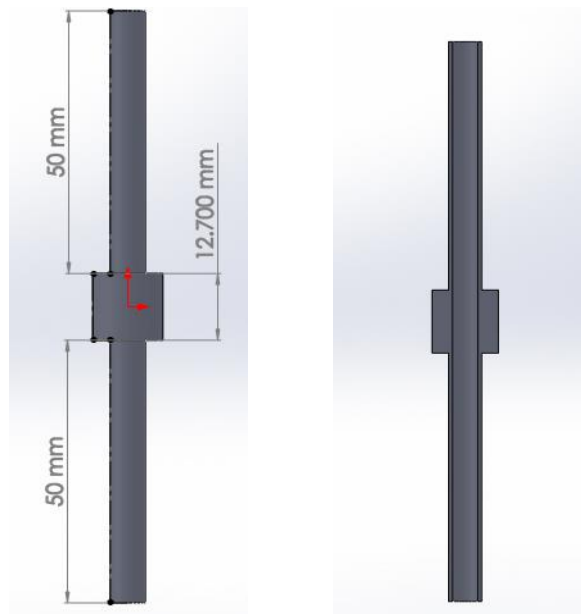


Fig. 3.33 Vista lateral y de sección del pasa-tubbing.

Como se observa en la figura 3.33 esta pieza tiene una altura total de 12.70 mm, los extremos tienen una altura de 50.00 mm y el centro una altura de $\frac{1}{2}$ ".

La función del diámetro exterior es la de poder soldar el pasa-tubbing con la base de la Cámara Inerte, ya que los tubos de acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ " no podrían ser soldados porque no tienen mucho material que aportar a la unión y puede existir el riesgo de que haya fugas (Fig. 3.34).

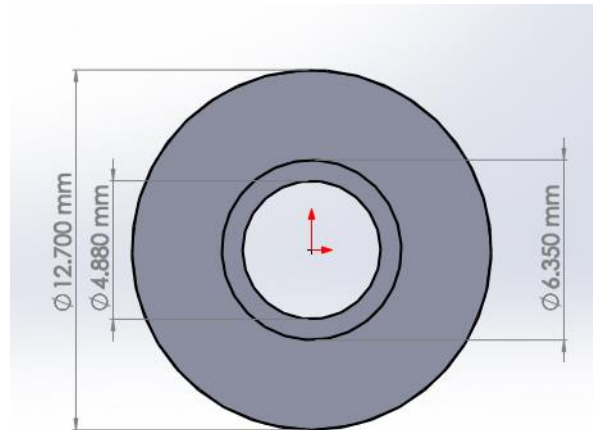


Fig. 3.34 Vista superior del pasa-tubbing.

3.15. Soporte Bridas

La función de estas piezas es evitar que las conexiones de las bridas tengan esfuerzos mecánicos excesivos, además de limitar su movimiento en los extremos. Los soportes para bridas son placas de acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ " de espesor y tienen diferentes medidas en función de la brida o conexión que van a soportar (Fig. 3.35).

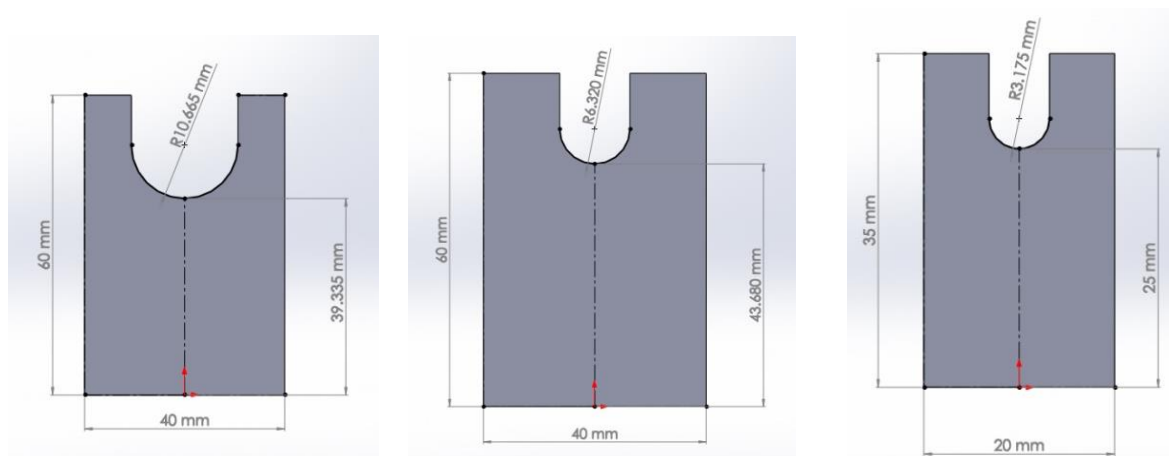


Fig. 3.35 Vista superior de los soportes para bridas.

3.16. Piezas para sellar la esfera

3.16.1. Empaque plano

El empaque plano se muestra en la figura 3.36. Es una pieza circular de 3.50 mm de espesor, y su función es la de proteger y sellar la pared de la esfera que está en contacto con la base de la Cámara Inerte. Esta pieza se deforma por la presión ejercida sobre una brida por medio de tornillos, al deformarse el empaque cubrirá las imperfecciones de la cara plana de la esfera. El empaque tiene un diámetro interior de 200.00 mm y un diámetro exterior de 280.00 mm y 12.00 barrenos de 7.50 mm de diámetro, estos barrenos coinciden con los de la base de la Cámara Inerte.

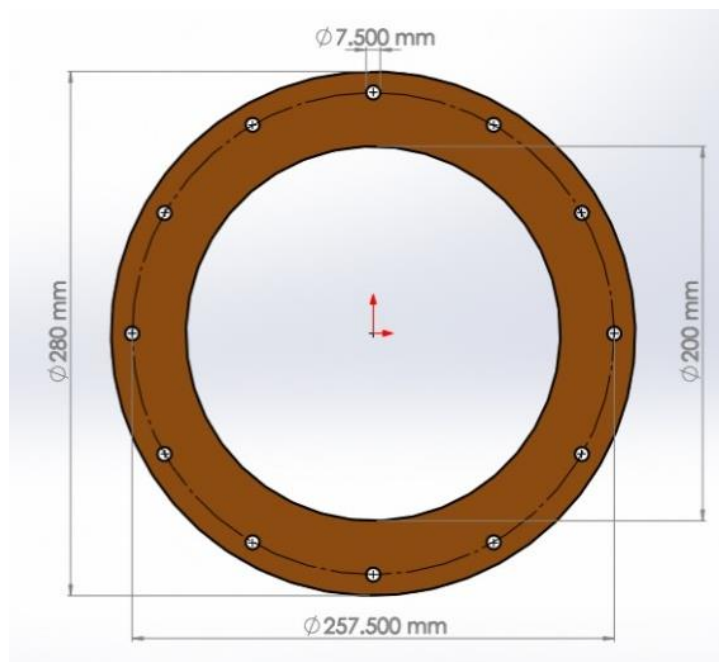


Fig. 3.36 Empaque plano.

3.14.3. Brida de esfera sin ranura

Esta brida sirve para deformar el empaque plano además de sujetar la esfera (Fig. 3.37). Es un disco de aluminio de 5.00 mm de espesor con un diámetro interior 215.00 mm y un diámetro exterior de 280.00 mm, tiene 12 barrenos de 7.50mm de diámetro inscritos en un radio de 257.50 mm.

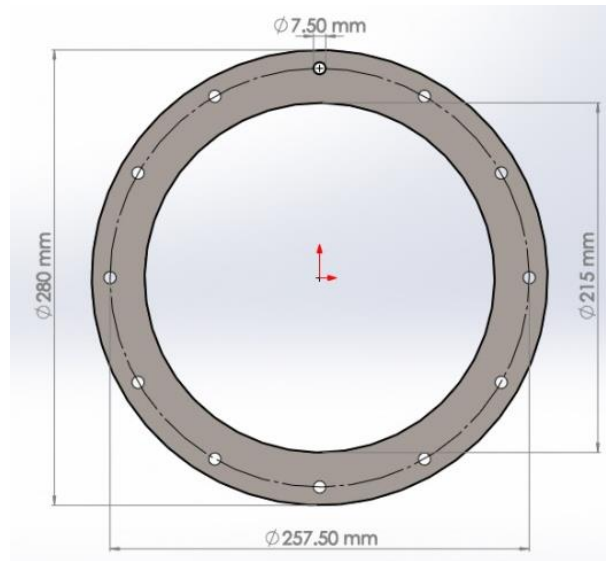


Fig. 3.37 Brida sin ranura de esfera.

3.14.4. Brida de esfera con ranura

Esta brida tiene la función de presionar a la brida sin ranura, además de alojar y deformar el anillo tórico para sellar el espacio entre la pared de la esfera y la brida. Al presionar el anillo contra la brida sin ranura por medio de tornillos, el diseño de la ranura deforma al anillo hacia la pared de la esfera sellándola.

La brida es un disco de aluminio de diámetro interior 215.00 mm y un diámetro exterior de 280.00 mm, tiene 12 barrenos de 7.50 mm de diámetro inscritos en un radio de 257.50 mm (Fig. 3.38)

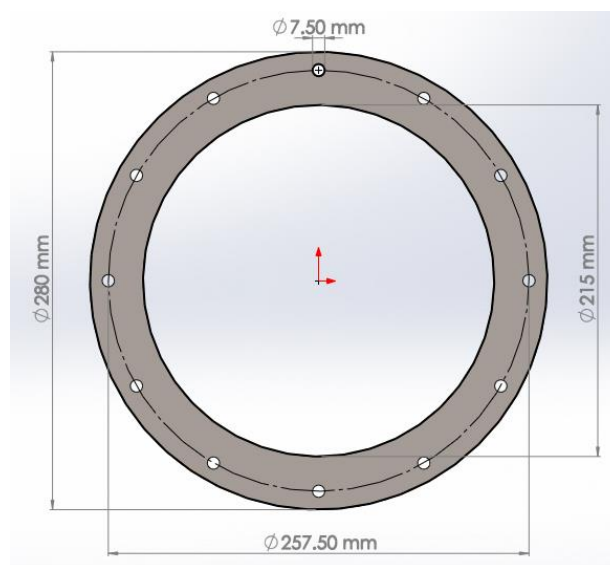


Fig. 3.38 Especificaciones de la brida de esfera con ranura.

El diseño de la ranura (Fig. 3.39) es un Ansi Inch AS-568-4461 con las especificaciones mostradas en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Especificaciones de ranura AS-568-4461.

Especificaciones ranura Ansi Inch AS-568-4461		
Unidades	Inch	mm
Diámetro de ranura	8.30	210.82
Ancho	0.301	7.6454
Radio	0.0275	0.6985

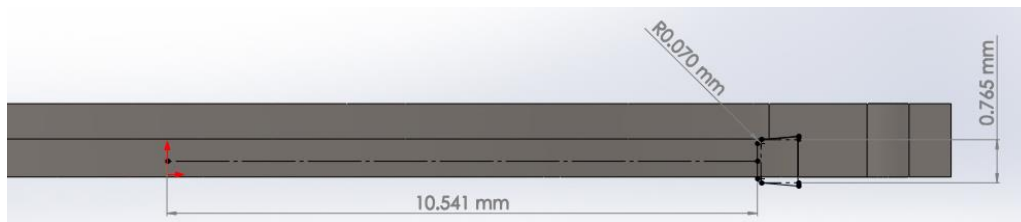


Fig.3.39 Vista de la sección del diseño de la ranura.

3.15. Piezas para sellar la boquilla

3.15.1. Empaque plano de boquilla

Este empaque es un disco de silicón de 3.50 mm de espesor con un diámetro interior de 73.00 mm y un diámetro exterior de 149.00 mm (Fig.3.40). Tiene 4 barrenos de 7.14 mm de diámetro distribuidos en un diámetro de 118.86 mm dentro del disco.

La función de esta pieza es la de deformarse para cubrir las irregularidades en la cara frontal de la boquilla lateral de la esfera, el empaque se deformara por la fuerza que se aplica al enroscar las tuercas que unirán el empaque con tres diferentes bridas por medio de tornillos.

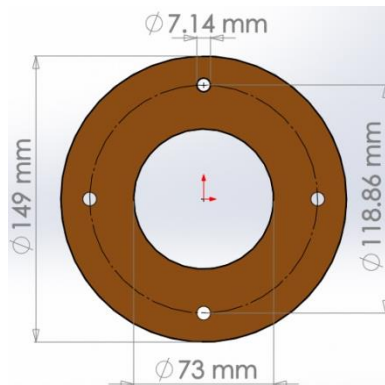


Fig. 3.40 Empaque plano de la boquilla.

3.15.2. Brida de boquilla sin ranura

Esta brida es un disco de aluminio de 13.00 mm de espesor con un diámetro interior de 90.15 mm un diámetro exterior de 149.00 mm y cuatro barrenos inscritos en un diámetro de 118.86 mm que servirán para unir la brida con el empaque plano y el anillo tórico de viton (Fig. 3.41).

Al presionar la brida con los tornillos ésta deformará el empaque plano y el anillo de viton sellando las paredes de la boquilla para tener una atmósfera controlada.

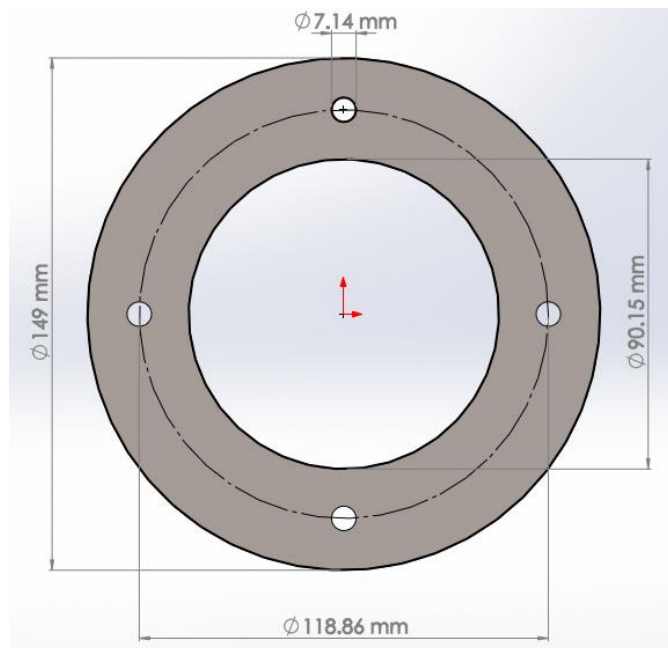


Fig. 3.41 Brida de boquilla sin ranura.

3.15.2. Brida de boquilla con ranura

Esta brida tiene la función de presionar el anillo de viton contra la brida sin ranura (Fig. 3.42). El diseño de la ranura asegura que el anillo se deforme hacia la pared de la boquilla sellando todo espacio en el que pueda ocurrir una fuga.

La brida es un disco de aluminio de 13.00 mm de espesor con un diámetro interior de 90.15 mm un diámetro exterior de 149.00 mm y cuatro barrenos inscritos en un diámetro de 118.86 mm.

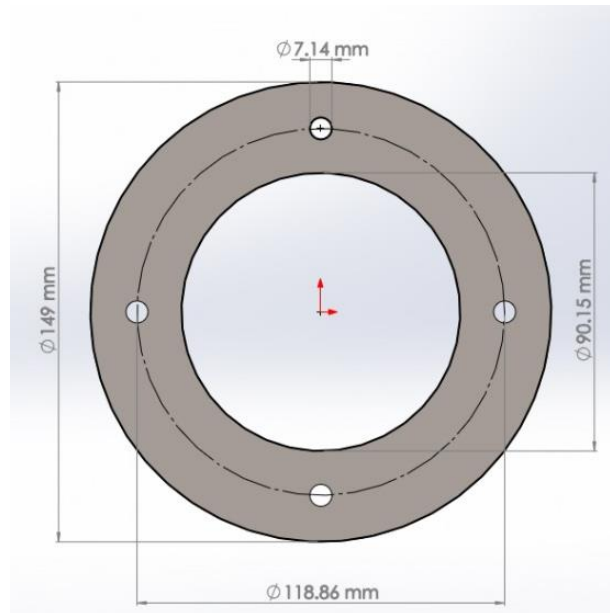


Fig 3.42 Brida de boquilla con ranura para anillo tórico.

El diseño de la ranura (Fig. 3.43) es un Ansi Inch AS-568-3401 con las especificaciones mostradas en la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Especificaciones ranura Ansi Inch AS-568-3401.

Especificaciones ranura Ansi Inch AS-568-3401		
Unidades	Inch	mm
Diámetro de ranura	3.227	81.96
Ancho	0.229	5.8166
Radio	0.0275	0.6985

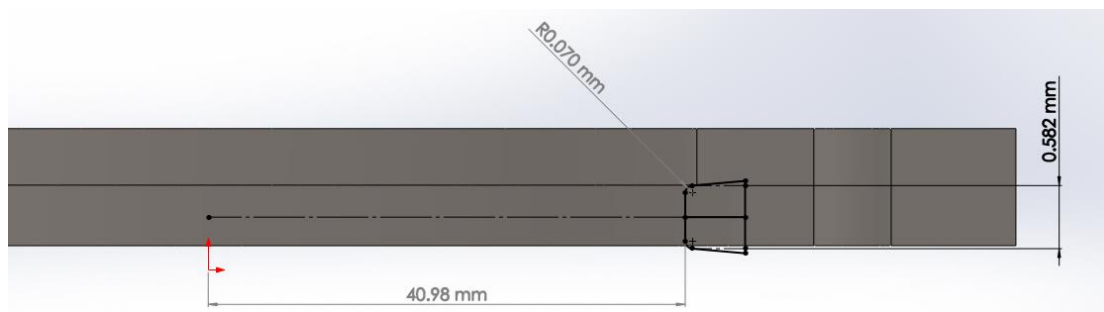


Fig. 3.43 Vista de la sección del diseño de la ranura.

3.15.3. Brida ciega de la boquilla

La función de esta brida es la de sellar la boquilla de la esfera, deformando el empaque plano y uniendo el resto de las piezas por medio de tornillos (Fig. 3.44). La brida es un disco de ½"

de espesor de acero inoxidable con un diámetro de 149.00 mm y cuatro barrenos de 7.14 mm de diámetro inscritos en un diámetro de 118.86 mm.

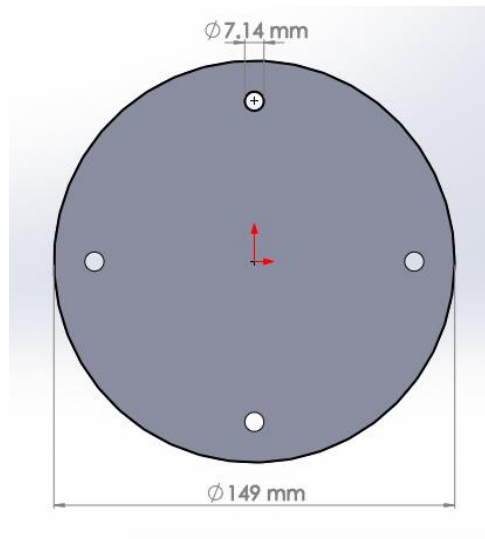


Fig. 3.44 Brida ciega de la boquilla.

3.16. Porta muestra

A continuación se muestra el diseño de las piezas que se utilizarán para colocar las muestras en la Cámara Inerte dentro de la zona focal del concentrador.

3.16.1. Ángulo del porta muestra

Esta es una pieza sencilla, su función es la de unir el porta muestra a la base de la Cámara Inerte y ubicarlo en el centro de la cámara. Es un ángulo de acero inoxidable de 3.00 mm de espesor, con medidas de 30.00 mm ancho x 26.68 mm largo x 30.00 mm de alto (Fig. 3.45).

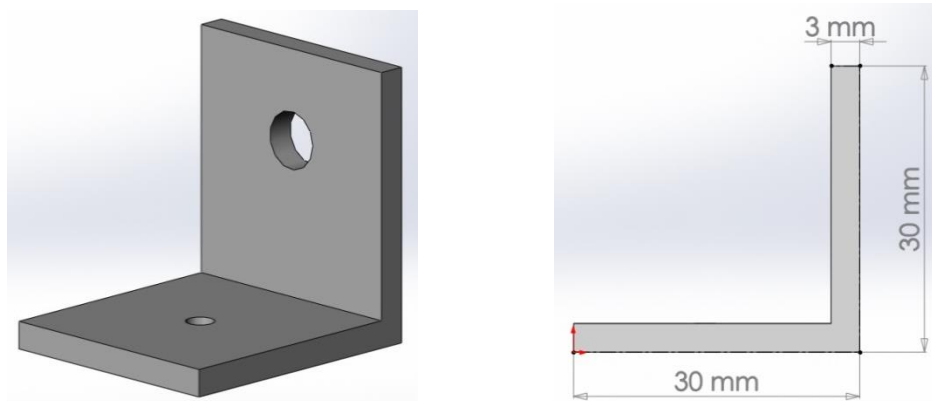


Fig. 3.45 Vista dimétrica y vista lateral del ángulo.

El ángulo tiene dos barrenos, el primero de $\frac{1}{8}$ " de diámetro para unirlo a la Base de la Cámara Inerte, y está ubicado en la cara horizontal del ángulo, está a 13.50 mm de la cara posterior y ubicado a 13.34 mm de las caras laterales, el segundo barreno tiene $\frac{1}{2}$ " de diámetro y está a 20.01 mm de la base y 13.34 mm de las caras laterales (Fig. 3.46).

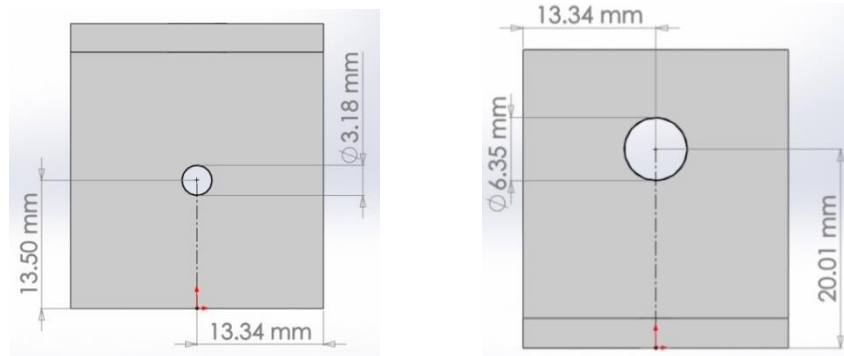


Fig. 3.46 Barrenos del ángulo del porta muestra.

3.16.2. Arenero del porta muestra

El arenero está compuesto por tres piezas (figuras 3.47-3.51) y su función es evitar que fragmentos de la muestra puedan caer en las tuberías de las bridas, además de soportar la horquilla con las muestras.

La primera pieza es el soporte, ésta es una pieza hecha con solera de acero inoxidable, y tiene una altura de 121.80 mm y un ancho de 62.10 mm sobre la cara superior descansa el arenero.

La pieza tiene un barreno de $\frac{1}{4}$ " en el centro de la solera a 20.00 mm de la base, por el cual se unirá con el ángulo de la base por medio de un tornillo.

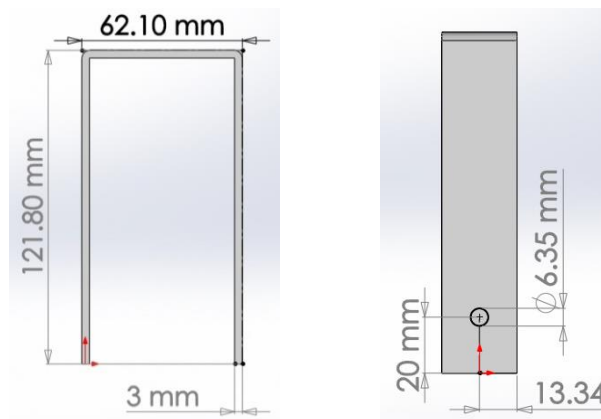


Fig. 3.47 Vista frontal y lateral del soporte del arenero.

La segunda pieza es una placa de acero inoxidable en forma de U, su función es la de soportar cualquier fragmento de material que caiga de la horquilla. El cuerpo del arenero tiene un espesor de 1.20 mm una altura de 32.66 mm un ancho de 32.66 mm y un largo de 150.60 mm (figuras 3.48. y 3.49).

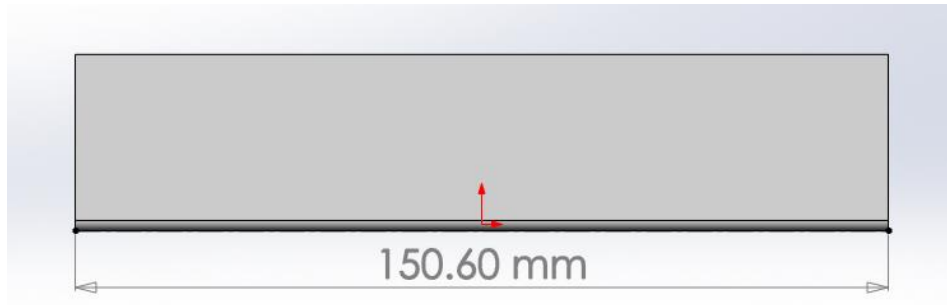


Fig. 3.48 Vista frontal del cuerpo del arenero.

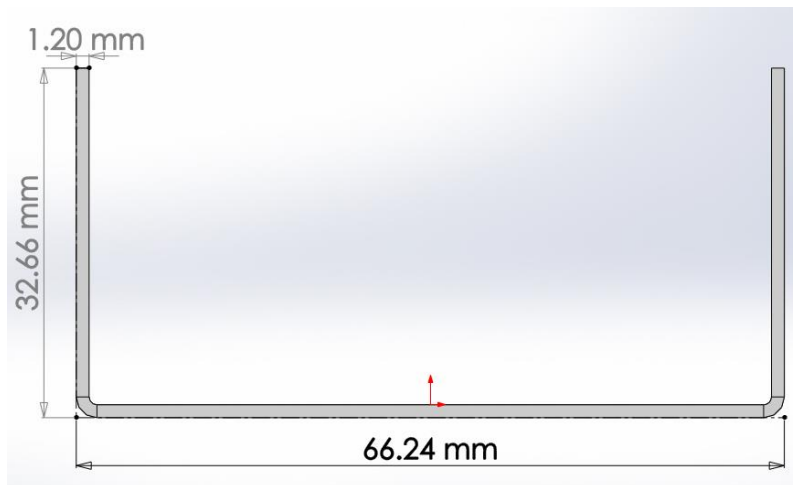


Fig. 3.49 Vista lateral del cuerpo del arenero.

La última pieza del arenero es el soporte en el cual se sujetará la horquilla con la muestra (Fig. 3.50). Es una pieza hecha con solera de acero inoxidable de 3.00 mm de espesor con un ancho de 13.24 mm un largo de 34.50 mm y una altura de 119.50 mm.

La ranura del soporte tiene la función de sujetar la horquilla a una altura variable para facilitar que la muestra se encuentre en la zona focal del concentrador. La ranura se encuentra en el centro de la solera a 7 mm de la base del soporte, tiene un radio de 2.50 mm y una altura de 99.50 mm.

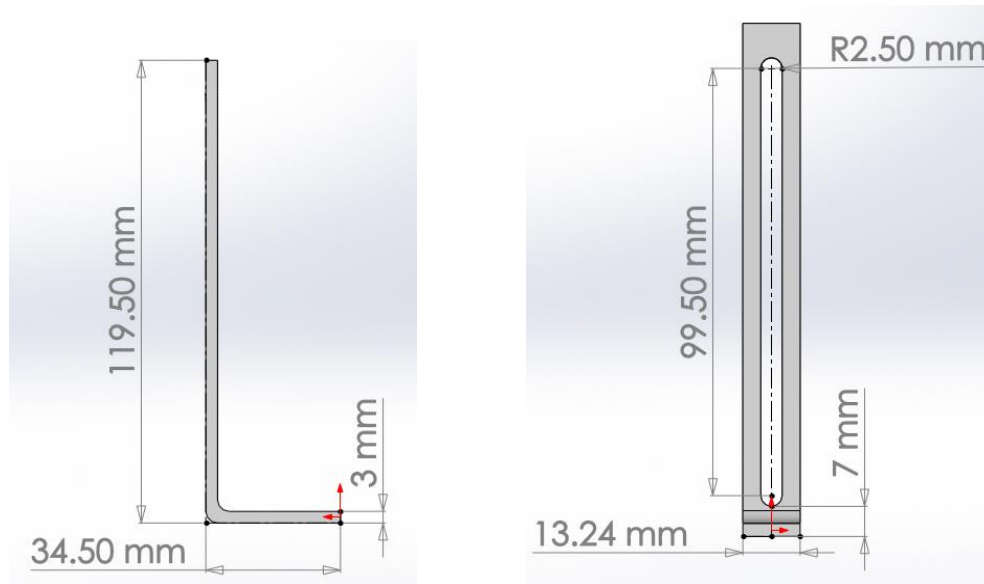


Fig. 3.50 Vista lateral del soporte con ranura para la horquilla.

Los soportes se soldaron en el centro del cuerpo del arenero para tener la pieza terminada que se muestra en la figura 3.51.

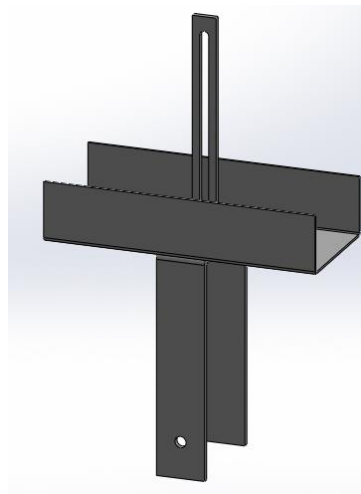


Fig. 3.51 Arenero completamente ensamblado.

3.16.3. Horquilla del porta muestra

La horquilla está hecha con solera de acero inoxidable de 3.00 mm de espesor, tiene un poste central de 13.24 mm x ancho 100.00 mm de alto y dos postes de 120.00 mm de alto que se encuentran a 83.24 mm de distancia del poste central (Fig. 3.52), con esto se busca que la pieza este lo más alejada posible de la zona focal para evitar que incremente su

temperatura por arriba de la temperatura de fusión. La horquilla tiene 5 barrenos de $\frac{1}{4}$ ", el del poste central para sujetarse a la ranura del arenero y los de los postes de los extremos para sujetar la muestra con ayuda de los postes.

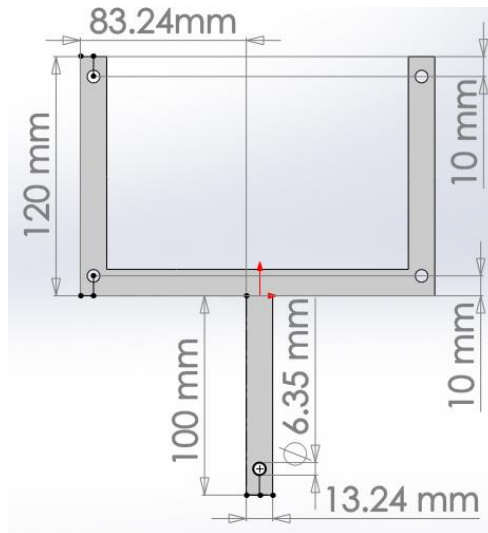


Fig. 3.52 Horquilla del porta muestra.

3.16.4. Postes de la horquilla

Los postes son dos láminas hechas con solera de acero inoxidable, se unen con tornillos a la horquilla para sujetar las muestras (Fig. 3.53). Los postes de 3.00 mm de espesor tienen 13.24 mm de ancho y 120 mm de altura, tienen dos barrenos de $\frac{1}{4}$ " a 10.00 mm de la base para sujetarse a la horquilla.

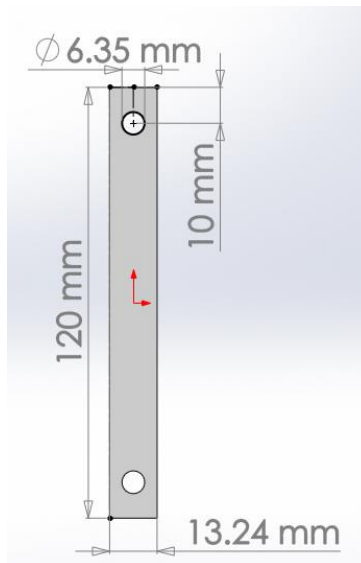


Fig. 3.53 especificaciones del poste de la horquilla.

3.16.5. Sistema de inyección de gases

El objetivo del sistema de inyección de gases es tener un flujo homogéneo de gas dentro de la esfera de la Cámara Inerte. Es importante tener un flujo homogéneo para asegurar que los gases que son inyectados tengan contacto con toda la superficie de la muestra colocada dentro de la Cámara Inerte.

3.17. Regaderas del sistema de inyección de gases

Las siguientes piezas fueron hechas con tubing de acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ ", sirven para tener un flujo homogéneo desde la base de la Cámara Inerte de cualquier gas que quiera inyectarse.

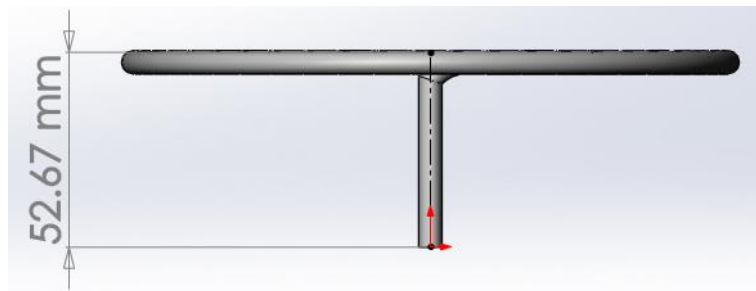


Fig 3.54 Vista frontal de la regadera de gas.

La regadera tiene una altura de 52.67 mm y un diámetro de 160.00 mm, tiene 46 barrenos de $\frac{1}{16}$ " distribuidos cada uno a 7.20° de distancia (figuras 3.54 y 3.55).

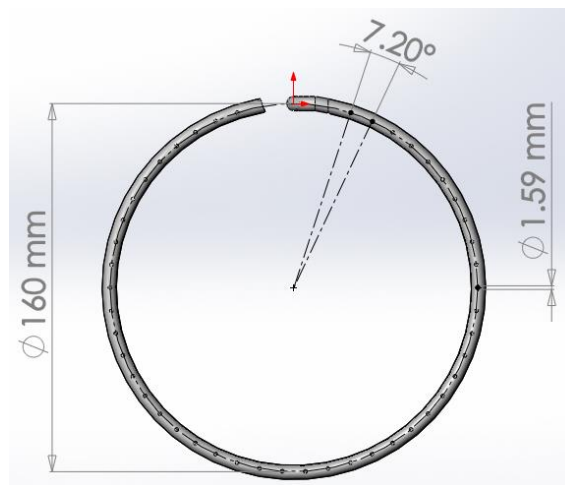


Fig. 3.55 Vista superior de la regadera inferior de gas.

Existe una segunda regadera, su función es la de inyectar un flujo homogéneo de gas a lo largo y desde la parte superior de la esfera (Fig. 3.56). La regadera tiene una altura total de 396.50 mm y la curvatura en ella es para que el tubing se encuentre lo más lejano posible de la zona focal.

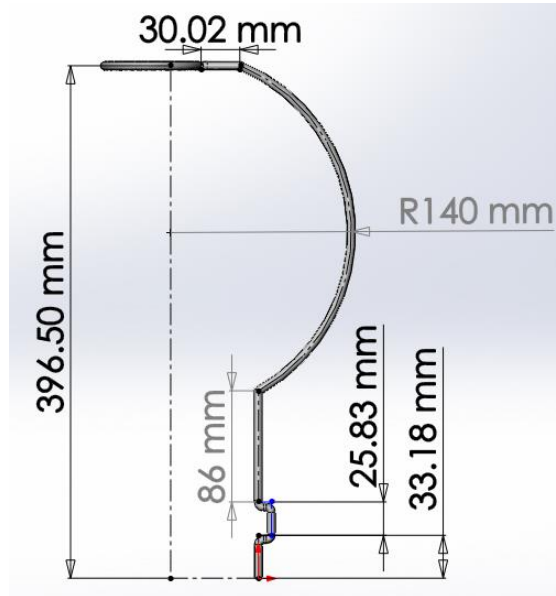


Fig.3.56 Vista lateral de la regadera de gas superior de la Cámara Inerte.

En la parte superior, la regadera tiene una circunferencia de 75.17 mm en la cual se encuentran distribuidos 40 barrenos de $1/16$ " separados cada uno por 8.37° para distribuir uniformemente el flujo de gas (Fig. 3.57).

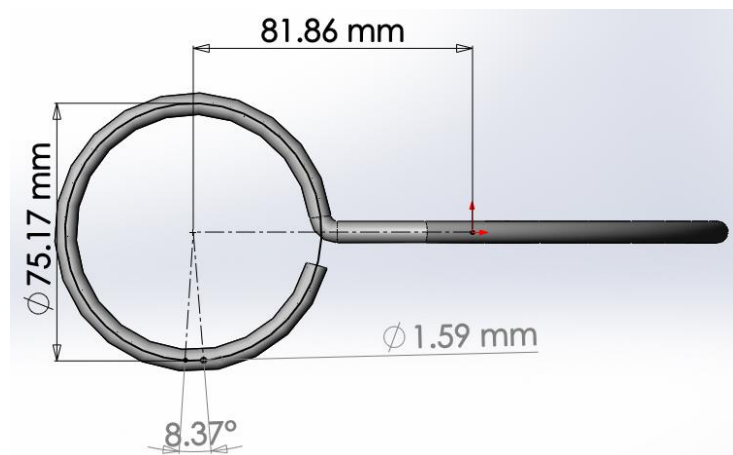


Fig. 3.57 Vista superior de la regadera superior.

3.18. Esfera de la Cámara Inerte

Esta es la pieza más importante de la cámara, ya que es la que será sometida a un mayor esfuerzo por su gran área superficial, además de que será el recinto de las muestras que recibirán la radiación del concentrador.

Se decidió que la geometría de la cámara fuera una esfera para que la superficie estuviera lo más alejada posible de las muestras, que al estar en la zona focal aumentarán de temperatura y por lo tanto emitirán radiación aumentando la temperatura de las paredes del contenedor.

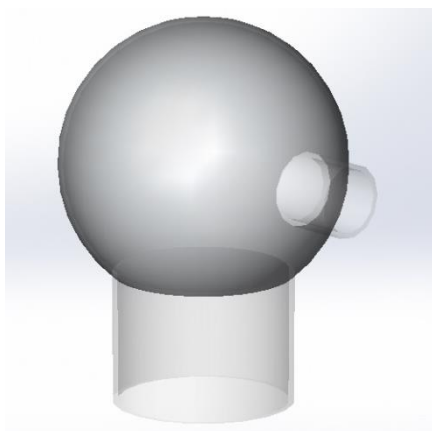


Fig. 3.58 Esfera de la Cámara Inerte.

La esfera fue hecha con un matraz de bola de 343.12 mm de diámetro, con esto aseguramos que las paredes del contenedor están por lo menos a 171 mm de distancia de la zona focal, asegurando que la temperatura de las paredes no lleguen a la temperatura máxima de trabajo (500° C).

El matraz de bola fue cortado en un lado para posteriormente soldar un tubo de vidrio de borosilicato de 201.83 mm de diámetro interior por 155.00 mm de alto, el matraz y el tubo tienen un espesor de 6.51 mm, que es el máximo que se maneja comercialmente.

La boquilla del matraz bola fue orientada horizontalmente para poder ser utilizada para instalar equipo al reactor como pueden ser diferentes tipos de pistones que permiten introducir reactivos gradualmente al reactor.

3.18.1. Análisis de esfuerzos de la esfera

Al ser una pieza crítica en la Cámara Inerte se realizó un análisis estructural con el software de diseño Solidworks 2012® para conocer la reacción que tendría al generar un vacío completo, es decir que dentro de la esfera no quedará ninguna partícula de gas que ejerza

una presión contra las paredes de la cámara. Al hacer esto la presión máxima que soportaría la esfera sería la presión atmosférica. Por lo tanto se consideró que toda la superficie de la esfera soportaría una presión equivalente a 101,325 Pa.

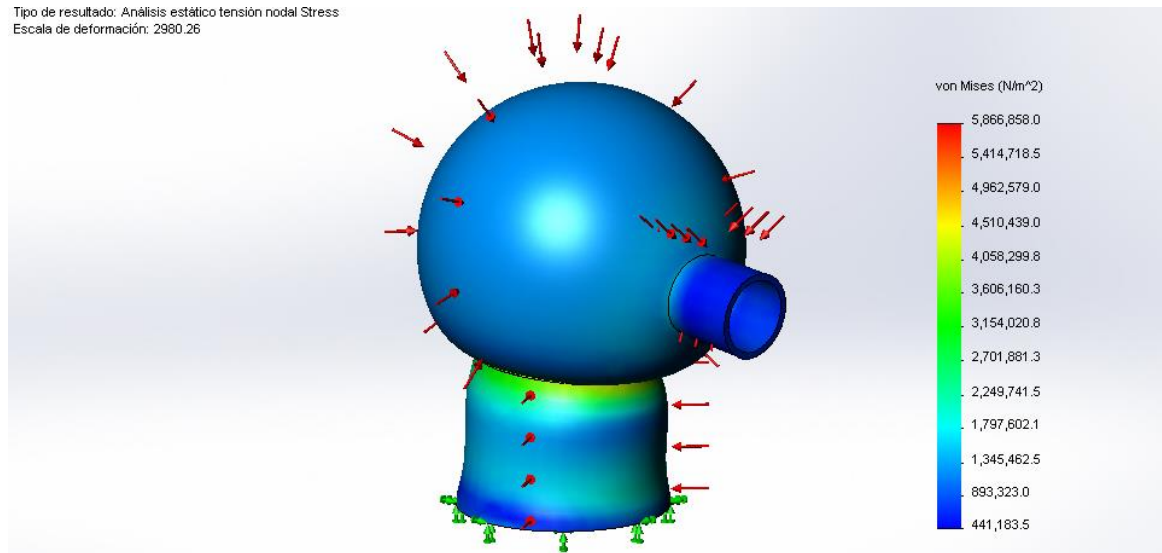


Fig. 3.59 Esfuerzos presentes en la esfera.

Aplicando esta presión se obtuvo un resultado un esfuerzo máximo de 5,866,858 Pa, éste esfuerzo está muy por debajo del máximo que puede soportar el vidrio de borosilicato que tiene un modulo de Young de 63 GPa (63×10^9 Pa). Como se puede ver en la figura 3.59.

El esfuerzo máximo se localiza en la región que une el tubo de Pyrex[®] con la esfera y se encuentra del lado de la boquilla (fig.3.60), por el momento que produce la boquilla al soportar la presión atmosférica.

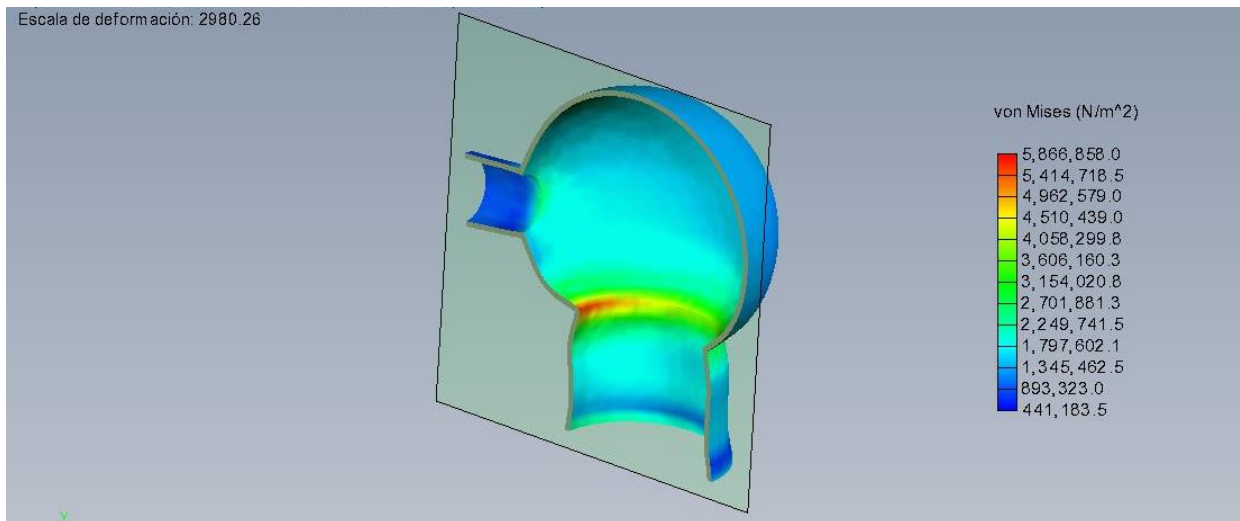


Fig. 3.60 Vista de la sección del análisis de esfuerzo.

Capítulo 4

Ensamble de la Cámara Inerte

En este capítulo se muestra la manera y el orden en que se ensamblaron las piezas de la Cámara Inerte. Se describe de manera detallada las especificaciones que se siguieron para ensamblar las piezas y los sellos de la Cámara Inerte. Para poder tener control sobre la atmosfera dentro de la Cámara Inerte fue necesario cumplir con las especificaciones del ensamble, de lo contrario, podrían existir fugas que no permitirían tener las condiciones deseadas.

4.1. Ensamble de bridas

Como se muestra en la figuras 4.1 a la figura 4.4 cada brida fue soldada a un ensamble de dos tubos que forman un ángulo de 90°. Estos tubos fueron soldados a la base de la Cámara Inerte, la longitud del primer tubo define la distancia entre la base y el centro de la brida. Para que todas las bridas (KF 16, KF 25, CF 1 ½", CF 2 ¾") tengan la misma distancia de su centro a la base de la cámara, la longitud del primer tubo es diferente dependiendo el diámetro del mismo, la longitud del segundo tubo depende del barreno al que fue soldado en la cámara Inerte y del tipo de brida.

La brida KF 25 fue soldada a un codo con un ángulo de 90° de 69.00 mm de alto por 157.00 mm de ancho como se muestra en la figura 4.1.



Fig. 4.1 Ensamble brida KF 25.

La brida KF 16 fue soldada a un codo con un ángulo de 90° de 69.00 mm de alto por 157.00 mm de ancho como se muestra en la figura 4.2.

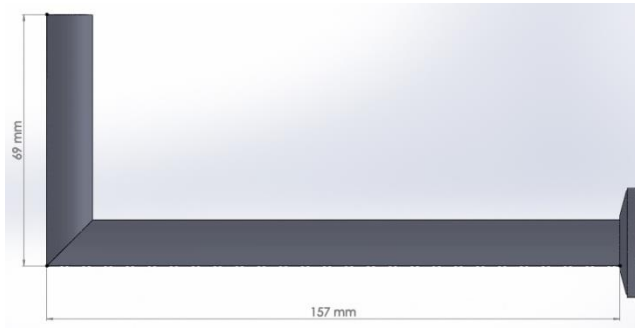


Fig. 4.2 Ensamble brida KF 16.

La brida CF 2 3/4" fue soldada a un codo con un ángulo de 90° de 73.41 mm de alto por 134.00 mm de ancho como se muestra en la figura 4.3.

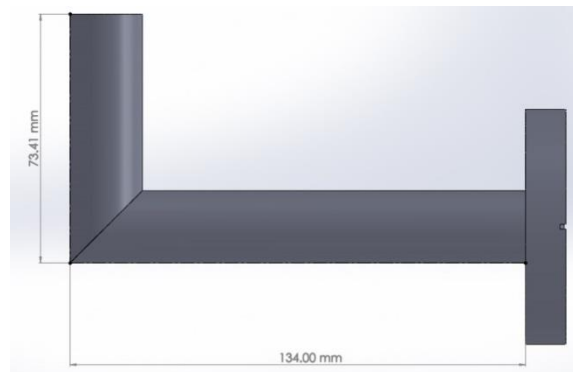


Fig. 4.3 Ensamble brida CF 2 3/4".

La brida CF 1 1/2" fue soldada a un codo con un ángulo de 90° de 73.00 mm de alto por 137.00 mm de ancho como se muestra en la figura 4.4.

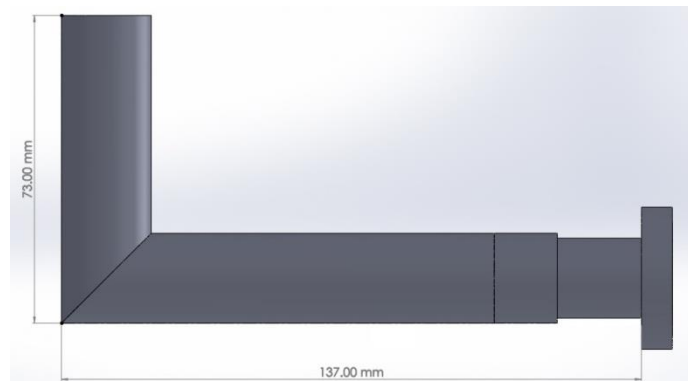


Fig. 4.4 Ensamble brida CF 1 1/2".

4.2. Ensamble de bridas con la base de la Cámara Inerte

Las bridas deben tener una distribución en la base de la Cámara Inerte que permita su fácil manipulación e instalación de instrumentos a la cámara, dicha distribución se observa en la figura 4.5. La base de la Cámara Inerte cuenta con dos bridas KF 25, dos bridas KF 16, una brida CF 2 3/4", una brida CF 1 1/3" para la instalación de equipo e instrumentos de medición y control, y tres pasa-tubbings para la inyección de gases. Todos los componentes ensamblados fueron soldados en la parte superior de la base para evitar fugas y todas las piezas soldadas a la base de la cámara inerte están separadas por un ángulo de 45°.

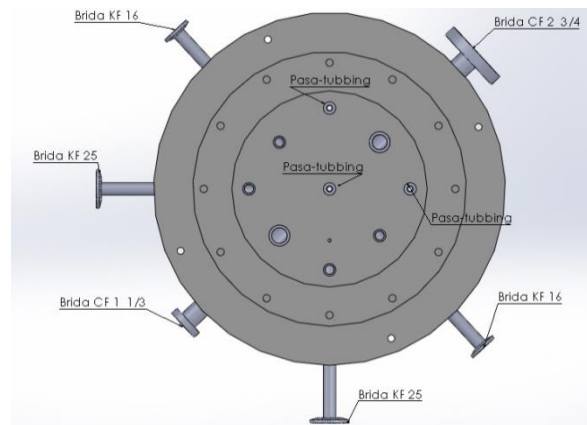


Fig. 4.5 Distribución de conexiones en la base de la Cámara Inerte.

4.2. Ensamble de apoyo de la Cámara Inerte

Se ensamblaron soportes que ayudan a que las bridas no sufran grandes esfuerzos, estos soportes se soldaron al diámetro interior del apoyo de la Cámara Inerte, ver figura 4.6. Siguiendo la misma distribución que las bridas. Se colocaron siete soportes a 45° dependiendo el tipo de conexión o brida que sostienen (Fig. 4.6). Para los dos tubbings finales se colocaron dos soportes separados a 30° (Fig. 4.7).

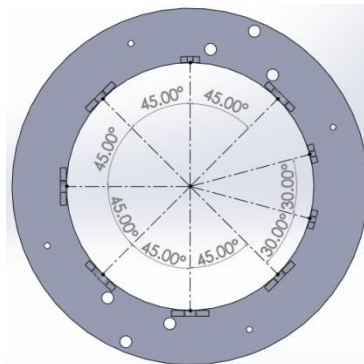


Fig. 4.6 Distribución de soportes de bridas y conexiones.

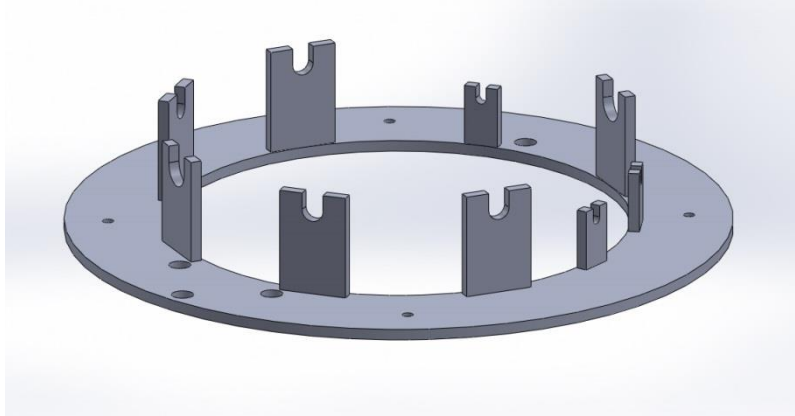


Fig. 4.7 Vista dimétrica del ensamblaje de soportes.

Al apoyo de la Cámara Inerte se deben ensamblar cuatro pernos que servirán para soportar la base de la cámara inerte, estos pernos se enroscan fácilmente en los barrenos de $\frac{1}{4}$ " de diámetro inscritos en el radio de 165.00 mm de la pieza, ver figuras 4.8 y 4.9.

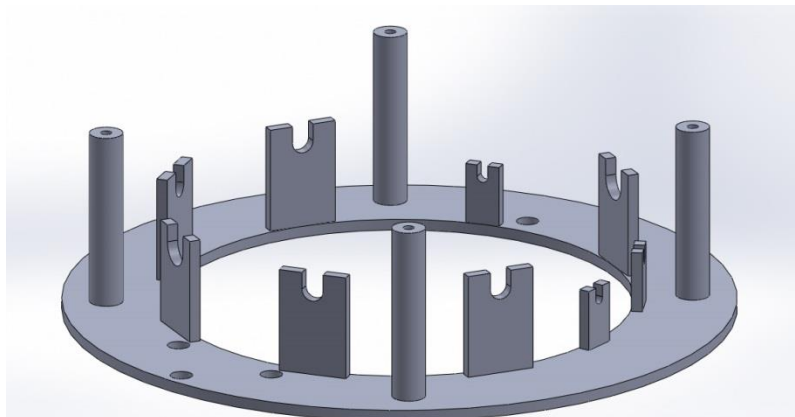


Fig. 4.8 Vista dimétrica del ensamblaje de los pernos.

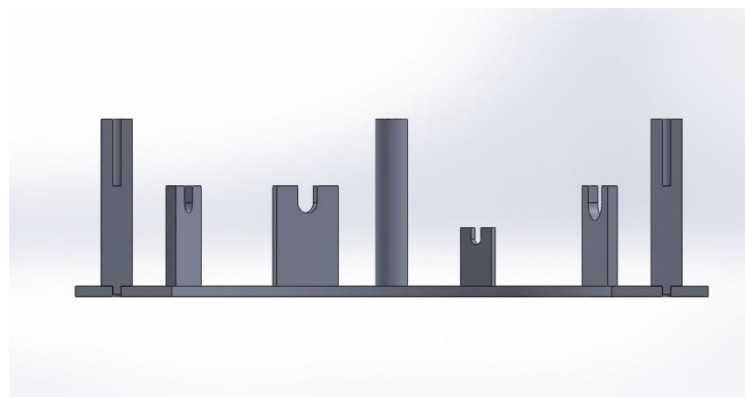


Fig. 4.9 Vista de la sección de los pernos enroscados.

4.3. Ensamble de la base con el apoyo de la Cámara Inerte

Este ensamble se lleva a cabo enroscando 4 tornillos de cabeza hexagonal de $\frac{1}{4}$ " x $1\frac{1}{3}$ " en los pernos del apoyo a través de los barrenos inscritos en el radio de 165.00 mm de la base de la Cámara Inerte, cuidando la distribución de las bridas para que coincidan con sus respectivos soportes del apoyo, ver figuras 4.10 y 4.11.

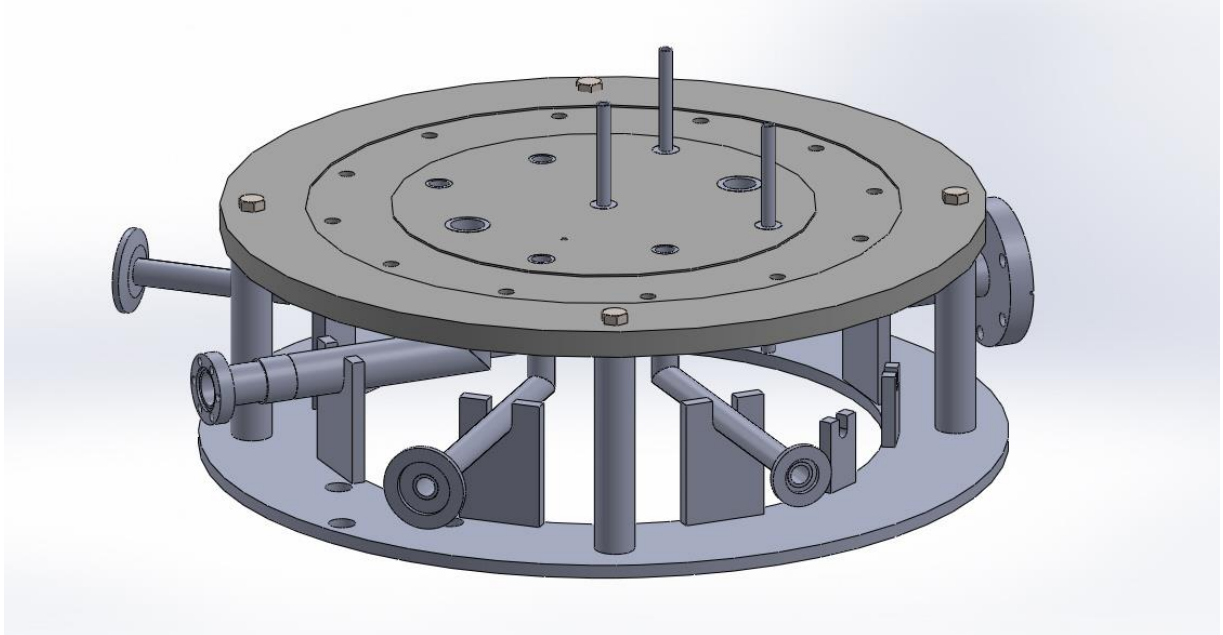


Fig. 4.10 Ensamble base con apoyo.

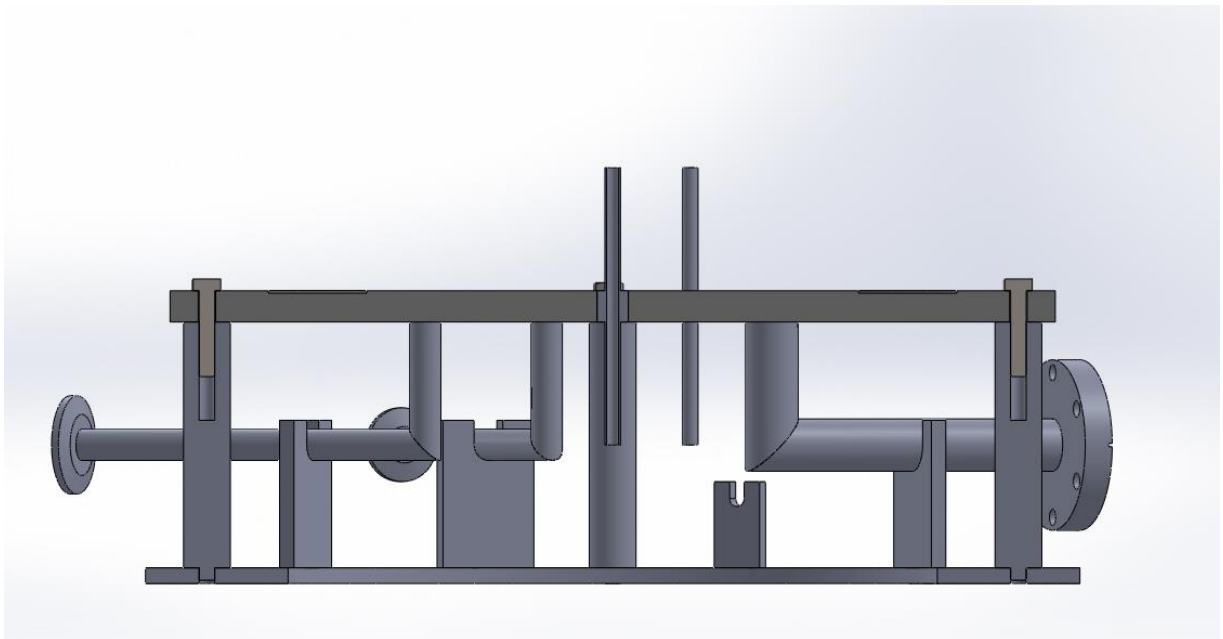


Fig. 4.11 Vista de la sección del ensamble de la base con el apoyo.

4.4. Ensamble de bridas y sellos

Se deben ensamblar a la base de la cámara las bridas y sellos que mantendrán la atmosfera deseada dentro de la cámara.

Estos elementos se ensamblan a la base de la Cámara Inerte utilizando tornillos de cabeza hueca y punta plana ANSI B18.3.5M. Estos tornillos se enroscan, como se observa en la figura 4.12, a los barrenos de $\frac{1}{4}$ " inscritos en el radio de 128.75 mm de la base.

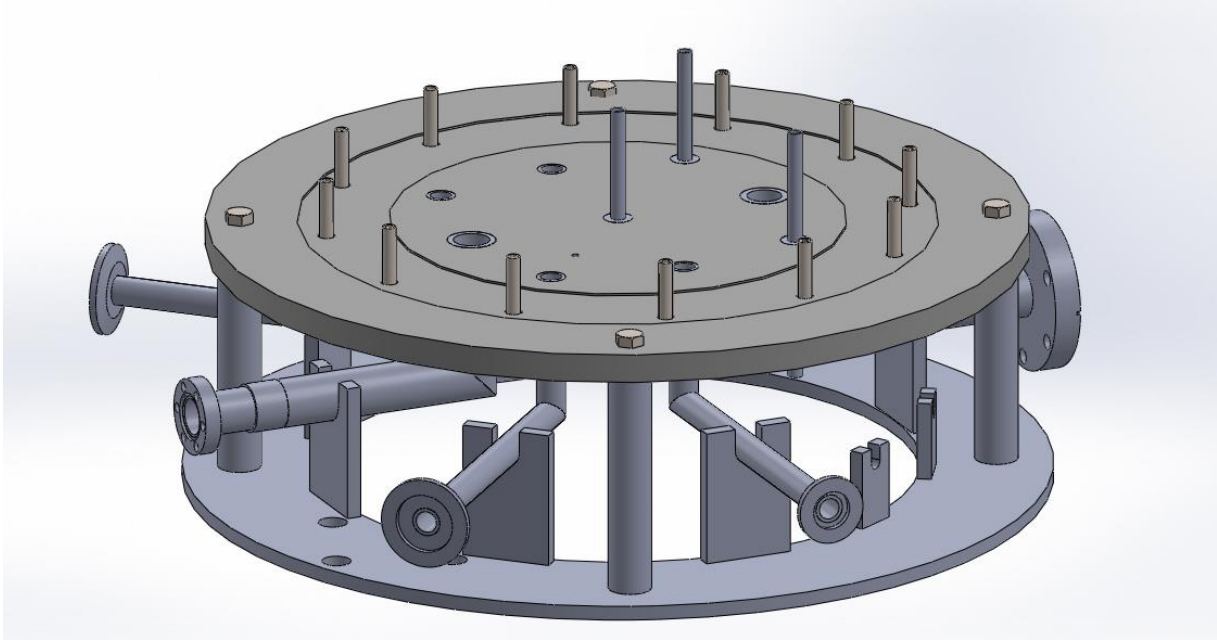


Fig.4.12 Ensamble de tornillos de cabeza hueca en la base de la Cámara Inerte.

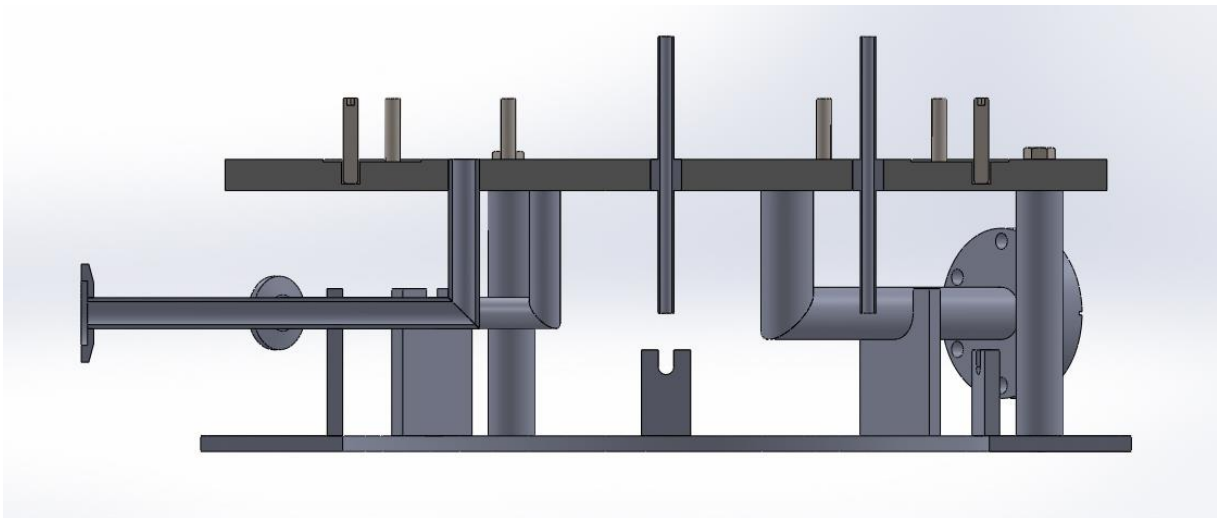


Fig. 4.13 Vista de la sección del ensamble de los tornillos de cabeza hueca.

Con los tornillos ensamblados se puede colocar el primer elemento para sellar la cámara, un empaque plano de silicón. Este empaque se coloca en el canal de la Cámara Inerte haciendo coincidir los barrenos del empaque con los tornillos de cabeza hueca (Fig. 4.13).

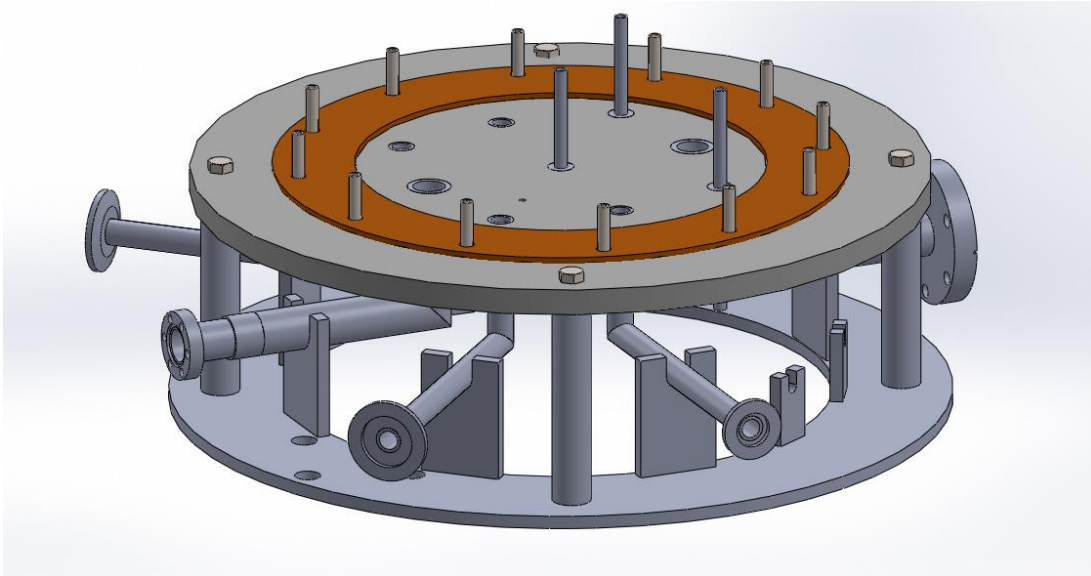


Fig. 4.14 Vista dimétrica del empaque plano colocado en la base de la Cámara Inerte.

La brida sin ranura se coloca de manera concéntrica a la base de la Cámara Inerte, haciendo coincidir los barrenos de la brida con los tornillos de cabeza hueca (Fig. 4.15).

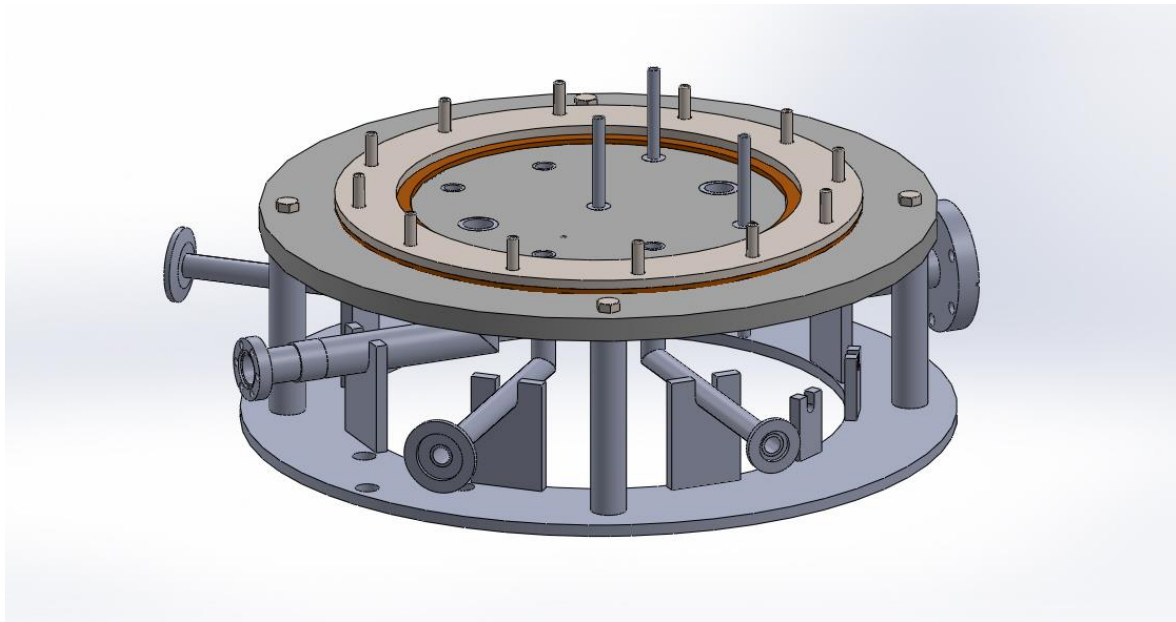


Fig. 4.15 Vista dimétrica del ensamble de la brida de aluminio.

La siguiente etapa del ensamble consiste en colocar otros elementos para sellar la brida. El primer elemento es un anillo de viton de 107.06 mm de diámetro interior y una sección transversal de $\frac{1}{2}$ " , éste se ubica sobre la brida sin ranura. El segundo elemento es la brida con ranura que se coloca de la misma manera que la brida sin ranura, la ranura de la brida debe de alojar el anillo de viton (figuras 4.16-4.18).

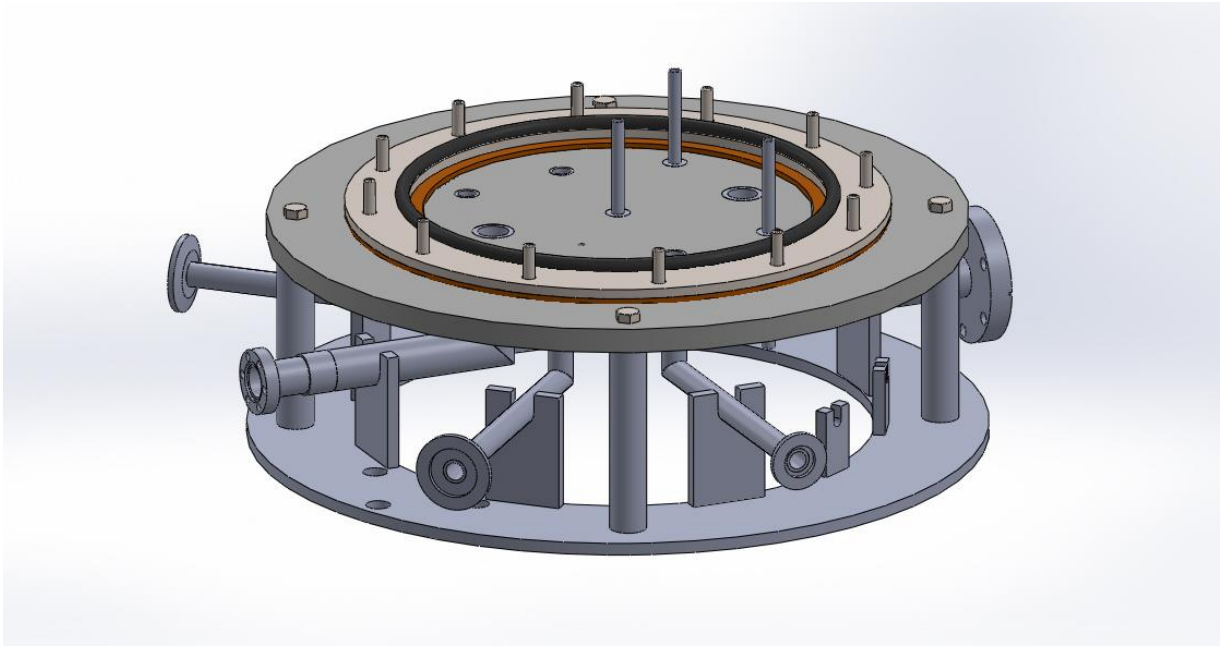


Fig. 4.16 O-ring colocado sobre la brida sin ranura.

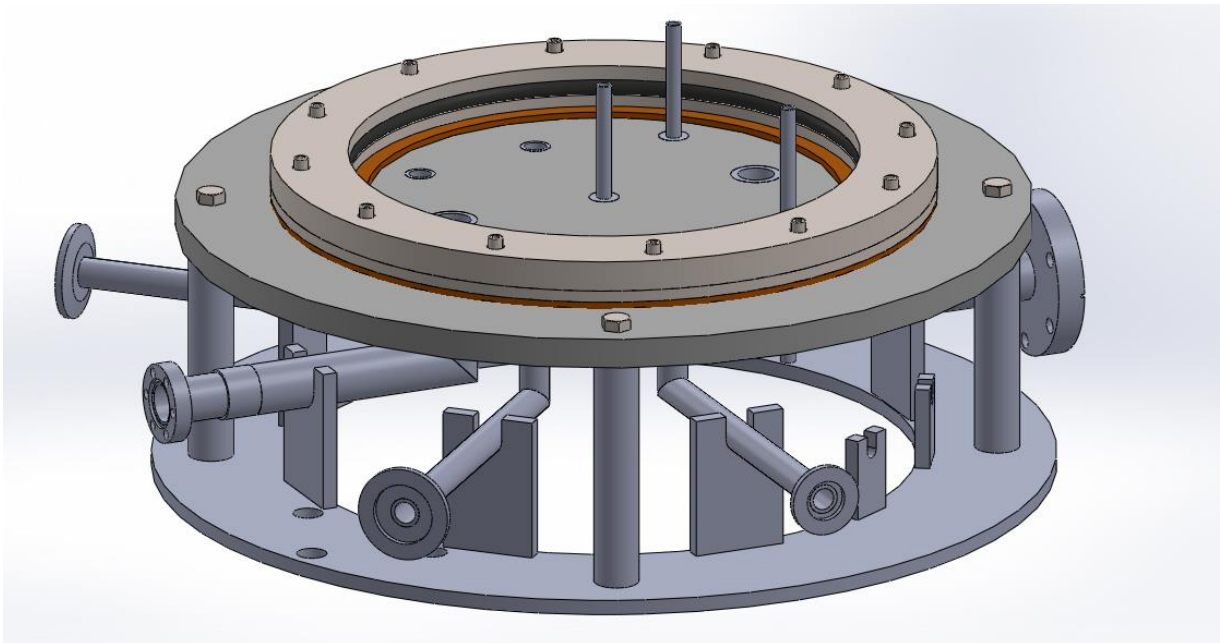


Fig. 4.17 Cámara Inerte con sellos ensamblados.

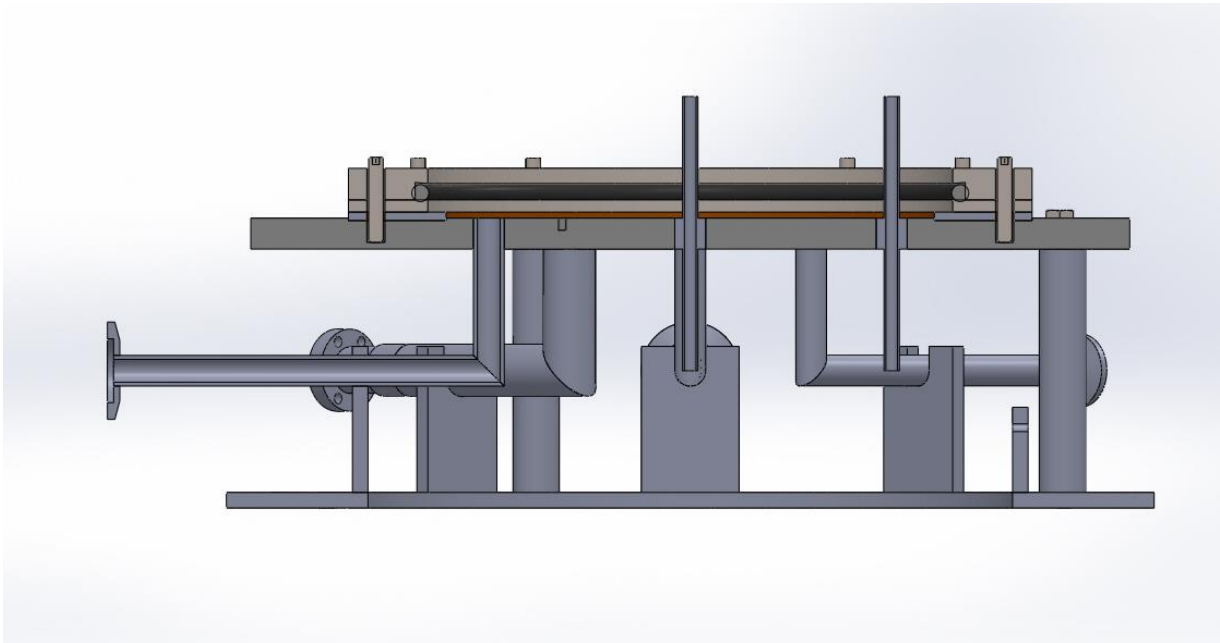


Fig. 4.18 Vista de la sección de la Cámara Inerte con sellos ensamblados.

4.5. Ensamble sistema de inyección de gases.

Las regaderas de gas se instalaron a la base por medio de conectores rectos swagelok (Fig. 4.19). Los conectores rectos se unieron a los pasa-tubbings ubicados en el diámetro de 165.00 mm de la base.

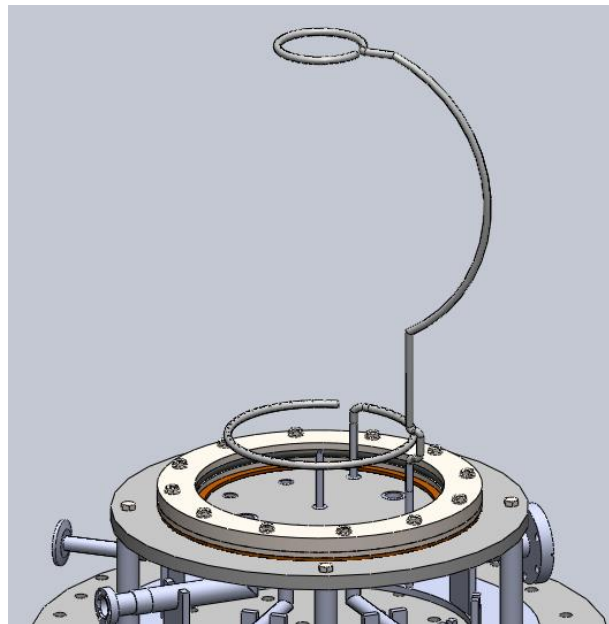


Fig. 4.19 Regaderas instaladas en la base de la cámara.

4.6. Ensamble porta muestra y receptor de productos

Se unió el ángulo que sostiene el porta muestra a la base de la Cámara Inerte enroscando un tornillo de cabeza hexagonal de $\frac{1}{8}$ " x $\frac{1}{4}$ " a través del ángulo en el barreno de $\frac{1}{8}$ " que se encuentra a 52.43 mm del centro de la base. Se alineó la cara vertical del ángulo para que sea paralela al eje horizontal de la base (Fig. 4.20).

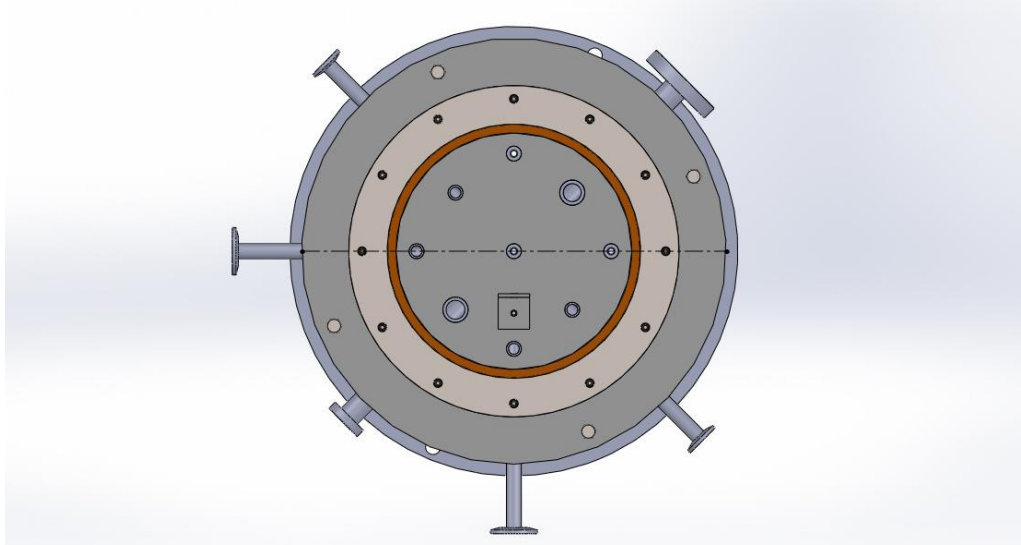


Fig. 4.20 Alineación del ángulo del porta muestra.

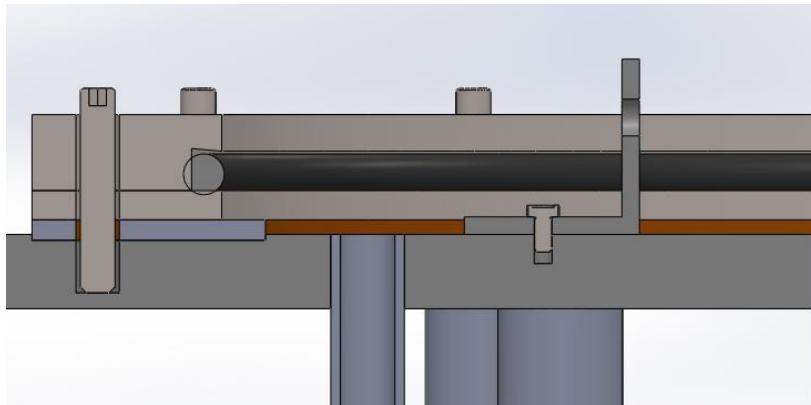


Fig. 4.21 Vista de la sección de la unión del ángulo del porta muestra.

El porta muestras se unió al ángulo por medio de un tornillo de cabeza hexagonal de $\frac{1}{4}$ " x $\frac{1}{8}$ " (Fig. 4.21). El porta muestra debe tener la misma alineación que el ángulo para asegurar que la muestra sea paralela a la zona focal del concentrador (Fig. 4.22).

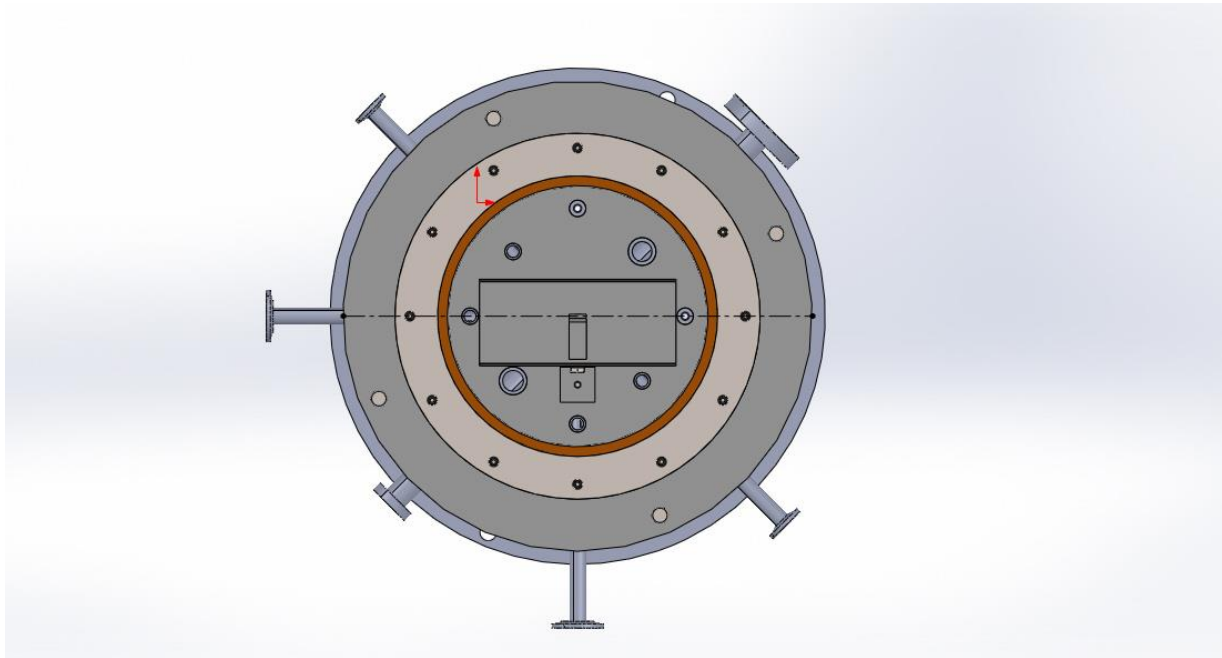


Fig. 4.22 Alineación de porta muestra.

Como se muestra en la figura 4.23 en la horquilla se fija previamente la muestra por medio de tornillos para colocarse sobre el porta muestra, la altura de la horquilla se ajusta para que el centro de la muestra se encuentre en la zona focal del concentrador (Fig. 4.24).

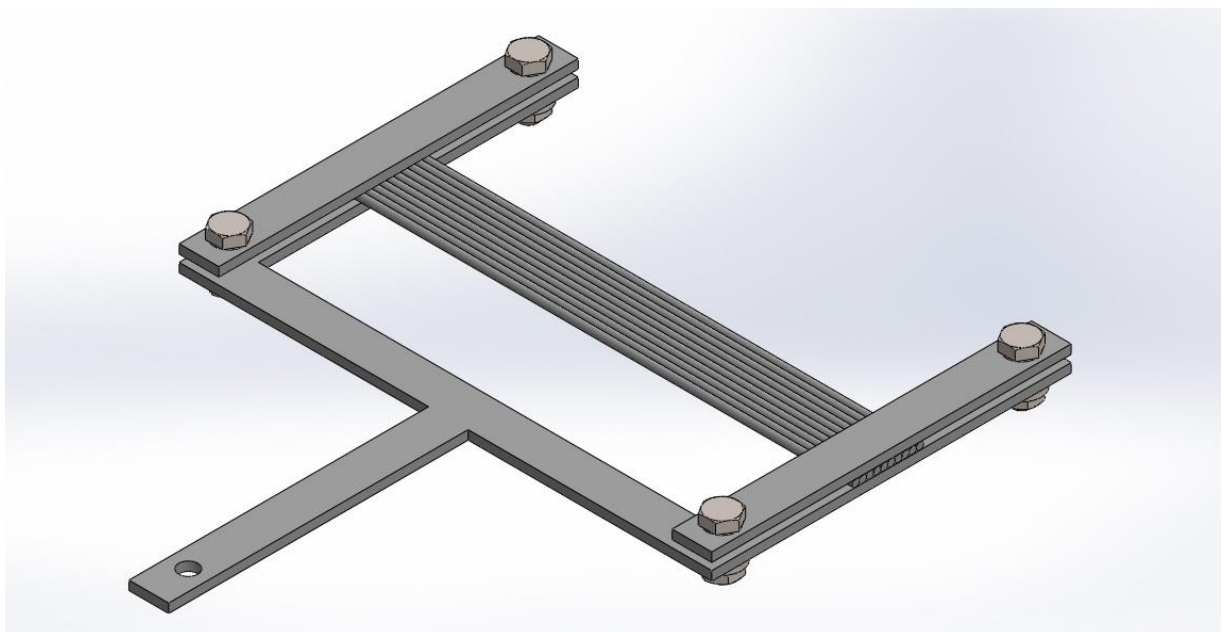


Fig. 4.23 Horquilla con muestras.

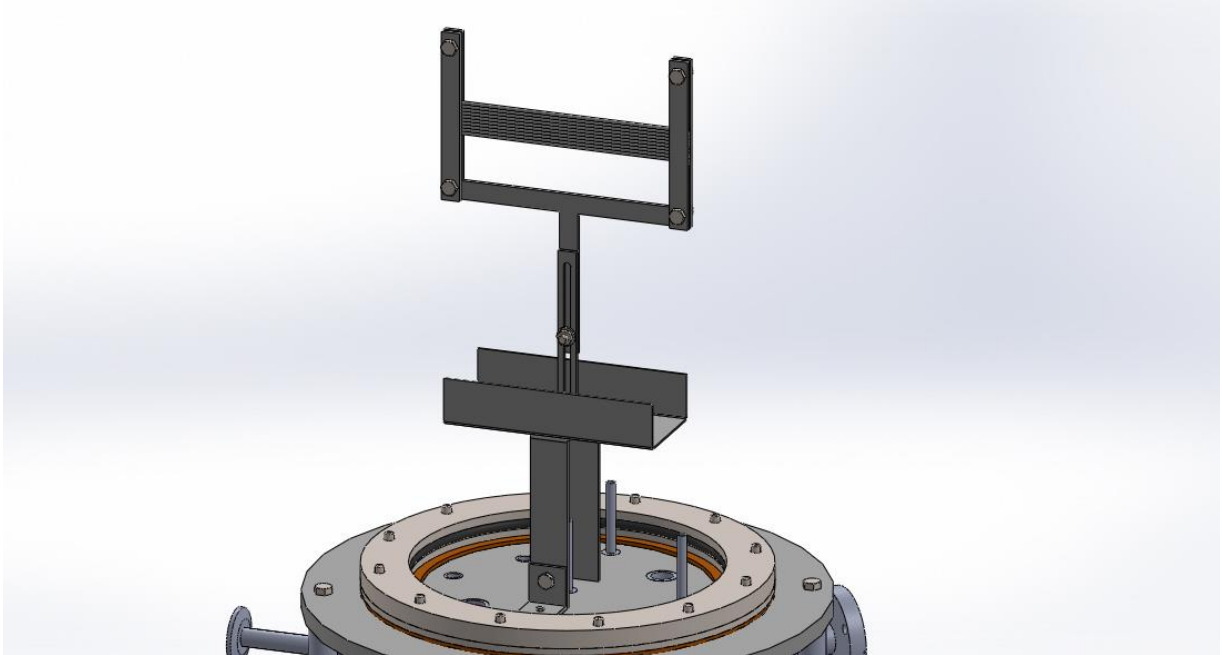


Fig. 4.24 Porta muestra con horquilla.

4.6. Ensamble de la esfera de la Cámara Inerte

Al tener todos los componentes del interior de la cámara ensamblados se coloca la esfera. La esfera se coloca de manera concéntrica a la base sobre el empaque plano de silicón (Fig. 4.25).

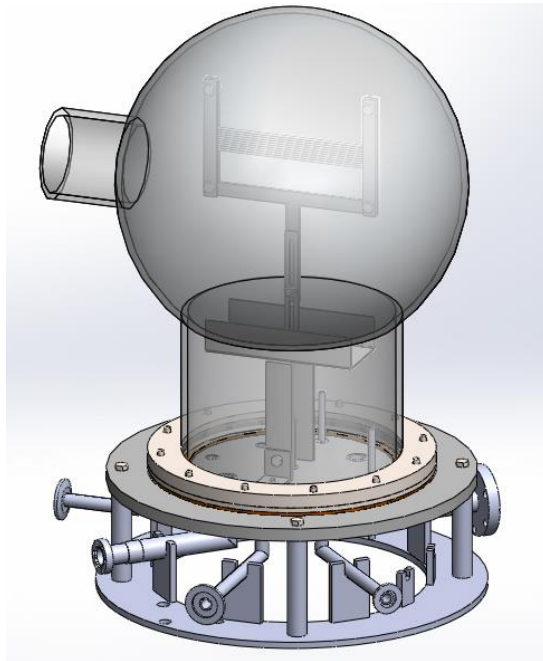


Fig. 4.25 Ensamble de la base de la Cámara Inerte con la esfera.

Cuando la esfera es colocada, se aprietan las bridas utilizando tuercas que se enroscan en los tornillos de cabeza hueca, al apretar las bridas estas deforman el anillo de viton que sellará el espacio entre la pared de la esfera y las bridas. El empaque, al ser deformado, cubrirá las imperfecciones de la cara sobre la cual se apoya la esfera sellándola (Fig. 4.26).

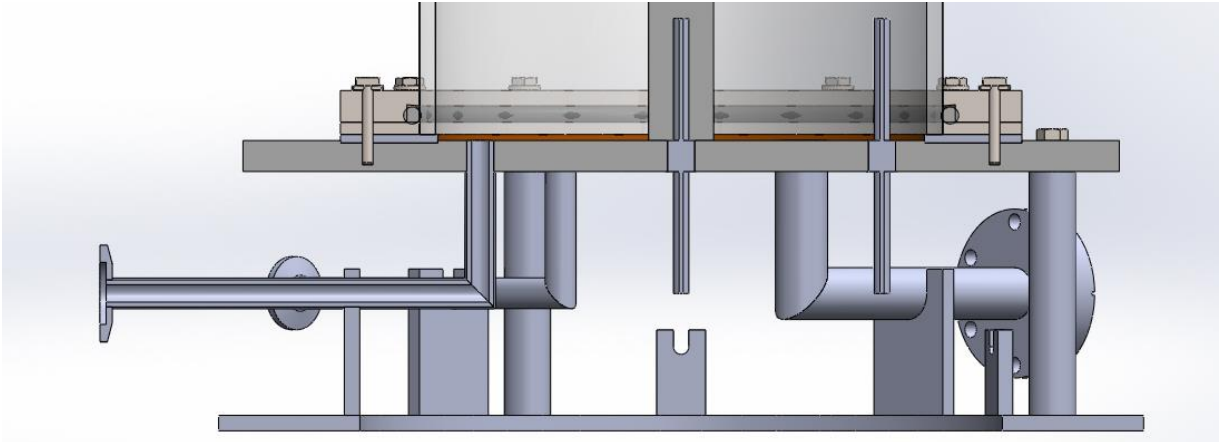


Fig. 4.26 Vista de la sección del ensamble de la base con la esfera.

4.7. Ensamble de la brida ciega de la boquilla

Como se observa en la figura 4.27 se colocó la brida con ranura para anillo tórico de manera concéntrica a la boquilla de la esfera, con la ranura opuesta al centro de la esfera. El anillo de viton se ubicó en la ranura de la brida para sellar el espacio entre las bridas y la esfera.

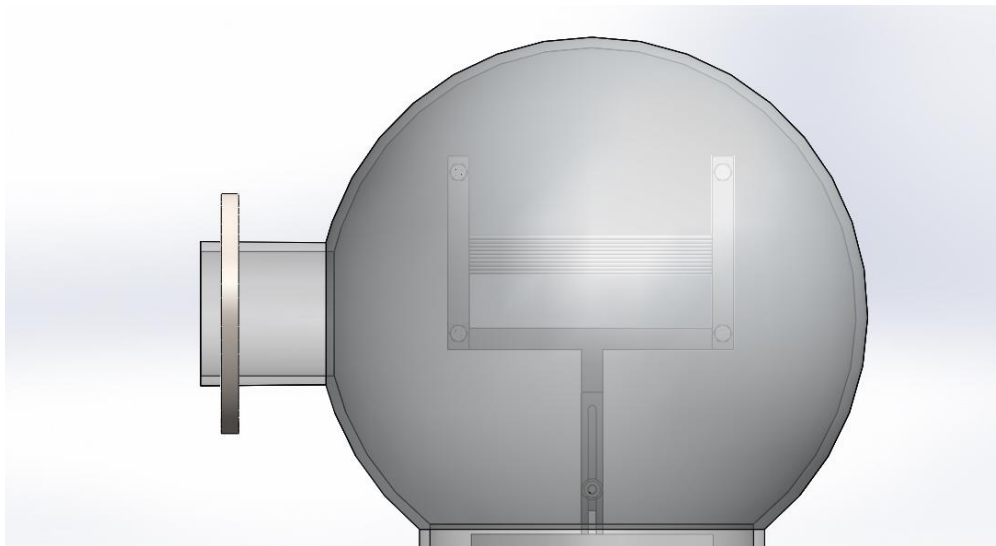


Fig. 4.27 Brida con ranura colocada en la boquilla de la esfera.

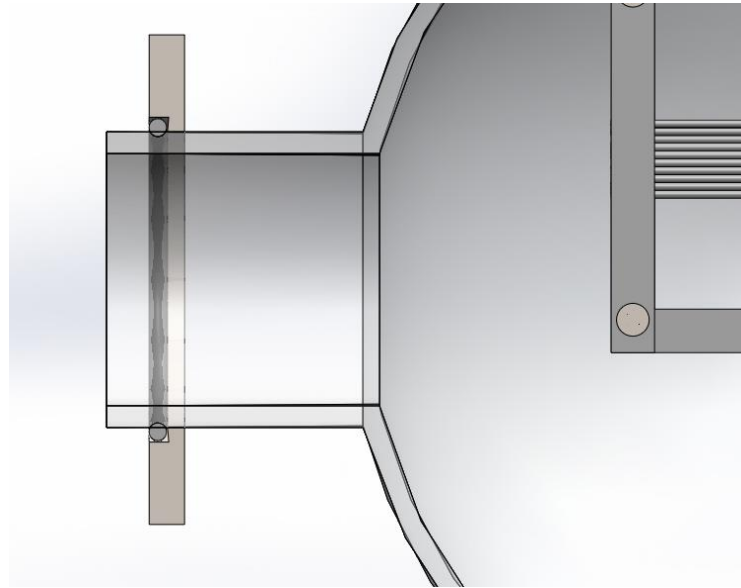


Fig. 4.28 Vista de la sección del anillo de viton colocado en la ranura de la brida.

Como se observa en la figura 4.28 la brida sin ranura se colocó después del anillo de viton de manera concéntrica a la boquilla, haciendo coincidir una de sus caras con la de la brida con ranura (Fig. 4.29). El empaque plano de silicón se ubicó de manera que una de sus caras sea coincidente con la cara plana de la boquilla para sellarla. Para finalizar, el sello se coloca en la brida ciega sobre el empaque plano, la brida ciega se sujeta por medio de tornillos hexagonales de cabeza hueca a la brida sin ranura y a la brida con ranura (Fig. 4.30).

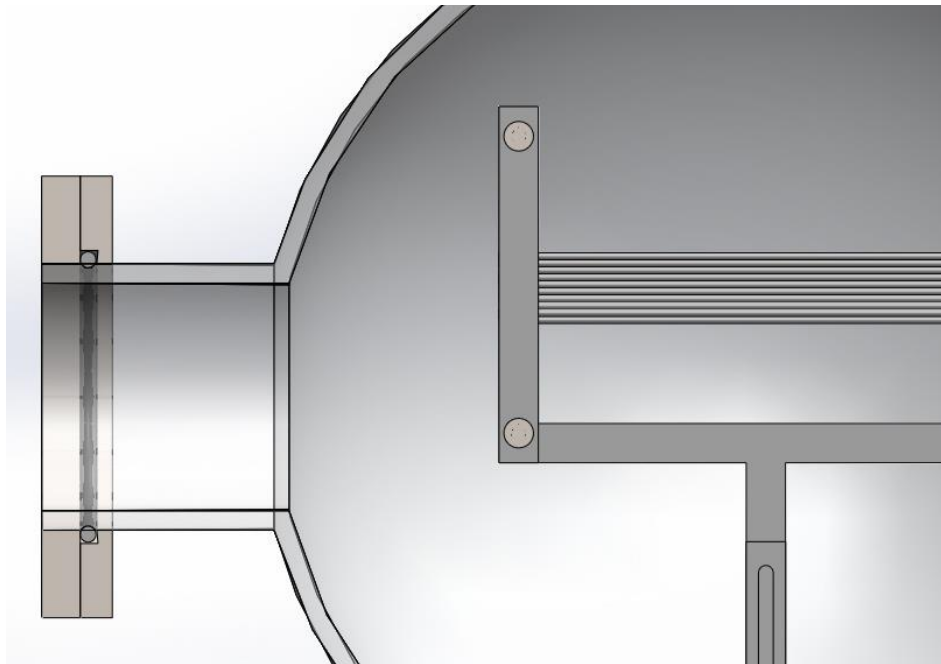


Fig. 4.29 Vista de la sección de la boquilla con la segunda brida.

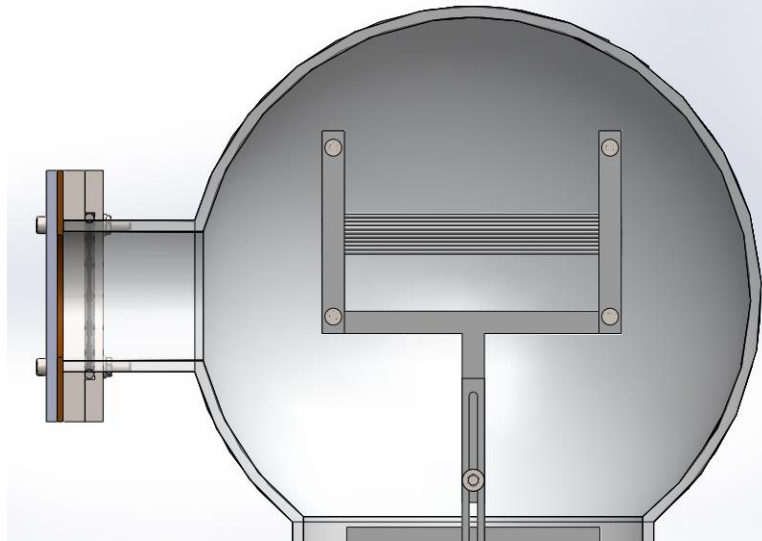


Fig. 4.30 Vista de la sección de la boquilla completamente sellada.

De esta manera se concluyó el ensamble de la Cámara Inerte (Fig. 4.31), teniendo como resultado un sistema completamente aislado que está listo para su instalación de trabajo en la mesa de trabajo del HoSIER.

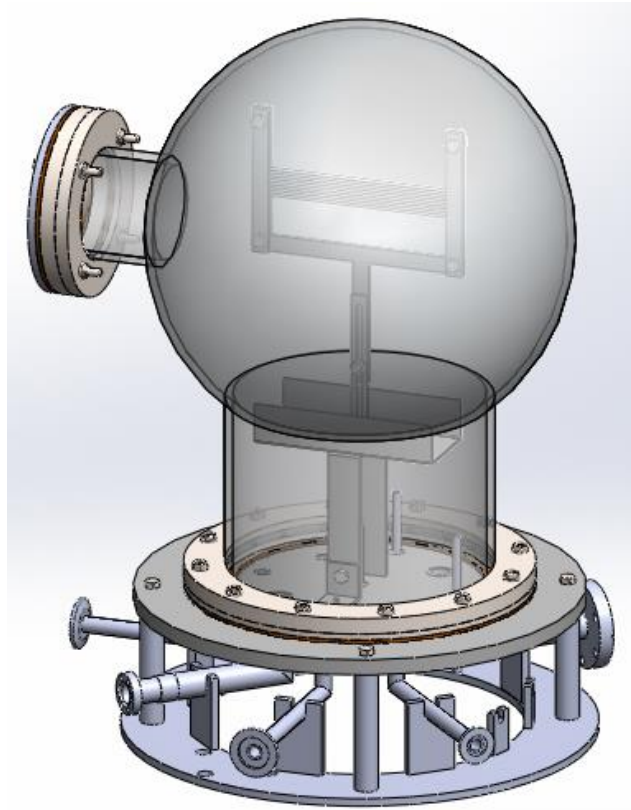


Fig. 4.31 Cámara Inerte completamente ensamblada.

Capítulo 5

Instalación de la Cámara Inerte en el HoSIER

5.1. Mesa de perfiles modulares de aluminio

Para ubicar el centro de la esfera en la zona focal del concentrador del HoSIER se diseñó y construyó una mesa en la que se montó la cámara (Fig. 5.1), la mesa tiene la función de soportar instrumentos, asegurar la Cámara Inerte a la mesa de trabajo y brindar seguridad al equipo y personal que opera en el HoSIER.

Para la construcción de la mesa se eligieron perfiles modulares de aluminio que permiten una gran flexibilidad en el diseño, la mesa tiene una altura de 250.00 mm, en la base cuenta con dos perfiles ubicados de manera horizontal de los cuales se puede sujetar por medio de ángulos a la base circular de la mesa de trabajo del HoSIER.



Fig. 5.1 Mesa de perfiles modulares de aluminio.

5.2. Instalación en la mesa de trabajo del HoSIER

Para ubicar la cámara en el eje focal se utilizaron guías por medio de tres láser que se ubican en diferentes puntos del cuarto del HoSIER.

Conociendo las características del concentrador que se expusieron en el capítulo 1, sabemos que la zona focal se encuentra a 3.68 metros del espejo central del concentrador. Para ubicar correctamente la muestra en la zona focal en el eje x de la mesa, se debe medir la distancia entre el centro de la esfera y el espejo central del concentrador. Para realizar esta medición se utilizó un medidor láser que asegura tener una medición precisa, al tener la muestra a 3.68m del espejo central esta se encuentra en la zona focal del concentrador en el eje x.

Para ubicar la cámara en la zona focal en el eje y, se utilizó un láser que se encuentra en el techo del cuarto del HoSIER, este láser fue ubicado previamente en el techo, sobre el eje y de la zona focal. Utilizando este láser se alineó el centro de la cámara en el eje y de la zona focal.

Como se observa en la figura 5.2, la altura se utiliza un láser paralelo al techo del cuarto del HoSIER, alineando el centro de la muestra con este láser se colocó la muestra en la zona focal en el eje z.



Fig. 5.2 Alineación de la Cámara Inerte.

5.3. Instalación de inyección de gases

Para trabajar bajo diferentes condiciones es necesario contar con una instalación adecuada de inyección de gases, ésta instalación debe permitir trabajar con vacío.

Las tuberías de gases de la Cámara Inerte son de tubing de acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ ", para realizar conexiones a estas tuberías es necesario utilizar racores especiales para evitar fugas.

Para instalar el tubing y las válvulas se utilizaron conectores rectos, codos y T's (Fig. 5.3). Los racores utilizados deben de ser especiales para aplicaciones de vacío, estos racores son especialmente diseñados para evitar fugas, además de que están normalizados para adaptar cualquier tipo de instrumento o válvula a la tubería.



Fig. 5.3 Racores swagelok para vacío.

En la tubería se instalaron racores swagelok que cuentan con un sistema de sellado que consiste en estrangular el extremo de la tubería en la cual se va a conectar por medio de una férula como se observa en la figura 5.4.



Fig. 5.4 Tubing deformado por una férula swagelok.

Para regular la inyección de gases se instalaron válvulas de paso, válvulas check y válvulas de regulación.

La válvula check (Fig. 5.5) deja fluir gas en un solo sentido, cuando se alcanza una presión de $\frac{1}{3}$ de psi en la entrada de la válvula, esta deja fluir el gas automáticamente. Cuando existe una presión mayor en la salida de la válvula, ésta impide el paso del gas por medio de un muelle evitando que el gas fluya. La función de esta válvula es evitar que una mezcla de gas fluya por una tubería en la que se encuentre conectada únicamente un tipo de gas, de esta manera se evita tener una atmosfera contaminada cuando una prueba requiera la inyección de un solo gas. La válvula está hecha de acero inoxidable y cuenta con una junta de elastómero que sirve para crear el sello al ser presionada por el muelle (Swagelok, 2013a).



Fig. 5.5 Válvula antirretorno.

La válvula de paso instalada (Fig. 5.6) es una válvula de palanca swagelok de acero inoxidable de ¼". Al levantar la palanca de la válvula, el pistón que mantiene sellada la salida de gas se eleva, dejando fluir el gas, al bajar la palanca el pistón vuelve a su posición inicial impidiendo el paso del gas, esta válvula puede trabajar hasta una presión de 20 Bar (Swagelok, 2013b).

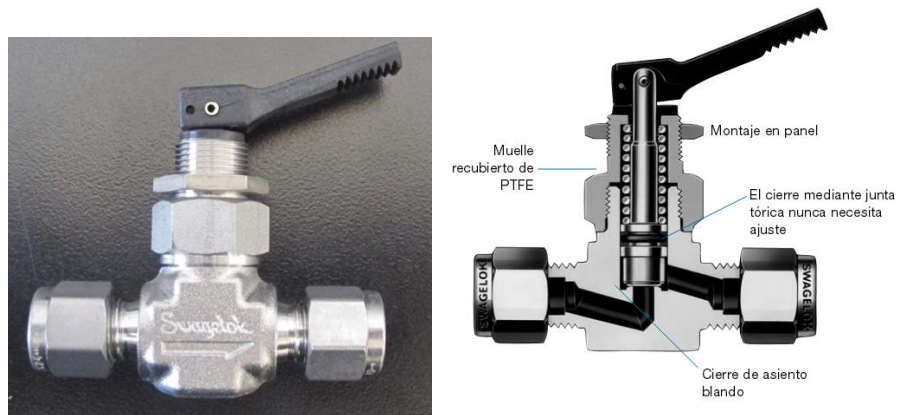


Fig. 5.6 Válvula de paso.

La válvula de regulación (Fig. 5.7) es una válvula de acero inoxidable, puede trabajar con presiones de hasta 68.9 bar, funcionan por medio de un vástago con forma de aguja que se desplaza por una cavidad cónica, de esta manera al avanzar o retroceder aumenta o disminuye el flujo de gas (Swagelok, 2013c).

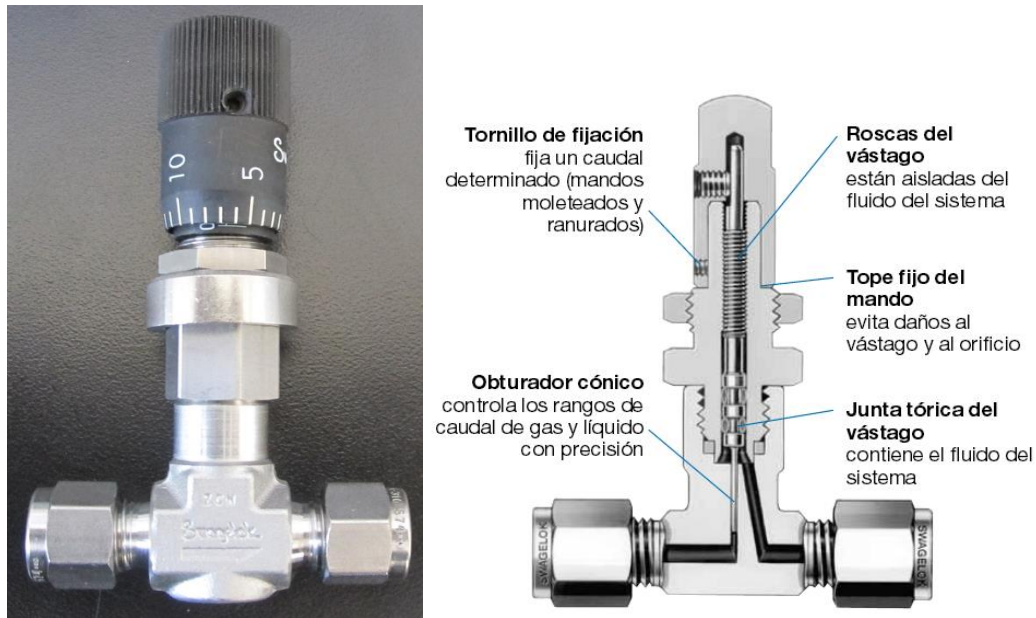


Fig. 5.7 Válvula de regulación.

El flujo se regula por medio de un mando micrométrico con precisión de .04 en el cual se regula el flujo de gas en función del número de vueltas que se da al mando, el coeficiente de caudal máximo de la válvula es de .03 (Fig. 5.8), el coeficiente de caudal C_v es el flujo volumétrico en galones americanos por minuto de agua a una temperatura de 60°F con una caída de presión a través de la válvula de 1 psi. Conociendo el coeficiente de caudal máximo se puede conocer el flujo volumétrico de gas que pasa por la válvula en función de la presión de trabajo por medio de la ecuación 31.

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{S_g}} \quad (31)$$

Dónde:

Q = caudal

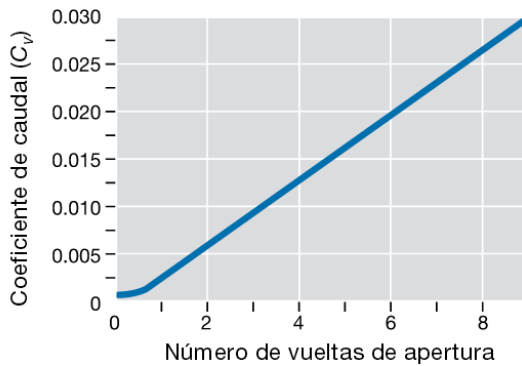
C_v = coeficiente de caudal

ΔP = diferencia de presión a la atmosfera

S_g = gravedad específica del fluido de trabajo

La ecuación 31 es específica en cuando a unidades, con Δp en psi y Q en gal/min. Tanto C_v y S_g son adimensionales.

Coefficiente de caudal según vueltas de apertura



Caudal máximo—Cv 0,03

Diferencial de presión a la atmósfera bar (psi)	Aire l/min estándar (pies ³ /min)	Agua l/min (gal EE.UU./min)
0,68 (10)	9,3 (0,33)	0,34 (0,09)
3,4 (50)	25,4 (0,90)	0,79 (0,21)
6,8 (100)	42,4 (1,5)	1,1 (0,30)

Fig. 5.8 Relaciones de Coeficiente de caudal.

En el diagrama de la figura 5.9 se muestra la instalación realizada en el HoSIER, para cada tubería de gas se instaló al principio una válvula de paso para controlar la apertura y cierre, después se conectó una válvula “check” para que el gas fluya en un solo sentido, el flujo proveniente de esta válvula debe ser regulado por lo que se instaló después una válvula de aguja, al regular el flujo el gas está listo para ser inyectado. Después de la válvula de aguja se instaló otra válvula de paso para dejar pasar el flujo de gas deseado. Antes de la Cámara Inerte se encuentra una última válvula de paso que controla el flujo de todos los gases hacia la cámara.

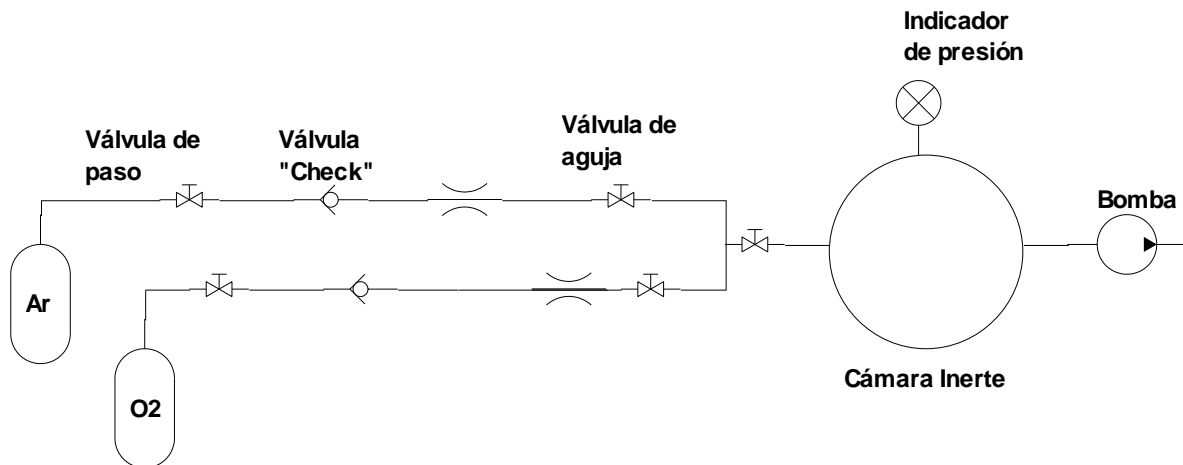


Fig. 5.9 Diagrama de la instalación de gases.

5.4. Caracterización de la Cámara Inerte

La cámara puede ser utilizada para realizar diferentes pruebas experimentales. Para realizar estas pruebas se necesita monitorear la presión y temperatura, por lo que se conectaron diferentes instrumentos de medición a la cámara.

Para la medición y control de la presión se necesitan dos instrumentos, un sensor medirá el vacío que se ha generado dentro de la cámara para poder tener una atmosfera controlada y el segundo sensor medirá la presión dentro de la cámara al inyectar el gas, para conocer el nivel de concentración del gas inyectado.

Para el control de la presión se utilizaron dos instrumentos ya que es necesario trabajar bajo dos diferentes rangos de presión y se necesita un instrumento confiable para cada rango.

Cuando se genera vacío dentro de la cámara se monitorea la presión por medio de un medidor Pirani MKS 345 (Fig. 5.10), el sensor está diseñado para trabajar en sistemas de medio vacío teniendo una medición rápida y estable, se instala fácilmente ya que está diseñado para acoplarse por medio de una brida KF 16. El rango de medición del Pirani es de 1.0×10^{-4} hasta 100 torr y tiene una señal de salida de 0.20 hasta 3.25 VDC por medio de un puerto RS-232 de 9 pines (MKS, 2013).



Fig. 5.10 Medidor Pirani.

La presión medida por el pirani puede monitorearse por medio de un transductor digital de la medición o en la computadora de control del horno por medio del sistema de adquisición de datos.

Cuando se inyectan gases a la cámara se monitorea la presión por medio de un manómetro Cole-Parmer (Fig. 5.11), este sensor se instala por medio de un adaptador de rosca macho NPT de $\frac{1}{4}$ " a una brida KF 25 o KF 16, este instrumento tiene un rango de medición de -14.7 a 100 psi y una señal de salida de 4.0 a 20.0 mA (Cole-Parmer, 2013).

Al inyectar el gas se observa como la lectura de presión del Pirani va aumentando hasta salir del rango de lectura, cuando el Pirani sale del rango, se debe de monitorear la presión a través del sensor Cole-Parmer, si se quiere trabajar por debajo de la presión atmosférica, la lectura del sensor Cole-Parmer no debe de superar 0 psig, ya que es un manómetro, conociendo los cambios en la presión se puede conocer la concentración de los gases dentro de la cámara.



Fig. 5.11 Sensor Cole-Parmer.

Para medir la temperatura se eligieron termopares tipo K, ya que este tipo de termopares está especialmente diseñado para ser utilizado en ambientes oxidantes, además de que tiene un rango de temperatura suficientemente amplio (0 a 1100 °C).

Se colocaron 4 termopares a través del pasamuros eléctrico para medir temperatura en las muestras que se encuentren interior de la cámara (Fig. 5.12).

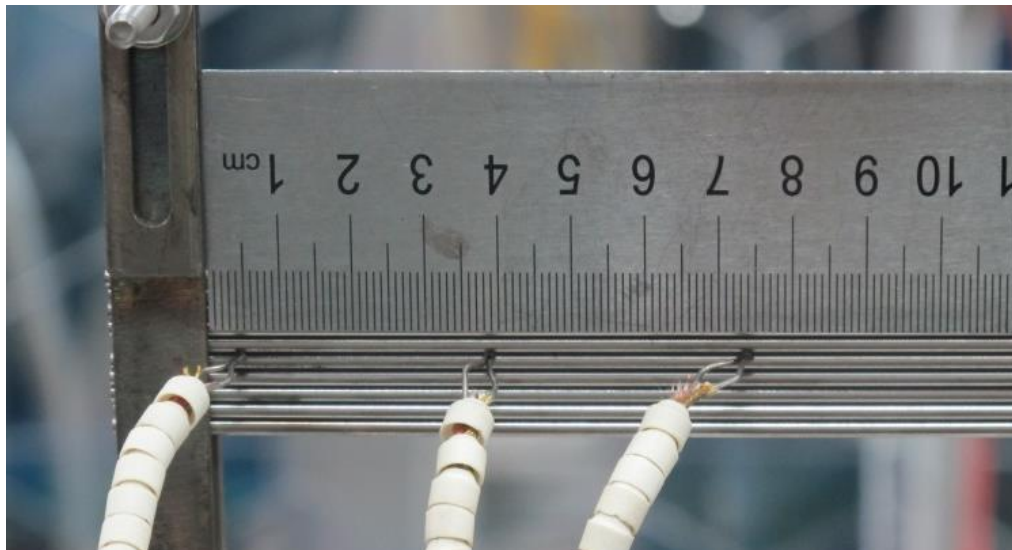


Fig. 5.12 Termopares colocados sobre una muestra de tungsteno.

Se colocaron otros 4 termopares tipo K para monitorear la temperatura de la pared de la esfera (Fig. 5.13). Es crítico monitorear esta temperatura, ya que si llega a superar 500°C la esfera podría fracturarse, dado que esta es su temperatura máxima de trabajo.

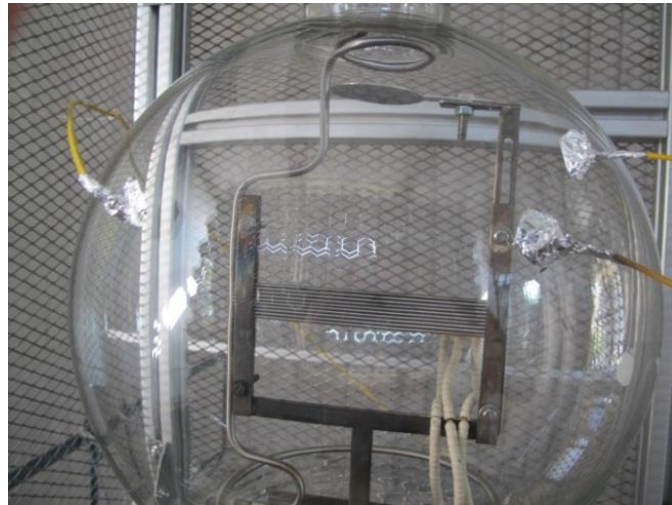


Fig. 5.13 Termopares en la pared exterior de la esfera de la Cámara Inerte.

5.5. Sistema de adquisición de datos

Para la realización de los experimentos se debe tener control y monitoreo de las condiciones de la cámara, por eso se eligió un sistema de adquisición de datos en tiempo real.

Para la adquisición de datos se utiliza un sistema CompactRIO (Fig. 5.14) de adquisición de entradas y salidas en el cual se pueden instalar diferentes módulos de acuerdo a las señales que manden los instrumentos de medición.

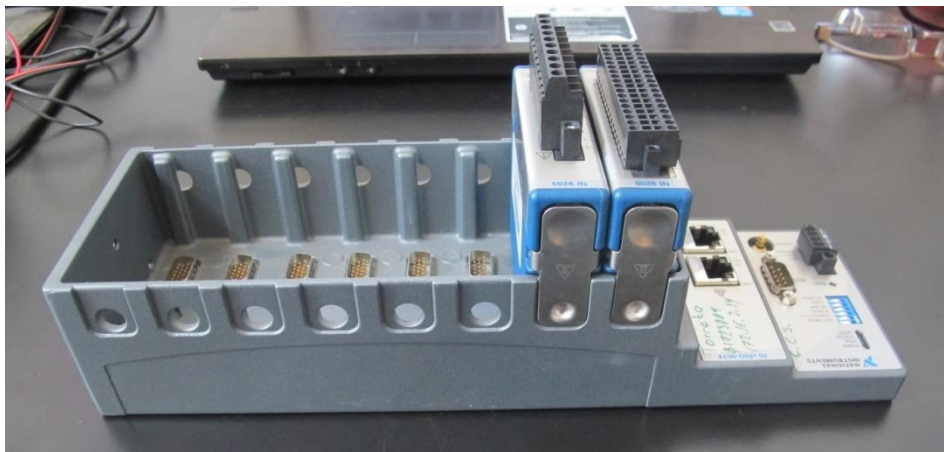


Fig.5.14 Chasis CompactRIO con 8 espacios para módulos de señales.

Este sistema permite una gran flexibilidad además de un fácil control del monitoreo de las variables. Las señales de los instrumentos son recibidas en módulos intercambiables como el de la figura 5.15. De acuerdo al tipo de señal que genere el instrumento, existen módulos en diferentes rangos para señales de corriente, de voltaje, o señales digitales.



Fig. 5.15 Módulo 9205 para señales de voltaje.

Tabla 5.1 Conexión de instrumentos en chasis del CompactRIO.

Instrumento	Modulo	Señal
Pirani	9205	mVolts
Cole-Parmer	9203	mA
Termopares	9211	mVolts

Para monitorear las variables se desarrolló un instrumento virtual a partir del software LabView 2009, este software es en un lenguaje de programación gráfico, la programación de los instrumentos visuales se realiza de una manera gráfica ya que todas las estructuras de control cuentan con iconos a los cuales se les asigna los parámetros con los cuales serán ejecutados.

Por medio de los módulos, las señales de los instrumentos se transmiten al software desarrollado, el software procesa éstas señales para tener información clara de las variables involucradas en las pruebas.

5.6. Software de monitoreo y control


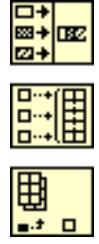
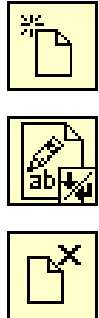
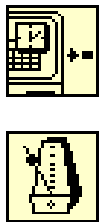

Para el monitoreo y control del experimento de producción de óxidos de tungsteno se programó un software en el cual se muestra de manera clara la medición de los instrumentos instalados.

El diagrama de bloques del instrumento virtual empieza con la creación de un archivo en una ruta especificada, sobre este archivo se escribirán los valores asignados a los a las variables. En la tabla 5.2 se explica brevemente la función de los operadores más importantes utilizados en el diagrama de bloques del instrumento virtual.

Los valores de las variables son leídos dentro de un ciclo while que se ejecuta cada 100 ms, se tendrán 10 lecturas cada segundo hasta que el instrumento virtual sea cerrado (fig.5.16).

Tabla 5.2 Tipos de datos y operadores utilizados en el diagrama de bloques.

<p>Tipos de Datos:</p> <p>Cada tipo de dato está identificado por un color. Los datos utilizados en el diagrama de bloques son los siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Enteros. 2. Dobles. 3. Booleanos. 4. Cadenas de texto. 5. Ruta. 6. Arreglos (los arreglos son del color del tipo de datos, el cableado tiene un mayor espesor). 7. Señal. 8. Error (define la secuencia del flujo de información). 	
<p>While loop (ciclo while):</p> <p>El subdiagrama inscrito dentro de esta estructura se ejecutará hasta que se cumpla una condición lógica definida.</p>	
<p>Flat sequence (Secuencia plana):</p> <p>Los diagramas dentro de esta estructura se ejecutan en una secuencia, sirve para asegurar que el siguiente diagrama se ejecute hasta que se hayan ejecutado todas las instrucciones del recuadro anterior.</p>	
<p>Variables compartidas:</p> <p>Cada variable representa un módulo instalado en el CompactRIO, estas variables contienen un arreglo compuesto por todos los canales del módulo, para obtener el valor de un canal se debe descomponer el arreglo especificando el índice del canal.</p>	

<p>Operadores matemáticos y lógicos:</p> <p>Los operadores matemáticos realizan operaciones aritméticas con dos números generando un resultado numérico.</p> <p>Los operadores lógicos evalúan dos números generando un resultado booleano.</p>	
<p>Operadores de arreglos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Concatena datos de tipo string. 2. Crea arreglos de datos numéricos. 3. Devuelve el valor especificado de un arreglo. 	
<p>Operadores File I/O (Archivos entradas/salidas):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Crea y abre un archivo en la ruta especificada. 2. Escribe sobre el archivo de una ruta especificada. 3. Cierra el archivo de una ruta especificada. 	
<p>Operadores de sincronización:</p> <p>Estos operadores registran tiempo durante la ejecución del instrumento virtual.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Devuelve la hora actual. 2. Espera hasta el múltiplo de milisegundo especificado para que se pueda ejecutar el diagrama o subdiagrama en que se encuentra. 	
<p>SubVI de conversión de datos:</p> <p>Convierte un arreglo de datos de tipo Double a una cadena de texto (string).</p>	

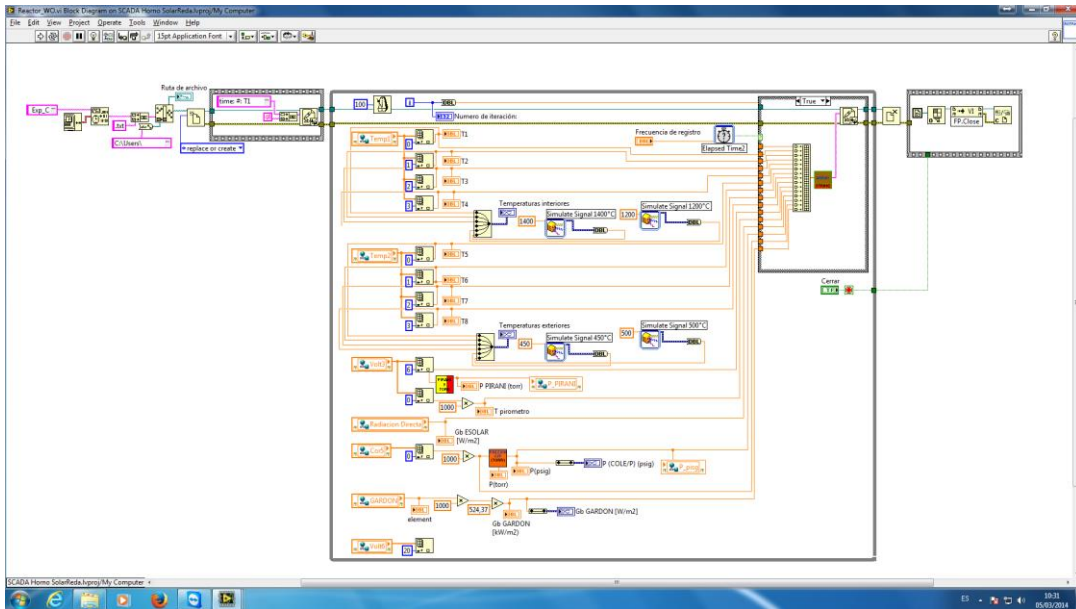


Fig. 5.16 Diagrama de bloques del instrumento virtual de monitoreo y control.

Las lecturas de las variables son de un tipo de dato flotante, para escribirlas en el archivo creado se deben convertir a un tipo de dato de texto. Los datos son convertidos en un subVI (sub Virtual Instrument), para convertir los datos se utiliza una estructura case en la cual se hace un arreglo con las lecturas de las variables. El arreglo creado se utiliza como parámetro de entrada al subVI, dentro del subVI el arreglo se descompone para que cada elemento sea convertido en un tipo de dato de texto para después ser concatenado en una sola línea de texto. La línea de texto concatenada es la salida del subVI, ésta línea se escribe dentro del archivo generado (fig. 5.17).

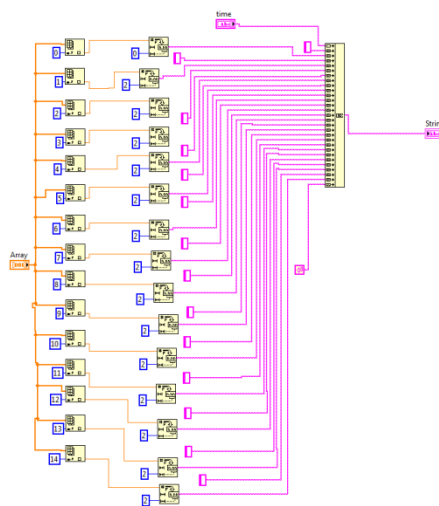


Fig. 5.17 SubVi de conversión de datos flotantes a datos de texto.

Las señales adquiridas por medio del sistema de adquisición de datos son representadas en el programa por medio de indicadores y gráficas que muestran de una manera sencilla la información (fig. 5.18). La información presentada en el instrumento virtual se actualiza cada segundo para tener un mayor control sobre lo que sucede en la prueba.

La información presentada en la ventana del programa es:

- 1) Gráfica de temperaturas Interiores con Indicadores.
En esta parte del instrumento virtual se muestran las temperaturas registradas por los termopares colocados en el interior de la esfera. La temperatura de los termopares es registrada en una gráfica en la que se muestra la diferencia de temperatura respecto al tiempo. En los indicadores se muestra la temperatura registrada por cada termopar.
- 2) Gráfica de temperaturas exteriores con indicadores.
En esta parte del software se muestran las temperaturas registradas por los termopares colocados en el exterior de la esfera. La temperatura de los termopares es registrada en una gráfica en la que se muestra la diferencia de temperatura respecto al tiempo, dentro de la gráfica se muestra la temperatura límite de trabajo de la esfera.
- 3) Gráfica de presión sensor Cole-Parmer e indicador.
En esta gráfica se muestra la variación de la señal del sensor Cole-Parmer respecto al tiempo. Los indicadores del sensor Cole-Parmer muestran la presión registrada por el instrumento en Torr y psi.
- 4) Indicador de sensor Pirani.
Este indicador muestra la presión registrada por el sensor Pirani en Torr.
- 5) Gráfica de radiación solar directa e indicador.
Esta gráfica muestra la variación de la radiación solar respecto al tiempo, es importante monitorear la radiación solar directa porque de su magnitud depende la radiación que recibirá la muestra con un porcentaje de apertura del atenuador. El indicador de la radiación solar muestra la cantidad de radiación directa en W/m^2 .
- 6) Indicador sensor gardon.
Este indicador muestra la potencia incidente en la muestra.

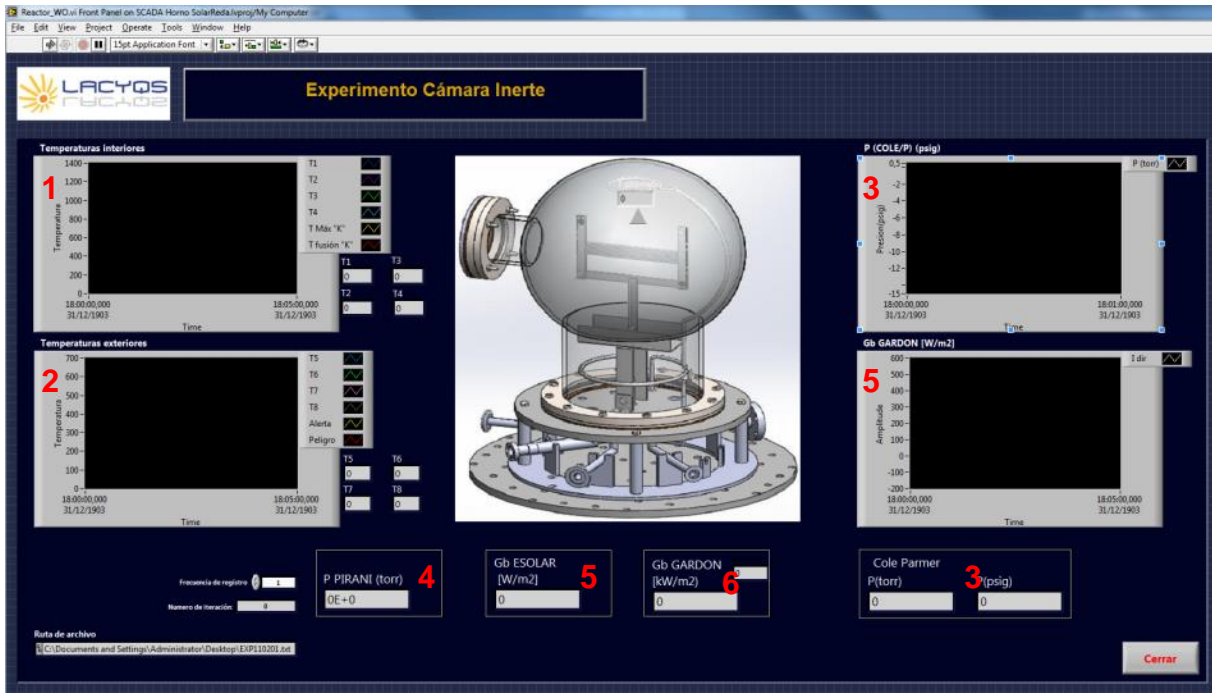


Fig. 5.18 Ventana del software de control de la Cámara Inerte.

5.7. Pruebas preliminares de vacío

Las primeras pruebas realizadas con la Cámara Inerte fueron realizar vacío para comprobar que no existieran fugas.

Estas pruebas se realizaron conectando a la Cámara el sensor Pirani a una brida KF 16 de la cámara para monitorear la presión y conectando la bomba de vacío a través de las válvulas de mariposa en una brida KF 25 de la cámara. Las demás bridas de la cámara fueron selladas con bridas ciegas y los pasa-tubbings por medio de racores swagelok (Fig. 5.19).

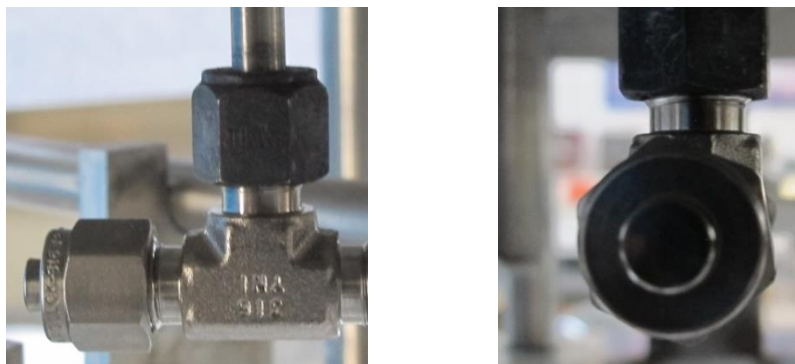


Fig. 5.19 Racores swagelok sellados.

Después de sellar correctamente todas las bridas y asegurar las bridas de la esfera se inició la prueba de vacío (Fig. 5.20). La prueba se realizó con una bomba Felisa 1400 con una capacidad de 25 L/min, capaz de realizar un vacío máximo de .003 torr. Durante la prueba se alcanzó un vacío de 8×10^{-3} torr en un tiempo de 30 minutos.

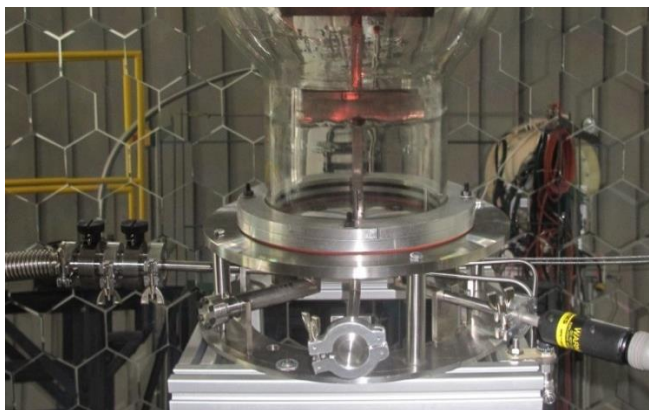


Fig. 5.20 Cámara Inerte preparada para una prueba de vacío.

Para comprobar que no hubiera fugas al conectar los tubbings de gases, el sensor Cole-Parmer y los termopares, se realizaron pruebas de vacío al conectar cada uno, para descartar fugas en las conexiones de los equipo.

5.8. Prueba preliminar de síntesis de óxidos de tungsteno

En esta prueba se buscó producir WO_3 , W_nO_{3n-2} ($WO_{2.9}$) y $W_{24}O_{68}$ ($WO_{2.83}$) a temperaturas menores a los 585 °C y presiones de aproximadamente de 0.4 atmosferas con una mezcla de Argón y Oxígeno.

Para la prueba se colocaron tres termopares en las muestras, el primer termopar fue colocado a 7.5 cm de la horquilla, el segundo a 3.5 cm de la horquilla y el tercero al lado de la horquilla (0 cm). Se colocó un cuarto termopar en la salida de los gases para conocer su temperatura al salir del sistema.

Para empezar la prueba se realizó vacío en la cámara hasta alcanzar una presión de 6×10^{-3} torr, para empezar a inyectar gases, primero se obtuvo una presión de -6.5 psig con un flujo constante de Ar, después se abrió el atenuador del HoSIER para conseguir una temperatura constante menor a 585 °C. Al contar con esta temperatura se inyectó O_2 a la cámara hasta obtener una presión de -2.5 psig.

En la tabla 5.3 se muestran las observaciones e información registrada durante el experimento:

Tabla 5.3 Registro de información de la prueba de síntesis de óxidos de tungsteno.

Hora	Observación
11:20	Inicio del experimento. $T_{\text{inicial}} 580\text{ }^{\circ}\text{C}$.
11:30	Se empieza a inyectar O_2 , la temperatura tuvo un decremento hasta $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se tuvo que abrir el atenuador para incrementar la temperatura a los 516°C .
11:55	Se reubico el spot porque estaba un poco abajo y cargado hacia el este.
12:30	Se cerró el atenuador para verificar la formación de los óxidos de tungsteno.
	El experimento tuvo una duración de 1 hrs.

Con el software de monitoreo y control se registraron los valores de las variables involucradas en el experimento.

Las lecturas registradas por los termopares muestran los cambios de temperatura durante en el experimento, al graficar estos datos (Fig. 5.21) se notan los cambios de temperatura por los eventos que ocurrieron en las observaciones.

La gráfica de la figura 5.21 muestra el incremento de temperatura registrado por T1 al reubicar el spot en el centro de la muestra, después de ubicar el spot se alcanzó la temperatura inicial. La gráfica también muestra el descenso de temperatura al inyectar los gases, este descenso es provocado por la reacción química. También se muestra el descenso súbito de temperatura al cerrar el atenuador, el descenso se debe a que el atenuador impide el paso de la radiación reflejada por el heliostato al concentrador.

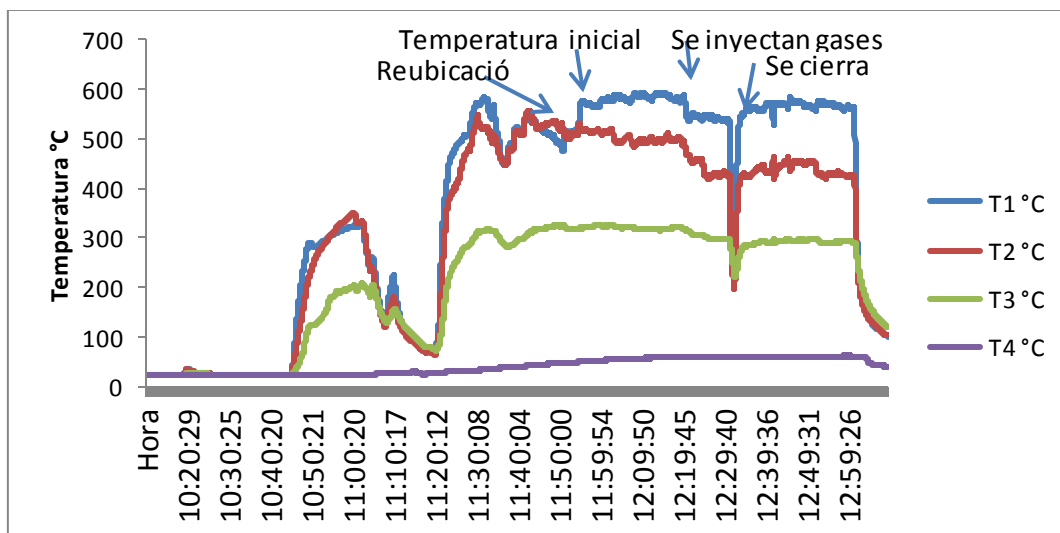


Fig. 5.21 Gráfica de registros de temperatura de la prueba de síntesis de óxidos de tungsteno.

Las variaciones en la temperatura están en función de la radiación solar directa, ya que esta radiación es la que refleja heliostato hacia el concentrador y de ésta depende la potencia que incide en la zona focal.

La variación se muestra en las figuras 5.22 y 5.23, la variación es mostrada en la zona del gráfico delimitada por rojo.

La gráfica 5.22 muestra las variaciones de temperatura en función de la radiación solar directa, durante el tiempo que se realizó la prueba, de 11:30 a.m. a 12:30 a.m.

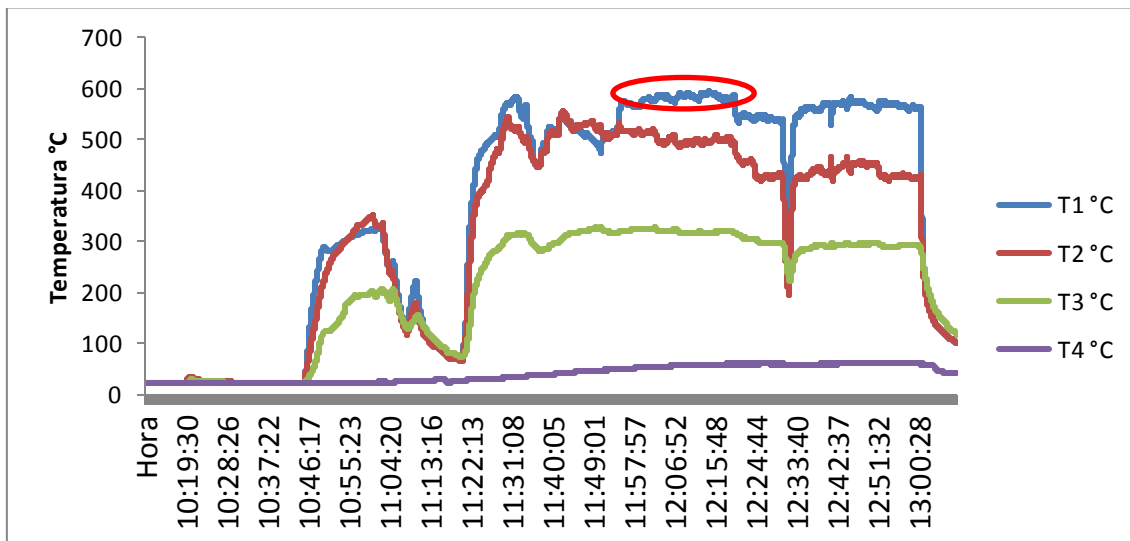


Fig. 5.22 Gráfica de registros de temperatura.

La gráfica 5.23 muestra las variaciones de la radiación solar directa, durante el tiempo que se realizó la prueba, de 11:30 a.m. a 12:30 a.m.

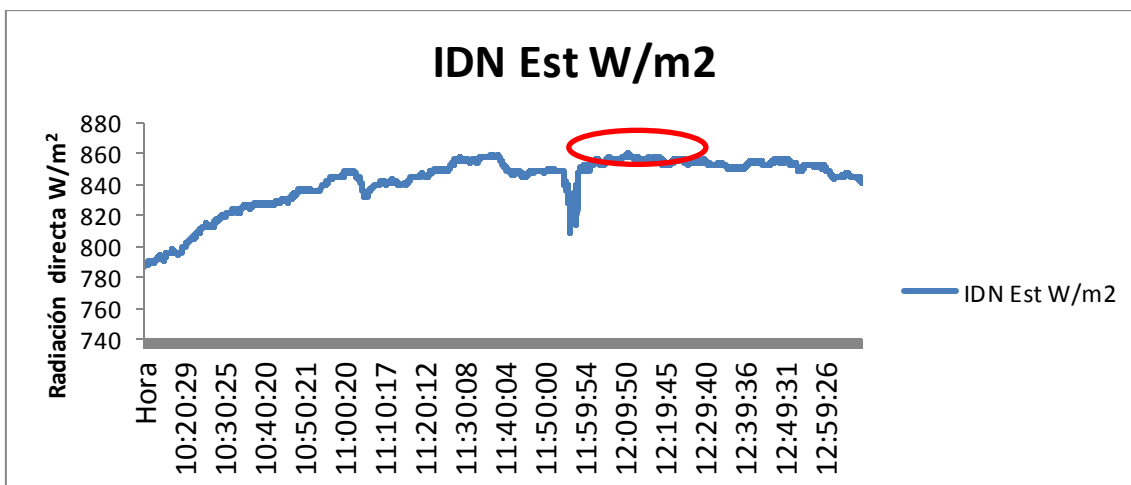


Fig. 5.23 Gráfica de registro de radiación directa.

Los datos registrados por los termopares en el exterior de la cámara muestran que la temperatura de la esfera no superó más de 100° C (figura 5.24), lo que muestra que se trabajó bajo la temperatura máxima de operación (500°C). La mayor temperatura registrada por los termopares exteriores fue la del termopar 8 (T8), éste termopar era el más cercano al centro de la esfera.

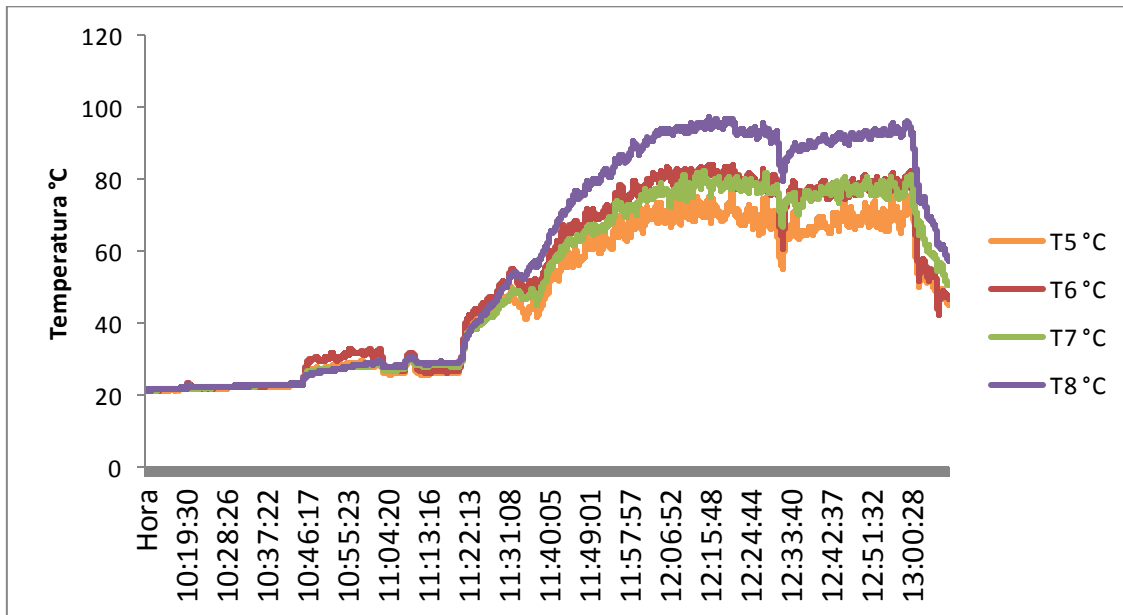


Fig. 5.24 Gráfica de temperaturas registradas por los termopares externos.

Al finalizar el experimento se desmontó la cámara para analizar las muestras. Las muestras presentaron la formación de una capa de óxidos de tungsteno. La figura 5.25 muestra la zona de las barras de tungsteno donde se formó el óxido de tungsteno después de la reacción.

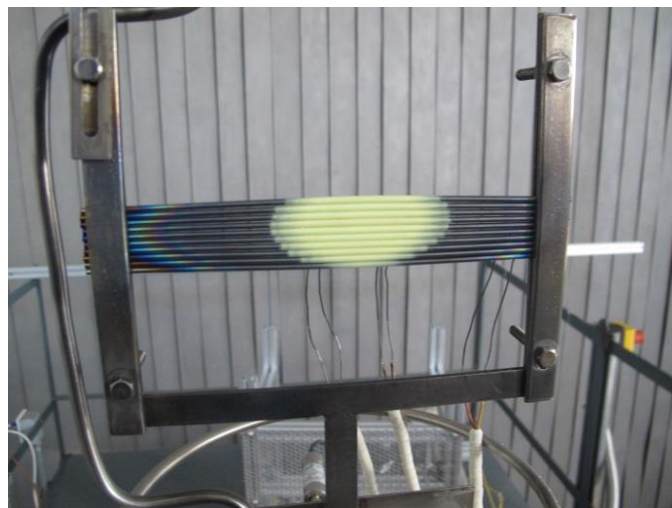


Fig. 5.25 Barras de tungsteno con óxidos.

Capítulo 6

Higiene y seguridad en la operación de la Cámara Inerte

6.1. Normas de seguridad acerca de la presión

La Cámara Inerte es un recipiente sujeto a presión, por eso se consultó la NORMA Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2011 de la Secretaria de Trabajo y Previsión Social.

La norma oficial mexicana NOM-020-STPS-2011, Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas - Funcionamiento - Condiciones de seguridad, tiene como objetivo establecer los requisitos de seguridad para el funcionamiento de los recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas en los centros de trabajo, a fin de prevenir riesgos a los trabajadores y daños en las instalaciones (STPS, 2011).

Según la definición de la NOM-020-STPS-2011 un recipiente sujeto a presión es:

El aparato construido para operar a una presión superior a la atmosférica o sometido a vacío. La presión puede ejercerse sobre la superficie interior, la exterior y/o los componentes del equipo. Dicha presión puede provenir de fuentes externas o mediante la aplicación de calor, desde una fuente directa, indirecta o cualquier combinación de estas.

La norma clasifica los recipientes sujetos a presión en tres diferentes categorías (ver tabla 6.1), según su capacidad y condiciones de operación. Dependiendo de la clasificación del recipiente, éste tendrá que cumplir con diferentes requisitos para su correcta operación.

Tabla 6.1 Clasificación de recipientes sujetos a presión.

Categoría	Fluido	Presión	Volumen
I	Agua, aire y/o fluido no peligroso	$P \leq 490.33 \text{ kPa}$	$V \leq 0.5 \text{ m}^3$
II	Agua, aire y/o fluido no peligroso	$P \leq 490.33 \text{ kPa}$	$V > 0.5 \text{ m}^3$
	Agua, aire y/o fluido no peligroso	$490.33 \text{ kPa} > P < 784.53 \text{ kPa}$	$V \leq 1 \text{ m}^3$
	Peligroso	$P \leq 686.47 \text{ kPa}$	$V \leq 1 \text{ m}^3$
III	Agua, aire y/o fluido no peligroso	$490.33 \text{ kPa} > P < 784.53 \text{ kPa}$	$V > 1 \text{ m}^3$
	Agua, aire y/o fluido no peligroso	$P > 784.53 \text{ kPa}$	Cualquier volumen
	Peligroso	$P \geq 784.53 \text{ kPa}$	$V > 1 \text{ m}^3$
	Peligroso	$P > 686.47 \text{ kPa}$	Cualquier volumen

Para definir la presión de operación de la cámara es necesario consultar la presión registrada en las pruebas preliminares. La presión de operación registrada en el sensor Cole-Parmer fue de -7.5 psig, equivalentes a -51.71 kPa, por lo tanto, después de realizar el cálculo para la presión de operación de la esfera, esta resulta ser de 49.61 kPa. Considerando que el volumen de la esfera es igual a $3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, se concluye que la Cámara Inerte es un recipiente sujeto a presión categoría I.

Por otra parte, para los equipos clasificados en la categoría I se deben cumplir los siguientes requisitos:

- Tener marcado el número de serie o identificación.
- Contar con un manómetro y, en su caso, con instrumentos de control.
- Mantener sus instrumentos de control en condiciones seguras de operación.
- Contar con un dispositivo de relevo de presión, y
- Disponer de espacio suficiente para su operación, revisión y en su caso la realización de maniobras de mantenimiento, de conformidad con el manual de fabricación o recomendaciones del instalador.

Según la Norma, la cámara debe de contar con un nombre genérico, un número de serie o único de identificación, su clasificación de acuerdo con la tabla 6.2, los fluidos manejados y una ficha técnica.

Tabla 6.2 Ficha técnica de la Cámara Inerte.

Fluidos manejados	Ar, O ₂
Presión de operación	49.61 kPa
Capacidad volumétrica	$3.84 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
Temperatura de diseño	500 °C
Temperaturas de operación	450° C

6.2. Medidas de seguridad acerca de la presión

Para proteger las instalaciones, el equipo y a los usuarios que operan el HoSIER, se diseñó una jaula para prevenir accidentes, en caso de que la esfera implosione o explote. La jaula fue diseñada con los perfiles modulares de aluminio para acoplarse fácilmente a la mesa de la Cámara Inerte. La jaula tiene un ancho de 498.00 mm x 365.00 mm de largo x 794.00 mm de alto, está cubierta por una malla de acero inoxidable, dejando descubierto únicamente el lado por el cual incide la radiación concentrada hacia el centro de la esfera.

6.3. Medidas de seguridad en el manejo de materiales

Las muestras usadas en las pruebas experimentales fueron electrodos de tungsteno, los cuales se eligieron por su alto punto de fusión y su disponibilidad comercial en la localidad. Sin embargo, existen comercialmente diferentes tipos de electrodos tungsteno que difieren en su composición.

Los electrodos de tungsteno son clasificados según la Norma ISO 6848 dependiendo su porcentaje de composición de tungsteno y su contenido de óxidos metálicos. Cada tipo de electrodo es fácilmente identificable por una banda de color según su composición (tabla 6.3).

Tabla 6.3 Tipos de electrodo de tungsteno.

Designación ISO 6848	Aditivos en forma de óxidos %	Tungsteno %	Color de identificación
WP		≥ 99.95	Verde
WT20	ThO ₂ : 1.70-2.20	≥ 97.30	Rojo
WL15	LaO ₂ : 1.30-1.70	≥ 97.80	Oro
WC20	CeO ₂ : 1.80-2.20	≥ 97.30	Naranja/Gris
WL10	La ₂ O ₃ : 0.80-1.20	≥ 98.30	Negro
WL20	ZrO ₂ : 0.15-0.50	≥ 97.30	Celeste
WZ3	LaO ₂ & CeO ₂ : 1.80-2.20	≥ 99.10	Marrón

Es importante destacar que se utilizaron electrodos de tungsteno puro durante los experimentos, ya que los electrodos pueden contener materiales peligrosos como el torio, que es un material radiactivo de origen natural, que en grandes concentraciones, puede ser nocivo para la salud.

6.3.1. Tungsteno

Para conocer las medidas que se deben de tomar al manejar tungsteno se consultó la hoja de datos de seguridad del tungsteno (MSDS, Material Safety Data Sheet).

El tungsteno es un elemento natural. Se encuentra en rocas y minerales, combinado con otras sustancias químicas, pero nunca se encuentra en forma del metal puro. El tungsteno elemental es un metal blanco a gris acero que puede ser usado en forma pura o mezclado con otros metales para formar aleaciones. Uno de los usos más comunes del tungsteno es productos como filamentos de bombillas, por su alto punto de fusión (tabla 6.4) (Midwest tungsten service, 2013).

Tabla 6.4 Propiedades físicas del tungsteno.

Tungsteno	
Temperatura de fusión	3410 °C
Temperatura de evaporación	5900 °C
Densidad específica	19.3
Solubilidad en agua	Insoluble

6.3.2. Información de seguridad acerca del tungsteno

6.3.2.1. Incendio y explosión

El polvo de tungsteno puede presentar un riesgo moderado de incendio si se acumula y expone a una fuente de ignición. Es recomendable cubrir estos residuos con un polvo inerte, como arena seca o piedra caliza, que evite el contacto con el oxígeno.

El fuego de clase D son los producidos o generados por metales combustibles. Es común que la fuente de ignición sea una corriente eléctrica. Para extinguir un incendio de clase D es necesario contar con protección respiratoria para polvos tóxicos y gases.

El polvo de tungsteno puede generar un incendio o explosión en condiciones favorables de tamaño de partícula, dispersión y una fuente de ignición de alta temperatura. Uno de los principales riesgos a la salud en los incendios es que el trióxido de tungsteno sublima a los 750° C y puede ser inhalado.

6.3.2.2. Riesgo a la salud

La exposición al tungsteno puede ocurrir por la inhalación, el contacto con la piel y ojos, de polvo o gases generados en procesos físicos o metalúrgicos.

Los efectos de la sobre exposición del polvo y gases del tungsteno puede causar irritación en la nariz y garganta. El contacto con la piel y los ojos puede causar irritación por la abrasión

del polvo. Sobre la ingestión de pequeñas cantidades de tungsteno no hay estudios reportados que muestren efectos adversos a la salud.

Los procedimientos de emergencia y primeros auxilios en los diferentes tipos de contacto son:

- a) Inhalación: si se presentan cualquier tipo de síntoma pulmonar, se debe retirar de la fuente y buscar atención médica. Se debe aplicar asistencia respiratoria si es necesario.
- b) Contacto cutáneo: si se presenta irritación se debe lavar el área afectada con jabón suave y agua abundante. Se debe prevenir una segunda exposición por contacto. Si la irritación persiste, se recomienda buscar atención médica.
- c) Contacto ocular: si se presenta irritación, lave los ojos con una gran cantidad de agua por 15 minutos. Si persiste la irritación se recomienda buscar atención médica.
- d) Ingestión: si se ingiere una cantidad considerable de polvo y si la persona se encuentra consciente, entonces debe ingerir una gran cantidad de agua y autoinducir el vómito, así como buscar atención médica.

6.3.2.3. Equipo de protección personal

Para evitar cualquier tipo de contacto se recomienda el uso de guantes y lentes de seguridad. Para evitar la inhalación en ambientes donde existan grandes cantidades de tungsteno en el aire, se recomienda el uso de un respirador que cumpla con los requerimientos de la Norma 29 CFR 1910.134 de la OSHA (Occupational Safety & Health Administration).

6.3.3. Trióxido de tungsteno

El trióxido de tungsteno es el producto más común de la reacción del tungsteno con oxígeno. Generalmente, los minerales de tungsteno son tratados con álcalis para producir WO_3 (Tabla 6.5). En las pruebas que se realizaron en el HoSIER se produjo trióxido de tungsteno.

Tabla 6.5 Propiedades físicas del trióxido de tungsteno (Sigma-Aldrich, 2013).

Fórmula	WO_3
Densidad	7.16 g/cm ³
Punto de fusión	1473 °C
Punto de ebullición	1837 °C
Masa molar	231.48 g/mol

Para manejar el trióxido de tungsteno se deben seguir las mismas medidas de seguridad que en el manejo de tungsteno, ya que presenta los mismos riesgos para la salud.

Capítulo 7

Conclusiones

En esta tesis se ha descrito el trabajo realizado en el IER-UNAM, referente al diseño y construcción de una Cámara Inerte para el Horno Solar (HoSIER) del Laboratorio Nacional de Concentración y Química Solar. A continuación se detallan los logros alcanzados en el desarrollo del trabajo:

Se diseñó la Cámara Inerte de acuerdo a los requerimientos necesarios para la realización de pruebas experimentales en el HoSIER.

Se construyeron los componentes de la Cámara Inerte de acuerdo a la ingeniería de diseño. Para asegurar que cumplieran con las especificaciones de diseño,

Se ensamblaron los componentes de la Cámara Inerte de acuerdo con los requerimientos necesarios para su ensamblaje.

Se instrumentó la Cámara Inerte con los elementos periféricos y con los instrumentos de medición necesarios para realizar los experimentos con radiación solar concentrada (uniones y conexiones, medición de temperatura y presión, inyección de gases, etc).

Se logró evaluar y verificar el funcionamiento adecuado de cada componente, así como de la Cámara Inerte ensamblada en su totalidad.

Se colaboró en el desarrollo de un software de adquisición de datos. De esta manera se puede obtener información de los experimentos y controlar las condiciones de trabajo dentro de la Cámara Inerte.

Se realizaron pruebas preliminares, para comprobar que los sellos de la cámara pudieran sellarla y evitar fugas que provocaran el intercambio de materia con el exterior. En estas pruebas la cámara mostró un buen desempeño y cumplió con las expectativas de diseño. En las pruebas preliminares realizadas en el HoSIER, se operó la cámara bajo una presión de vacío de .003 torr y con temperaturas en la zona focal de más de 1100°C. Durante las

pruebas no se presentaron cambios significativos en la presión, por lo tanto podemos concluir que estas condiciones de trabajo no afectaron el funcionamiento de la Cámara Inerte.

Con la Cámara Inerte se pueden realizar pruebas con una atmosfera controlada, en la cual se puede trabajar con las condiciones deseadas de temperatura, presión y diferentes concentraciones de gases.

Trabajos Futuros

Como trabajos futuros a esta tesis se propone lo siguiente:

Se propone el diseño y automatización de un pistón para la boquilla lateral de la esfera de la Cámara Inerte. Con este sistema se podría regular la exposición de la muestra gradualmente en la zona focal del concentrador.

Un estudio de mecánica de fluidos y transferencia de calor del flujo de gas dentro de la cámara. Para conocer el comportamiento de los gases cuando se inyectan dentro de la cámara, su interacción con la muestra y los cambios en su comportamiento con el aumento de temperatura.

Un estudio detallado para determinar los niveles de concentración de gases a partir del caudal o el aumento de la presión, considerando el cambio de densidad por los cambios en la temperatura así como el factor de compresibilidad.

Un estudio para la medición de altas temperaturas dentro de la cámara por medio de pirómetros o cámaras termográficas.

Bibliografía

1. Cunningham, R. (Agosto, 2003). La energía, historia de sus fuentes y transformación. *Petrotecnia*, Año XLIII N° 4, 52-60.
2. Chambon, et al., (2010). Thermal Dissociation of Compressed ZnO and SnO₂ Powders in a Moving-Front Solar Thermochemical Reactor. *Processes, Materials and Solar Energy Laboratory (CNRS-PROMES)*, 66120 Font-Romeu, France.
3. Cole-Parmer, (2013). Transmisores y transductores de presión. [Fecha de consulta 11/02/14]. Disponible en: <http://www.coleparmer.com/buy/product/5681-14-7-100-psi-cole-parmer-316-stainless-steel-compound-transmitter-4-20-ma-output.html>
4. Flamant, G., Balat-Pichelin, M. (2010). *Encyclopedia of Life Support Systems: Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems – Vol. 1 – Elaboration and Testing of Materials Using Concentrated Solar Energy*.
5. Licurgo, J. (2012). Diseño, construcción y puesta en operación de una pantalla lambertiana para el horno solar de alto flujo radiativo. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Morelos, Cuernavaca.
6. Midwest tungsten service, (2013). Tungsten Material Safety Data Sheet. [Fecha de consulta 11/02/14]. Disponible en : <http://www.clean.cise.columbia.edu/msds/tungsten.pdf>
7. MKS, (2013). Presión y medición de vacío. [Fecha de consulta 11/02/14]. Disponible en: <http://www.mksinst.com/product/Product.aspx?ProductID=452>
8. Montiel, M. (2013). Transferencia de calor en un receptor de energía solar concentrada del tipo de cavidad cúbica abierta. (Tesis doctoral). Instituto de Energías Renovables, Universidad Autónoma de México, Morelos, Temixco.
9. NI, (2013). Cómo realizar una medición con termopares. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/7108/es/>

10. OECD/IEA, (2012). International Energy Agency: Key World Energy Statistics 2012.
11. Palumbo R. et al, (2003). Reflections on the design of solar thermal chemical reactors: thoughts in transformation. *Energy*, Volume 29, Issues 5–6, April–May 2004, Pages 727-744.
12. Ragnar, Ó. (2013). A Clean Energy Economy: Lessons from Iceland. Meeting of OECD Ambassadors. OECD, Paris.
13. REN21, (2013). Renewables 2013: Global status report.
14. Secretaría de Energía, (2012). Balance Nacional de Energía 2011.
15. Secretaría de Energía, (2013). Estrategia Nacional de Energía 2013-2027.
16. Serwey, A., Jewett, J. (2008). Física para ciencias e ingeniería. CENGAGE Learning, séptima edición.
17. Sigma-Aldrich, (2013). Hoja técnica de seguridad del material: Trióxido de tungsteno. [Fecha de consulta 11/02/14]. Disponible en : <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=MX&language=es&productNumber=204781&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=http%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Faldrich%2F204781%3Flang%3Des>
18. Steinfeld, A., Palumbo, R. (2003). Solar thermochemical process technology. *ENCYCLOPEDIA OF PHYSICAL SCIENCE & TECHNOLOGY* R. A. Meyers Ed., Academic Press, Vol. 15, pp. 237-256, 2001.
19. Steinfeld, A., Meier A. (2004). Solar Fuels and Materials. *Encyclopedia of Energy – Energy sciences, Engineering and Technology Resources*.
20. Secretaría del Trabajo y Previsión Social, (2011). NOM-020-STPS-2011: Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas - Funcionamiento - Condiciones de Seguridad.
21. Swagelok, (2013a). Válvulas antirretorno. [Fecha de consulta 11/02/14]. Disponible en: <http://www.swagelok.com.mx/downloads/WebCatalogs/ES/MS-01-176.pdf>
22. Swagelok, (2013b). Válvulas de palanca. [Fecha de consulta 11/02/14]. Disponible en: <https://www.swagelok.com.mx/downloads/WebCatalogs/ES/MS-01-54.pdf>
23. Swagelok (2013c). Válvulas de regulación. [Fecha de consulta 11/02/14]. Disponible en: <https://www.swagelok.com.mx/downloads/WebCatalogs/ES/MS-01-142.pdf>

24. TC, (2008). Guía de termometría para termopares.
25. Villalobos, J. (2000). Diseño y construcción de un sistema de ultravacio para tratamientos térmicos y mediciones de conductividad eléctrica en materiales semiconductores. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Morelos, Cuernavaca.